

Compendio de revisiones en ciencias veterinarias, agroforestales, pesqueras y áreas afines



Abanico Académico

**Sergio Martínez González
Fidel Ávila Ramos
Carlos Omar De la Cruz Moreno**
Editores



Abanico Académico

Compendio de revisiones en ciencias veterinarias, agroforestales, pesqueras y áreas afines.

Sergio Martínez González
Fidel Ávila Ramos
Carlos Omar De la Cruz Moreno
Editores



Abanico Académico

Primera Edición 2025.

ABANICO ACADÉMICO

La presentación y disposición en conjunto de la obra:

Compendio de revisiones en ciencias veterinarias, agroforestales, pesqueras y áreas afines en su primera edición, es publicada en versión digital con 642 páginas, después del proceso de arbitraje y dictaminación por pares, nacional e internacional. De acuerdo a la Ciencia Abierta puede ser reproducida o transmitida, mediante cualquier sistema o método, electrónico o mecánico, con fines académicos y sin fines de lucro.

El contenido de cada capítulo es responsabilidad de los autores y Abanico Académico se deslinda de toda responsabilidad sobre la información ahí vertida.

Sergio Martínez González
Fidel Ávila Ramos
Carlos Omar De la Cruz Moreno
Editores

Todos los derechos reservados a:
Abanico Académico.
abanicoacademico.mx
RFC MAGS690517979
Calle Valle Bravo 16, Colonia Valle Dorado. Tepic, Nayarit, México.
CP. 63000.

ABANICO ACADÉMICO

Tepic, Nayarit, México, 2025.

Primera edición

Versión Digital
ISBN: 978-607-26738-2-3
DOI: 10.21929/abanico/2025.2
URL: <https://doi.org/10.21929/abanico/2025.2>



EDITORES

Sergio Martínez González



Doctor por la Universidad de Colima. México. Profesor Investigador de la Unidad Académica de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad Autónoma de Nayarit. México. Cuenta con Reconocimiento al Perfil PRODEP-SEP desde 2005 y del Sistema Nacional de Investigadores-CONACYT de México de 2018 al 2025. Estancia Posdoctoral en la Universidad Arkansas USA del 2019 al 2020. Editor en Jefe de la revista Abanico Veterinario. Factor Total del Investigador-AI 1.0867

Fidel Ávila Ramos



Doctor por el Colegio de Postgraduados Campus Montecillos. Profesor de Tiempo Completo en el Programa de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad de Guanajuato, México. Reconocimiento Perfil PRODEP-SEP desde el año 2016 y del Sistema Nacional de Investigadores-CONACYT de México desde 2021 al 2025. Editor Asociado Abanico Veterinario. Factor Total del Investigador-AI 0.5679

Carlos Omar De la Cruz Moreno



Licenciado en medicina veterinaria y zootecnia por la Universidad Autónoma de Nayarit (UAN), Diplomado y Doctorado en ciencias veterinarias por la Universidad Complutense de Madrid (UCM). Profesor universitario de tiempo completo (UAN) con perfil deseable (Prodep). Ponente de eventos nacionales e internacionales, autor de artículos científicos y de 7 libros. Certificado por el Concervet en el área de medicina en perros y gatos.



ABANICO ACADEMICO. RFC: MAGS690517979. Teléfono Móvil (52-311) 1221626.
<https://abanicoacademico.mx>
Valle Bravo 16, Col. Valle Dorado, Tepic, Nayarit, México. CP. 63180.
E-mail: abanicoacademico@gmail.com

Tepic, Nayarit, México a 10 de diciembre de 2025.

El que suscribe **Sergio Martínez González**, Director General de **ABANICO ACADEMICO**, me permito informar que el libro **Compendio de revisiones en ciencias veterinarias, agroforestales, pesqueras y áreas afines**, con 642 páginas en 32 capítulos, ISBN 978-607-26738-2-3 y DOI <https://doi.org/10.21929/abanico/2025.2>, fue publicado digital y en línea por la editorial Abanico Académico en su primera edición en Tepic, Nayarit, México en el 2025, cuyos editores y autores son Sergio Martínez González, Fidel Avila Ramos y Carlos Omar de la Cruz Moreno, además participaron otros autores reconocidos en cada capítulo.

El contenido del libro fue revisado por el Comité de Arbitraje Nacional e Internacional formado por los investigadores siguientes: Adriana del Carmen Gutiérrez Castillo, Benjamín Valladares Carranza, Camelia Alejandra Herrera Corredor, Citlaly Natali De la Torre Sosa, Dreyli Maygualida Hidalgo Ramos, Edgar Alfredo Ramírez Acevedo, Emir Lenin Serafín Higuera, Emmanuel Ortiz Espinoza, Erika Gabriela Palomares Reséndiz, Erika Lorena López Rodríguez, Fidel Avila Ramos, Francisco Guadalupe Echavarría Chairez, Gerardo Uriel Bautista Trujillo, Guadalupe Arjona Jiménez, Guillermina Barrientos Rivera, Ilda Graciela Fernández García, José Arias Rico, José Luis Zárate Castrejón, Juan Mendoza Churape, Juan Apolinar Aguilar Castillo, Luz Adriana Arias Hernández, Mario Blanco Camarillo, Mario Alberto Macías Flores, Mauricio Alberto Realpe Quintero, Nereida Violeta Vega Cabrera, Oscar Guadalupe Barrón Bravo, Osmar Antonio Jaramillo Morales, Ramiro González Ávalos, Rubén Cornelio Montes Pérez, Rudy Solís Silván, Talina Olivia Martínez Martínez, Ulises Mercado Burciaga, Yazmin Alcalá Canto.

Sin otro particular, agradezco de antemano su atención al presente.

Dr. Sergio Martínez González

ABANICO ACADEMICO

E-mail: abanicoacademico@gmail.com



INNOVACION EDUCATIVA SIN AULAS - ABANICO VETERINARIO - ABANICO AGROFORESTAL - ABANICO BOLETIN TECNICO- ABANICO BOLETIN MEXICANO - ABANICO BUSCADOR- ABANICO SALUD ANIMAL - CONGRESO INTERNACIONAL ABANICO VETERINARIO, AGROFORESTAL, AMBIENTAL, PESQUERO, ACUICOLA Y DEL MAR - ABACADEMIC - EDITORIAL- REDES DE INVESTIGACION - REPORTE ANTIPLAGIO - CURSOS DE DISEÑO EXPERIMENTAL, BIOESTADISTICA Y REDACCION - TRADUCCION - ABANICO INDEX - ABANICO CANAL - DOI - CONVOCATORIAS.



REVISORES

Con profunda gratitud reconocemos su valiosa participación como revisores de este libro. Su mirada crítica, compromiso académico y generosidad intelectual han enriquecido significativamente esta obra. Les damos las gracias por ser parte esencial de este proceso.

Adriana del Carmen Benjamín	Gutiérrez	Castillo
Camelia Alejandra	Valladares	Carranza
Citlaly Natali	Herrera	Corredor
Dreyli Maygualida	De la Torre	Sosa
Edgar Alfredo	Hidalgo	Ramos
Emir Lenin	Ramírez	Acevedo
Emmanuel	Serafín	Higuera
Erika Gabriela	Ortiz	Espinoza
Erika Lorena	Palomares	Reséndiz
Fidel	López	Rodríguez
Francisco Guadalupe	Ávila	Ramos
Gerardo Uriel	Echavarría	Chairez
Guadalupe	Bautista	Trujillo
Guillermina	Arjona	Jiménez
Ilda Graciela	Barrientos	Rivera
José	Fernández	García
José Luis	Arias	Rico
Juan	Zárate	Castrejón
Juan Apolinar	Mendoza	Churape
Luz Adriana	Aguilar	Castillo
Mario	Arias	Hernández
Mario Alberto	Blanco	Camarillo
Mauricio Alberto	Macias	Flores
Nereida Violeta	Realpe	Quintero
Oscar Guadalupe	Vega	Cabrera
Osmar Antonio	Barrón	Bravo
Ramiro	Jaramillo	Morales
Rubén Cornelio	González	Ávalos
Rudy	Montes	Pérez
Talina Olivia	Solís	Silván
Ulises	Martínez	Martínez
Yazmin	Mercado	Burciaga
	Alcalá	Canto



PRÓLOGO

La presente obra colectiva reúne una diversidad de investigaciones aplicadas que reflejan el dinamismo, la pertinencia y el compromiso científico de las ciencias agropecuarias y veterinarias de México reflejadas a nivel regional e internacional. En un contexto marcado por desafíos ambientales, sanitarios y productivos, los capítulos aquí compilados ofrecen soluciones innovadoras, diagnósticos precisos y propuestas de mejora continua que responden a las necesidades de los territorios rurales, los sistemas alimentarios y la salud integral.

Desde el mejoramiento genético de cultivos estratégicos como el frijol y la soya, hasta el uso de microorganismos benéficos como *Bacillus* y tecnologías de producción adaptadas al Altiplano Semiárido, se evidencia el esfuerzo por fortalecer la seguridad alimentaria y la resiliencia agroecológica. México, con más de 6.9 millones de hectáreas cultivadas y una producción anual de más de 27 millones de toneladas de maíz, requiere enfoques sostenibles que integren innovación, calidad y certificación de semillas, como se aborda en varios capítulos.

En el ámbito pecuario, se documentan prácticas tecnológicas en ranchos ganaderos, estrategias nutricionales para cabritos y pollos de engorda, así como obtener los parámetros reproductivos en sistemas familiares. Estos estudios no solo aportan al rendimiento productivo, sino que visibilizan el papel de las unidades de producción rural en la economía nacional, donde el sector pecuario representa una porción sustancial del PIB agroalimentario.

Para lograr los objetivos mencionados, México debe incluir de manera prioritaria especies forrajeras adaptadas a sus condiciones agroecológicas, como *Leucaena leucocephala* y *Leucaena esculenta*, cuyo potencial nutricional y digestibilidad han sido ampliamente documentados en sistemas de producción de rumiantes. Estas leguminosas arbustivas no solo aportan proteína vegetal de alta calidad, sino que también contribuyen a la mejora de la fertilidad del suelo mediante la fijación biológica de nitrógeno, lo que las convierte en aliadas clave para la sostenibilidad agropecuaria en zonas áridas y semiáridas.



La sanidad animal y la salud pública emergen como ejes transversales, con investigaciones sobre patógenos zoonóticos como *Escherichia coli* O157:H7, *Corynebacterium pseudotuberculosis*, *Leptospira* spp. y parásitos en mascotas. El abordaje de la resistencia antimicrobiana, la metagenómica y las vacunas de subunidades refleja el rigor científico y la relevancia global de estos temas, en un momento donde la OMS advierte que para 2050 las infecciones resistentes podrían causar más de 10 millones de muertes anuales.

La medicina alternativa y los fitofármacos también tienen cabida en esta obra, con estudios que exploran el potencial terapéutico de especies emblemáticas como el árnica (*Heterotheca inuloides*), la miel de mezquite (*Prosopis glandulosa*), el propóleo y el veneno de abeja. Estos recursos naturales, ampliamente distribuidos en ecosistemas mexicanos, han sido objeto de investigaciones que revelan propiedades analgésicas, antiinflamatorias, antimicrobianas y cicatrizantes, con aplicaciones tanto en medicina veterinaria como en salud humana.

El enfoque neurofarmacológico de algunos de estos compuestos como la miel de mezquite en procesos de regeneración tisular abre nuevas posibilidades para el tratamiento de heridas, dolor crónico y afecciones dérmicas en animales de producción y compañía. Asimismo, el propóleo y el veneno de abeja han demostrado efectos inmunomoduladores y antibacterianos que podrían complementar terapias convencionales, especialmente en contextos rurales donde el acceso a medicamentos sintéticos es limitado.

Estas investigaciones no solo valorizan el conocimiento tradicional y el uso ancestral de plantas y productos apícolas, sino que también promueven la conservación de la biodiversidad y el desarrollo de bio productos con valor agregado. En México, se estima que más de 3,000 especies vegetales tienen algún uso medicinal documentado, y la apicultura representa una actividad económica relevante en al menos 20 estados del país, con una producción anual superior a las 60 mil toneladas de miel.

Los enfoques complementarios que integran fitofármacos y medicina alternativa enriquecen la visión integral de la salud animal y humana, alineándose con el paradigma “Una sola salud” (One Health), que reconoce la interdependencia entre el bienestar de los



animales, las personas y el ambiente. Además, fomentan la investigación interdisciplinaria, la innovación farmacológica y el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, contribuyendo a la diversificación de tratamientos y al fortalecimiento de la medicina preventiva en zonas rurales y periurbanas.

Finalmente, se incluyen reflexiones sobre la educación veterinaria, las progresiones de aprendizaje y la evaluación por competencias, que invitan a repensar la formación profesional desde la pertinencia curricular y la transformación pedagógica. En un mundo donde la interdisciplina y la vinculación social son clave, estos aportes consolidan una visión crítica y propositiva.

Esta obra es testimonio del talento académico, la vocación territorial y el compromiso ético de quienes investigan, enseñan y transforman desde las ciencias agrícolas, pecuarias y del mar. Su lectura permitirá al lector comprender la complejidad de los sistemas agropecuarios y veterinarios, y valorar las soluciones que emergen desde la ciencia aplicada con impacto local y resonancia global.

Fidel Avila Ramos



Índice

Sección 1: Medicina veterinaria.

Capítulo 1.	25
Efectos terapéuticos de la miel de abeja en la cicatrización de heridas: una revisión desde la perspectiva neurofarmacológica.	
Ramona Guadalupe Hernández-Medina.	
Fidel Avila-Ramos.	
Ma. Eugenia Barreto-Arias.	
Montserrat Fernández-Moya.	
Elena Franco-Robles.	
Osmar Antonio Jaramillo-Morales.	
Capítulo 2.	39
Fitofármacos con efecto analgésico en medicina veterinaria.	
Osmar Antonio Jaramillo-Morales.	
Luis Manuel Orozco Castellanos.	
Nereida Violeta Vega-Cabrera.	
Fidel Avila-Ramos.	
Josué Vidal Espinosa-Juárez.	
Gerardo Ruvalcaba-Palacios.	
Capítulo 3.	51
Zoonosis parasitarias de perros y gatos: el vínculo silencioso entre mascotas y humanos.	
Socorro M. Salgado-Moreno.	
Carlos A. Carmona-Gasca.	
Sergio Martínez-González.	
Ruth B. Vironchi-Lujan.	
Mario Alberto Macías-Flores.	
Capítulo 4.	69
Leptospirosis, avances de la enfermedad y del agente causal.	
Luz Olivia Castillo Sánchez.	
Alejandro de la Peña Moctezuma.	
Gerardo Uriel Bautista Trujillo.	
Carlos Enrique Ibarra Martínez.	
Sergio Martínez González.	
Bladimir Peña Parra.	
Carlos Alfredo Carmona Gasca.	
	85



Capítulo 5.

Algunas plantas de importancia en la clínica veterinaria: generalidades y protocolo terapéutico.

Carlos Omar De la Cruz Moreno.
Juan José Fernando Borrayo González.
Sergio Martínez González.
Fidel Avila Ramos.
Carlos Alfredo Carmona Gasca.
Juan Antonio Hernández Ballesteros.

Capítulo 6.

129

Complejo respiratorio bovino: un enfoque desde los virus involucrados.

Edith Rojas-Anaya.
Sergio Iván Román-Ponce.
Francisco Castillo-Rangel.
Israel Daniel Ricardo González.

Capítulo 7.

149

Evaluación de la respuesta inmune de la vacuna de subunidades PLD y CP40 frente a *Corynebacterium pseudotuberculosis* biovar *ovis*.

Roberto Montes-de-Oca-Jiménez.
María Carla Rodríguez Domínguez.
Martha Elba Ruiz-Riva-Palacio.
Pilar Eliana Rivadeneira-Barreiro.
Pablo Cleomenes Zambrano-Rodríguez.
Fátima Ingrid López Vivas.

Capítulo 8.

163

Análisis de la metagenómica y resistencia antimicrobiana de *Corynebacterium pseudotuberculosis*.

Dan Israel Zavala-Vargas.
Roberto Montes-de-Oca-Jiménez.
Martha Elba Ruiz-Riva-Palacio.

Capítulo 9.

179

Análisis de los mecanismos de resistencia antimicrobiana en *Corynebacterium pseudotuberculosis*.

Dan Israel Zavala-Vargas.
Roberto Montes-de-Oca-Jiménez.
Martha Elba Ruiz-Riva-Palacio.
Pilar Eliana Rivadeneiro-Barreiro.
Pablo Cleomenes Zambrano-Rodríguez.
Pedro Sánchez Aparicio.



Capítulo 10. 195

Identificación de *Escherichia coli* O157:H7 productora de toxina Shiga por PCR en rumiantes.

Mónica Silva-Vega.
Lucía Delgadillo-Ruiz.
Perla Ivonne Gallegos-Flores.
Carlos Meza-López.
Benjamín Valladares-Carranza.
Rómulo Bañuelos-Valenzuela.

Sección 2: Zootecnia.

Capítulo 11. 215

La fibra dietética sobre la salud intestinal en el pollo de engorda: función digestiva y aplicaciones en nutrición aviar.

Mario Alberto Macías-Flores.
María Guadalupe Herrera-Hernández.
Osmar Antonio Jaramillo-Morales.
Carlos Omar De la Cruz-Moreno.
Carlos Alfredo Carmona-Gasca.
Sergio Martínez González.
Fidel Avila-Ramos.

Capítulo 12. 239

Manejo de la garrapata *Rhipicephalus microplus* en las unidades de producción de bovinos.

Oscar Guadalupe Barrón-Bravo.
César Andrés Ángel-Sahagún.
Ricardo Avilés-Ruiz.
Pedro Mendoza-de Gives.
Juan Samuel Alcalá-Rico.
Maya-Cruz Nely Amairani.

Capítulo 13. 257

Prácticas tecnológicas en ranchos ganaderos en el norte de México.

Sergio Iván Román-Ponce.
José María Carrera-Chávez.
Francisco Castillo-Rangel.
Edith Rojas-Anaya.

Capítulo 14. 281

Conceptos básicos sobre el calostro bovino.

Karla Rodríguez-Hernández.



Capítulo 15. 297

Parámetros reproductivos en bovinos del sistema familiar-traspatio.

Ricardo Avilés-Ruiz.
Oscar Guadalupe Barrón-Bravo.
Rubén Darío Garza-Cedillo.
Miguel Ruiz-Albarrán.
Abner Josué Gutiérrez-Chávez.
Juan Samuel Guadalupe Jesús Alcalá-Rico.

Capítulo 16. 315

El uso de suplementos alimenticios modifica la producción de cabritos y la composición de la leche en cabras bajo sistema de pastoreo.

Ricardo Avilés-Ruiz.
Mauricio Velázquez-Martínez.
Juan Samuel Guadalupe Jesús Alcalá Rico.
Oscar Guadalupe Barrón-Bravo.
Jorge Maldonado-Jaquez.
Leonardo Iván Vélez-Monroy.

Capítulo 17. 333

Composición bromatológica y digestibilidad *in vitro* de vainas de *Leucaena leucocephala* y *esculenta* como alimento potencial para rumiantes.

Carlos Meza-López.
Lucía Delgadillo-Ruiz.
Francisco G. Echavarría-Chairez.
Rómulo Bañuelos-Valenzuela.

Sección 3: Agricultura.

Capítulo 18. 351

Desarrollo de nuevas variedades de frijol y tecnologías de producción para el altiplano semiárido de México.

Odilón Gayosso-Barragán.
Griselda Chávez-Aguilar.
Jorge Alberto Acosta-Gallegos.
Juan Samuel Guadalupe Jesús Alcalá-Rico.
Deli Nazmín Tirado-González.
Ulises Aranda-Lara.



Capítulo 19.	369
Mejora del rendimiento de cultivos agrícolas utilizando acolchados.	
Eladio Delgadillo-Ruiz.	
Luz Adriana Arias-Hernández.	
Rómulo Bañuelos-Valenzuela.	
Lucia Delgadillo-Ruiz.	
Arturo Berumen-Cervantes.	
María Maldonado-Santoyo.	
Capítulo 20.	387
Uso potencial de <i>acacia</i> (huizache), en fitorremediación de suelos contaminados de zonas áridas y semiáridas.	
Citlalli Selene Ruíz-García.	
Josefina Huerta-García.	
Lucia Delgadillo-Ruiz.	
Cruz Daniel Mandujano-García.	
Felipe de Jesús Escalona-Alcázar.	
Perla Ivonne Gallegos-Flores.	
Capítulo 21.	403
Cruzas dialélicas para el mejoramiento genético de caracteres fisiológicos de semilla de soya.	
Juan Samuel Guadalupe Jesús Alcalá-Rico.	
Neymar Camposeco-Montejo.	
Ricardo Avilés-Ruiz.	
Odilón Gayosso-Barragan.	
José Ángel Marroquín-Morales.	
Oscar Guadalupe Barrón-Bravo.	
Capítulo 22.	427
El género <i>Bacillus</i> en la agricultura: diversidad de mecanismos para el crecimiento y protección de las plantas.	
Esmeralda Plascencia-Ulloa.	
Lily X. Zelaya-Molina.	
Ismael F. Chávez-Díaz.	
Edgardo Bautista-Ramírez.	
Zoe Reséndiz-Venado.	
Nelly E. Cortés-Martínez.	
Capítulo 23.	447
Fibras de origen natural.	
Dolores Vargas-Álvarez.	
Jesús Tadeo Hernández-Moreno.	
Hugo Mauricio Montes de Oca.	



Capítulo 24. 463

Normatividad, calidad y certificación de la semilla de maíz en México.

Adriana Natividad Avendaño-López.

Martín Quintana-Camargo.

María Leonor Román Miranda.

Gilberto Rodríguez-Pérez.

Sección 4: Seguridad alimentaria.

Capítulo 25. 479

Patógenos responsables de infecciones asociadas al consumo de ceviche de pescado.

Fidel Avila-Ramos.

Mauricio Arredondo-Castro.

Juan José Fernando Borrayo-González.

Carlos Omar De la Cruz-Moreno.

Socorro Marisa Salgado-Moreno.

Ranferi Gutiérrez-Leyva.

Carlos Alfredo Carmona-Gasca.

Sección 5: Medicina alternativa.

Capítulo 26. 495

Plantas utilizadas en medicina tradicional mexicana: *Heterotheca inuloides* Cass (Árnica mexicana).

Fátima Jaqueline Ramos-Parga.

Perla Ivonne Gallegos-Flores.

Edgar León Esparza-Ibarra.

Emmanuel De La O-Cuevas.

Lucía Delgadillo-Ruíz.

Josefina Huerta-García.

Capítulo 27. 517

Características del propóleo y usos en medicina alternativa.

Cesar Ibarra-Gudiño.

Sergio Martínez-González.

Ranferi Gutiérrez-Leyva.

Fidel Ávila-Ramos.

Ulises Mercado-Burciaga.

Edgar Alfredo Ramírez-Acevedo.

Carlos Alfredo Carmona-Gasca.



Capítulo 28.

533

Revisión del uso del veneno de abeja en la salud humana.

Cesar Ibarra Gudiño.
Wilbert Alfredo Flores Del Real.
Rosa Isela Lepe Aguilar.
Socorro Salgado Moreno.
Bladimir Peña Parra.
Carlos Alfredo Carmona Gasca.
Sergio Martínez González.
María Guadalupe Orozco Benítez.

Sección 6: Ambiental.

Capítulo 29.

549

Expansión e impacto de *Cherax quadricarinatus* en Nayarit, México: nuevos registros de traslocación y establecimiento en cuatro cuerpos de agua.

J. Raúl Tapia-Varela.
Carlos A. Romero-Bañuelos.
César A. Tapia-Varela.
José T. Nieto-Navarro.
Raquel Enedina Medina-Carrillo.
Lisset del C. Ramos-Ramírez.

Sección 7: Educación.

Capítulo 30.

567

Pertinencia de la evaluación con base a progresiones de aprendizaje en Medicina Veterinaria.

Martha Elba Ruiz-Riva-Palacio.
Roberto Montes-de-Oca-Jiménez.
Pilar Eliana Rivadeneira-Barreiro.
Pablo Cleomenes Zambrano-Rodríguez.
Pedro Sánchez-Aparicio.
Edalhi García-Faz.

Capítulo 31.

579

Progresiones de aprendizaje en la Medicina Veterinaria ¿Moda, transformación o solución?

Martha Elba Ruiz-Riva-Palacio.
Roberto Montes-de-Oca-Jiménez.
Pilar Eliana Rivadeneira-Barreiro.
Pablo Cleomenes Zambrano-Rodríguez.
Pedro Sánchez-Aparicio.
Edalhi García-Faz.



Sección 8: Animales de laboratorio.

Capítulo 32.

593

Investigación en animales de laboratorio.

María Isabel Chávez-Ruvalcaba.

Blanca Marisa López-Alvarado.

Lucia Delgadillo-Ruiz.

Verónica Bañuelos-Melero.

Josefina Huerta-García.

Francisca Chávez-Ruvalcaba.

Anexo

Información de los autores.

609

MEDICINA VETERINARIA



Abanico Académico

Efectos terapéuticos de la miel de abeja en la cicatrización de heridas: una revisión desde la perspectiva neurofarmacológica

Ramona Guadalupe Hernández-Medina.
Fidel Avila-Ramos.
Ma. Eugenia Barreto-Arias.
Montserrat Fernández-Moya.
Elena Franco-Robles.
Osmar Antonio Jaramillo-Morales.





Resumen

La prevalencia generalizada de heridas sin cicatrizar tiene un gran impacto no solo en la salud pública sino también en la economía. Se están utilizando numerosas intervenciones, incluyendo nuevos medicamentos y tecnologías, para lograr una cicatrización significativa de las heridas y eliminar las infecciones, sin embargo, algunas de estas intervenciones son costosas para los pacientes o han presentan poca eficacia. Por lo tanto, es fundamental encontrar nuevas alternativas que tenga un efecto terapéutico en el proceso de curación y la capacidad de eliminar microbios. La miel es un producto natural recientemente introducido en la medicina moderna. Sus propiedades antibacterianas y sus efectos en la cicatrización de heridas se han investigado exhaustivamente. Estudios a nivel preclínico y clínicos han demostrado que la miel es un agente antibacteriano eficaz de amplio espectro. Este capítulo propone ofrecer una visión integrada y crítica del potencial terapéutico de la miel en la cicatrización de heridas, abordando tanto sus fundamentos bioquímicos como su impacto clínico, con especial énfasis en los mecanismos de acción que la hacen relevante para la medicina regenerativa y la neurofarmacología aplicada. Los datos muestran que las propiedades cicatrizantes de la miel incluyen la estimulación del crecimiento tisular, una mayor epitelización y la minimización de la formación de cicatrices. Estos efectos se atribuyen a la acidez de la miel, su contenido de peróxido de hidrógeno, su efecto osmótico, su contenido nutricional, antioxidante y la estimulación inmunitaria. Además, los datos presentados demuestran que las mieles de diferentes zonas geográficas tienen efectos terapéuticos considerables en heridas. Los resultados fomentan el uso de la miel en la práctica clínica como cicatrizante natural y seguro.

Palabras clave: Miel, heridas, neurofarmacológico, mecanismos moleculares, compuestos fisicoquímicos.



Introducción

La cicatrización de heridas es un fenómeno dinámico y altamente regulado, compuesto por varias fases que se solapan entre sí y requieren la participación orquestada de células inmunes, factores de crecimiento, citoquinas y componentes de la matriz extracelular. Comprender las etapas fundamentales de este proceso es esencial para valorar la intervención terapéutica de agentes bioactivos de la miel (Figura 1).

- **Inflamación:** Esta es la primera fase tras la lesión, caracterizada por la vasoconstricción inicial seguida de una rápida vasodilatación, que permite el reclutamiento de células inflamatorias como neutrófilos y monocitos. Estas células fagocitan patógenos y detritos celulares, al tiempo que secretan citoquinas proinflamatorias como TNF- α , IL-1 β e IL-6, fundamentales para activar las fases siguientes.
- **Proliferación celular:** A continuación, ocurre la activación de queratinocitos, fibroblastos y células endoteliales. Esta fase promueve la formación de tejido de granulación, la deposición de colágeno tipo III y la reepitelización del sitio de la herida. Factores como el TGF- β y FGF-2 desempeñan un papel crítico en esta etapa.
- **Angiogénesis:** El crecimiento de nuevos vasos sanguíneos a partir de capilares preexistentes garantiza un suministro adecuado de oxígeno y nutrientes. Este proceso es regulado por factores como el VEGF (factor de crecimiento endotelial vascular) y el PDGF. En contextos patológicos, la angiogénesis insuficiente compromete la regeneración tisular.
- **Remodelación del tejido:** Finalmente, el colágeno tipo III es reemplazado por colágeno tipo I, más resistente. Los fibroblastos se diferencian en miofibroblastos, los cuales contraen la herida. Esta fase puede durar semanas o meses y determina la resistencia mecánica final del tejido cicatrizado.

Estas fases no solo son esenciales para la resolución estructural de la lesión, sino que también están interconectadas con procesos neuro inmunes.

A lo largo de las últimas décadas, el interés por terapias complementarias y naturales ha crecido significativamente, en parte debido a la búsqueda de alternativas menos invasivas y con menores efectos adversos que los tratamientos convencionales. Dentro de este panorama, la miel, y especialmente la miel ha emergido como un agente terapéutico con propiedades bioactivas de gran interés clínico, por su acción sobre citoquinas y rutas redox, posee el potencial de modular cada una de estas etapas a nivel molecular y celular, con implicaciones clínicas relevantes para la medicina regenerativa.

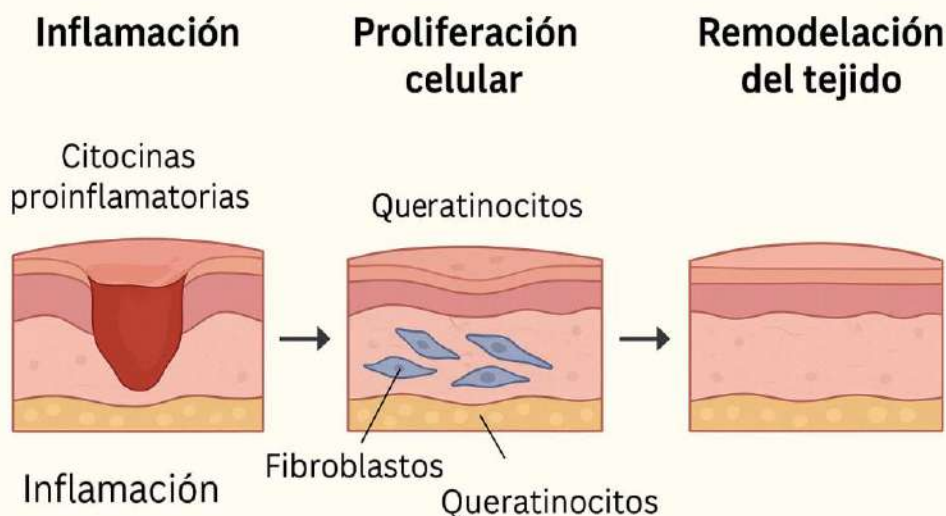


Figura 1. Etapas fisiológicas de la cicatrización de heridas: inflamación, proliferación celular y remodelación del tejido.

La miel es producida a partir del néctar de árboles o flores. Este tipo de miel presenta un perfil fitoquímico especialmente rico en compuestos fenólicos, flavonoides y azúcares reductores, los cuales han demostrado propiedades antioxidantes, antimicrobianas y antiinflamatorias. Desde un punto de vista neurofarmacológico, es especialmente relevante la capacidad de estos compuestos para modular mediadores inflamatorios que también están implicados en procesos neuropatológicos, como la activación glial, la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS) y la liberación de citoquinas proinflamatorias.

Composición fitoquímica y estructura molecular de la miel

La miel se distingue por una composición fitoquímica rica y diversa, determinada en gran medida por factores como la especie de *Prosopis* predominante, las condiciones climáticas y edáficas, así como por la actividad microbiana y la técnica de recolección utilizada. Desde el punto de vista bioquímico, sus componentes principales se pueden agrupar en cinco categorías funcionales: azúcares reductores, compuestos fenólicos, flavonoides, enzimas y micronutrientes traza.

Los azúcares representan aproximadamente el 70-80% de la miel, siendo la glucosa y la fructosa los más abundantes. Estos azúcares no sólo actúan como fuente energética, sino también como agentes osmóticos que impiden el crecimiento microbiano en heridas abiertas. Sin embargo, el verdadero valor terapéutico de la miel reside en sus compuestos secundarios, especialmente los fenólicos y flavonoides como la quercetina, el ácido gálico,



la pinocembrina y el kaempferol. Estos metabolitos actúan como potentes antioxidantes al neutralizar radicales libres e inhibir vías proinflamatorias, como la activación del factor nuclear kappa B (NF- κ B) y la producción de prostaglandinas mediada por COX-2. Además, se han identificado enzimas como la glucosa oxidasa, responsable de la producción controlada de peróxido de hidrógeno, un agente antimicrobiano natural. También contiene trazas de minerales como zinc, magnesio y selenio, los cuales contribuyen a la replicación celular, la formación de tejido conectivo y el equilibrio redox intracelular.

Desde el punto de vista estructural, las moléculas activas de la miel muestran una afinidad importante por receptores celulares involucrados en la modulación de la inflamación y la regeneración tisular. Esta interacción sugiere que su acción no es meramente tópica, sino que puede desencadenar respuestas biológicas de carácter sistémico, especialmente aquellas relacionadas con la neuro inflamación, mediante inhibición cruzada de citoquinas como IL-1 β , TNF- α e IL-6, ampliamente expresadas tanto en tejidos periféricos como en el sistema nervioso central bajo condiciones patológicas. La combinación de estos factores convierte a la miel en una matriz bioactiva de interés creciente para la medicina regenerativa, con potencial aplicación como vehículo farmacológico o como componente en biomateriales de liberación sostenida para terapias tópicas o transdérmicas.

Mecanismos moleculares de la miel en la modulación de procesos cicatriciales

Desde un punto de vista farmacodinámico, los efectos de la miel sobre el proceso de cicatrización se vinculan con la modulación de múltiples vías celulares y moleculares. En primera instancia, su acción hiperosmótica reduce la carga bacteriana al deshidratar selectivamente el entorno microbiano, lo que disminuye el riesgo de infección local sin necesidad de antibióticos. A nivel celular, la miel favorece la migración y proliferación de fibroblastos y queratinocitos, elementos esenciales para la formación de tejido de granulación y la posterior reepitelización.

El perfil flavonoide de esta miel contribuye además a una disminución sostenida de marcadores inflamatorios, como la expresión de ciclooxigenasa-2 (COX-2) y la liberación de prostaglandinas E2 (PGE2), lo que resulta en un microambiente más propicio para la regeneración. Su contenido de peróxido de hidrógeno, producido por la enzima glucosa oxidasa, tiene un papel dual: actúa como desinfectante leve y como señal redox que modula la transcripción de genes relacionados con la proliferación celular y la reparación tisular. Adicionalmente, se ha observado una activación indirecta de vías relacionadas con factores de crecimiento, como TGF- β y VEGF, claves en procesos como la angiogénesis y la remodelación de matriz extracelular. Estos mecanismos combinados sugieren que la miel actúa como un agente multifuncional en la cicatrización, capaz de



influir positivamente en todas las fases del proceso reparativo (Figura 2).

Uso tradicional de la miel

La miel de ha sido valorada ancestralmente por diversas comunidades indígenas y rurales en regiones semiáridas de América, especialmente en México y el suroeste de los Estados Unidos. Su uso tradicional trasciende la simple nutrición, posicionándola como un recurso multifuncional en la medicina popular, prácticas rituales y sistemas de curación natural.

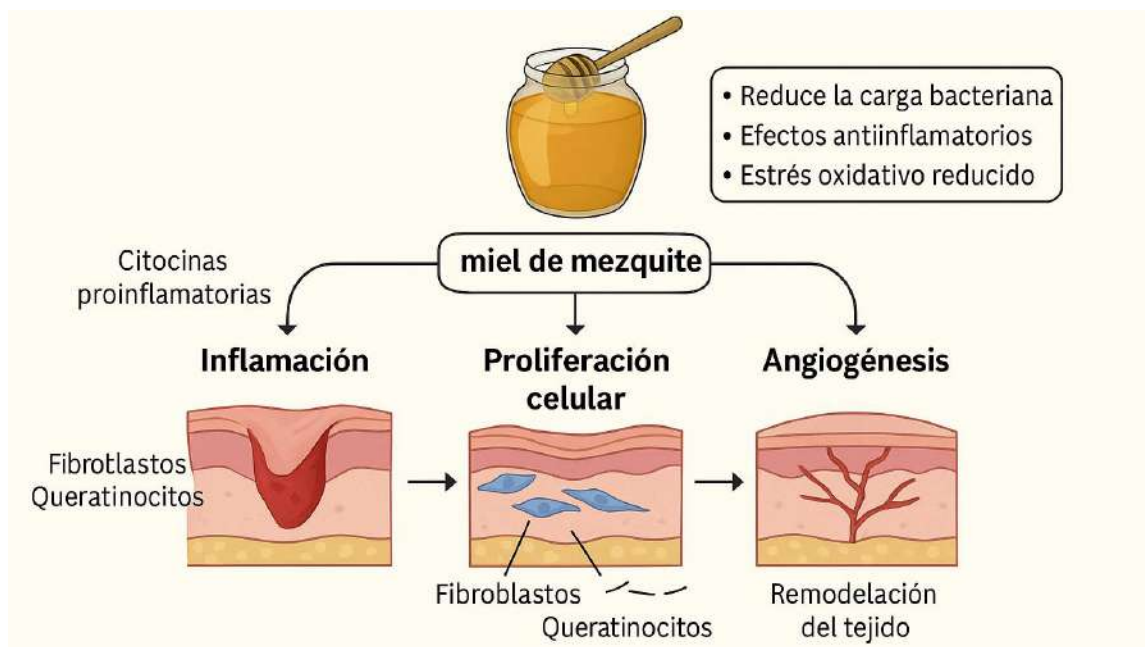


Figura 2. Mecanismo de acción de la miel en la cicatrización de heridas.

En contextos etnomédicos, la miel ha sido empleada como ungüento para tratar heridas abiertas, quemaduras, úlceras y picaduras de insectos. Su aplicación directa sobre la piel lesionada era común, aprovechando sus propiedades antimicrobianas naturales, reconocidas empíricamente mucho antes de que fueran validadas por la ciencia moderna. Esta práctica se sustentaba en la observación de una cicatrización más rápida y una menor recurrencia de infecciones.

Además, se utilizaba como remedio oral en infusiones calientes o bien, diluida en agua para aliviar afecciones respiratorias, incluyendo tos seca, faringitis y bronquitis. Se le atribuían también propiedades calmantes, siendo administrada a niños con insomnio leve o a personas con ansiedad transitoria.



En algunas culturas, la miel se asociaba simbólicamente con la purificación y la regeneración espiritual, usándose en ofrendas y como ungüento en prácticas de sanación energética. Estas creencias tradicionales, aunque no verificables mediante métodos empíricos modernos, reflejan el valor terapéutico que históricamente se ha conferido a este producto apícola.

La integración de este conocimiento ancestral con la evidencia científica actual no solo enriquece el marco terapéutico, sino que abre posibilidades para el desarrollo de productos que respeten el saber tradicional, al mismo tiempo que cumplen con estándares biomédicos contemporáneos.

Efectos sobre citoquinas inflamatorias y redes moleculares implicadas en la regeneración tisular

Los efectos beneficiosos de la miel se deben en gran medida a su capacidad para regular la respuesta inmunitaria e inflamatoria. Los estudios más recientes destacan que este tipo de miel posee actividad directa sobre citoquinas clave como interleucina-1 beta (IL-1 β), interleucina-6 (IL-6) y factor de necrosis tumoral alfa (TNF- α). Estas moléculas, comúnmente asociadas con inflamación crónica y daño tisular, son inhibidas en presencia de los compuestos antioxidantes y polifenólicos presentes en la miel.

Asimismo, la miel puede modular la vía de señalización del factor nuclear kappa B (NF- κ B), que es un eje central en la producción de citoquinas y quimioquinas proinflamatorias. Al inhibir esta vía, se reduce la infiltración de neutrófilos y monocitos, facilitando un cambio fenotípico hacia una fase proliferativa dominada por células reparadoras como macrófagos tipo M2. Esta transición es crucial, pues favorece la producción de factores como VEGF (vascular endothelial growth factor), que estimula la neovascularización, y TGF- β , que interviene en la remodelación del colágeno y la maduración de la dermis.

Desde la óptica neurofarmacológica, estos mismos mecanismos tienen implicaciones relevantes en la modulación de la neuroinflamación, ya que las vías de señalización inflamatorias en tejidos periféricos comparten similitudes estructurales y funcionales con aquellas presentes en el sistema nervioso central. Por ende, el uso de mieles no solo tiene aplicación tópica, sino que podría servir como modelo de intervención antiinflamatoria sistémica.

Comparativa farmacológica con mieles bioactivas internacionales: manuka, gelam y tualang

La miel ha sido comparada entre ella, dada su naturaleza y origen, por ejemplo, mieles terapéuticas reconocidas a nivel internacional, como la miel de manuka (*Leptospermum scoparium*), gelam (*Melaleuca spp.*) y tualang (*Koompassia excelsa*). Cada una de estas mieles presenta perfiles químicos distintivos. Por ejemplo, la miel de manuka se



caracteriza por su alto contenido de metilglioxal, lo que le confiere gran actividad antibacteriana. Sin embargo, su perfil inflamatorio es más limitado que el de otras mieles, las cuales contienen una mayor diversidad de flavonoides como pinocembrina, luteolina y ácido cafeico.

La miel gelam y la tualang también exhiben propiedades antioxidantes, pero su índice de inhibición de especies reactivas de oxígeno (ROS) es menor en comparación con otros tipos de mieles. Además, estudios recientes han mostrado que estas mieles tienen un mejor perfil de tolerancia dérmica en aplicaciones prolongadas, mostrando menos reacciones de hipersensibilidad o irritación cutánea.

Desde el punto de vista farmacológico, las diferentes mieles combinan alta biodisponibilidad de compuestos activos con bajo perfil de toxicidad, lo que la convierte en una alternativa prometedora para su incorporación en productos biomédicos como apósitos, geles cicatrizantes y formulaciones tópicas de liberación controlada.

Evidencia clínica y preclínica en modelos animales y humanos

La futura inclusión de la miel en protocolos clínicos dependerá del cumplimiento de estándares de farmacovigilancia, estandarización fitoquímica y validación bajo buenas prácticas de manufactura. No obstante, aún existen vacíos importantes: faltan ensayos clínicos aleatorizados, multicéntricos y doble ciego que evalúen la eficacia de la miel en humanos bajo condiciones controladas, determinando dosis óptimas, frecuencia de aplicación y efectos adversos a largo plazo.

La tolerancia dérmica de la miel es especialmente destacable, ya que muestra escasa reactividad inmunológica y buena penetrancia transdérmica, lo que la posiciona como candidata ideal para su vehiculización en liposomas, apósitos inteligentes o sistemas de liberación controlada.

En estudios como el de Subrahmanyam (1998), la miel fue incluso más eficaz que la sulfadiazina de plata en la resolución de heridas por quemadura. Por su parte, Mohammadi et al. (2017) exploraron el uso de nanofibras impregnadas con flavonoides (como chrysin) derivados de miel en animales de laboratorio, observando una aceleración marcada de la fase de proliferación celular y angiogénesis.

Estas mieles han sido estudiadas en heridas quirúrgicas, quemaduras de segundo grado, úlceras diabéticas y heridas crónicas de origen venoso, mostrando en todos los casos una reducción significativa en el tiempo de cicatrización, menor colonización bacteriana y reducción del dolor local.

Desde el punto de vista clínico, aunque los ensayos específicos con miel aún son escasos, los resultados obtenidos con otras mieles bioactivas como la de manuka, gelam y tualang han permitido construir un paralelismo translacional sólido.

En modelos animales diabéticos, el efecto cicatrizante de la miel se ha mantenido



incluso bajo condiciones de hiperglucemia sostenida. Esto ha sido atribuido a la capacidad antioxidante de la miel, que mitiga el daño por radicales libres, y a la restauración de vías de señalización alteradas como NF- κ B, COX-2 y la vía MAPK/ERK.

Adicionalmente, el peróxido de hidrógeno generado por la glucosa oxidasa presente en la miel actúa como molécula señalizadora redox, modulando la proliferación de fibroblastos y queratinocitos en el lecho de la herida.

La angiogénesis inducida por la miel ha sido consistentemente relacionada con la presencia de flavonoides como la pinocembrina, luteolina y quercetina, los cuales potencian la expresión de factores de crecimiento como TGF- β y VEGF. Estos elementos son indispensables para la reorganización vascular y el soporte nutricional del tejido neoformado.

Tinciones histológicas como hematoxilina-eosina (H&E), Tricrómico de Masson y técnicas inmunohistoquímicas con anticuerpos anti-VEGF y CD31 han sido empleadas para validar dichos efectos, mostrando una organización más eficiente del tejido y una vascularización mejorada.

La evaluación terapéutica de la miel en la cicatrización de heridas ha avanzado progresivamente desde estudios observacionales hasta ensayos preclínicos y clínicos emergentes. En modelos animales, especialmente con ratas Wistar y conejos neozelandeses, la aplicación tópica de miel ha demostrado mejoras significativas en los tiempos de reepitelización, densidad capilar, y deposición de colágeno tipo I.

Aplicaciones en biotecnología farmacéutica y medicina regenerativa

La miel representa una plataforma biocompatible de gran interés para la ingeniería de tejidos y la medicina regenerativa. Diversas líneas de investigación proponen su uso como componente de apósitos inteligentes, formulados con biopolímeros como alginato, quitosano o ácido hialurónico. Estas combinaciones permiten el desarrollo de sistemas de liberación sostenida que prolongan la actividad antiinflamatoria y antimicrobiana de la miel. Asimismo, se ha explorado su potencial como agente bioactivo en hidrogeles, nanopartículas y matrices tridimensionales. Tales sistemas pueden usarse en la administración localizada de flavonoides, los cuales no solo estimulan la cicatrización, sino que también modulan la angiogénesis y el estrés oxidativo, factores clave en la regeneración de tejidos complejos como el nervioso o epitelial.

Desde el punto de vista farmacéutico, la miel también puede ser vehiculizada en emulsiones y liposomas para mejorar su penetrancia dérmica. Esta estrategia permite ampliar sus aplicaciones más allá del ámbito dermatológico, posibilitando su uso en mucosas, cavidades corporales o en tratamientos postquirúrgicos de heridas internas.



Limitaciones biofarmacéuticas y direcciones futuras

A pesar de sus ventajas, el uso clínico de la miel enfrenta varios desafíos biofarmacéuticos. Uno de los principales es la variabilidad en su composición química, determinada por factores ambientales, estacionales y florales. Esta falta de estandarización dificulta el establecimiento de concentraciones terapéuticas uniformes y complica su aprobación regulatoria.

Otro obstáculo importante es la escasez de ensayos clínicos controlados en humanos, lo cual limita la capacidad de extrapolar resultados obtenidos en modelos animales. A nivel industrial, la conservación de la actividad biológica durante los procesos de purificación, envasado y almacenamiento es también un reto técnico.

Además, se requieren estudios de toxicología crónica y de interacción con otros fármacos tópicos, especialmente en pacientes con comorbilidades. La ausencia de marcos normativos específicos para productos terapéuticos apícolas también representa una barrera significativa para su integración formal en guías médicas y protocolos hospitalarios.

Conclusión crítica desde el enfoque neurofarmacológico

Desde un enfoque neurofarmacológico, la miel no solo destaca como agente cicatrizante tópico, sino también como modulador potencial de procesos inflamatorios sistémicos. Su riqueza en compuestos antioxidantes y antiinflamatorios, comprobada en múltiples estudios preclínicos, la convierte en una herramienta prometedora para la medicina regenerativa avanzada. A través de mecanismos que involucran la inhibición del NF- κ B, la modulación de citoquinas proinflamatorias y la promoción de la angiogénesis mediante VEGF, esta miel actúa de forma sinérgica para acelerar la reparación de tejidos. Además, su perfil de seguridad, biodisponibilidad dérmica y versatilidad farmacotecnológica le confieren ventajas competitivas frente a productos sintéticos. Se concluye que la miel puede poseer el potencial necesario para ser incorporada en terapias integradas que requieran modulación de la inflamación, estimulación tisular y control de infecciones, tanto en contextos clínicos como experimentales.

Bibliografía

- Ahmed, S., Sulaiman, S. A., Baig, A. A., Ibrahim, M., Liaqat, S., Fatima, S., Jabeen, S., Shamim, N., & Othman, N. H. (2018). Honey as a Potential Natural Antioxidant Medicine: An Insight into Its Molecular Mechanisms of Action. *Oxidative medicine and cellular longevity*, 2018, 8367846. <https://doi.org/10.1155/2018/8367846>
- Aljadi, A., & Kamaruddin, M. (2004). Evaluation of the phenolic contents and antioxidant capacities of two Malaysian floral honeys. *Food Chemistry*, 85(4), 513–518.



[https://doi.org/10.1016/s0308-8146\(02\)00596-4](https://doi.org/10.1016/s0308-8146(02)00596-4)

- Alvarez-Suarez, J. M., Giampieri, F., & Battino, M. (2013). Honey as a source of dietary antioxidants: structures, bioavailability and evidence of protective effects against human chronic diseases. *Current Medicinal Chemistry*, 20(5), 621–638. <https://doi.org/10.2174/092986713804999358>
- Al-Waili, N. S., Salom, K., Butler, G., & Al Ghamdi, A. A. (2011). Honey and microbial infections: a review supporting the use of honey for microbial control. *Journal of Medicinal Food*, 14(10), 1079–1096. <https://doi.org/10.1089/jmf.2010.0161>
- Aziz, Z., & Abdul Rasool Hassan, B. (2017). The effects of honey compared to silver sulfadiazine for the treatment of burns: A systematic review of randomized controlled trials. *Burns: journal of the International Society for Burn Injuries*, 43(1), 50–57. <https://doi.org/10.1016/j.burns.2016.07.004>
- Bertoncelj, J., Dobersek, U., Jamnik, M., & Golob, T. (2007). Evaluation of the phenolic content, antioxidant activity and colour of Slovenian honey. *Food Chemistry*, 105(2), 822–828. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.01.060>
- Bogdanov, S., Jurendic, T., Sieber, R., & Gallmann, P. (2008). Honey for nutrition and health: a review. *Journal of the American College of Nutrition*, 27(6), 677–689. <https://doi.org/10.1080/07315724.2008.10719745>
- Estevinho, L., Pereira, A. P., Moreira, L., Dias, L. G., & Pereira, E. (2008). Antioxidant and antimicrobial effects of phenolic compounds extracts of Northeast Portugal honey. *Food and chemical toxicology : an international journal published for the British Industrial Biological Research Association*, 46(12), 3774–3779. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2008.09.062>
- García Chávez, C., Ramos Arredondo, L. E., Jasso Barbosa, G. N., Hernández Medina, R. G., & Avila Ramos, F. (2024). Miel de mezquite, características y su uso cicatrizante. *Jóvenes en la Ciencia*, 28. <https://doi.org/10.15174/jc.2024.4286>
- Gheldof, N., Wang, X. H., & Engeseth, N. J. (2002). Identification and quantification of antioxidant components of honeys from various floral sources. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(21), 5870–5877. <https://doi.org/10.1021/jf0256135>
- Hegazi, A.G., Abdel-Rahman, E.H., Abd-Allah, F.F., & Abdou, A.M. (2015). Influence of Honey on Immune Status in Mice-Bearing Ehrlich Carcinoma. *Journal of Clinical & Cellular Immunology*, 6, 1-6.



- Khalil, M. I., Sulaiman, S. A., & Boukraa, L. (2010). Antioxidant properties of honey and its role in preventing health disorder. *The Open Nutraceuticals Journal*, 3(1), 6–16. <https://doi.org/10.2174/18763960010030100006>
- Mandal, M. D., & Mandal, S. (2011). Honey: its medicinal property and antibacterial activity. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*, 1(2), 154–160. [https://doi.org/10.1016/S2221-1691\(11\)60016-6](https://doi.org/10.1016/S2221-1691(11)60016-6)
- Mesaik, M. A., Dastagir, N., Uddin, N., Rehman, K., & Azim, M. K. (2015). Characterization of immunomodulatory activities of honey glycoproteins and glycopeptides. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63(1), 177–184. <https://doi.org/10.1021/jf505131p>
- Mijanur Rahman, M., Gan, S. H., & Khalil, M. I. (2014). Neurological effects of honey: current and future prospects. *Evidence-based Complementary and Alternative Medicine : eCAM*, 2014, 958721. <https://doi.org/10.1155/2014/958721>
- Mohammadi, Z., Sharif Zak, M., Majdi, H., Seidi, K., Barati, M., Akbarzadeh, A., & Latifi, A. M. (2017). The effect of chrysin-loaded nanofiber on wound healing process in male rat. *Chemical Biology & Drug Design*, 90(6), 1106–1114. <https://doi.org/10.1111/cbdd.12996>
- Molan P. C. (2001). Potential of honey in the treatment of wounds and burns. *American Journal of Clinical Dermatology*, 2(1), 13–19. <https://doi.org/10.2165/00128071-200102010-00003>
- Moncayo-Espinoza, idier J., Castillo-Jaramillo, M. J., & González-Zambrano, R. V. (2024). Efectos terapéuticos de la miel de abeja (melipona beecheii) como cicatrizante en heridas e intervenciones quirúrgicas en especies menores. *Revista Científica Arbitrada En Investigaciones De La Salud GESTAR*. ISSN: 2737-6273., 7(13), 2-21. Recuperado a partir de <https://journalgestar.org/index.php/gestar/article/view/98>
- Rahimi, V. B., Shirazinia, R., Fereydouni, N., Zamani, P., Darroudi, S., Sahebkar, A. H., & Askari, V. R. (2017). Comparison of honey and dextrose solution on post-operative peritoneal adhesion in rat model. *Biomedicine & Pharmacotherapy = Biomedecine & Pharmacotherapie*, 92, 849–855. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2017.05.114>
- Raynaud, A., Ghezali, L., Gloaguen, V., Liagre, B., Quero, F., & Petit, J. M. (2013). Honey-induced macrophage stimulation: AP-1 and NF-κB activation and cytokine production are unrelated to LPS content of honey. *International Immunopharmacology*, 17(3), 874–879. <https://doi.org/10.1016/j.intimp.2013.09.014>
- Safi, S. Z., Batumalaie, K., Qvist, R., Mohd Yusof, K., & Ismail, I. S. (2016). Gelam Honey Attenuates the Oxidative Stress-Induced Inflammatory Pathways in Pancreatic Hamster



- Cells. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine : eCAM*, 2016, 5843615. <https://doi.org/10.1155/2016/5843615>
- Saxena, S., Gautam, S., & Sharma, A. (2009). Physical, biochemical and antioxidant properties of some Indian honeys. *Food Chemistry*, 118(2), 391–397. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.05.001>
- Schencke, C., Vásquez, B., Sandoval, C., & Del Sol, M. (2016). El Rol de la Miel en los Procesos Morfofisiológicos de Reparación de Heridas. *International Journal of Morphology*, 34(1), 385–395. <https://doi.org/10.4067/s0717-95022016000100056>
- Sforcin, J. M., & Bankova, V. (2011). Propolis: is there a potential for the development of new drugs?. *Journal of Ethnopharmacology*, 133(2), 253–260. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2010.10.032>
- Spilioti, E., Jaakkola, M., Tolonen, T., Lipponen, M., Virtanen, V., Chinou, I., Kassi, E., Karabournioti, S., & Moutsatsou, P. (2014). Phenolic Acid Composition, Antiatherogenic and Anticancer Potential of Honeys Derived from Various Regions in Greece. *PLoS ONE*, 9(4), e94860. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0094860>
- Tonks, A., Cooper, R. A., Price, A. J., Molan, P. C., & Jones, K. P. (2001). Stimulation of TNF-alpha release in monocytes by honey. *Cytokine*, 14(4), 240–242. <https://doi.org/10.1006/cyto.2001.0868>
- Van den Berg, A. J., van den Worm, E., van Ufford, H. C., Halkes, S. B., Hoekstra, M. J., & Beukelman, C. J. (2008). An in vitro examination of the antioxidant and anti-inflammatory properties of buckwheat honey. *Journal of Wound Care*, 17(4), 172–178. <https://doi.org/10.12968/jowc.2008.17.4.28839>
- Viuda-Martos, M., Ruiz-Navajas, Y., Fernández-López, J., & Pérez-Alvarez, J. A. (2008). Functional properties of honey, propolis, and royal jelly. *Journal of Food Science*, 73(9), R117–R124. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2008.00966.x>
- Yaghoobi, R., Kazerouni, A., & Kazerouni, O. (2013). Evidence for Clinical Use of Honey in Wound Healing as an Anti-bacterial, Anti-inflammatory Anti-oxidant and Anti-viral Agent: A Review. *Jundishapur Journal of Natural Pharmaceutical Products*, 8(3), 100–104. <https://doi.org/10.17795/jjnpp-9487>
- Zainol, M. I., Mohd Yusoff, K., & Mohd Yusof, M. Y. (2013). Antibacterial activity of selected Malaysian honey. *BMC Complementary and Alternative Medicine*, 13, 129. <https://doi.org/10.1186/1472-6882-13-129>

Fitofármacos con efecto analgésico en medicina veterinaria

Osmar Antonio Jaramillo-Morales.
Luis Manuel Orozco Castellanos.
Nereida Violeta Vega-Cabrera.
Fidel Avila-Ramos.
Josué Vidal Espinosa-Juárez.
Gerardo Ruvalcaba-Palacios.





Resumen

El dolor es una experiencia sensorial y emocional compleja, cuya función principal es la protección del organismo frente a estímulos dañinos. En animales, este proceso, aunque difícil de cuantificar, se ha estudiado ampliamente desde una perspectiva neurofisiológica. El manejo del dolor en animales constituye un pilar fundamental de la medicina veterinaria moderna. El empleo de fitofármacos como agentes analgésicos ha ganado interés por su origen natural, menor toxicidad y capacidad de modular múltiples blancos farmacológicos. Este documento revisa las aplicaciones clínicas, mecanismos de acción y potencial terapéutico de los fitofármacos en el ámbito veterinario.

Palabras clave: Fitofármacos veterinarios, analgesia veterinaria.



Introducción

Desde el punto de vista fisiopatológico, el dolor se divide en fases bien definidas: transducción, transmisión, modulación y percepción. La transducción ocurre en las terminaciones nerviosas libres (nociceptores), que convierten estímulos térmicos, químicos o mecánicos en señales eléctricas. Esta activación depende de canales iónicos específicos como receptores de potencial transitorio (TRPV), canales iónicos sensibles al ácido (ASIC) y canales de sodio tipo Nav1.7.

La señal generada es transmitida por fibras nerviosas A δ (dolor agudo) y C (dolor persistente), que convergen en el asta dorsal de la médula espinal. Allí, se produce la liberación de neurotransmisores como glutamato, sustancia P y péptido relacionado con el gen de la calcitonina (CGRP), los cuales amplifican la respuesta nociceptiva.

La modulación de la señal ocurre mediante mecanismos inhibitorios o excitatorios a nivel espinal y supraspinal. Estructuras como la sustancia gelatinosa de Rolando, el tálamo y la sustancia gris periacueductal participan en esta modulación, influenciada por neurotransmisores como serotonina, noradrenalina y endorfinas endógenas.

Finalmente, la percepción del dolor ocurre en la corteza somatosensorial, integrándose con aspectos emocionales y conductuales en regiones como el sistema límbico. El dolor inflamatorio y el dolor neuropático presentan mecanismos adicionales como la sensibilización central, en la cual hay una amplificación mantenida de las señales dolorosas debido a la neuroplasticidad sináptica y la pérdida de inhibición tónica.

Tratamiento farmacológico convencional y efectos adversos

El tratamiento farmacológico del dolor en medicina veterinaria se basa en grupos como antiinflamatorios no esteroideos (AINEs), opioides, anestésicos locales, y, en menor medida, antagonistas del N-metil-D-aspartato (NMDA), antidepresivos tricíclicos y gabapentinoides.

Los AINEs como el meloxicam, carprofeno, y robenacoxib actúan inhibiendo la enzima ciclooxigenasa (COX), especialmente la isoforma COX-2, disminuyendo la producción de prostaglandinas implicadas en la sensibilización nociceptiva. Aunque eficaces en dolor agudo e inflamatorio, presentan riesgos de ulceración gastrointestinal, hepatopatías y nefrotoxicidad, especialmente en tratamientos prolongados o en animales geriátricos.

Los opioides como morfina, buprenorfina y tramadol se unen a receptores μ , κ y δ en el sistema nervioso central. Estos fármacos son fundamentales en cirugía mayor o dolor oncológico, pero su uso prolongado puede causar dependencia, tolerancia, depresión respiratoria y efectos gastrointestinales como constipación y vómito.

Los anestésicos locales como lidocaína y bupivacaína actúan bloqueando los canales de sodio dependientes de voltaje en las fibras nerviosas, impidiendo la conducción del impulso doloroso. Aunque útiles en bloqueos regionales, su toxicidad cardiovascular y neurológica es relevante en caso de sobredosis.



Otros fármacos adyuvantes incluyen gabapentina y amitriptilina, empleados en dolor neuropático. Si bien pueden modular la excitabilidad neuronal, su uso requiere precaución por posibles efectos sedantes y alteraciones hepáticas. La complejidad de los efectos adversos ha motivado la búsqueda de fitofármacos como alternativa segura y efectiva.

Bases farmacológicas de los fitofármacos

Los fitofármacos son preparados estandarizados derivados de plantas medicinales, cuyas propiedades terapéuticas se deben a la presencia de metabolitos secundarios con actividad farmacológica definida. Desde una perspectiva farmacológica, su acción se explica por la interacción de múltiples compuestos bioactivos con dianas moleculares involucradas en la fisiopatología del dolor, la inflamación y la señalización nociceptiva.

Los fitofármacos contienen una diversidad de metabolitos secundarios con actividad biológica, entre los que destacan (Figura 1):

- ☐ **Flavonoides:** como quercetina, luteolina y apigenina, con efectos antioxidantes y antiinflamatorios.
- ☐ **Terpenoides:** como carvacrol, borneol y linalol, con acción analgésica central y periférica.
- ☐ **Alcaloides:** como berberina, capsaicina y morfina vegetal, con capacidad para modular neurotransmisores.
- ☐ **Saponinas y taninos:** que actúan como inhibidores de enzimas proinflamatorias o moduladores del sistema inmune.

Estos compuestos interactúan con una amplia gama de proteínas blanco, incluyendo canales iónicos, receptores de membrana y factores de transcripción intracelular. Los principales mecanismos farmacodinámicos de los fitofármacos analgésicos incluyen:

- ☐ **Inhibición de COX-2 y LOX:** reduciendo la síntesis de prostaglandinas y leucotrienos, lo que disminuye la sensibilización nociceptiva.
- ☐ **Modulación de citoquinas:** como IL-1 β , IL-6 y TNF- α , mediadores clave en la respuesta inflamatoria.
- ☐ **Interacción con receptores TRP (receptores de potencial transitorio):** implicados en la transducción del dolor térmico y mecánico.
- ☐ **Estimulación de vías opioides endógenas:** algunos fitofármacos aumentan la liberación de endorfinas o modulan la respuesta a opioides.
- ☐ **Actividad antioxidante:** por neutralización de radicales libres y reducción del estrés oxidativo, que es un componente importante en el dolor crónico y neuropático.

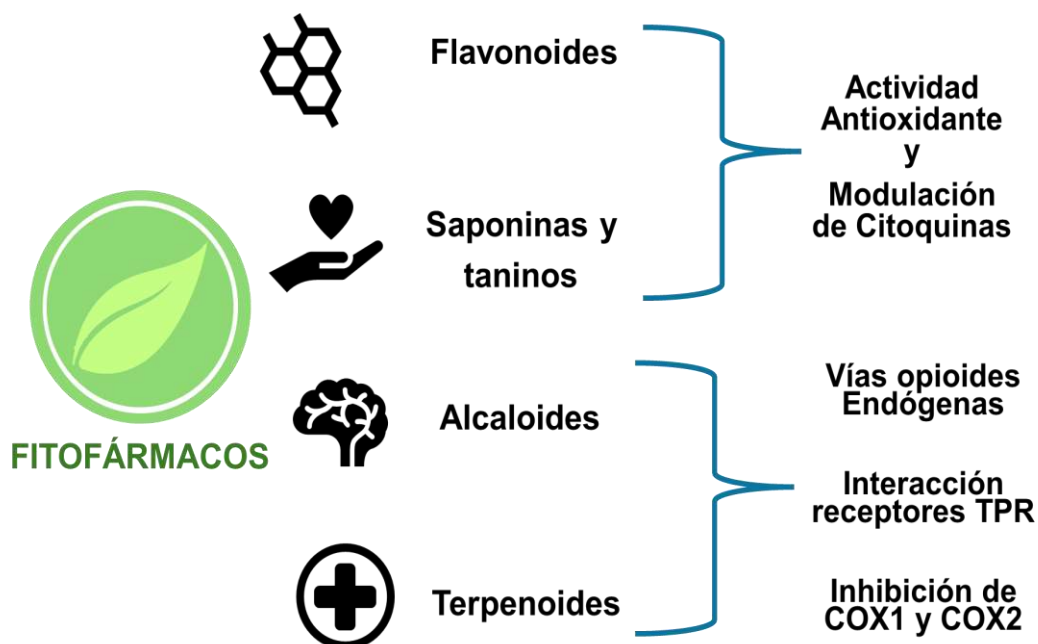


Figura 1. Fitofármacos y actividades farmacológicas.

Una de las limitaciones en el uso de fitofármacos es su baja biodisponibilidad oral, debido a factores como baja solubilidad, metabolismo de primer paso y degradación gastrointestinal. Sin embargo, avances en formulaciones como microencapsulación, nanopartículas y complejos con ciclodextrinas han mejorado significativamente la estabilidad y absorción de compuestos como la curcumina y la quercetina.

La farmacocinética de muchos fitofármacos en animales aún está poco caracterizada. Estudios en perros y gatos han revelado perfiles de absorción lentos y acumulación en tejidos, lo cual puede ser ventajoso en condiciones de dolor crónico. La variabilidad entre especies es otro reto que requiere estudios específicos para establecer dosificaciones seguras y efectivas.

Una característica única de los fitofármacos es su acción multiblanco. A diferencia de los fármacos sintéticos que actúan sobre una única diana, los extractos vegetales modulan simultáneamente diferentes rutas fisiopatológicas, lo cual potencia su eficacia en procesos complejos como el dolor inflamatorio, visceral o neuropático.

Este efecto sinérgico también permite el uso de dosis menores, reduciendo potenciales efectos adversos. Además, favorece la combinación con fármacos convencionales en protocolos de analgesia multimodal, optimizando el control del dolor sin aumentar la carga tóxica.



Principales especies vegetales con efecto analgésico

Principales especies vegetales con efecto analgésico han sido documentadas como fuentes de compuestos con efectos analgésicos, ya sea por su uso tradicional o por evidencia farmacológica moderna. Su actividad está asociada a la presencia de metabolitos secundarios con capacidad antiinflamatoria, antioxidante y neuromoduladora (Figura 2).

- ***Salix alba* (sauce blanco).** El sauce blanco es una de las fuentes vegetales más antiguamente reconocidas por sus propiedades analgésicas. Su principio activo, la salicina, es un precursor natural del ácido salicílico. Actúa inhibiendo la ciclooxygenasa (COX), reduciendo la producción de prostaglandinas. Se ha demostrado su efectividad en dolor osteomuscular y en procesos inflamatorios articulares.
- ***Curcuma longa* (cúrcuma).** La cúrcuma contiene curcumina, un polifenol con capacidad para modular múltiples rutas celulares implicadas en la inflamación y el dolor. Inhibe COX-2, NF- κ B, y citoquinas como TNF- α e IL-6. Su uso en modelos animales ha evidenciado disminución de la hiperalgesia y del edema en pruebas de carragenina y formalina.
- ***Harpagophytum procumbens* (garra del diablo).** Originaria de África, esta especie es rica en iridoides como el harpagósido, con actividad antiinflamatoria y analgésica demostrada en modelos de dolor articular crónico. Ha sido utilizada con éxito en veterinaria equina y canina como alternativa a los AINEs, con menor toxicidad gastrointestinal.
- ***Capsicum annuum* (chile).** El componente activo capsaicina actúa como agonista del receptor TRPV1, generando una desensibilización nociceptiva periférica tras una estimulación sostenida. Se utiliza tópicamente para el manejo del dolor neuropático, osteoartritis y neuralgias. Su mecanismo se basa en la depleción de sustancia P en las terminaciones nerviosas sensoriales.
- ***Matricaria chamomilla* (manzanilla).** La manzanilla contiene flavonoides como la apigenina y luteolina, así como compuestos terpénicos con efecto modulador de la respuesta inflamatoria. Su uso tradicional en dolor intestinal y cólico ha sido respaldado por modelos preclínicos en animales, donde ha mostrado efecto antinociceptivo central y periférico.
- ***Zingiber officinale* (jengibre).** El jengibre contiene gingeroles y shogaoles, compuestos que bloquean la biosíntesis de prostaglandinas y leucotrienos. Además, inhibe la vía de la lipooxygenasa y reduce la actividad de mediadores inflamatorios como TNF- α . En perros y caballos, ha mostrado utilidad en dolor musculoesquelético y articular crónico.
- ***Valeriana officinalis* (valeriana).** La valeriana se ha utilizado tradicionalmente como ansiolítico y sedante, pero también presenta actividad



analgésica por modulación GABAérgica y regulación de canales de calcio. En modelos animales, reduce la percepción del dolor térmico y mecánico, y se ha usado en medicina veterinaria como coadyuvante en estrés asociado a dolor crónico.

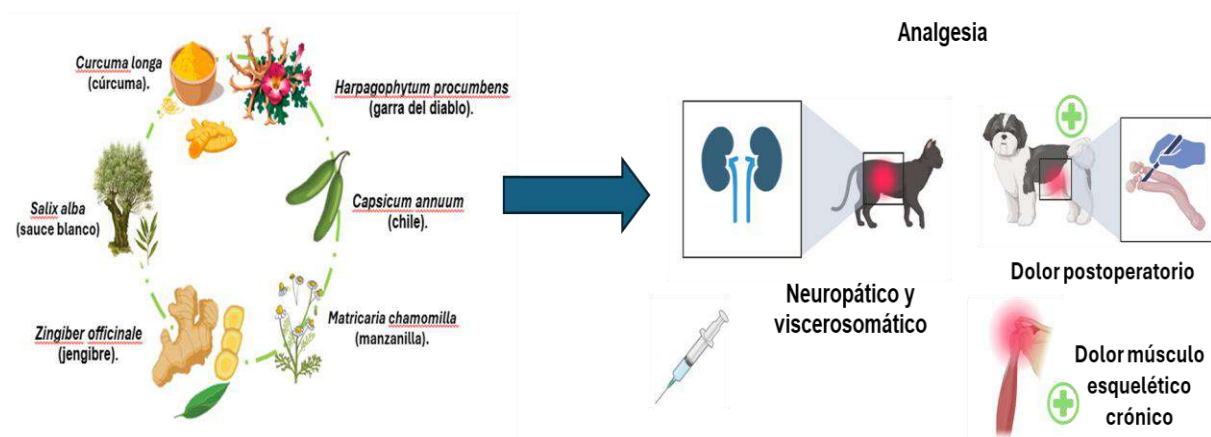


Figura 2. Principales especies vegetales con efecto analgésico.

Evidencia clínica en medicina veterinaria

En las últimas dos décadas, la investigación clínica en medicina veterinaria ha avanzado hacia la validación del uso de fitofármacos como herramientas analgésicas seguras y eficaces. Si bien gran parte de la evidencia procede de estudios preclínicos, existen ensayos controlados, estudios observacionales y reportes de casos que respaldan su aplicación clínica en animales domésticos y de producción.

Dolor musculoesquelético crónico

Uno de los ámbitos con mayor documentación es el manejo del dolor articular y musculoesquelético, particularmente en perros geriátricos con osteoartritis. Por ejemplo, un estudio realizado por Reeves et al. (2018) evaluó la eficacia de un extracto estandarizado de *Boswellia serrata* en perros con artrosis, encontrando una reducción significativa en la puntuación de dolor y mejora en la movilidad tras 6 semanas de tratamiento.

Asimismo, suplementos basados en *Harpagophytum procumbens* (garra del diablo) han mostrado beneficios clínicos en caballos con dolor crónico de extremidades, mejorando su locomoción sin provocar efectos gastrointestinales típicos de los AINEs.

Dolor postoperatorio

La inclusión de fitofármacos en protocolos multimodales de analgesia postquirúrgica ha mostrado efectos adyuvantes. En un estudio aleatorizado, administraciones orales de extracto de cúrcuma y jengibre en perros sometidos a ovariectomía redujeron las concentraciones plasmáticas de prostaglandinas y mejoraron los puntajes de confort



postoperatorio.

Los fitofármacos también han sido evaluados como coadyuvantes en bloqueos regionales. El uso de aceite esencial de *Lavandula angustifolia* como complemento tópico posterior a cirugía menor mostró reducción de sensibilidad mecánica en ratas, lo cual ha motivado su exploración en pacientes felinos y canino.

Dolor neuropático y viscerosomático

Aunque más limitado, también hay evidencia emergente en el uso de fitofármacos para condiciones de dolor neuropático o visceral. Compuestos como la quercetina y la berberina han sido evaluados en modelos de lesión medular e inflamación colónica, mostrando inhibición de IL-6 y reducción de la activación microglial.

En gatos con dolor crónico asociado a enfermedad renal o tumores orales, el uso complementario de fitofármacos como valeriana, pasiflora y cúrcuma ha sido bien tolerado, con mejoras clínicas reportadas por cuidadores y clínicos en términos de apetito, interacción y conducta.

Ventajas clínicas y consideraciones

Los fitofármacos presentan ventajas como una menor toxicidad hepática y renal, acción multiblanco y utilidad en tratamientos prolongados, especialmente en animales geriátricos o polimedicados. No obstante, su eficacia puede ser variable dependiendo de la estandarización del producto, la dosis y la especie animal tratada.

En medicina veterinaria, la necesidad de evidencia clínica robusta ha motivado un enfoque más riguroso en los últimos años, incluyendo ensayos doble ciego, protocolos validados de dolor (Glasgow Composite Measure Pain Scale) y biomarcadores séricos de inflamación.

Perspectivas regulatorias y desafíos

La integración de fitofármacos como agentes analgésicos en medicina veterinaria presenta avances promisorios, pero también se enfrenta a importantes retos normativos, científicos y productivos. A pesar de su creciente aceptación en terapias integrativas, su regulación aún es heterogénea y limitada en comparación con los fármacos sintéticos convencionales.

Ausencia de normativas veterinarias específicas. En la mayoría de los países latinoamericanos, los fitofármacos utilizados en medicina veterinaria carecen de una categoría regulatoria diferenciada. A menudo son clasificados como suplementos alimenticios, productos herbolarios o cosméticos, lo que dificulta la implementación de estándares farmacológicos, dosis terapéuticas definidas, y ensayos clínicos obligatorios. Esta ambigüedad genera un vacío legal que puede comprometer tanto la seguridad como la eficacia terapéutica.



En regiones como la Unión Europea, aunque existe una directiva específica para medicamentos de origen vegetal (2004/24/CE), su aplicación en veterinaria no está plenamente desarrollada. En Estados Unidos, la FDA regula productos herbales bajo la categoría de “nutraceuticals” o “animal supplements”, sin requerir pruebas preclínicas rigurosas como sí ocurre con fármacos de uso humano.

Dificultades de estandarización Uno de los desafíos más relevantes en fitofarmacología es la variabilidad en la composición química de los extractos vegetales, afectada por factores como el origen botánico, condiciones de cultivo, método de extracción y almacenamiento. Esta variabilidad puede alterar significativamente la biodisponibilidad, potencia y seguridad del producto final.

La estandarización mediante marcadores químicos (como curcumina, harpagósido o gingerol) es esencial para garantizar reproducibilidad y eficacia clínica. No obstante, son pocos los productos veterinarios fitoterapéuticos que cumplen con estos requisitos bajo normas internacionales como las de la Farmacopea Europea o USP Herbal Monographs.

El uso concomitante de fitofármacos con analgésicos tradicionales puede generar interacciones farmacocinéticas o farmacodinámicas no deseadas. Por ejemplo, algunos flavonoides y alcaloides modulan enzimas del citocromo P450, afectando la metabolización hepática de opioides, AINEs y corticosteroides.

Estas interacciones no están bien caracterizadas en animales, lo que representa un área crítica de investigación para garantizar terapias combinadas seguras y eficaces.

Para que los fitofármacos sean aceptados como tratamientos veterinarios válidos, deben cumplir con principios de farmacovigilancia, incluyendo evaluación toxicológica, estudios de eficacia, farmacocinética y reportes de efectos adversos. A nivel mundial, sólo un pequeño porcentaje de productos herbolarios han sido evaluados bajo estas condiciones en animales.

Además, la validación científica requiere el diseño de ensayos clínicos controlados, doble ciego y con número estadísticamente significativo de pacientes animales. Esto implica costos, infraestructura técnica y colaboración interinstitucional, que muchas veces exceden las capacidades de los laboratorios naturales o empresas locales.

Los avances en biotecnología vegetal, técnicas de microencapsulación, y métodos de liberación controlada están abriendo nuevas oportunidades para el desarrollo de fitofármacos veterinarios con mayor biodisponibilidad y estabilidad. A medida que se generan más datos clínicos y se consolidan registros regulatorios adaptados, se espera una integración formal de estos productos como parte de protocolos analgésicos multimodales.

La armonización internacional de regulaciones, la educación profesional en farmacognosia veterinaria, y la inversión en investigación transnacional son factores clave para superar los desafíos actuales y posicionar a los fitofármacos como herramientas analgésicas validadas en la práctica clínica veterinaria.



Conclusiones y áreas de oportunidad

Los fitofármacos representan una vía prometedora y ética en el tratamiento del dolor animal. Su perfil de seguridad, eficacia demostrada en múltiples estudios y aceptación por parte del público general los posicionan como herramientas valiosas. No obstante, es indispensable ampliar la base de evidencia clínica y mejorar la biofarmacología para garantizar su uso estandarizado.

Bibliografía

- Amalraj, A., Pius, A., Gopi, S., & Gopi, S. (2016). Biological activities of curcuminoids, other biomolecules from turmeric and their derivatives: A review. *Journal of Traditional and Complementary Medicine*, 7(2), 205–233. <https://doi.org/10.1016/j.jtcme.2016.05.005>
- Amato, R., Pacifico, E., Lotito, D., Ciarcia, R., & De Cristofaro, R. (2025). Effects of a cannabinoid-based phytocomplex (Pain Relief™) on chronic pain in osteoarthritic dogs. *Animals*, 15(1), 101. <https://doi.org/10.3390/ani15010101>
- Anand, P., & Bley, K. (2011). Topical capsaicin for pain management: Therapeutic potential and mechanisms of action of the new high-concentration capsaicin 8% patch. *British Journal of Anaesthesia*, 107(4), 490–502. <https://doi.org/10.1093/bja/aer260>
- Bartels, E. M., Folmer, V. N., & Bliddal, H. (2015). Efficacy and safety of ginger in osteoarthritis patients: A meta-analysis. *Osteoarthritis and Cartilage*, 23(1), 13–21. <https://doi.org/10.1016/j.joca.2014.10.016>
- Brendler, T. (2021). From bush medicine to modern phytopharmaceutical: A bibliographic review of Devil's Claw (*Harpagophytum* spp.). *Pharmaceuticals*, 14(8), 726. <https://doi.org/10.3390/ph14080726>
- Brendler, T., Gruenwald, J., & Ulbricht, C. (2006). *Harpagophytum procumbens*—Devil's claw: An anti-inflammatory herb. *Clinics in Dermatology*, 24(4), 313–318. <https://doi.org/10.1016/j.clindermatol.2006.04.006>
- Calixto, J. B. (2000). Efficacy, safety, quality control, marketing and regulatory guidelines for herbal medicines (phytotherapeutic agents). *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*, 33(2), 179–189. <https://doi.org/10.1590/S0100-879X2000000200001>
- Ceylan, B., Ural, K., & Sucu, E. (2020). Effect of Devil's Claw (*Harpagophytum procumbens*) on chronic lameness in horses. *Equine Veterinary Journal*, 52(6), 805–810. <https://doi.org/10.1111/evj.13210>



- Chandran, B., & Goel, A. (2012). A randomized, pilot study to assess the efficacy and safety of curcumin in patients with active rheumatoid arthritis. *Phytotherapy Research*, 26(11), 1719–1725. <https://doi.org/10.1002/ptr.4639>
- Chan, K. (2003). Some aspects of toxic contaminants in herbal medicines. *Chemosphere*, 52(9), 1361–1371. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(03\)00471-3](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(03)00471-3)
- De Oliveira, A. M., Widmer, R., Silva, R. O., et al. (2022). Flavonoid-rich fraction from *Croton blanchetianus* leaves exerts peripheral and central analgesic effects. *Chemistry & Biodiversity*, 19(4), e202100853. <https://doi.org/10.1002/cbdv.202100853>
- Di Lorenzo, C., Dell'Agli, M., Colombo, E., et al. (2020). Phytotherapy and veterinary medicine: Regulation and clinical research. *Frontiers in Veterinary Science*, 7, 226. <https://doi.org/10.3389/fvets.2020.00226>
- Ekhande, S., Patil, R., & Aher, P. (2022). Herbal bioenhancers in veterinary phytomedicine. In A. Mishra & S. Bhatia (Eds.), *Drug delivery technology of herbal bioactives* (pp. 315–332). De Gruyter. <https://doi.org/10.1515/9783110746808-012>
- Elhoseny, S. M., Saleh, N. M., & Meshali, M. M. (2024). Self-nanoemulsion intrigues the gold phytopharmaceutical chrysin: In vitro assessment and intrinsic analgesic effect. *AAPS PharmSciTech*, 25(3). <https://doi.org/10.1208/s12249-024-02767-0>
- Fogle, J. E., & Zoran, D. L. (2021). Integrative pain management in feline chronic disease. *Journal of Feline Medicine and Surgery*, 23(5), 451–460. <https://doi.org/10.1177/1098612X20982150>
- Gomes, P. B., et al. (2020). Analgesic effects of *Lavandula angustifolia* essential oil in rats. *Phytotherapy Research*, 34(9), 2456–2462. <https://doi.org/10.1002/ptr.6716>
- Heinrich, M., Barnes, J., Gibbons, S., & Williamson, E. M. (2018). *Fundamentals of pharmacognosy and phytotherapy* (3rd ed.). Elsevier Health Sciences.
- Kumar, G. P., & Khanum, F. (2012). Neuroprotective potential of phytochemicals. *Pharmaceutical Biology*, 50(12), 1420–1434. <https://doi.org/10.3109/13880209.2012.684683>
- López-Alarcón, C., & Denicola, A. (2013). Evaluating the antioxidant capacity of natural products: A review on chemical and cellular-based assays. *Analytica Chimica Acta*, 763, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2012.11.051>
- Mahdi, J. G. (2010). Medicinal potential of willow: A chemical perspective of aspirin discovery. *Journal of Saudi Chemical Society*, 14(3), 317–322. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2009.12.001>



- Murbach, T. S., Glavits, R., Endres, J. R., Hirka, G., Vértési, A., Béres, E., & Szakonyiné, I. P. (2014). A toxicological evaluation of valerian root extract. *Food and Chemical Toxicology*, 63, 99–109. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2013.10.046>
- Nunes, K. M., Assis, F. F. V., Américo, Á. V. L. S., et al. (2020). Efficacy of phytopharmaceuticals from the Amazonian plant *Libidibia ferrea* for wound healing in dogs. *Frontiers in Veterinary Science*, 7, 244. <https://doi.org/10.3389/fvets.2020.00244>
- Odira, H. O., Mitema, S. O., Mapenay, I. M., et al. (2022). Anti-inflammatory, analgesic, and cytotoxic effects of the phytexponent: A polyherbal formulation. *Journal of Integrative Medicine*, 20(3), 219–228. <https://doi.org/10.1177/2515690X221082986>
- Patil, K. R., Mahajan, U. B., Unger, B. S., et al. (2019). Animal models of inflammation for screening of anti-inflammatory drugs. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(18), 4367. <https://doi.org/10.3390/ijms20184367>
- Rajendran, R., et al. (2018). Quercetin suppresses microglial activation in spinal cord injury. *Neuroscience Letters*, 676, 23–30. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2018.04.032>
- Reeves, M. P., & Hanson, P. D. (2018). Use of *Boswellia serrata* in veterinary osteoarthritis management. *Veterinary Medicine: Research and Reports*, 9, 69–76. <https://doi.org/10.2147/VMRR.S160316>
- Romero, B., Susperregui, J., & Sahagún, A. M. (2022). Use of medicinal plants by veterinary practitioners in Spain: A cross-sectional survey. *Frontiers in Veterinary Science*, 9, 1060738. <https://doi.org/10.3389/fvets.2022.1060738>
- Srivastava, J. K., Shankar, E., & Gupta, S. (2010). Chamomile: A herbal medicine of the past with a bright future. *Molecular Medicine Reports*, 3(6), 895–901. <https://doi.org/10.3892/mmr.2010.377>
- Wachtel-Galor, S., & Benzie, I. F. F. (Eds.). (2011). *Herbal medicine: Biomolecular and clinical aspects* (2nd ed.). CRC Press.
- Wang, Z., & Zhang, M. (2013). A review of the pharmacokinetics and bioavailability of dietary flavonoids. *Phytotherapy Research*, 27(8), 1103–1118. <https://doi.org/10.1002/ptr.4891>
- Williamson, E. M. (2001). Synergy and other interactions in phytomedicines. *Phytomedicine*, 8(5), 401–409. <https://doi.org/10.1078/094471101750286918>
- Zhang, L., Yang, R., & Guo, S. (2016). Curcumin and ginger extract improve post-operative pain management in dogs. *Journal of Veterinary Pharmacology and Therapeutics*, 39(2), 142–148. <https://doi.org/10.1111/jvp.12259>

Zoonosis parasitarias de perros y gatos: el vínculo silencioso entre mascotas y humanos

Socorro M. Salgado-Moreno.
Carlos A. Carmona-Gasca.
Sergio Martínez-González.
Ruth B. Vironchi-Lujan.
Mario Alberto Macías-Flores.





Resumen

En este capítulo, se explora cómo vivir cerca de perros y gatos, además de los beneficios emocionales que nos brindan, también pueden implicar un riesgo poco visible: las zoonosis parasitarias. Estas enfermedades, que se transmiten de los animales a los humanos, a menudo pasan desapercibidas, pero pueden causar desde malestares digestivos leves, hasta problemas graves como ceguera, alteraciones neurológicas o abortos espontáneos. El texto recuerda que médicos y veterinarios como Virchow o Schwabe ya habían señalado que la salud humana y animal no se pueden atender de manera aislada. Esta perspectiva, conocida hoy como “Una Sola Salud”, es crucial en países como México, donde alrededor del 70% de los hogares tienen al menos una mascota. Esta cercanía aumenta la exposición a parásitos de relevancia médica como *Toxocara*, *Giardia*, *Toxoplasma gondii*, *Ancylostoma* y *Dipylidium caninum*. Un aspecto preocupante es que muchas de estas infecciones no presentan síntomas evidentes, lo que complica su detección. Aunque hay métodos moleculares más precisos, su uso sigue siendo limitado en muchas comunidades rurales, donde además falta información epidemiológica. Otro factor importante es el desconocimiento general: muchos dueños no son conscientes de la necesidad de desparasitar a sus mascotas de forma adecuada y regular, lo que aumenta el riesgo de transmisión, especialmente en niños y personas con bajas defensas. Esta revisión enfatiza que para combatir las zoonosis parasitarias es fundamental implementar campañas educativas, facilitar diagnósticos y establecer políticas públicas sólidas que integren la salud humana, animal y ambiental, reconociendo que todas forman parte de una realidad.

Palabras clave: Parásitos de mascotas, enfermedades zoonóticas, parásitos en humanos.



Introducción

La forma en que entendemos las zoonosis parasitarias ha evolucionado con el tiempo, gracias a contribuciones fundamentales como las de Rudolf Virchow, William Osler, Calvin Schwabe y William Karesh. Rudolf Virchow (1821-1902) fue pionero de la patología moderna, siendo quien acuñó el término zoonosis y argumentó que no deberían existir distinciones entre la medicina humana y la veterinaria. Más adelante, William Osler popularizó el concepto de zoonosis en América del Norte en 1892. Luego, Calvin Schwabe extendió aún más el alcance de esta noción al enfatizar la importancia de las enfermedades animales transmisibles para la salud pública mundial. Finalmente, figuras como William Karesh han resaltado la necesidad de un enfoque interdisciplinario. Cada uno de estos investigadores, desde contextos históricos únicos, sentó las bases teóricas y prácticas del enfoque que hoy conocemos como UNA SOLA SALUD (One Health).

En las últimas décadas, el concepto de zoonosis ha cobrado mayor importancia en el ámbito de la salud pública, especialmente debido a su papel en la aparición de enfermedades de origen animal. Los cambios sociales y demográficos también han intensificado la importancia de adquirir y difundir el conocimiento sobre las zoonosis, ya que a medida que el humano irrumpe en ecosistemas con los cuales no tenía contacto, aumenta su exposición a nueva fauna y las enfermedades que esta pueda transmitir. Tradicionalmente, la atención sanitaria se ha centrado en las enfermedades bacterianas, o virales transmitidas por el ganado u otros animales de producción. Sin embargo, los parásitos zoonóticos procedentes de animales de compañía, principalmente perros (*Canis lupus familiaris*) y gatos (*Felis catus*), plantean un problema epidemiológico persistente que históricamente se ha subestimado.

En México, datos recientes del Instituto de Estadística y Geografía (2021) revelan que alrededor del 69% de los hogares tienen un animal (mascota) de compañía. Los cuales, además de ofrecer al humano beneficios emocionales y sociales que han quedado documentados, este fenómeno también ha aumentado notablemente la exposición de las personas a parásitos zoonóticos. Los perros y los gatos pueden ser huéspedes permanentes, intermediarios de una amplia variedad de agentes parasitarios de importancia médica, entre los que destacan *Toxocara spp.*, *Ancylostoma spp.*, *Giardia duodenalis*, *Dipylidium caninum* y *Toxoplasma gondii*.

Estas infecciones pueden afectar a los humanos de muchas maneras, que van desde trastornos digestivos leves hasta complicaciones graves como larvas migrantes viscerales y oculares, lesiones degenerativas migratorias, cambios neurológicos y abortos espontáneos. Sus efectos son especialmente graves para poblaciones vulnerables tales como niños, ancianos y personas inmunodeprimidas.

Aunque la mortalidad humana por parasitismo intestinal podría parecer baja, cada año se registran en el mundo hasta 100.000 muertes por amebiasis y cientos más por helmintiasis. Las infecciones parasitarias causadas por protozoarios y helmintos afectan



a alrededor de 3.500 millones de personas en todo el mundo y además son responsables de morbilidad clínica de 450 millones. Los niños son más vulnerables, ya que su sistema inmunológico aún está en desarrollo y suelen tener hábitos de higiene menos establecidos.

Por otro lado, el diagnóstico de estas enfermedades parasitarias enfrenta varios desafíos, muchas de ellas se presentan de manera subclínica o con síntomas poco específicos, lo que complica su detección temprana. Los métodos diagnósticos, como el análisis de las heces (coprológicos y coproparasitológicos), tienen limitaciones en cuanto a sensibilidad y especificidad. Aunque las herramientas moleculares son más precisas, todavía no están ampliamente disponibles en los entornos clínicos rurales del país.

En el contexto mexicano, la vigilancia epidemiológica y la investigación sobre zoonosis parasitarias transmitidas por mascotas siguen siendo limitadas, fragmentadas y centradas principalmente en entornos urbanos o en animales institucionalizados, como los albergues. Esta visión restringida excluye a poblaciones de mascotas domiciliadas o semiconfinadas en comunidades rurales, donde las condiciones sanitarias y el acceso a los servicios veterinarios son precarios. Este vacío de información limita la toma de decisiones en temas de salud pública y oculta el verdadero alcance del problema.

Los animales de compañía, especialmente perros y gatos, desempeñan un papel importante en la vida de un humano, no solo por ser fuente de afecto y compañía, sino también como potenciales vectores de enfermedades zoonóticas parasitarias. Las relaciones humano-animales no son apariciones recientes, de hecho, la Organización Mundial de la Salud Animal (OIE por sus siglas en inglés) ha enfatizado la importancia del bienestar animal, delineando cinco libertades fundamentales que deben ser garantizadas: libertad de hambre y sed; de dolor, lesión y enfermedad; de molestias físicas y térmicas; de temor y angustia; y de manifestar un comportamiento normal. Estas libertades reflejan la responsabilidad ética y sanitaria que los humanos deben tener hacia los animales bajo su cuidado o tutela.

Se han identificado cuatro fallas humanas que describen el trato hacia los animales: ignorancia, inexperiencia, incompetencia e indolencia. Estas categorías subrayan la necesidad de educación, capacitación, formación y compromiso para garantizar el bienestar animal y, por consecuencia, la salud pública. La domesticación de animales ha sido una constante en la evolución humana y su presencia en los hogares modernos ha generado vínculos muy cercanos. Sin embargo, esta cercanía también ha incrementado el riesgo de transmisión de enfermedades parasitarias con potencial zoonótico aparte de los ya mencionados anteriormente, en donde los perros y gatos pueden ser reservorios, incluyendo *Leishmania spp.*, *Echinococcus spp.* y *Dirofilaria immitis*.

Dentro de la perspectiva de Una Sola Salud, es fundamental tomar en cuenta la contribución de las mascotas a la cadena epidemiológica de los parásitos zoonóticos. Esto hace referencia a la conexión entre la salud humana, animal y ambiental. Por lo tanto,



estar consciente de este fenómeno será necesario para desarrollar políticas públicas útiles, programas de control sanitario y medidas educativas que permitan concientizar a la población.

La falta de conocimiento sobre las enfermedades es preocupante. Esta brecha en el conocimiento destaca la necesidad de campañas informativas y de concientización de estas amenazas para los propietarios de mascotas y para los profesionales de la salud. Un ejemplo claro de esta problemática ha sido presentada por investigadores de la Universidad Autónoma de Nayarit (2020) en donde en la población de San Pedro lagunillas se identificaron 19 géneros de parásitos entéricos en perros, así como en otra investigación en el V Congreso de Abanico Veterinario Internacional (2024) al año siguiente se encontró que el 40% de los perros domésticos de una población costera de Nayarit fueron positivos a filariosis, una enfermedad parasitaria que se transmite a través de mosquitos del género *Culex* y *Aedes*, que son comunes en la región. Estos resultados ponen de manifiesto la circulación activa de parásitos en la sangre de los animales domésticos (mascotas) y destacan el riesgo potencial para la salud humana en áreas en donde estos vectores son abundantes y las estrategias de vigilancia sanitaria son limitadas. Además, resalta la necesidad de incluir las enfermedades transmitidas por vectores en los planes locales de prevención de zoonosis, especialmente en regiones con condiciones climáticas y ecológicas que favorecen su transmisión.

Una amenaza subestimada: desconocimiento persistente

Las zoonosis parasitarias que se transmiten a través de animales de compañía (mascotas) son un tema epidemiológico de gran importancia, pero todavía no se han informado y tratado lo suficiente en la salud pública actual. Se estima que más del 60% de las enfermedades infecciosas que afectan a los humanos tienen un origen zoonótico y cerca del 35%, es decir, alrededor de 170 enfermedades y afecciones, se hallan vinculadas a los parásitos. Los perros y los gatos, al ser mascotas que se encuentran en el mismo entorno y muy cercanos a los humanos, ya sea por convivencia directa o por contaminación ambiental con sus heces, orina, secreciones, pelo e incluso a través de vectores como la pulga y la garrapata.

Relevancia epidemiológica y especies parasitarias de interés en perros y gatos

Investigaciones epidemiológicas han demostrado que los helmintos zoonóticos que afectan el intestino de perros y gatos domésticos son altamente peligrosos para la salud pública. Esto se debe a que el manejo sanitario de los animales y algunas de las medidas en el manejo de sus heces son bastante deficientes, más aún si se considera que estos animales en la mayoría de los casos realizan sus necesidades en las vías públicas y parques de la comunidad.



La contaminación del medio ambiente con huevos y larvas de parásitos en las heces de perros y gatos al desecarse y pulverizarse representa un riesgo de salud pública. Estos supuestos ponen en riesgo, sobre todo a los niños, debido a la fácil exposición que tienen a actividades como jugar con mascotas, contacto con el suelo y pastos, además de la geofagia. Existe un gran número de zoonosis parasitarias descritas en el perro y gato, pero solo enfocaremos nuestra atención en las zoonosis parasitarias más frecuentes.

Protozoarios

Cryptosporidium parvum es una especie de parásito perteneciente al grupo de las coccidias, de baja especificidad del huésped que ocasionalmente parasita a perros y gatos.

Cryptosporidium canis se encuentra principalmente en perros, mientras que *C.felis* infecta principalmente a gatos, pero ambos también se han detectado en terneros y seres humanos. Los ooquistes de *Cryptosporidium*, son infecciosos tan pronto como se excretan con las heces, lo que convierte la contaminación fecal-oral en una vía común de infección. Dichos ooquistes son muy pequeños y no se detectan fácilmente en el agua. Si bien la mayoría de las personas con una infección por *Cryptosporidium* experimenta una enfermedad leve y auto limitada, con presentación de diarrea acuosa, profusa, que comienza de explosivamente de unas dos semanas después de la infección y que suele durar de 8 hasta 20 días, a menudo hay dolor abdominal, náusea, vómito, fiebre leve menor de 39°C y pérdida de peso.

Las infecciones pueden ser graves o potencialmente letales para personas con sistemas inmunitarios debilitados. Los niños pequeños y las personas con VIH/SIDA tienen mayor riesgo de enfermedad grave, llegando a presentar diarrea profusa y deshidratación grave, lo cual puede desencadenar la muerte. En algunos pacientes se ha encontrado que el parásito ha invadido el tracto respiratorio y biliar. El modo de transmisión es por agua y alimentos contaminados con materia fecal de individuos infectados, el contacto directo con las heces infectadas o la ingestión de agua de lagunas contaminadas con descargas de alcantarillado.

Para su diagnóstico es importante diferenciar clínicamente las diarreas debidas a *Cryptosporidium*. La sospecha diagnóstica se establece por la sintomatología, antecedentes epidemiológicos y la confirmación se obtiene por el hallazgo de los quistes en las deposiciones del paciente. Los quistes son difíciles de observar por su reducido tamaño (2,5 micras de diámetro), por lo que se ocupan técnicas de concentración como la de Sheather y la observación bajo un contraste de fase de personal experto. La tinción de Gimsa o con azul de metileno facilita su observación. La tinción de Ziehl-Neelsen tiñe los quistes de rojo. También se utilizan otras tinciones como Safranina-azul de metileno. El



diagnóstico serológico ELISA, se ha refinado y muestra niveles de sensibilidad y especificidad. Sin embargo, los anticuerpos pueden aparecer demasiado tarde para fines clínicos, dejando esta prueba para estudios epidemiológicos.

Toxoplasmosis

Provocada por el protozooario *Toxoplasma gondii*, los gatos son huéspedes definitivos y diseminan ooquistes en sus heces. Es un parásito que depende de la ausencia o existencia de felinos. Los hospedadores intermediarios, entre los que se incluyen el perro, pueden infectarse por ingestión de ooquistes esporulados eliminados por félidos o de bradizoitos (quistes) de los tejidos de cualquier animal de sangre caliente.

Este parásito puede transmitirse a los humanos de manera congénita (aunque es raro) o adquirida, principalmente a través de la ingestión de carne cruda o mal cocida, especialmente de cerdo y cordero. También puede ocurrir por la ingestión accidental de ooquistes que se encuentran en el suelo, agua o alimentos contaminados con heces de gatos infectados. Los gatos son los hospedadores definitivos del parásito y, aunque excretan millones de ooquistes en un corto periodo, estos pueden sobrevivir durante meses en condiciones adecuadas, contaminando pastizales y facilitando el ciclo de transmisión.

Varios estudios han demostrado que la presencia de gatos, la manipulación de carne cruda, el consumo de productos que no han sido cocinados adecuadamente y el contacto con suelos contaminados son factores clave para la infección en humanos. Por ejemplo, se ha notado una mayor seroprevalencia en mujeres embarazadas que consumen carne poco cocida o que tienen gatos, así como en personas que trabajan con carne, como los inspectores de mataderos. También se ha documentado la participación indirecta de insectos como moscas y cucarachas en la propagación de ooquistes.

En cuanto al diagnóstico, se emplean métodos directos (que son poco sensibles) y serológicos como ELISA, IFI y Sabin-Feldman, poniendo especial atención en la detección de anticuerpos IgM, IgG, IgA e incluso IgE para diferenciar entre infecciones agudas y crónicas, lo cual es crucial en el contexto del embarazo. Además, se utiliza el análisis molecular mediante PCR, especialmente en líquidos fetales y sueros neonatales, así como pruebas de avididad de IgG. En los gatos, la detección de ooquistes en heces es limitada debido al corto periodo de excreción, por lo que se prefiere el diagnóstico serológico.

Hay una gran variedad de pruebas serológicas disponibles para un análisis más específico, pero es fundamental recordar que la serología por sí sola no es concluyente. Entre las pruebas serológicas se incluyen la hemoaglutinación directa, hemoaglutinación indirecta, aglutinación modificada, aglutinación látex, ELISA o inmunofluorescencia indirecta. La mayoría de estas pruebas miden niveles de IgG que no se desarrollan hasta dos semanas tras la infección, pero que permanecen elevados durante varios años o toda la vida del animal. La técnica de Western blotting puede ser útil, sobre todo para la



detección de infecciones congénitas.

Para prevenir el contagio por ooquistes, las personas que viven con gatos deben tomar precauciones. Es fundamental limpiar las heces a diario (usando guantes) y desecharlas correctamente, asegurándose de enjuagar los recipientes con agua caliente para evitar que los ooquistes esporulen. También evitar que los gatos, especialmente los jóvenes, practiquen la caza. Alimentar a los gatos con productos cocidos o envasados. Además, se recomienda tomar medidas de protección en actividades como la jardinería usando guantes y lavándose las manos después. Lavar correctamente las frutas que crecen cerca del suelo y comer carne bien cocida. También es crucial controlar la presencia de vectores mecánicos como las moscas y cucarachas.

Giardiasis

Es una enfermedad entérica de distribución mundial, en México se estima que alrededor de 9 millones de personas están infectadas con este parásito. La causa de la enfermedad en el hombre, animales domésticos y otros mamíferos es el protozoo flagelado *Giardia intestinalis*, (también denominada *Giardia duodenalis* o *Giardia lamblia*) que se localiza en el intestino delgado de distintos hospederos (Imagen 1). Este parásito posee dos estadios evolutivos, el trofozoíto (15x10 µm) y el quiste (10x8 µm), que es la forma de resistencia en el medioambiente. La infección se da a través de la ingestión de quistes infecciosos; es más común en niños que en adultos, también puede presentarse en forma epidémica, siendo común en instituciones tales como orfanatos y guarderías infantiles. La dosis media infectante para el hombre es de solo 10 quistes, pero posteriormente algunos enfermos pueden eliminar 900 millones de quistes por día en las heces; la eliminación de quistes puede ser intermitente. Así también *Giardia intestinalis* es uno de los causantes de la “diarrea del turista”.

La giardiosis puede manifestarse en forma aguda, presentando: náuseas, vómitos, diarrea acuosa, dolor abdominal, anorexia marcada, meteorismo, flatulencia. Generalmente es autolimitada durando de 3 a 4 días. Sin tratamiento, puede evolucionar a una forma subaguda, que persiste 2 semanas o meses, incluso convertirse en afección crónica. En los casos crónicos, los síntomas más comunes son malestar abdominal y dolor epigástrico difuso sin horario ni relación con las comidas. La diarrea se vuelve pastosa de mal olor, a menudo alternando con episodios de estreñimiento, y se observa una baja importante de peso. Los síntomas remiten y reaparecen en intervalos variables.

La enfermedad puede transmitirse con mayor frecuencia a través de la ingesta de agua contaminada con quistes (heces). También mediante transmisión directa por la mano de la persona infectada fecal-oral directa. También manejo inadecuado de las heces de las mascotas contaminadas; esto ocurre particularmente en niños y personal manipulador de alimentos. No obstante, como los quistes son susceptibles a factores



ambientales como la desecación, las temperaturas altas o bajas y la luz solar, su sobrevivencia en los alimentos no es prolongada. Las epidemias se han presentado mayormente por la contaminación del agua potable, agua de piscinas, lagunas y estanques. Diagnóstico: Generalmente se establece por el hallazgo de los parásitos en heces del paciente. En las heces formadas predominan los quistes y en las heces diarreicas los trofozoitos.

Los métodos de concentración son ideales para la demostración de quistes; sin embargo, deberán hacerse de manera seriada por al menos tres días consecutivos, ya que estos se liberan de manera intermitente. Para los trofozoitos lo ideal es tamizaje de muestras frescas, de manera simultánea donde se sospecha del parásito por su típico movimiento flagelar, y también muestras fijadas y teñidas en donde se identifica al parásito por sus características morfológicas. Algunos especialistas recomiendan el análisis hasta de seis muestras. También es recomendada la prueba de ELISA para la demostración de antígenos de *G. Intestinalis*. Aunque se ha informado sobre la presencia de anticuerpos y de reacciones de inmunidad mediada por el paciente, las pruebas inmunológicas poco específicas ya que no permiten diferencias entre una infección presente o de infecciones anteriores. Lo más reciente es el PCR que encuentra secuencias específicas de ADN de *Giardia*.

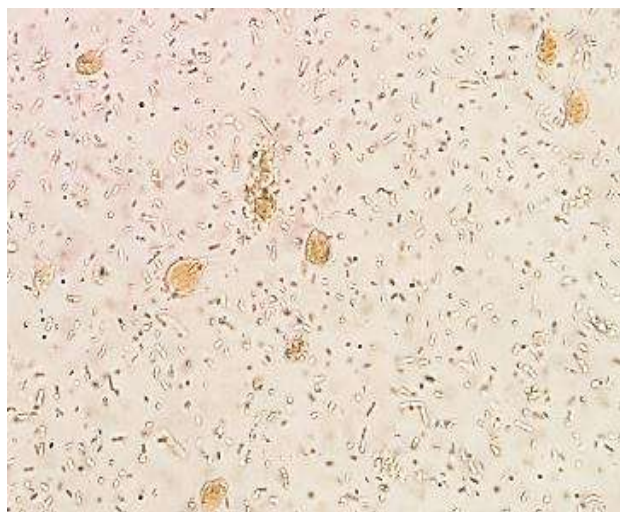


Imagen 1. Ooquiste de Giardia, observado en microscopio con objetivo de 40x (foto original).

Cestodos

Dipilidiosis

Provocada por *Dipylidium caninum*, que puede llegar a medir 10 a 70 cm de largo y alrededor de 3 mm de ancho, con un rango de 60 a 175 proglótidos. Sus huéspedes definitivos son principalmente perros, gatos, y algunos felídeos y cánidos silvestres. Sus



huéspedes intermediarios son las pulgas *Ctenocephalides canis* y *C. Felis*. También puede actuar como huésped intermediario la pulga del hombre (*Pulex irritans*) y el piojo del perro (*Trichodectes canis*).

Esta parasitosis se transmite por la ingestión accidental de pulgas infectadas. Afecta principalmente a niños y se manifiesta con síntomas digestivos inespecíficos. Los proglótidos grávidos y desprenden del cuerpo del cestodo (cadena de segmentos) y se expulsan a través del ano, ya sea por propia movilidad o junto con las heces.

Una vez en el medio ambiente, los proglótidos se desintegran y liberan los huevos, que deben ser ingeridos por las larvas de pulgas para continuar el ciclo evolutivo (Imagen 2). Los huevos eclosionan en el intestino de la larva de pulga, y los embriones (oncosferas) penetran en la cavidad celómica, donde se transforman en cisticercoides. La larva de la pulga sigue desarrollándose hasta adulto. Cuando un perro, un gato o un niño comen una pulga infectada, el cisticercioide se libera en el intestino delgado tras la digestión, se adhiere a la mucosa y se convierte en parásito adulto a los 20 días.

La dipilidiasis humana, por sus características epidemiológicas, afecta principalmente a bebés y niños pequeños. Los síntomas incluyen molestias digestivas, diarrea y cólicos, irritabilidad, cambios en el apetito e insomnio; a menudo la infección no presenta síntomas. La eliminación de los proglótidos móviles es el signo que llama la atención de los padres.

La dipilidiasis es poco frecuente en humanos. Sin embargo, los responsables de la salud pública y el control de zoonosis deben ser conscientes del riesgo de resurgimiento de esta cestodiasis.



Imagen 2. Huevo de *Dipylidium caninum*, observado en microscopio con objetivo de 40x (foto original).

Diagnóstico: En el hombre y los animales, el diagnóstico se basa en la observación macroscópica de los proglótidos móviles y microscópica de los parásitos de los huevos en los proglótidos grávidos. Ningún otro cestodo tiene las características morfológicas de *D. caninum*, el cual es de color blanquecino y tiene una forma de semilla de melón (cuando



esta relajado) o de arroz cocido (contraído). Es muy ágil y a menudo se ve deslizándose en el pelaje de los animales infectados. Para observar proglótidos o huevos, es más efectivo examinar material recogido de la zona perianal que analizar las heces.

Nematodos

Toxocariasis

Causada por *Toxocara canis*, *T. cati*, parásito que vive en el intestino delgado del perro y de varios canidos silvestres. Llega a medir 9 a 18 cm de largo en el caso (ascárido hembra) y 4 a 10 cm (ascárido macho). Los huevos contienen un cigoto y se eliminan en la materia fecal. Son extremadamente resistentes a los factores ambientales y en suelos húmedos, sombríos y frescos suelen mantenerse viables durante varios años (Imagen 3). En recientes investigaciones se ha comprobado que algunos resisten la desecación. Cuando el hombre u otros huéspedes canidos, roedores, cerdos y corderos ingieren los huevos infectantes, las larvas se liberan en el intestino, e inician una migración somática y permanecen en los tejidos como larvas hipobióticas, produciendo síndromes clínicos como larva migrans visceral y ocular, con riesgo de ceguera en humanos. Las larvas pueden migrar a otros órganos y causar daños específicos, pudiendo desarrollar larva migrans visceralis, larva migrans ocular y toxocarariasis encubierta.



Imagen 3. Huevo de *Toxocara canis*, observado en microscopio con objetivo de 40x (foto original).

Las larvas producen pequeños túneles de lesiones traumáticas, inflamatorias o necróticas durante su migración, con una respuesta granulomatosa eosinofílica y en algunos casos con abscesos cuando la larva se fija en un lugar. Los primeros órganos que atraviesan en su migración son el hígado y el pulmón. Las manifestaciones clínicas dependen del número de larvas y su localización. Se ha reportado que los síntomas pueden recurrir durante varios meses. Puede presentarse de forma grave con accesos asmáticos, fiebre alta, anorexia, artralgia, mialgia, náuseas, vómito, hepatomegalia y linfadenopatía. La



forma ocular pocas veces viene precedida por la forma visceral; la infección es unilateral, provocando la disminución progresiva de la visión y su pérdida repentina. La forma nerviosa se caracteriza por meningoencefalitis. Habiendo sintomatología como irritabilidad, trastornos menores de la conducta, convulsiones y deficiencias motoras. La infección intestinal con parásitos adultos es muy rara.

Ancilostomatidosis

Producida por *Ancylostoma caninum*, *Ancylostoma ceylanicum* y *Uncinaria spp.* infectan a perros, gatos, respectivamente. La principal fuente de infección para las especies en riesgo son los pisos, agua y tierra contaminados con heces de animales infectados. Su ciclo de vida comprende su desarrollo en el medio ambiente, donde los huevos eliminados por las heces se convierten en larvas infectantes (Imagen 4). Las larvas pueden penetrar la piel humana, causando lesiones cutáneas migratorias, alcanzando los pulmones a través del torrente sanguíneo y luego migran al intestino, donde se transforman en adultos. Se ha demostrado que pueden causar enteritis eosinofílica, síntomas digestivos y en casos graves anemia. Su ciclo de vida facilita su transmisión en condiciones de higiene deficiente o convivencia estrecha con animales infectados.

Es un problema de alta prevalencia y amplia distribución mundial, sobre todo en regiones tropicales y subtropicales, donde las condiciones climáticas (temperaturas de 29° C y humedad alrededor del 87%) son favorables para que se desarrolle este parásito. Además, las costumbres culturales, en donde la gente suele andar descalza (sin protección en los pies) en suelos, playas y parques, representan un serio peligro, ya que pueden estar contaminados con heces y ocasionar severos daños a la población más vulnerable. A nivel mundial se calcula que aproximadamente existen 1,277 millones de personas infectadas por *Ancylostoma*.

Sobre el diagnóstico de *Ancylostoma caninum* no se puede realizar por la presencia de huevos en las heces ya este parásito no alcanza la madurez sexual en el hombre. La observación de úlceras aftosas del íleon terminal, ciego, colón, asociados con manifestaciones clínicas ayudan al diagnóstico. Los ensayos de ELISA, han demostrado anticuerpos específicos de las clases IgG e IgE con productos secretorios y excretorios del parásito. La prueba de *Western blot*, aparentemente es más sensible y específica, con un antígeno de 68kDa.

El control de estas parasitosis requiere acciones integradas incluyendo un esquema de desparasitación regular de las mascotas, control de animales callejeros, mejoras en saneamiento ambiental y educación sanitaria sobre las rutas de transmisión.



Imagen 4. *Ancylostoma caninum* observado en microscopio 40x (foto original).

Filariosis

Causada por *Dirofilaria immitis* (gusano del corazón de los perros). Las filarias, que son nematodos de la familia *Onchocercidae*, representan una amenaza global tanto para los animales como para los humanos (Imagen 5). Es transmitida por 60 especies de mosquitos del género *Aedes*, *Culex* y *Anopheles*. Afecta principalmente a perros, cánidos salvajes y otros animales, incluyendo felinos, mustélidos, úrsidos, caballos y humanos, clasificándose como una zoonosis. Aunque muchos mamíferos son infectados, no todos muestran síntomas, pero algunas especies pueden desarrollar enfermedades graves con pronósticos fatales.

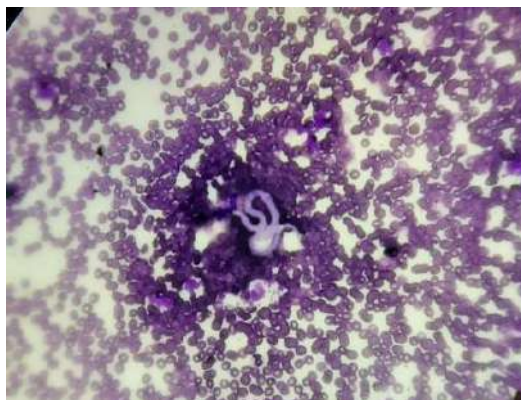


Imagen 5. Micro filaria en sangre de perro periférica con hemo colorante 40x (foto original).

El aumento en la exposición de los humanos a los perros destaca la necesidad de reducir la prevalencia y prevenir la propagación, ya que estos actúan como reservorios. *Dirofilaria immitis* es notable por su capacidad de infectar a los humanos de manera accidental, causando lesiones pulmonares, en los ojos, el cerebro o el testículo, sin llegar



los parásitos a la etapa adulta. Aunque generalmente la infección es asintomática, puede confundirse con otras enfermedades. La transmisión se produce a través de los animales infectados y los mosquitos (vectores), lo que significa que su distribución depende de los factores climáticos, ecológicos y humanos. Otra especie importante es *Dirofilaria repens*, que también afecta a los humanos y ha mostrado una preocupante expansión geográfica en las últimas décadas.

Desde la óptica de la salud pública, la falta de vigilancia epidemiológica y el su diagnóstico hacen de la filariasis una enfermedad “desatendida” y emergente. Los profesionales de la medicina humana y veterinaria se enfrentan a varios desafíos, como la dificultad para distinguir entre especies de filarias que son morfológica y clínicamente similares; la escasez de pruebas diagnósticas que sean sensibles, específicas y accesibles; el bajo nivel de conciencia sobre el riesgo zoonótico, incluso en áreas endémicas; y los efectos del cambio climático, que amplían la distribución geográfica y la actividad de los vectores.

Para los veterinarios, es esencial implementar estrategias de prevención y control que se centren en el diagnóstico temprano, el tratamiento oportuno y la vigilancia de la infección en animales domésticos. Las pruebas de laboratorio, como la técnica de gota gruesa y el método de concentración modificada: Knott, permiten la visualización microscópica de microfilarias en sangre periférica. Estos hallazgos pueden complementarse con pruebas inmunológicas (detección de antígenos) o moleculares (PCR), que ofrecen una mayor sensibilidad para confirmar la infección.

Implicaciones para la salud pública

Las enfermedades parasitarias zoonóticas de perros y gatos representan un desafío de salud pública considerable y complicado. Esto se debe no solo a la variedad de agentes que están involucrados, sino también a lo fácil que es para ellos propagarse tanto en áreas urbanas como rurales. La cercanía y la interacción frecuente entre las personas y sus mascotas, junto con la falta de medidas preventivas efectivas y una baja percepción del riesgo, contribuyen a que estemos constantemente expuestos a parásitos que son importantes desde el punto de vista médico.

En México y en muchos otros países de América Latina, los factores sociales y ambientales son fundamentales para entender cómo se perpetúan estas zoonosis. Elementos como la tenencia irresponsable de mascotas, el hacinamiento, la pobreza, la falta de infraestructura sanitaria, el escaso acceso a servicios veterinarios crea un ambiente ideal para que los parásitos se transmitan entre animales y personas. Esta problemática se intensifica en áreas alrededor de las urbes, donde perros y gatos, muchos de ellos sin control sanitario, deambulan libremente y defecan en espacios públicos, sin que existan mecanismos efectivos para su recolección o neutralización.



Además, hay una falta de conciencia colectiva sobre el potencial zoonótico de estas enfermedades. Muchos estudios han mostrado que gran parte de la población no está al tanto de la necesidad de desparasitar a sus mascotas de manera regular, así como de la importancia de evitar el contacto directo con heces de animales, lo que aumenta el riesgo de exposición.

Desde una perspectiva epidemiológica, muchas de estas enfermedades no están sujetas a declaración obligatoria, lo que significa que su verdadera carga se subestima en los sistemas de salud pública. Esta falta de notificación dificulta el diseño de políticas fundamentadas en evidencia y retrasa la implementación de programas de control a gran escala. Además, la ausencia de datos que conecten la medicina humana y veterinaria crea una visión fragmentada del problema, lo que complica el enfoque integral que estas enfermedades requieren.

Por otro lado, la creciente evidencia de resistencia de los parásitos a los tratamientos antiparasitarios convencionales, junto con la posibilidad de coinfecciones, presenta nuevos retos para los sistemas de salud pública y la medicina veterinaria. Estas situaciones exigen un enfoque preventivo que sea sostenido, multidisciplinario y adaptado a las realidades locales.

En este contexto, poner en práctica el enfoque de Una sola salud no solo es oportuno, sino que se vuelve esencial. Este modelo fomenta la colaboración activa entre médicos, veterinarios, epidemiólogos, ambientalistas y educadores para enfrentar los problemas de salud que compartimos entre humanos, animales y el medio ambiente. Las enfermedades parasitarias zoonóticas son un claro ejemplo de patologías que no conocen fronteras entre especies y disciplinas, por lo que su control requiere una coordinación intersectorial sólida y continua.

Diagnóstico y vigilancia

El diagnóstico de las zoonosis parasitarias en animales de compañía y en humanos se fundamenta principalmente en técnicas coprológicas y copropratoscópicas convencionales, como frotis fecal húmedo, flotación, sedimentación, tinciones específicas y ELISA. Aunque estas técnicas son accesibles y económicas, tienen limitaciones significativas en cuanto a sensibilidad, especialmente cuando la carga parasitaria es baja o la excreción de huevos o quistes ocurre de manera intermitente.

En las últimas décadas, hemos visto el seguimiento de herramientas moleculares como reacción en cadena de la polimerasa (PCR), el análisis de secuencias de ADN ribosomal (18s, Its1) y marcadores mitocondriales (COI). Estas innovaciones han mejorado la precisión en los diagnósticos y a la vez han facilitado la identificación de infecciones mixtas. Sin embargo, estas tecnologías no están ampliamente estandarizadas para su uso rutinario en clínicas o en el ámbito de la salud pública.



Brechas en el contexto mexicano

En México, las investigaciones sobre parasitosis zoonóticas en perros y gatos, como se mencionó anteriormente, se han enfocado principalmente en ambientes urbanos o en animales de refugios, lo que marca una notable falta de representación de las poblaciones que viven en hogares, en condiciones semiurbanas o en áreas rurales. Este enfoque metodológico sesgado limita la validez externa de los datos y no permite la creación de políticas públicas fundamentadas en evidencia sólida.

Del mismo modo, se carece de estadísticas epidemiológicas nacionales sistematizadas sobre la prevalencia y distribución de varias enfermedades zoonóticas en todo tipo de entornos. Algunos lugares marginados y zonas apartadas del país podrían tener índices alarmantes sin que se hayan realizado estudios al respecto. Se requiere de una visión más amplia e integral que incluya todos los sectores de la población canina y felina para comprender cabalmente la epidemiología de estas enfermedades y así prevenir su propagación.

Asimismo, tanto la sociedad como los profesionales de la salud, ya sea el personal médico de humanos o médicos veterinarios, carecen notoriamente de concientización sobre la importancia de las enfermedades zoonóticas parasitarias. Esto deriva en un subdiagnóstico clínico, la práctica de la automedicación inadecuada y la falta de implementación de medidas preventivas como esquemas de desparasitación regular o el correcto manejo de las heces de perros y gatos.

El escaso entendimiento público sobre este tema ha llevado a un descuido generalizado de las prácticas preventivas básicas en la interacción hombre-animal generando un aumento del riesgo de transmisión zoonótica inadvertida. No obstante, una mayor sensibilización podría promover actitudes más responsables y así reducir la carga tanto animal como humana de estas infecciones comunes, pero a menudo infravaloradas.

Riesgo sanitario y social

Los parásitos zoonóticos discutidos aquí tienen un impacto grave en grupos vulnerables como niños, ancianos y personas con sistemas inmunitarios comprometidos. Algunas de estas infecciones pueden dejar secuelas permanentes como ceguera (toxocariasis ocular), abortos espontáneos (Toxoplasmosis congénita) o desnutrición crónica (giardiasis, anquilostomiasis). Esta carga de enfermedades no solo afecta al individuo enfermo, sino que también repercute en su familia, en el sistema de salud y en toda la comunidad, ejerciendo mayor presión sobre los ya limitados recursos disponibles para los grupos más desfavorecidos.



Conclusiones

Las zoonosis parasitarias que se transmiten a través de perros y gatos representan un reto constante y a menudo subestimado para la salud pública. Aunque hay progresos en medicina veterinaria y humana, lo que ha permitido comprender mejor los ciclos biológicos y los mecanismos de transmisión de estos parásitos, todavía nos encontramos con barreras estructurales, sociales y técnicas que complican su control. En lugares como México, la alta tenencia de mascotas, las prácticas inadecuadas de desparasitación, el contacto tan estrecho entre humanos y animales, y las deficientes condiciones sanitarias en espacios públicos crean un entorno propicio para la propagación de helmintos, protozoarios y nemátodos que pueden producir enfermedad.

Bibliografía

- Cooper, P. J. (2008). Toxocara canis infection: an important and neglected environmental risk factor for asthma? *Clinical & Experimental Allergy*, 38(4), 551-553. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2222.2008.02934.x>
- Deplazes, P., Staebler, S., & Gottstein, B. (2006). Reisemedizin parasitärer Erkrankungen des Hundes. *Schweizer Archiv Für Tierheilkunde*, 148(9), 447-461. <https://doi.org/10.1024/0036-7281.148.9.447>
- Di Labio, E., Regula, G., Steiner, A., Miserez, R., Thomann, A., & Ledergerber, U. (2007). Antimicrobial Resistance in Bacteria from Swiss Veal Calves at Slaughter. *Zoonoses And Public Health*, 54(9-10), 344-352. <https://doi.org/10.1111/j.1863-2378.2007.01071.x>
- Global disease emergence. *Emerging Infectious Diseases*, 11(7), 1000-1002. <https://doi.org/10.3201/eid1107.050194>
- Kahn, L. H. (2006). Confronting Zoonoses, Linking Human and Veterinary Medicine. *Emerging Infectious Diseases*, 12(4), 556-561. <https://doi.org/10.3201/eid1204.050956>
- Lee, A. C., Schantz, P. M., Kazacos, K. R., Montgomery, S. P., & Bowman, D. D. (2010). Epidemiologic and zoonotic aspects of ascarid infections in dogs and cats. *Trends In Parasitology*, 26(4), 155-161. <https://doi.org/10.1016/j.pt.2010.01.002>
- Núñez, C. R., Martínez, G. D. M., Arteaga, S. Y., Macotela, M. P., Montes, P. B., & Durán, N. R. (2013). Prevalence and Risk Factors Associated with Toxocara canis Infection in Children. *The Scientific World JOURNAL*, 2013(1). <https://doi.org/10.1155/2013/572089>
- Overgaauw, P. A., & Van Knapen, F. (2012). Veterinary and public health aspects of Toxocara spp. *Veterinary Parasitology*, 193(4), 398-403. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2012.12.035>



- Prato-Previde, E., Ricci, E. B., & Colombo, E. S. (2022). The Complexity of the Human–Animal Bond: Empathy, Attachment and Anthropomorphism in Human–Animal Relationships and Animal Hoarding. *Animals*, 12(20), 2835. <https://doi.org/10.3390/ani12202835>
- Sánchez-Klinge LE, Calvo RP, Mutis BCA. (2011). *Dirofilaria immitis*: una zoonosis presente en el mundo. *Revista Medicina Veterinaria*. 22:57-68. <http://www.scielo.org.co/pdf/rmv/n22/n22a07.pdf>
- Sharma, R., Singla, L. D., & Gill, J. P. S. (2017). Parasitic zoonoses in India: An overview of their status, distribution, and public health implications. *Trends in Parasitology*, 33(11), 790–804. <https://doi.org/10.1016/j.pt.2017.07.003>
- Zinsstag, J., Schelling, E., Waltner-Toews, D., & Tanner, M. (2011). From “One Medicine” to “One Health” and systemic approaches to health and well-being. *Preventive Veterinary Medicine*, 101(3–4), 148–156. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2010.07.003>

Leptospirosis, avances de la enfermedad y del agente causal.

Luz Olivia Castillo Sánchez.
Alejandro de la Peña Moctezuma.
Gerardo Uriel Bautista Trujillo.
Carlos Enrique Ibarra Martínez.
Sergio Martínez González.
Bladimir Peña Parra.
Carlos Alfredo Carmona Gasca.





Resumen

La leptospirosis es una enfermedad zoonótica de distribución mundial causada por bacterias del género *Leptospira*, que afecta a humanos y mamíferos domésticos y silvestres. Los roedores son los principales reservorios, excretando la bacteria en la orina durante largos periodos. La enfermedad es más frecuente en regiones cálidas y húmedas, con suelos alcalinos y presencia de agua superficial. *Leptospira* es una espiroqueta helicoidal, microaerófila, sensible a la desecación, luz solar y desinfectantes. Su clasificación tradicional distingue especies patógenas (*L. interrogans*), saprófitas (*L. biflexa*) e intermedias, aunque estudios genéticos recientes han identificado 64 especies agrupadas en cuatro subclados (P1, P2, S1, S2). La diversidad genética y serológica incluye más de 260 serovariedades, con serogrupos como Hardjo, Pomona, Tarassovi y Grippotyphosa, relevantes en bovinos. La patogenia involucra hemolisinas con actividad fosfolipasa que causan anemia, ictericia y hemoglobinuria. La enfermedad puede presentarse en forma aguda, subaguda o crónica, con signos como fiebre, aborto, agalactia y mastitis atípica. El diagnóstico incluye pruebas directas (cultivo, PCR) e indirectas (serología), siendo la aglutinación microscópica (MAT) la más específica. Sin embargo, su interpretación requiere considerar historia clínica y títulos de anticuerpos. Estudios en México y otros países revelan alta prevalencia en bovinos, con serovariedades predominantes como Hardjo, Wolffi, Tarassovi y Pomona. La leptospirosis causa pérdidas económicas por infertilidad, abortos y baja producción láctea. La falta de estudios epidemiológicos integrales y de diagnóstico bacteriológico limita el control efectivo. Se recomienda fortalecer la vigilancia, mejorar el diagnóstico y considerar la leptospirosis como enfermedad endémica de notificación obligatoria.

Palabras clave: Leptospirosis, leptospira, serovariedades, diagnóstico serológico, zoonosis.



Introducción

Leptospirosis es una enfermedad zoonótica de gran impacto en la salud pública a nivel mundial. Es causada por bacterias patógenas pertenecientes al género *Leptospira*, que afecta a los seres humanos y a casi todas las especies de mamíferos tanto silvestres como domésticos, siendo los roedores los principales reservorios de leptospirosis pudiendo excretándolas en la orina durante años. Está presente en todos los continentes excepto en la Antártida, con más de 200 serovariedades. La leptospirosis en especies domésticas ha adquirido importancia en los últimos años y solamente ahora disponemos de datos relativos a su frecuencia. En términos generales, la enfermedad es más frecuente en zonas o regiones de clima húmedo y cálido, de suelos alcalinos y con agua superficial abundante.

Las condiciones óptimas para la sobrevivencia de las leptospirosis son el medio ambiente húmedo y cálido, con agua ligeramente alcalina o neutra, sin embargo, pueden mantenerse viables en un medio ambiente con un pH ligeramente ácido por períodos limitados, bajo estas condiciones ambientales, las infecciones son frecuentes en áreas tropicales y subtropicales y se presentan durante todo el año, en las regiones áridas, con mayor frecuencia alrededor de donde existe agua y una alta concentración de animales, en las regiones templadas las infecciones se presentan generalmente en los meses calurosos y durante los meses de lluvia.

Agente causal: *Leptospira*

El término *Leptospira* proviene del griego “Lepto” que significa fino y “spira” que significa espiral. El género *Leptospira* contiene espiroquetas pequeñas, con morfología espiral, muy delgadas, que poseen movimientos flexuosos sobre su propio eje, se reproducen por fisión binaria transversal, son microaerófilas de difícil tinción, pero pueden impregnarse con plata, poseen una morfología y movilidad específicas, de forma helicoidal, miden de 10 a 20 μm de longitud por 0.13 μm de ancho, son normalmente curvadas en uno o ambos extremos dando el aspecto de ganchos. Están constituida en su mayor parte por el cilindro protoplasmático, delimitado por la membrana plasmática y la pared celular; a lo largo de ella se localizan dos flagelos o filamentos axiales, que están unidos a los polos de la célula por medio de botones terminales y dan vueltas alrededor del cilindro protoplasmático helicoidal; los filamentos y el cilindro están envueltos por una membrana de tres capas llamada vaina externa o cubierta celular externa.

Características de desarrollo

Como todos los organismos, las leptospirosis tienen necesidades nutritivas como iones de calcio, hierro, magnesio y amonio, vitaminas como la tiamina, aminoácidos como el ácido aspártico, el ácido glutámico, metionina y ácidos grasos que contienen 14 a 18 átomos de carbono y su temperatura de crecimiento mínima es de 15° C. y la máxima de 30° C. Son microorganismos sensibles a la desecación, la luz solar directa, los desinfectantes, los pH



ácidos y alcalinos, las altas concentraciones salinas, las temperaturas superiores a los 45°C-50°C, la putrefacción y a la mayoría de los antibióticos in vitro. Por tanto, los factores que determinan su supervivencia en el medio ambiente son: temperatura templada (25°C), ambiente húmedo, pH neutro o ligeramente alcalino y presencia de materia orgánica.

Los medios de cultivo que se utilizan en esta prueba son los que contienen de un 8 a 10% de suero de conejo como el medio de Stuart, Fletcher y Korthof; otro medio, que contiene albúmina de bovino es el creado por Ellinhausen y McCollough (1965), modificado por Jonson y Harris (1967) conocido como EMJH, el cual se considera como el mejor medio de cultivo para el aislamiento que no altera la antigenicidad de forma significativa y se emplea normalmente en forma semisólida mediante la adición de agar bacteriológico o gelosa purificada a una concentración final de 0.1 al 0.2%.

Clasificación y nomenclatura

La clasificación de las leptospirosis aceptado por el Subcomité de Taxonomía de *Leptospira* se basa en la serología, siendo el serotipo la unidad taxonómica básica. Anteriormente se conocían dos especies de *Leptospira*; *L. biflexa* como bacteria saprófita o no patógena y *L. interrogans*, patógena para los animales domésticos, animales silvestres y al hombre, todas de morfología similar. Tomando el criterio de la clasificación serológica, esta última se encuentra clasificada en los 25 serogrupos siguientes: Tarassovi, Shermani, Sejroe, Sarmin, Ranarum, Pyrogenes, Pomona, Panama, Mini, Manhao, Lyme, Louisiana, Javanica, Icterohaemorrhagiae, Hebdomadis, Grippotyphosa, Djasiman, Cynopteri, Celledoni, Canicola, Bataviae, Ballum, Autumnalis, Australis y uno aún no determinado, en los cuales se encuentran agrupados más de 260 serovariedades que son antigénicamente diferentes.

Mediante los estudios genéticos, se determina que son filogenéticamente los grupos bacterianos más antiguos y con cierto grado de heterogeneidad genética entre *L. interrogans* y *L. biflexa* y en base a este fundamento se ha desarrollado un sistema de clasificación filogenética. Se propuso reclasificar las especies del género *Leptospira* con base en el análisis comparativo de 1,371 genes lo que resultó en la identificación de 64 especie agrupadas en 4 subclados, denominados P1, P2, S1 y S2, en lugar de los grupos históricamente denominados saprófitos (S1 y S2), intermedios (P2) y patógenos (P1).

La llegada de la secuenciación de ADN de alto rendimiento permitió la identificación de cuatro nuevas especies (*L. gomenensis*, *L. putramalaysiae*, *L. dzianiensis* y *L. tipperaryensis*) en el subclado P1. También se han identificado diez nuevas especies en el subclado P2 (antiguo grupo "intermedio"). Finalmente, dieciséis nuevas especies de *Leptospira* aisladas del medio natural pertenecían a los subclados S1 y S2. Estas especies de *Leptospira* se encuentran en una amplia variedad de entornos,



incluidas las aguas superficiales, el suelo, y se encuentran en mamíferos, pero también en aves, anfibios y reptiles.

Aunque los tipos saprófitos y patógenos de *Leptospira* tienen algunas similitudes en su estructura y composición genética, varían en otros factores, como en la capacidad de causar enfermedad y de soportar diferentes temperaturas. Las leptospirosas saprófitas son capaces de crecer a bajas temperaturas (5–35 °C), se encuentran naturalmente en suelos húmedos y en el agua, pero no tienen la capacidad de causar ninguna infección. Las especies saprófitas de *Leptospira* incluyen más de 60 serovariedades, de las cuales la más conocida es *L. biflexa*. Otras especies de leptospirosas saprófitas incluyen a *L. meyeri*, *L. wolbachii*, *L. yanagawae*, *L. vanthielii* y *L. terpstrae*. Como estos organismos tienen estructuras algo similares con otras especies del mismo género, la capacidad de manipular y controlar fácilmente las leptospirosas saprófitas las convierte en buenas alternativas y más seguras para estudios estructurales y moleculares en comparación con las leptospirosas patógenas.

Las leptospirosas “intermedias” fueron consideradas como intermediario bioquímico entre las leptospirosas saprófitas y patógenas. Una de las principales leptospirosas que se consideraron en este grupo fue *Leptospira parva*, ubicada bioquímicamente entre *L. interrogans* y *L. biflexa*. *L. parva* es capaz de coexistir con varias leptospirosas saprófitas y patógenas. Otras leptospirosas que se consideraban en este grupo de las “intermedias” incluyen a *L. broomi*, *L. inadai*, *L. licerasiae*, *L. wolffii* y *L. fainei*; ahora este grupo ha sido clasificado como el subclado P2 de las leptospirosas patógenas.

No obstante, y desde el punto de vista fenotípico, en algunos casos las leptospirosas patógenas clasificadas dentro del mismo serogrupo se pueden encontrar en dos categorías genéticas, por ejemplo: el caso de Hardjobovis y Hardjoprajitno que se encuentran en el serogrupo Serjoe, pero la primera está en la especie *L. borgpetersenii* y la segunda en *L. interrogans*.

En relación a su infectividad, algunos serogrupos de leptospirosas tienen importancia en los animales a los que infecta preferentemente, pero también a los hospedadores accidentales como: por ejemplo, la serovariedad Canicola está adaptada a los caninos pero los bovinos son un hospedador accidental para esta serovariedad al igual que los equinos y cerdos; Pomona está adaptada a los bovinos y los cerdos, pero puede infectar, como hospedadores incidentales a los equinos y a los ovinos; Hardjo infecta principalmente a los bovinos y Grippotyphosa infecta a los bovinos y a los cerdos.

Factores de virulencia

Hay indicios de que el componente citotóxico de las leptospirosas es una glicoproteína presente en las hemolisinas que permite su adherencia a las células, así contribuye a la presentación de la hemoglobinuria, anemia hemolítica, daño que se observa en la leptospirosis aguda. Es probable que todas las hemolisinas descritas sean fosfolipasas, que



algunos autores han denominado “hemotoxinas” por su amplio espectro sobre las membranas celulares.

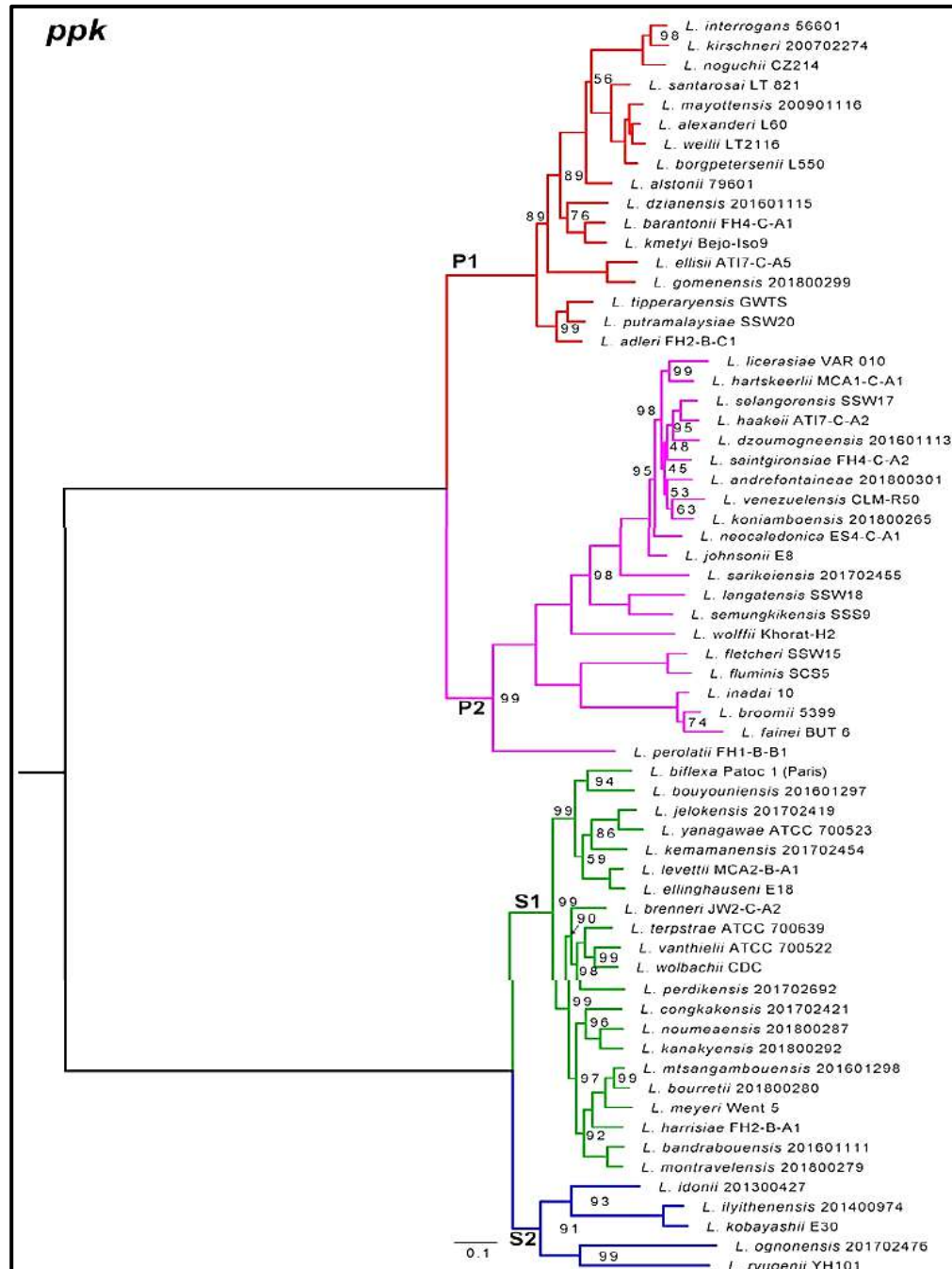


Figura 1. Clasificación genética de *Leptospira*. Las ramas están coloreadas según su pertenencia a los cuatro subclados principales: P1 (rojo), P2 (morado), S1 (verde) y S2 (azul). Este árbol filogenético fue construido con las secuencias de los genes 16S del ARN ribosomal y *ppk* que codifica una polifosfato quinasa.



Patogenia de la leptospirosis

La bacteria se multiplica en diferentes órganos especialmente en el hígado, los riñones y pulmones, permaneciendo en sitios de difícil penetración por los anticuerpos circulantes como en el fluido cerebro espinal, humor vítreo, útero, y ocasionalmente en la ubre; su eliminación ocurre posteriormente a través de la orina principalmente, ocasionalmente en la leche.

Presentación de la enfermedad

En su forma aguda se relaciona con una fase inicial, que coincide con un periodo de bacteremia, y signos de fiebre de 40.5 a 41.5°C., anorexia, anemia hemolítica, ictericia y hemoglobinuria con alta mortalidad principalmente en becerros, aborto en hembras gestantes y agalactia que dura de 2 a 10 días con subsecuente recuperación excepto en la vacas que están en la última fase de lactación, debido a una mastitis atípica en la que se observa la ubre edematosa, flácida a la palpación y la secreción láctea de color amarillento o teñida de sangre.

La forma subaguda difiere de la aguda solamente en que no se presentan todos los signos en ni con la misma severidad; existe fiebre de 39.0 a 40.5° C, y se registra depresión, anorexia, disnea y cierto grado de hemoglobinuria e ictericia moderada. Cuando la infección toma un curso crónico, las alteraciones principales son el aborto que se presenta entre el quinto y el sexto mes de la gestación con la retención de membranas fetales, reabsorción embrionaria, partos prematuros y trastornos reproductivos.

Diagnóstico de la leptospirosis

Las técnicas más utilizadas para el diagnóstico de la leptospirosis son las pruebas directas para detectar la bacteria, antígenos proteicos y el ácido nucleico en los tejidos o líquidos corporales; las técnicas indirectas son las pruebas serológicas para detectar anticuerpos específicos.

El aislamiento del agente a partir de muestras de tejidos y de fluidos es el método diagnóstico más confiable para demostrar la presencia del microorganismo en el animal susceptible, permitiendo la identificación del serotipo infectante, requiere de medios de cultivo específicos para confirmar su crecimiento al microscopio en un tiempo de 4 a 6 semanas y aun hasta los 6 meses; este diagnóstico suele ser costoso, tardado y laborioso por lo que no todos los laboratorios lo practican.

Las leptospiras aisladas se identifican por serología mediante aglutinación absorción cruzada, los métodos moleculares son más utilizados actualmente y los más comunes son mediante estudios del ADN: hibridación, por restricción de longitud de fragmentos del polimorfismo, por tipificación del ARN ribosomal y la reacción en cadena de la polimerasa o PCR.



Los estudios serológicos más utilizados son la aglutinación microscópica (AM), la fijación del complemento y el análisis inmunoenzimático (ELISA) para detectar anticuerpos del tipo IgM. La AM, considerada como prueba de referencia internacional y de uso oficial para la exportación e importación de animales es la más específica, exacta y altamente sensible, ya que utiliza cultivos vivos jóvenes como antígeno e identifica el serogrupo y el serotipo, detecta anticuerpos del isotipo IgM desde los 10-14 días post infección o en el momento del aborto. Otro fenómeno importante a tomar en cuenta en la aplicación de una vacuna es que estos anticuerpos se detectan en un tiempo de 2 o 3 semanas post vacunación, pero también a una post infección, por lo tanto, una reacción positiva serológica deberá interpretarse con cautela con base a la historia clínica del animal o hato y al título de anticuerpos detectado.

Con el objeto de obtener buenos resultados es necesario tener una colección de cepas locales que representen los serogrupos con sus respectivas serovariedades y la utilización de cultivos vivos de 7-14 días de crecimiento, con personal de laboratorio capacitado para el mantenimiento de las cepas, evitar contaminación a los cultivos y hacia el personal de laboratorio.

La técnica de ELISA se aplica en estudios serológicos para el diagnóstico de muchas enfermedades, utiliza antígenos sonicados para el serodiagnóstico en humanos y animales, identifica anticuerpos antileptospira, por su sensibilidad y especificidad ha permitido determinar con exactitud el serotipo infectante, es una prueba en la que el fenómeno de reacción cruzada es mínimo ya que se utiliza el serotipo específico, pero no proporciona información ante una posible infección por otros serovariedades, por lo tanto y a pesar de ser eficaz, sensible y segura no está admitida como prueba de diagnóstico oficial.

La lesión postsepticémica de las leptospiras en el riñón está asociada con inflamación intersticial focal o difusa y se observa mediante la tinción de hematoxilina-eosina en cortes de tejido fijado e incluido en parafina, cuando existe un gran número de bacterias intactas se detectan mediante tinciones de plata, procedimiento laborioso y poco común que requiere de experiencia para su realización e interpretación ya que otras bacterias y artefactos se pueden confundir con las leptospiras, esta técnica se recomienda para detectar la bacteria a partir de órganos provenientes de enfermos crónicos en cortes de riñón e hígado, aunque también se puede hacer en frotis de otras muestras.

Diagnóstico de leptospirosis

El diagnóstico de leptospirosis es difícil de confirmar debido, por un lado, a la gran diversidad de signos clínicos presentes en individuos enfermos, sean humanos o animales, y por otra parte, a la difícil adaptabilidad del microorganismo a las condiciones de laboratorio que lo hace de aislamiento difícil y lento. A nivel nacional y mundial se sabe



que la leptospirosis bovina es ocasionada principalmente por las serovariedades Hardjo, Wolffi y Tarassovi, cuyo huésped de mantenimiento es el bovino. Se desconoce con precisión la función que desempeñan otras especies animales en la transmisión de las serovariedades al bovino. Según los datos publicados sobre los métodos de diagnóstico, se observa una gran variación en los estudios serológicos y bacteriológicos que se practican con poca o nula frecuencia, diferencias que resultan por las serovariedades utilizados, por las características específicas de las pruebas y por otro lado los hospederos que se encuentren realmente o no infectados, además de la capacidad y experiencia del laboratorio para interpretar y diagnosticar la enfermedad mediante las tres técnicas.

Cuando se requiere analizar información reciente sobre la frecuencia de leptospirosis en México, no se cuenta con un estudio que implique gran parte del territorio nacional para determinar la prevalencia real en las poblaciones animales y solamente se dispone de estudios serológicos y en muy pocos casos el aislamiento bacteriológico para determinar las serovariedades presentes más frecuentes.

Aunque existen estudios sobre leptospirosis en la mayoría del territorio mexicano, hasta donde sabemos, no existen reportes de casos o estudios epidemiológicos de leptospirosis en la población bovina en México.

El diagnóstico de la leptospirosis es complicado, debido principalmente a las características intrínsecas de las leptospiras y a la epidemiología de la enfermedad. Si se considera que es una enfermedad zoonótica de distribución mundial, que provoca grandes pérdidas económicas en la ganadería al producir abortos, partos prematuros, disminución de la producción láctea, e infertilidad, ya que comúnmente los animales no presentan signos clínicos específicos, ni lesiones apreciables en la canal, hace necesario realizar el diagnóstico definitivo por pruebas de laboratorio. En el suroeste de Uganda, sueros recolectados durante un período de 4 años provenientes varios lugares, se encontró una positividad de seroprevalencia de Hardjo del 29.35% en bovinos.

Especies circulantes de *Leptospira* identificadas en el ganado de la Amazonia brasileña. El presente estudio tuvo como objetivo detectar los serogrupos más prevalentes y las especies de *Leptospira* circulantes en vacas de la Amazonia brasileña. Las pruebas utilizadas fueron la prueba de aglutinación microscópica (MAT), La frecuencia de vacas reactivas con MAT fue de 46.6% (97/208) con títulos que iban de 100 a 3,200, siendo el serogrupo de Sejroe el más prevalente.

Las serovariedades Mini, Icterohaemorrhagiae y Ballum no son usualmente consideradas en los estudios serológicos ni en los esquemas de inmunización anti-*Leptospira* específicos para bovinos. Los resultados del presente estudio apoyan la tesis de que es necesario invertir esfuerzos para obtener el aislamiento e identificación de *Leptospira*, como la evidencia firme de la existencia de las serovariedades asociadas a infección en animales, y no conformarnos simplemente con los resultados de los estudios serológicos, como se ha hecho tradicionalmente.



La herramienta de diagnóstico estándar (MAT) se recomienda para rebaños, pero no para diagnósticos individuales. El objetivo de este estudio fue evaluar la respuesta humoral de los bovinos frente a sus propios aislamientos recuperados. Un total de 25 bovinos de los cuales se recuperaron las leptospiras, fueron analizados por MAT contra cepas de referencia y sus propios aislados. Solo tres vacas 12% presentaron serorreactividad contra sus propios aislamientos. Este estudio demuestra que el ganado puede no reaccionar contra sus propios aislamientos y resalta la importancia de interpretar los resultados negativos serológicos con precaución.

La positividad general fue de 355 muestras que significan el 85.33 % donde la serovariedad más común fue Hardjoprajitno con títulos de 1:51,200 presentándose con mayor positividad en vacas de desecho. La enfermedad de leptospirosis está presente en el estado de Nayarit, tiene una prevalencia más alta en comparación a la reportada a nivel nacional, no hay diferencias estadísticas de positividad por regiones productivas, genotipos, aptitud zootécnica, o sexo de bovinos, pero la edad en la que se presenta la mayor positividad es en vacas de desecho.

Epizootiología de la leptospirosis

Los datos publicados sobre los métodos de diagnóstico muestran una gran variación en los estudios serológicos y bacteriológicos que se practican con poca frecuencia, diferencias que resultan por las serovariedades utilizados, por las características específicas de las pruebas y por otro lado los hospederos que se encuentren realmente o no infectados, además de la capacidad y experiencia del laboratorio para interpretar y diagnosticar la enfermedad mediante las tres técnicas.

Cuando se requiere analizar información reciente sobre la frecuencia de leptospirosis, no se cuenta con un estudio que implique gran parte del territorio nacional para determinar la prevalencia real en las poblaciones animales y solamente se dispone de estudios serológicos aislados y en muy pocos casos el aislamiento bacteriológico para determinar las serovariedades presentes más frecuentes.

En los animales con fin zootécnico se caracteriza por ocasionar pérdidas económicas importantes debido a trastornos reproductivos como mortinatos, abortos, nacimiento de animales débiles, infertilidad y baja producción láctea, actualmente con mayor interés en los años recientes, por el incremento en la incidencia del problema. Uno de los principales problemas al tener un hato infectado es la presencia de animales enfermos que con el tratamiento llegan a sanar o quedar como portadores asintomáticos, y representan un riesgo potencial para la población animal y el personal expuesto. Desde el punto de vista epidemiológico, los estudios publicados estiman que cerca de 40 % de los hatos en México están o han estado expuestos a *Leptospira*.



La más amplia gama de serovariedades se encuentra en las regiones tropicales y subtropicales donde predominan los climas cálidos, con precipitaciones abundantes y una fauna silvestre. Entre los animales que comúnmente presentan la infección se encuentran los perros, bovinos, cerdo y caballo encontrándose signos clínicos muy variados incluyendo síndromes reproductivos, ictericos, urémicos y respiratorios.

A nivel nacional son pocos los estudios realizados sobre la frecuencia de la leptospirosis bovina asociada a los factores climáticos. En México la presencia de anticuerpos contra leptospirosis ha sido diagnosticada en la mayoría de los estados y es considerada actualmente por la “SAGARPA” como una enfermedad “endémica”, de notificación obligatoria, con una prevalencia promedio del 49.7%. Las frecuencias más altas reportadas han sido para los estados de Tabasco, Chiapas, Guerrero y Veracruz con clima cálido húmedo.

Resulta importante mencionar la falta de técnicas para el diagnóstico de leptospirosis en el Estado Nayarit. Por ejemplo, la implementación de pruebas como la aglutinación microscópica con la utilización del mayor número posible de serovariedades representativos de cada serovariedad de referencia para tener una mayor oportunidad de detectar algún problema en el diagnóstico de la leptospirosis en una especie o región geográfica.

Existen diversos trabajos serológicos realizados como en Iowa, Estados Unidos en la Unión Americana donde de 204 sueros de bovinos analizados se encontró una positividad del 14.1%, con respuesta a los serovariedades Hardjo 10.8%, Pomona 2%, y el 2.5% a otras serovariedades, otra investigación de un total de 5,111 muestras de sueros bovinos procedentes de 49 estados y de Puerto Rico, se obtuvieron 2,493 positivos, que representan el 49%, y también el 1.7 % de aislamientos a partir de muestras de riñón e identificas como Hardjo, Pomona y Grippytyphosa mediante aglutinación absorción cruzada.

En Australia, mediante la misma prueba serológica se demostró una prevalencia del 49.2%, a las serovariedades Hardjo con un 4% y Pomona con un 2.4% como los más representativos de 218 muestras procesadas. En otro estudio realizado en Australia, después de haber analizado 2,857 sueros de bovinos, se detectaron las serovariedades Hardjo con un 15.8%, Tarassovi 3.9%, Pomona 4% y Szwajizak con el 2.2% como los de mayor prevalencia.

En países europeos, de un total de 11,081 muestras, se menciona una prevalencia del 2.4% con predominancia a los serovariedades Hardjo con el 1.2% y Grippytyphosa con el 0.48%; en Holanda de 6,359 sueros bovinos de detectó el 26.1% como positivos, a los serovariedades Grippytyphosa con un 22.0% y Copenhageni 20.0% y en Portugal con una prevalencia del 23.3%, teniendo al serotipo Hardjo con un 18.2% de un total de 711 muestras; en este mismo país tras haberse procesado 9,543 muestras durante los años 1987 a 1993 se obtuvo una prevalencia del 15.3% identificando reacción principalmente



para los serogrupos Sejroe, Pomona, Hebdomadis, Tarassovi y Icterohaemorrhagiae.

La alta prevalencia de anticuerpos contra *L. interrogans* de áreas rurales de Colombia en especial de la región de la Ciénaga de Oro son endémicas donde el ganado puede actuar como portador renal y contaminar las fuentes de agua. En este estudio, el tamaño de la muestra fue de 325 vacas en edad reproductiva. Las muestras se enfrentaron 11 serovariedades. La seroprevalencia de la leptospirosis fue de 70.0% en el ganado, las serovariedades con más casos de positivos fueron: Hardjo 58.2%, Saxkoebing 38.4%, Tarassovi 36.8%, Grippotyphosa 30.2%, Bratislava 18.6% y Pomona 14.9%. En México no se utiliza la serovariedad Saxkoebing por ser del serogrupo Sejroe donde también se encuentra Hardjo. Pero al igual que en el presente trabajo, reporta a las serovariedades Hardjo, Tarassovi, Grippotyphosa, Bratislava y Pomona como las más importantes. En el estado de Santa Catarina (Brasil) un total de 80 vacas el 6.44% fueron positivas a la MAT las serovariedades identificadas fueron: Pomona 3.2%, Sejroe 3.1% e Icterohaemorrhagiae 0.6%. Fueron identificados como factores asociados a la positividad serológica el acceso de los perros a la pastura, la exposición del alimento a los roedores incrementa la posibilidad de la infección por *Leptospira*. En la Provincia de Kerman, Irán el 17.36% de las muestras fueron positivas donde la serovariedad Pomona fue la serovariedad más prevalente e igual que el presente estudio la serovariedad Icterohaemorrhagiae fue la segunda serovariedad en importancia.

Los problemas de leptospirosis en bovinos se asocian a los serovariedades Hardjo, Wolffi y Tarassovi; aplicando la prueba de aglutinación microscópica en diferentes estudios, tenemos que en el estado de Veracruz en 623 sueros de bovino se obtuvo un total de 223 positivos, que representan el 35.79% y a los serovariedades más representativas Wolffi 25.84%, Hardjo con un 13.16%, y a Hebdomadis un 11.23%; en el estado de Jalisco en 216 sueros de bovino se detectó el 37.5 % de seropositividad con mayor frecuencia a las serovariedades Hardjo, Wolffi, Tarassovi, Pyrogenes, Canicola y Hardjo UAM-X este último de aislamiento nacional.

En Puebla, se utilizaron 18 serovariedades como antígeno para analizar 116 muestras de suero, de los cuales 98 fueron positivos que representan el 84.48%, los sueros reaccionaron con mayor frecuencia contra las serovariedades Icterohaemorrhagiae en un 45.69%, Pyrogenes con el 21.55%, Pomona 13.18% Canicola y Celledoni con un 12.93%. En Tamaulipas de un total de 683 muestras se obtuvo un 33.38% de seropositividad y las serovariedades más representativas fueron Wolffi con un 39.7%, Tarassovi un 35.5%, y a Hardjo con un 24.7%. En el estado de Veracruz se analizaron 157 muestras, de las cuales el 75.8% resultaron positivos a uno o más serovariedades como Wolffi con un 69.4%, Hardjo un 65.6%, mientras que Tarassovi tuvo un 54.1%.

A nivel de rastro en el Estado de Guerrero se reporta una prevalencia del 32.89% en 380 sueros de bovinos identificándose las siguientes serovariedades Australis con el



39.2%, *Bataviae* con 12%, *Grippytyphosa* 8.8% y *Ballum* 6.4.

Un estudio realizado en el municipio de Ixtapaluca en el Estado de México con 60 muestras de bovinos productores de leche, 50 animales con problemas y 10 sin problemas reproductivos, se detectó una seropositividad del 66% en las vacas con problemas reproductivos que reaccionaron a los serovariedades *Wolffi* con el 75.7%, *Hardjo* un 63.6%, *Bratislava* el 9.1%, *Panama* 6.1% y *Pyrogenes* 3.03%; en las vacas sin problemas reproductivos existió una seroprevalencia del 20.0% detectando con mayor frecuencia *Hardjo* el 100%, *Wolffi* con 100%, *Icterohaemorrhagiae* con 50.0%, *Hebdomadis* 50.0% y *Tarassovi* 50.0%.

En el rastro municipal San Mateo Atenco, de 138 muestras resultó el 54.34% con seropositividad y de acuerdo al lugar de procedencia la positividad fue la siguiente: en San Mateo Atenco un 61.76%, del Puente el 47.36%, de Lerma un 50.0%, *Ocoyoacac* 37.5%, de Toluca un 76.92%, *Texcaltitlán* con 36.36%, *Metepec* 75%, *Santiago Tianguistenco* con 25%, *San Felipe del Progreso* 50%, *Sultepec* 50%, *Ixtlahuaca* 100%, *Almoloya de Juárez* 100%, *Tejupilco* 100%, *Otzolotepec* 100%, *Coatepec Harinas* 0%, *Valle de Bravo* 50% y los serovariedades más importantes fueron: *Bratislava* 22.46%, *Panama* 18.84%, *Hardjo* UAM-X 15.21%, *Tarassovi* 13.76%, *Pomona* 10.97%, *Hardjo* 8.69%.

En Nayarit el porcentaje de positividad relativa de las diferentes serovariedades fueron los siguientes; *Autumnalis* 3.1%, *Ballum* 27.6 %, *Bataviae* 4.5%, *Bratislava* 33.6%, *Canicola* 10.5%, *Grippytyphosa* 11.5%, *Hardjoprajitno* 44.2 %, *Icterohaemorrhagiae* 43.5%, *Mini* 34.1 %, *Pomona* 6.7 %, *Pyrogenes* 2.4%, *Tarassovi* 4.8%.

En México, la ganadería es la actividad económica importante en el sector pecuario. La leptospirosis tiene repercusión económica por la baja en producción, problemas reproductivos y muerte de animales para engorda. Es una enfermedad de lugares tropicales y relacionada con desastres naturales principalmente inundaciones, como tormentas tropicales y huracanes como Kena, el huracán Willa en 2018 y más recientemente el huracán Erick.

Aunque la mortalidad es baja (5%), la morbilidad suele ser elevada según datos clínicos y serológicos pudiendo alcanzar hasta el 100% de los animales expuestos. En animales jóvenes la mortalidad es mucho más alta que en adultos. Las cifras de abortos alcanzan hasta el 30%, y la disminución de la producción de leche son las causas principales de pérdidas.

Conclusiones

En México, son pocos los estudios realizados que proporcionen información completa y suficiente para tener una visión retrospectiva de la enfermedad y los estudios serológicos realizados que identifican diferentes prevalencias a las serovariedades mayormente encontradas: *Canicola*, *Pomona*, *Hardjo*, *Tarassovi*. Cuando se requiere analizar información reciente sobre la frecuencia de leptospirosis en México, no se cuenta con un



estudio que implique gran parte del territorio nacional para determinar la prevalencia real en las poblaciones animales y solamente se dispone de estudios serológicos aislados y en muy pocos casos el aislamiento bacteriológico para determinar las serovariedades presentes más frecuentes. A pesar de lo anterior se tiene un panorama general que indica que esta enfermedad es endémica y por la especificidad de especie, los brotes concuerdan con las temporadas de lluvias e inundaciones.

Bibliografía

- Adler, B. (2014). Pathogenesis of leptospirosis: cellular and molecular aspects. [Research Support, Non-U.S. Gov't Review]. *Vet Microbiol*, 172(3-4), 353-358. doi: 10.1016/j.vetmic.2014.06.015
- Atherstone, C., Picozzi, K., & Kalema-Zikusoka, G. (2014). Seroprevalence of *Leptospira hardjo* in cattle and African buffalos in southwestern Uganda. *Am J TropMedHyg*, 90(2), 288-290. doi: 10.4269/ajtmh.13-0466
- Carmona-Gasca, C. A., León Lara, L., Castillo-Sánchez, L. O., Ramírez-Ortega, J. M., Ko, A., Luna Palomera, C., & Peña-Moctezuma, A. d. l. (2011). Detección de *Leptospirasantarosai* y *L. kirschneri* en bovinos: nuevos aislados con potencial impacto en producción bovina y salud pública. *Veterinaria México*, 42, 277-288.
- Chávez, T. (2006). Análisis de los resultados obtenidos en el diagnóstico serológico de leptospirosis en animales, de 1989 a 2004 en el departamento de microbiología e inmunología, FMVZ. UNAM. Licenciatura, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Nacional Autónoma de México, México DF.
- Ensunchó-Hoyos, C., Rodríguez-Rodríguez, V., Pérez-Doria, A., Vergara, O., & Calderón-Rangel, A. (2017). Epidemiology and behavior of leptospirosis in Ciénaga de Oro, Córdoba (Colombia). *Trop Anim Health Prod*, 49(7), 1345-1351. doi: 10.1007/s11250-017-1332-6
- Favero, J. F., de Araujo, H. L., Lilenbaum, W., Machado, G., Tonin, A. A., Baldissera, M. D., Da Silva, A. S. (2017). Bovine leptospirosis: Prevalence, associated risk factors for infection and their cause-effect relation. *Microb Pathog*, 107, 149-154. doi: 10.1016/j.micpath.2017.03.032
- Guedes, I. B., Araujo, S. A. A., de Souza, G. O., de Souza Silva, S. O., Taniwaki, S. A., Cortez, A., Heinemann, M. B. (2019). Circulating *Leptospira* species identified in cattle of the Brazilian Amazon. *Acta Trop*, 191, 212-216. doi: 10.1016/j.actatropica.2019.01.011



-
- Khalili, M., Sakhaee, E., Aflatoonian, M. R., Abdollahpour, G., Tabrizi, S. S., Damaneh, E. M., & Hossini-Nasab, S. (2014). Seroprevalence of bovine leptospiral antibodies by microscopic agglutination test in Southeast of Iran. *Asian Pac J Trop Biomed*, 4(5), 354-357. doi: 10.12980/APJTB.4.2014C1206
- Levett, P. N. (2007). Sequence-based typing of *Leptospira*: epidemiology in the genomic era. *PLoS Negl Trop Dis*, 1(2), e120. doi: 10.1371/journal.pntd.0000120
- Libonati, H., Pinto, P. S., & Lilenbaum, W. (2017). Seronegativity of bovines face to their own recovered leptospiral isolates. *MicrobPathog*, 108, 101-103. doi: 10.1016/j.micpath.2017.05.001.
- Otaka, D., Penna, B., Martins, G., Hamond, C., Lilenbaum, W., & Medeiros, M. A. (2013). Rapid diagnostic of leptospirosis in an aborted bovine fetus by PCR in Rio de Janeiro, Brazil. [Letter]. *VetMicrobiol*, 162(2-4), 1001-1002. doi: 10.1016/j.vetmic.2012.11.037.

Algunas plantas de importancia en la clínica veterinaria: generalidades y protocolo terapéutico

Carlos Omar De la Cruz Moreno.
Juan José Fernando Borrayo González.
Sergio Martínez González.
Carlos Alfredo Carmona Gasca.
Fidel Ávila Ramos.
Juan Antonio Hernández Ballesteros.





Resumen

Las intoxicaciones representan siempre un reto para el clínico, tanto en los aspectos concernientes al diagnóstico como en el abordaje terapéutico. Sin embargo, es importante precisar que, en aquellos casos cuando se trata de toxinas de origen vegetal, el desafío es aún mayor, toda vez que existe una gran diversidad de plantas de ornato y silvestres que con facilidad están al alcance de las mascotas.

Cierto es que, dado el proceso evolutivo de los seres vivos, las plantas no se quedan atrás y derivado de ello, es precisamente que, todas aquellas consideradas tóxicas poseen características distintivas como sabor amargo (aquellas que tienen alcaloides como la teobromina), son irritantes (derivado de los cristales de oxalato, como ocurre en la *Dieffenbachia*) o bien, secretan sustancias viscosas (como la Jara pringosa — *Cistus Ladanifer* —). Todo esto obedece a una estrategia de supervivencia frente a la depredación de los herbívoros. Para los animales de compañía, la exposición a dichas toxinas no debería ser común considerando que sus hábitos alimenticios son distintos. Pero la realidad dista mucho de ello. Es por ese motivo que en el presente capítulo se analizan cuatro plantas que frecuentemente provocan intoxicaciones incluso mortales en perros y gatos, además de otras especies.

Lirios (*Lilium longiflorum*), lilis (*Hemerocallis* spp), Ricino (*Ricinus communis*), Nochebuena (*Euphorbia pulcherrima*) y Matapuercos (*Dieffenbachia* spp) se han vinculado ampliamente con intoxicaciones en perros y gatos, por ello, se hace un análisis de sus aspectos generales, diagnóstico y protocolo terapéutico. En éste último apartado, se procura desglosar cada una de las estrategias: *triage* (fundamental en pacientes cuyo estado de salud sea grave), evacuante, neutralizante, antidótica, signológica, eliminatória y complementaria. De esta manera se brindan herramientas al clínico para un manejo integral del paciente intoxicado.

Palabras clave: Intoxicaciones, tratamiento, *Lilium longiflorum*, *Hemerocallis* spp, *Ricinus communis*, *Euphorbia pulcherrima*, *Dieffenbachia* spp.



Introducción

La variedad de plantas que pueden resultar tóxicas para los animales domésticos y silvestres es enorme y la identificación de todas ellas resulta complicada. A pesar de esto, es aconsejable que el médico veterinario pueda reconocer a las plantas comúnmente involucradas en este tipo de patologías. Además, en algunos casos se hace necesario el conocimiento básico de los principios activos, y la sintomatología asociada a las intoxicaciones que producen. Esto le permitirá realizar una serie de preguntas importantes durante la anamnesis: ¿cómo era la planta? ¿Cómo eran sus flores y hojas?, ¿qué cantidad aproximada de material vegetal consumió el animal? Las respuestas posteriormente serán de mucha ayuda para el diagnóstico y tratamiento.

La forma más sencilla de estudiar a los vegetales tóxicos, es agrupándolos de acuerdo con el aparato u órgano que afectan. Sin embargo, se debe tener en cuenta que muchas plantas pueden ser tóxicas para varios órganos a la vez. El paraíso (*Melia azedarach L.*) por ejemplo, posee sustancias que causan un cuadro de deshidratación y diarrea, acompañado de sintomatología nerviosa, con temores musculares, ataxia, falla respiratoria, coma y muerte.

La piel es muy sensible a muchas sustancias irritantes. Algunas plantas poseen látex, causante de daños leves a moderados sobre la piel, por ejemplo, la estrella federal o nochebuena (*Euphorbia pulcherrima*); otras, por el contrario, causan reacciones alérgicas más graves, tal es el caso de la hiedra venenosa (*Rhus toxicodendron L.*) o de la ortiga (*Urtica dioica L.*). Esta última posee estructuras que actúan como verdaderas agujas hipodérmicas, las que contienen sustancias farmacológicamente activas, responsables del efecto urticante.

Las intoxicaciones por plantas tienen una frecuencia que no es sencilla de determinar, por ejemplo: un gato difícilmente habrá de tragar alguna planta tóxica —considerando su sabor amargo, las eventuales resinas pegajosas, entre otras características que resultan aversivas—, sin embargo, en caso de que pudiera disponer de lirios —ya sea en un arreglo floral o en el jardín—, en cuyo caso la literatura señala que la ingesta de un solo pétalo puede ser letal, sí que habrá de pasear por ahí, y en caso de que el polen se adhiera a su pelaje, en el acicalado posterior terminará ingiriéndolo dando lugar a la posterior intoxicación. En el caso de los perros, los accidentes ocurren con frecuencia en la etapa de transición, donde el juego y la exploración demandan mucho de su tiempo y suele morder cuanto objeto se encuentra a su alcance —incluyendo las plantas, de las cuales tendrá que descubrir su carácter aversivo—. En el caso de los adultos, los accidentes están más relacionados con aburrimiento —animales que pasan demasiado tiempo a solas— y/o problemas conductuales, incluyendo la polifagia.

En este sentido, para el veterinario, el reto es conocer las plantas tóxicas endémicas de la región en la que ejerce, aunque eso no descarta la inclusión de alguna exótica que los propietarios de animales puedan tener en casa. Además de ello, el clínico deberá estar



capacitado para brindar un tratamiento integral. La cantidad de plantas puede resultar abrumadora, sin embargo, no todas representan un riesgo excesivo y, de igual manera, no todas tienen la misma presencia en el hogar, jardín o espacios públicos recreativos como parques por lo cual, reiteramos la conveniencia de conocer en detalle el entorno y hacer nuestro listado de las más comunes y peligrosas.

Algunas plantas de importancia en la clínica veterinaria

1. Azucenas o lilis

Clasificación toxicológica: Plantas nefrotóxicas.

Nombre científico: *Lilium longiflorum*.

Heimerocallis spp.



Figura 1. Flores de lirio, son muy frecuentes en los hogares, especialmente en festividades como el día de San Valentín.



Generalidades

La familia liliaceae está conformada por una cantidad importante de géneros y especies, aunque no todas son de interés veterinario, al menos en lo concerniente a toxicidad. *Lilium longiflorum* es una planta muy común en ramos de flores para uso ornamental, está reconocida y se considera muy tóxica solo para gatos. La ingestión de una sola hoja puede dar lugar a una insuficiencia renal aguda e irreversible en gatos. Es una planta originaria de Europa perteneciente a la familia de las Liliáceas. En la actualidad se cultiva extensamente en las zonas templadas del mundo por sus atractivas flores. Se trata de hierbas que se reproducen por bulbos, sus flores son blancas y solitarias o dispuestas en grupos en los vértices de los tallos; tienen 5 estambres con filamentos blancos y anteras de color amarillo intenso. Los frutos son cápsulas alargadas que al madurar se dividen en tres partes y contienen semillas de color café. La *Hemerocallis* spp., también pertenece a la familia de las Liliáceas y es tóxica para los gatos.

Toxicidad

Especies afectadas:

Principalmente gatos, aunque también se han reportado intoxicaciones en perros y conejos.

Principios tóxicos y Mecanismo de acción:

Aún no se han determinado la identidad química del o los componentes tóxicos presentes en estas plantas. Dentro de lo poco que se conoce al respecto, se ha descrito una naturaleza hidrosoluble. Dicha característica se vincula con el daño renal ocasionado.

Todas las especies del género *Lilium*, así como de *Hemerocallis*, se consideran altamente tóxicas para los gatos, que es la especie que hasta hoy se considera más susceptible, puesto que los perros, pueden llegar a presentar un cuadro clínico moderado con carácter gastrointestinal y sin compromiso renal.

Es importante considerar que todas las partes de la planta son tóxicas, en orden de mayor a menor peligrosidad se encuentran los pétalos, hojas, el polen e incluso el agua de los floreros. Es frecuente encontrar documentos que señalan de manera alarmante que, el consumo de un solo pétalo es capaz de matar a un gato, pero lo cierto es que es necesario indicar que esto ocurre siempre que no exista un tratamiento adecuado o lo hay, pero se inicia demasiado tarde; por lo cual, dicho dato resulta fatalista para los dueños de felinos y pudiera incluso orillarlos a desestimar el recurrir a consulta al considerar que de igual manera, el animal está sentenciado a muerte.

Se han establecido dosis tóxicas de 568 mg/kg y 291 mg/kg de extracto acuoso de hojas y pétalos de lirio de Pascua respectivamente.

Derivado del hecho de que actualmente no se tiene identificado el o los principios tóxicos, no se dispone con claridad cuál es el mecanismo de acción. Pese a ello, un hallazgo



habitual en los pacientes intoxicados es la necrosis tubular sin que llegue a dañar la membrana basal.

Etiología

La ingesta de plantas en jardines suele ser poco probable y, la mayor incidencia de intoxicaciones está relacionada con arreglos florales en el interior de casa y algunos datos epidemiológicos sugieren que la mayor incidencia ocurre en días festivos donde se disponen de dichos arreglos en el hogar. Respecto a la parte de planta principalmente implicada, suele ser el polen. De igual manera se han descrito casos de intoxicación en animales que bebieron del agua de los floreros.

Manifestaciones clínicas

La ingestión suele estar seguida de vómitos al poco rato (1-3 h), y el animal suele permanecer apático el resto del día. Tras 12 a 36 horas de la ingestión, los parámetros de la función renal comienzan a alterarse; la urea, el fósforo y en especial la creatinina comienzan a incrementarse enormemente.

El cuadro gastrointestinal suele incluir anorexia (que permanece durante todo el curso de la intoxicación), salivación y emesis de carácter transitorio, misma que obedece al efecto aversivo de la planta y suele remitir entre 3 y 6 horas tras la ingesta. En algunos pacientes se ha observado recurrencia de la emesis una vez que el cuadro renal ha progresado a estadios terminales. Se puede presentar también un cuadro diarreico de severidad variable.

El compromiso renal se acompaña de deshidratación, poliuria que luego da lugar a oliguria y finalmente anuria. Esta ausencia de evacuación de la orina suele presentarse en torno a las 24-48 horas tras la exposición al tóxico.

El paciente puede, adicionalmente, mostrarse hipotérmico. Es factible el compromiso neurológico caracterizado por depresión, ataxia, temblores, confusión y crisis convulsivas, siendo esto una afección indirecta, derivada del incremento de metabolitos tóxicos en sangre tras el fallo renal.

De manera poco frecuente se ha reportado pancreatitis asociada a la intoxicación.

Diagnóstico

Pruebas generales:

En un paciente sospechoso de intoxicación por lirios, existen diversos estudios de laboratorio que son indicativos principalmente de la insuficiencia renal asociada a la etiología presumible.



Principalmente habrán de realizarse estudios de orina y sangre:

- ☐ Examen general de orina: durante las primeras 24 horas ya puede apreciarse proteinuria, glucosuria, isostenuria (alrededor de 1.008 – 1.012). La cilindruria generalmente se aprecia desde las 12 horas tras exposición.
- ☐ Examen sanguíneo (Química sanguínea, biometría hemática, nivel de glucemia, perfil renal y hepático):
- ☐ Urea: Incrementada.
- ☐ Creatinina: Incrementada, en algunos casos se determinan cantidades excesivamente elevadas.
- ☐ Creatinina – quinasa: Muy elevada alrededor de las 24 horas.
- ☐ Fosforo: Incrementado.
- ☐ Potasio: Incrementado.

De manera adicional, se pueden considerar estudios de imagen:

- ☐ Ecografía / Radiografía: Suelen utilizarse para determinar el tamaño renal, grosor de la corteza, así como la cristaluria. Mediante ecografía es factible determinar los cambios de consistencia estructural y la necrosis tubular.

Análisis químico toxicológico:

Las técnicas habituales como la cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) o la espectrofotometría ultravioleta resultan ineficaces en estos casos, derivado del hecho de no disponer aun de la identidad del o de los compuestos tóxicos presentes en estas plantas.

Diferencial:

- ☐ Intoxicación por etilenglicol, uvas, pasas, antiinflamatorios no esteroideos y otros fármacos nefrotóxicos, plantas con oxalatos solubles.
- ☐ Enfermedades infecciosas de vías urinarias.
- ☐ Anormalidades físicas como obstrucción uretral, nefrolitos.

Hallazgos a la necropsia

En las intoxicaciones, es poco frecuente que se presenten lesiones patognomónicas, sin embargo eso no exenta de disponer de hallazgos que permitan enriquecer el historial clínico y perfilar el diagnóstico. En el caso de muerte tras la exposición a lirios, las alteraciones reportadas incluyen:

Macroscópicas:

- ☐ Vejiga vacía.
- ☐ Riñones normales o aumentados, congestivos.
- ☐ Presencia de cilindros granulosos o hialinos.



Microscópicas:

- ☐ Necrosis tubular con o sin mineralización.
- ☐ Membrana basal con figuras mitóticas.

Protocolo terapéutico

Para la toma de decisiones respecto a la actuación del clínico, resulta fundamental considerar diversos factores que pueden determinar cuál será la mejor forma de implementar el protocolo terapéutico (anexo 1). En atención a ello, dentro de todos los aspectos que involucran una atención integral, encontramos los siguientes apartados:

A. Triage

El abordaje inicial del paciente estará condicionado respecto al estado de salud (anexo 1) y, en caso de presentar un cuadro clínico de gravedad que ponga en riesgo inminente la vida del paciente, se deberá proceder con la estabilización aun cuando no se disponga con claridad la implicación de un tóxico o no. En este orden de ideas, en el anexo 2 se presenta el panorama del *triage* y, para el caso particular de un paciente intoxicado con lirios, se deben considerar los siguientes aspectos:

- ☐ Compromiso neurológico.

Si bien, se considera secundario al fallo renal, es importante atender cualquier alteración presente:

Depresión de SNC: Doxapram (perros y gatos, 5.5-11 mg/kg IV. La dosis se puede repetir 15-20 minutos después si es necesario); fisostigmina (en perros, 1 mg/perro cada 12 horas).

Convulsiones: Diazepam (perros y gatos, 0.5-1 mg/kg IV cada 10 minutos hasta 3 veces o 1 mg/kg rectal. Los gatos tienen que vigilarse estrechamente). Se puede adicionar un relajante muscular como el metocarbamol (perros y gatos, 20 mg/kg VO c/8-12 hrs).

B. Evacuante

Es de gran utilidad dentro de los primeros sesenta minutos tras la exposición. La vía de ingreso es digestiva, sin embargo, no se debe olvidar que el paciente pudo tener contacto con el polen y su pelaje puede estar impregnado, por lo que deberá procederse a la evacuación dérmica además de la digestiva.

El paciente en el que haya sospecha o confirmación de contacto con polen deberá bañarse de manera profusa para retirar el tóxico. Aunque el protocolo considera que, en compuestos secos, se debe proceder al cepillado, en este caso en particular, considerando la posibilidad y el consecuente riesgo de ingesta, es preferible directamente realizar el lavado cutáneo, con agua templada. En todo caso habrá de considerarse el estatus del



paciente, para evitar agravar alguna condición (hipotermia, crisis convulsivas, etc.).

Para la descontaminación digestiva, generalmente resulta más conveniente el uso de fármacos, entre los que de manera común se emplea xilacina (0.44 mg/kg IM, SC) o dexmedetomidina (7 µg/kg IM o 3.5 µg/kg IV). Ambos pueden provocar depresión respiratoria, que en caso de ser considerada riesgosa para el paciente, se puede revertir con yohimbina (0.11 mg/kg IV lenta) o atipamezol (0.05 mg/kg IM), una vez obtenido el efecto emético. Aunque muchos autores señalan que está contraindicado, en años recientes se ha señalado que puede emplearse apomorfina (0.25 mg/kg) por vía conjuntival, lo cual permite la remoción mediante lavado cuando ya se haya logrado el objetivo evacuante, aunque es necesario mantener una estrecha vigilancia del paciente. En la literatura existe abundante información respecto al uso de peróxido de hidrógeno como emético, sin embargo, dado el efecto lesivo no es recomendable y mucho menos en gatos.

Otras alternativas incluyen el lavado gástrico, aunque suele recomendarse más en casos de que el paciente hubiera ingerido grandes cantidades de planta, que no suele ser común en intoxicaciones por lirios y menos aún en pacientes felinos, a diferencia de los perros.

En caso de que la emesis o el lavado gástrico pudieran fallar, se puede considerar la remoción mediante endoscopia, siempre que se tenga certeza de que ingirió partes de la planta, ya que para el polen resultaría totalmente ineficaz. Esta técnica es de gran utilidad en muchos casos, desafortunadamente, no siempre está disponible en la clínica de manera oportuna.

C. Neutralizante

Si se le observa ingiriendo la planta, la administración de carbón activado es de gran utilidad. De igual manera, es importante considerar el riesgo que representa el polen, de tal manera que, el paciente puede no ingerir la planta, pero si tener contacto con ella y, posteriormente, mediante el acicalado, el polen será ingerido y la intoxicación se generará. En este orden de ideas, es conveniente apegarse a la máxima de que «si el tóxico y el animal están en el mismo espacio, la probabilidad de la intoxicación existe», así, lo más conveniente es evitar la interacción de gatos y lirios.

El carbón vegetal, a dosis habituales de 1-4 gramos por kg se considera eficaz para impedir la absorción de muchos tóxicos y, aunque en este caso, como se señaló previamente, no ha sido identificada la toxina de los lirios, la neutralización gástrica se ha demostrado y en consecuencia, es una práctica recomendada. La dosis puede repetirse, a criterio del médico veterinario.

D. Antidótico

Al desconocerse la toxina implicada, no se dispone de antídoto.



E. Signológico

Fallo renal.

La fluidoterapia ofrece los mejores resultados si se inicia durante las primeras 18 horas tras la ingesta, ya que la diuresis (130 ml/kg/día IV) es la mejor manera de proteger el riñón y en consecuencia, el pronóstico suele ser favorable. Es por ello que deberá ser instaurada antes de que se genere el proceso de necrosis tubular. En este caso en particular funciona muy bien la solución salina al 0.9% (130 ml/kg/día IV) durante 24 a 72 horas. Luego se disminuirá paulatinamente de acuerdo al comportamiento de los niveles de urea y creatinina, que deberán monitorearse de forma repetida. Sin embargo, si el tratamiento se retrasa hasta los primeros signos de oliguria, el pronóstico es muy grave.

En los pacientes que alcanzan la fase de anuria, el panorama se complica. En estos casos se implementará un tratamiento con diuréticos como la furosemida (1-2 mg/kg/hora IV) o manitol (1-2 mg/kg en bolos IV). Los diuréticos deberán emplearse cuando el paciente esté correctamente hidratado.

Algunos autores consideran de gran eficacia la diálisis peritoneal, sin embargo, en pocos casos está disponible.

Emesis.

No suele ser frecuente que se manifieste de forma repetida y en consecuencia no revierte mucha importancia, sin embargo, en aquellos pacientes en los que sea la excepción, se deberá iniciar un tratamiento. De manera habitual se utilizará citrato de maropitant (1 mg/kg SC cada 24 h), ondansetrón (0.1-0.5 mg/kg IM cada 8-12 h. Aunque la mayoría de las formulaciones restringen su uso en gatos, se ha demostrado que lo toleran bien), dolasetrón (0.5-1 mg/kg IV cada 24 horas; misma condición del ondansetrón), metoclopramida (0.2-0.5 mg/kg IM, IV cada 8-12 h). De los cuatro, habrá de considerarse de elección el citrato de maropitant, toda vez que tiene una acción más prolongada, comparado con los otros dos fármacos señalados, de los cuales, la metoclopramida es la menos eficaz y por ello es la menos recomendada. Existen presentaciones de antieméticos para administración oral (cisaprida y los tres ya citados se disponen para dicha vía), sin embargo, es una clara incongruencia administrarlos de forma enteral puesto que existe gran probabilidad de que sean evacuados antes de alcanzar la absorción y en consecuencia su eficacia sería nula.

Protección gástrica.

Es posible que se requiera el uso de fármacos protectores. De uso común encontramos a los inhibidores de la bomba de protones como el omeprazol (1 mg/kg VO si no hay emesis, IV, cada 24 h), antagonistas de los receptores H₂ como la cimetidina (5-10 mg/kg VO si no hay emesis, SC, IM, IV cada 6 h), ranitidina (2 mg/kg VO si no hay emesis, IV lenta,



cada 8-12 h) o famotidina (0.5-1 mg/kg VO si no hay emesis, SC, IM o IV lenta cada 12-24 h), aunque tienen un efecto más breve que el omeprazol y se consideran poco eficaces en felinos. De manera adicional se puede considerar el uso del sucralfato (250 mg VO cada 8 h durante 5-7 días).

F. Eliminatorio

Es muy importante incluir catárticos como el sulfato de magnesio (250 mg/kg VO) o sorbitol (al 70%, 3 ml/kg VO), a menos que el paciente presente diarrea, en cuyo caso estarán contraindicados estos fármacos. Suele administrarse de manera conjunta con el carbón vegetal, incrementando la eficacia para inhibir la absorción de la toxina, por una acción sinérgica.

En la literatura se señala la conveniencia de implementar técnicas avanzadas de depuración una vez que ha ocurrido la absorción del compuesto lesivo. Tal es el caso de la hemodiálisis o la diálisis peritoneal, sin embargo, son estrategias que comúnmente no están disponibles para el uso clínico y en consecuencia, sus bondades descritas, quedan en su mayoría, en un estatus anecdótico. Evidentemente, para el clínico que si disponga de ellas, deberá emplearlas sin lugar a dudas, puesto que incluso existen reportes de pacientes con signos de insuficiencia renal avanzada que se han recuperado con diálisis peritoneal o hemodiálisis.

G. Complementario

Será de gran ayuda que el paciente se mantenga con una dieta de prescripción renal y un monitoreo de la diuresis.

Pronóstico

Si las membranas basales de los túbulos renales no llegan a lesionarse, es posible la regeneración del epitelio tubular al cabo de 7-14 días del daño inicial.

2. Ricino

Clasificación toxicológica: Plantas que afectan al sistema digestivo.

Nombre científico: *Ricinus communis*.

Sinonimias: Higuera, ricino, palma Christi, higuera infernal, catapucia, tártago.

Generalidades

Pertenece a la familia de las Euforbiáceas y es originaria de África del Este, la cuenca del Mediterráneo y la India. Desde hace mucho tiempo su cultivo se ha extendido para extraer el aceite de las semillas que se ha usado tradicionalmente como laxante. En los últimos



años, además, se ha utilizado para la producción de biodiesel, que es demandado como un combustible renovable. De forma natural, su presencia es muy común en parques y jardines.



Figura 2. Planta de rinino, además de las cápsulas que contienen las semillas, se pueden observar las flores amarillas (masculinas) y rojas (femeninas).



Es fácilmente reconocible por sus hojas grandes almatilobuladas, sus flores en panícula y sus frutos en capsulas espinosas. Cada capsula se divide en tres secciones que contiene una semilla brillante grises, con manchas parduscas y negras. Es una planta anual herbácea.

Previamente ya se señaló su propiedad laxante, además de lo cual, en el Papiro de Ebers (1500 a.C.) se ha descrito su uso como abortivo, remedio para enfermedades abscesivas, calvicie, etc.; mientras que en el Papiro Hearst (de la misma época) es señalado que varias partes de la planta de ricino se utilizaban en preparados empleados para eliminar líquidos acumulados y promover la diuresis, así como se describe su uso externo en cataplasmas para curar heridas. Algunos hallazgos arqueológicos en la Cueva de la Frontera, en Sudáfrica, sugieren su uso como veneno desde hace aproximadamente 24,000 años. En el presente siglo, se ha documentado su extracción por el grupo terrorista Al Qaeda, aunque no se ha esclarecido si realmente la han utilizado con fines terroristas. Esto no es un hallazgo nuevo, puesto que, ha sido considerada en los programas de armamento químico y biológico de distintos países, sin embargo, se ha comprobado la dificultad para distribuirla de manera eficaz y lograr el cometido.

Toxicidad

Especies afectadas:

Perros y en general todas las especies incluido el humano.

Principios tóxicos y mecanismos de acción:

La semilla contiene ricina, una fitotoxina proteica localizada en el albumen y actúa previniendo la síntesis proteica en los ribosomas. El ácido ricinoleico altera los mecanismos que regulan la permeabilidad de la membrana del enterocito, evento que provoca pérdida de agua y electrolitos.

Toda la planta se considera tóxica, sin embargo, es relevante precisar que, la semilla concentra la mayor cantidad de ricina. Está considerada una de las toxinas vegetales más potentes, e incluso a dosis muy bajas puede causar la muerte. De hecho, la dosis mínima letal es de 0.0001 mg/kg; aunque, por vía oral es menos toxica ya que no se absorbe bien. Por tanto la toxicidad dependerá en gran medida de que la semilla haya sido masticada o simplemente tragada.

Además de la alteración de la permeabilidad en los enterocitos, se ha indicado la acción en el proceso de síntesis proteica en los ribosomas. De manera específica, la toxina actúa mediante la inhibición de la subunidad 28s de los ribosomas de células eucariotas impidiendo la síntesis de proteínas, evento que conduce a la muerte celular. Este fenómeno no es exclusivo de los enterocitos, sino que afecta por igual a todas aquellas células con elevada actividad de síntesis proteica, como las de los túbulos renales, linfoides, entre otras.



Figura 3. Capsulas de ricino. Cada una contiene hasta tres semillas. Se caracteriza por sus espinas suaves. Al secarse es de color marrón y se abre violentamente para expulsar las semillas a grandes distancias.

Etiología

Ingestión de semillas o más frecuentemente de tortas utilizadas como abono y que resultan muy apetitosas para los perros. En el hogar, donde se puede considerar que la planta no está presente, se han reportado accidentes derivados de la ingesta de artesanías



(pulseras, collares) en los que se utilizaron semillas como ornamento y, al estar perforadas para engarzarlas, los ácidos gástricos favorecen la liberación de la toxina aun cuando el animal no haya mordido la semilla.

En un estudio retrospectivo de ingestión de semillas de ricino en perros, solo murió el 9%; la baja mortalidad producida se atribuyó a que probablemente los perros no masticaron la semilla, con lo que no se habrían liberado toxoalbúminas en el aparato digestivo y las semillas se habrían eliminado intactas por las heces. En los perros que murieron, las lesiones que se describen son similares a las de una enteritis gastrohemorrágica.

Dosis tóxica 50 (DL₅₀) VO (g/kg):		
Especie:	Semillas:	Torta o harina:
Bovino adulto:	2	3
Terneros:	0.5	-
Equinos:	0.1	3
Ovinos:	1.25	2.5
Caprinos:	5.5	-
Porcinos:	1.3	5-6
Gallinas:	1.4	40
Conejos:	1	2
Perros:	0.6-5	3-5

Tabla 1. Dosis tóxica de la ricina por vía oral.

Manifestaciones clínicas.

En el perro, tras un periodo de latencia de 12-72 horas se presenta un cuadro digestivo característico que incluye:

- ☐ Anorexia.
- ☐ Náuseas.
- ☐ Emesis intensa, eventualmente hematemesis.
- ☐ Diarrea acuosa y generalmente hemorrágica y muy violenta.
- ☐ Cólicos y/o dolor abdominal generalizado.

De manera adicional, el cuadro clínico puede incluir:

- ☐ Insuficiencia renal aguda (poco frecuente, derivada de glomerulonefritis), eventualmente se observará en principio oliguria.
- ☐ Abatimiento y postración, siendo un estado típico.
- ☐ Convulsiones.



- ☐ Hipovolemia.
- ☐ Evolución hacia la muerte en 2-3 días tras la fase convulsiva, aunque en algunos casos se ha relacionado con shock hipovolémico.

En ovinos, los signos clínicos descritos aparecen tras un periodo de latencia de 7-24 horas tras la ingestión de semillas, pero cuando lo hacen son muy graves y de mal pronóstico.

Cuadro digestivo característico que incluye:

- ☐ Anorexia.
- ☐ Náuseas.
- ☐ Emesis intensa, eventualmente hematemesis.
- ☐ Diarrea acuosa y generalmente hemorrágica y muy violenta.
- ☐ Cólicos y/o dolor abdominal generalizado.

De manera adicional, el cuadro clínico puede incluir:

- ☐ Insuficiencia renal aguda (poco frecuente, derivada de glomerulonefritis), suele caracterizarse por oliguria, azotemia, cilindruria y hematuria.
- ☐ Hipoglucemia.
- ☐ Hemolisis.
- ☐ Abatimiento y postración, siendo un estado típico.
- ☐ Convulsiones.
- ☐ Hipovolemia.
- ☐ Evolución hacia la muerte en 2-3 días tras la fase convulsiva e insuficiencia renal.

En patos que habitan zonas en las que abunda el ricino se ha reportado un alto índice de mortalidad con cuadros clínicos caracterizados por diarrea sanguinolenta e hipertermia. En general, los signos de la intoxicación en aves son muy parecidos a los producidos por el botulismo, en que hay una parálisis progresiva hasta la muerte.

Diagnóstico

Pruebas generales:

Niveles sanguíneos de:

- ☐ Urea.
- ☐ Creatinina.
- ☐ Alanina transaminasa (ALT).
- ☐ Aspartato transaminasa (AST).
- ☐ Biometría hemática.



- ☐ Volumen corpuscular (PCV).
- ☐ Proteínas totales en suero.

Análisis químico toxicológico:

Se puede determinar la presencia de biomarcadores de ricina en orina o sangre mediante HPLC. Sin embargo, es una prueba que no suele estar disponible en la clínica veterinaria.

Diferencial:

- ☐ Todas las intoxicaciones que produzcan daño gastrointestinal, por ejemplo: basura, fosforo de zinc, haba precatoria (*Abrus precatorius*), arsénico inorgánico, plomo, mercurio inorgánico, talio y micotoxinas como el deoxinivalenol (DON, vomitoxina).
- ☐ Diversidad de virus, bacterias, neoplasias y lesiones GI inflamatorias.

Hallazgos a la necropsia

En las intoxicaciones, es poco frecuente que se presenten lesiones patognomónicas, sin embargo eso no exenta de disponer de hallazgos que permitan enriquecer el historial clínico y perfilar el diagnóstico. En el caso de muerte tras la exposición a ricino, las alteraciones reportadas incluyen:

- ☐ Gastroenteritis sobreaguda.
- ☐ Hemorragias de la mucosa digestiva.
- ☐ Degeneración y posible necrosis del hígado y de los riñones.
- ☐ Congestión generalizada.

De manera experimental, en animales se ha reportado, tras la administración intramuscular de ricina, necrosis linfóide local severa, necrosis hepática, esplenitis difusa, hemorragia gastrointestinal y edema pulmonar de moderado a severo.

Protocolo terapéutico

Para la toma de decisiones respecto a la actuación del clínico, resulta fundamental considerar diversos factores que pueden determinar cuál será la mejor forma de implementar el protocolo terapéutico (anexo 1). En atención a ello, dentro de todos los aspectos que involucran una atención integral, encontramos los siguientes apartados:

A. Triage:

El abordaje inicial del paciente estará condicionado respecto al estado de salud (anexo 1) y, en caso de presentar un cuadro clínico de gravedad que ponga en riesgo inminente la vida del paciente, se deberá proceder con la estabilización aun cuando no se disponga con claridad la implicación de un tóxico o no. En este orden de ideas, en el anexo 2 se presenta



el panorama del *triage* y, para el caso particular de un paciente intoxicado con ricina, se deben considerar los siguientes aspectos:

- ☐ Shock hipovolémico: si bien es cierto, su presencia no es frecuente, habrá de considerarse el soporte, que incluiría en principio fluidos IV o en el mejor de los casos, transfusión de sangre fresca completa.
- ☐ Convulsiones: Diazepam (perros y gatos, 0.5-1 mg/kg IV cada 10 minutos hasta 3 veces o 1 mg/kg rectal. Los gatos tienen que vigilarse estrechamente). Se puede adicionar un relajante muscular como el metocarbamol (perros y gatos, 20 mg/kg VO c/8-12 hrs).

B. Evacuante:

Es de gran utilidad dentro de los primeros sesenta minutos tras la exposición. La vía de ingreso de la ricina es digestiva y para la descontaminación, generalmente resulta más conveniente el uso de fármacos, entre los que de manera común se emplea xilacina (0.44 mg/kg IM, SC) o dexmedetomidina (7 µg/kg IM o 3.5 µg/kg IV). Ambos pueden provocar depresión respiratoria, que en caso de ser considerada riesgosa para el paciente, se puede revertir con yohimbina (0.11 mg/kg IV lenta) o atipamezol (0.05 mg/kg IM), una vez obtenido el efecto emético. Como una buena alternativa, en años recientes se ha señalado la apomorfina (0.04 mg/kg IV, 0.08 mg/kg IM, 0.1 mg/kg SC, 0.1-0.5 mg/kg VO y 0.25 mg/kg conjuntival. Este fármaco ha sido señalado por provocar una emesis persistente y para algunos autores representa una importante desventaja, sin embargo, por vía conjuntival, permite la remoción mediante lavado cuando ya se haya logrado el objetivo evacuante y de esa manera se salva la controversia señalada. La inducción de la emesis puede fracasar en caso de ingesta de semillas puesto que estas pueden quedar atrapadas en los pliegues gástricos.

Como alternativa, en caso de fallar la inducción de la emesis, se puede considerar el lavado gástrico, sin embargo, es posible que de igual manera fracase si las semillas se atascan o incluso no logran ingresar en la sonda. En este sentido, se sugiere, siempre que la talla del paciente lo permita, elegir un calibre mayor al tamaño de la semilla. En estos pacientes, si se dispone, la remoción mediante endoscopia resultará de gran conveniencia, dado que permite la adecuada eliminación de las semillas.

C. Neutralizante:

Si se le observa ingiriendo la planta, la administración de carbón activado es de gran utilidad. De igual manera.

El carbón vegetal, a dosis habituales de 1-4 gramos por kg se considera eficaz para impedir la absorción de muchos tóxicos. La neutralización gástrica de la ricina se ha demostrado y en consecuencia, es una práctica recomendada. Si bien es cierto que las



semillas pueden ser expulsadas indemnes con las heces debido a la resistente cubierta, ante la posibilidad de trituración al momento de que el paciente las tragó, es de gran importancia mantener dosis repetidas de carbón hasta que exista evidencia de su expulsión. En este sentido es de gran utilidad el diagnóstico por imagen, para cuantificar el material y la cantidad ingerida. Además, aun cuando la semilla ingrese entera, es factible que pueda ser atrapada por los pliegues gastrointestinales y así permanecer por tiempo prolongado en tracto gastrointestinal.

D. Signológico:

Deshidratación e insuficiencia renal:

Es fundamental instaurar una correcta terapia de fluidos.

Emesis.

Con frecuencia, el paciente presentará emesis persistente por lo que se recomienda, en atención a factores tales como riesgo de broncoaspiración, desequilibrio de líquidos y electrolitos, iniciar un tratamiento. De manera habitual se utilizará citrato de maropitant (1 mg/kg SC cada 24 h), ondansetrón (0.1-0.5 mg/kg IM cada 8-12 h. Aunque la mayoría de las formulaciones restringen su uso en gatos, se ha demostrado que lo toleran bien), metoclopramida (0.2-0.5 mg/kg IM, IV cada 8-12 h). De los cuatro, habrá de considerarse de elección el citrato de maropitant, toda vez que tiene una acción más prolongada, comparado con los otros dos fármacos señalados, de los cuales, la metoclopramida es la menos eficaz y por ello es la menos recomendada. Existen presentaciones de antieméticos para administración oral (cisaprida y los tres ya citados se disponen para dicha vía), sin embargo, es una clara incongruencia administrarlos por dicha vía puesto que existe gran probabilidad de que sea evacuada antes de alcanzar la absorción y en consecuencia se eficacia sería nula.

Protección gástrica.

Es de vital importancia el uso de fármacos protectores. De uso común encontramos a los inhibidores de la bomba de protones como el omeprazol (1 mg/kg VO si no hay emesis, IV cada 24 h), antagonistas de los receptores H₂ como la cimetidina (5-10 mg/kg VO si no hay emesis, SC, IM, IV cada 6 h), ranitidina (2 mg/kg VO si no hay emesis, IV lenta, cada 8-12 h) o famotidina (0.5-1 mg/kg VO si no hay emesis, SC, IM o IV lenta cada 12-24 h), aunque tienen un efecto más breve que el omeprazol. De manera adicional se puede considerar el uso del sucralfato (250 mg – 2 gr VO cada 8 h).

Dolor.

En bastante frecuente que el paciente manifieste dolor visceral dado el potencial lesivo de la ricina. En atención a ello, es necesario iniciar con un protocolo que mitigue el malestar



del paciente. En el mercado se dispone de una variedad de fármacos analgésicos, sin embargo habrá de tenerse cuidado al momento de elegir uno, considerando que, en principio, deberá ser eficaz para el dolor visceral y, que no represente riesgo de provocar y/o magnificar el daño gástrico presente en el paciente.

En este orden de ideas, si bien es cierto que, los AINE's son fármacos de uso frecuente en medicina veterinaria y su eficacia contra el dolor visceral se encuentra ampliamente demostrada, resulta importante considerar que de igual manera son conocidos por el potencial lesivo para sistema digestivo y renal. Y es esa situación la que precisamente los descarta por completo en un paciente intoxicado por ricina, toda vez que ambos sistemas se ven comprometidos por acción de la toxina. Es por ello que se consideran de elección los fármacos opioides como el tramadol (2-4 mg/kg IM, IV cada 8 h) y la buprenorfina (5-20 µg/kg IM, IV, SC, cada 8-12 h), siendo esta última la que tiene mayor duración en su efecto analgésico.

Convulsiones:

En los pacientes que se lleguen a presentar crisis convulsivas, se debe actuar de inmediato, considerando, en orden de idoneidad, administrar diazepam (0.5-1 mg/kg IV q10 minutos hasta 3 veces o 1 mg/kg rectal, máximo 20 mg/paciente), pentobarbital (5-15 mg/kg IV a efecto) o levetiracetam (20 mg/kg IV c/8 h).

E. Antidótico:

No existe un antídoto específico. De manera experimental se ha trabajado con un antisuero, sin embargo no está disponible de manera comercial.

F. Eliminatorio:

Considerando que la ricina se excreta por vía renal, es importante implementar un protocolo de diuresis forzada para reducir el tiempo de eliminación. De igual manera es muy importante incluir catárticos como el sulfato de magnesio (250 mg/kg VO) o sorbitol (al 70%, 3 ml/kg VO), a menos que el paciente presente diarrea, en cuyo caso estarán contraindicados estos fármacos.

G. Complementario:

En consideración al severo daño en mucosa gastrointestinal, el paciente deberá ingerir dieta blanda específica para cuidados GI.

De manera adicional se deberá incluir un antibiótico de amplio espectro dado que, las lesiones GI pueden ser el detonante para infecciones por patógenos oportunistas. Por considerar algún fármaco, se puede usar Amoxicilina (10-20 mg/kg VO).



Pronóstico

Algunos estudios avalan un panorama alentador para los pacientes intoxicados por ricina. Sin embargo, habrá de evitarse un exceso de confianza y brindar un tratamiento oportuno e integral, además de una estrecha vigilancia de la evolución.

3. Nochebuena

Clasificación toxicológica: Planta que afecta al sistema digestivo.

Nombre científico: *Euphorbia pulcherrima*.

Sinonimias: Flor de pascua, pascuera, poinsettia.

Generalidades

Se conocen aproximadamente 2000 especies de *Euphorbia*. La mayoría de las especies del género son hierbas, arbustos, árboles o lianas. Vulgarmente se denominan lechetreznas debido a su látex blanco, que se ha utilizado como tratamiento antiverrugas y para envenenar el agua. Son comunes en climas tropicales y regiones templadas. En América y África son abundantes.

La *Euphorbia pulcherrima* es una planta ornamental con vistosas brácteas rojas, rosas o blancas y flores amarillas arregladas en un llamado ciato. De hojas caducas, verdes y lanceoladas.

Toxicidad

Especies afectadas:

Perros y gatos. Otras especies del género *Euphorbia* pueden afectar al ganado bovino, caprino y ovino.

Principios tóxicos y mecanismos de acción:

Contiene un látex muy irritante compuesto de ésteres diterpénicos derivados del ingenol y el forbol. Los ésteres del forbol activan la proteinacinas C, que a su vez fosforila factores de transcripción de genes, aumentando o disminuyendo la expresión. Algunos de los factores que altera son protooncogenes, por lo que además de poder causar la muerte celular, se consideran promotores tumorales. Se desconocen las dosis tóxicas.

Etiología

Aunque sin distinción etaria pueden ocurrir las intoxicaciones, se reportan con mayor frecuencia en animales jóvenes. De igual manera influyen los hábitos siendo los animales curiosos los más frecuentemente involucrados, así como aquellos que pasan mucho tiempo a solas o bien, tienen poca actividad, lo que predispone al aburrimiento y dicha situación se ha relacionado con accidentes tóxicos en el hogar.



En ganado se produce por la ingesta de heno contaminado, ya que las plantas verdes tienen un sabor muy acre y son rechazadas por los animales.



Figura 4. Flor de nochebuena. Aunque suele crecer de forma silvestre; en el hogar es muy frecuente sobre todo en los meses de diciembre y enero, al ser parte de los ornamentos de la Navidad.

Manifestaciones clínicas

- ☐ Dérmicas: Incluye reacciones locales por contacto del látex con la piel y las mucosas: irritación, dermatitis vesiculosa, edema ligero, prurito y eritema.
- ☐ Oculares: El latex puede provocar conjuntivitis y lagrimeo.
- ☐ Generales en caso de ingestión: Irritación de cavidad oral y todo el tracto gastrointestinal. Causa salivación excesiva, emesis, eventualmente diarrea. En muy raras ocasiones la emesis se torna persistente y puede llegar a provocar deshidratación y/o desordenes de electrolitos.

En casos severos, que son muy infrecuentes, puede manifestarse cierto grado de compromiso neurológico caracterizado principalmente por temblores. La evolución generalmente es favorable en 2 a 4 días.

Diagnóstico

Pruebas generales:

En la mayoría de los pacientes no hay cambios significativos que puedan evidenciarse



mediante análisis clínicos. En caso de emesis persistente, podrá considerarse monitorizar la hidratación y electrolitos.

En pacientes con emesis severa y persistente si es recomendable realizar una analítica completa para descartar otras causas de emesis tales como pancreatitis, insuficiencia hepática y/o renal, entre otras.

Análisis químico toxicológico:

Es posible determinar la presencia de los fenoles mediante cromatografía líquida de alta eficacia (HPLC), aunque suele restringirse con fines de investigación y no para el diagnóstico clínico.

Diferencial:

Otras causas de enfermedad gastrointestinal:

- ☐ Pancreatitis.
- ☐ Ingestión de otros cáusticos.
- ☐ Obstrucción por cuerpos extraños.
- ☐ Gastroenteritis infecciosas (parvovirus, coronavirus, etc.).
- ☐ Neoplasias.

Hallazgos a la necropsia

En las intoxicaciones, es poco frecuente que se presenten lesiones patognomónicas, sin embargo eso no exenta de disponer de hallazgos que permitan enriquecer el historial clínico y perfilar el diagnóstico. En el caso de muerte tras la exposición a nochebuena, las alteraciones reportadas incluyen:

- ☐ Vesículas en las mucosas.
- ☐ Gastroenteritis de ligera a moderada.

Protocolo terapéutico

Para la toma de decisiones respecto a la actuación del clínico, resulta fundamental considerar diversos factores que pueden determinar cuál será la mejor forma de implementar el protocolo terapéutico (anexo 1). En atención a ello, dentro de todos los aspectos que involucran una atención integral, encontramos los siguientes apartados:

A. Triage:

El abordaje inicial del paciente estará condicionado respecto al estado de salud (anexo 1) y, en caso de presentar un cuadro clínico de gravedad que ponga en riesgo inminente la vida del paciente, se deberá proceder con la estabilización aun cuando no se disponga con claridad la implicación de un tóxico o no. En este orden de ideas, en el anexo 2 se presenta el panorama del *triage* y, para el caso particular de un paciente intoxicado con



nochebuena, se deben considerar los siguientes aspectos:

- ☐ Compromiso neurológico: Es poco frecuente y se caracteriza por temblores y puede atenderse con relajantes musculares como el metocarbamol (20 mg/kg VO cada 8-12 hrs).

B. Evacuante:

En caso de exposición dérmica, se recomienda el lavado de las zonas afectadas con grandes cantidades de agua y un jabón neutro.

Si hay evidencia de afección ocular, se procederá al lavado de los ojos con agua abundante durante 15-20 minutos, posteriormente se aplicarán colirios anestésicos (tetracaína al 1%) y se evaluará la integridad del epitelio corneal con gotas de fluoresceína. Ante la evidencia de ulceración podrá recurrirse al uso de corticoides y antibióticos oftálmicos.

Para la descontaminación digestiva, generalmente resulta más conveniente el uso de fármacos, entre los que de manera común se emplea xilacina (0.44 mg/kg IM, SC) o dexmedetomidina (7 µg/kg IM o 3.5 µg/kg IV). Ambos pueden provocar depresión respiratoria, que en caso de ser considerada riesgosa para el paciente, se puede revertir con yohimbina (0.11 mg/kg IV lenta) o atipamezol (0.05 mg/kg IM), una vez obtenido el efecto emético. Como una buena alternativa, en años recientes se ha señalado la apomorfina (0.04 mg/kg IV, 0.08 mg/kg IM, 0.1 mg/kg SC, 0.1-0.5 mg/kg VO y 0.25 mg/kg conjuntival). Este fármaco ha sido señalado por provocar una emesis persistente y para algunos autores representa una importante desventaja, sin embargo, por vía conjuntival, permite la remoción mediante lavado cuando ya se haya logrado el objetivo evacuante y de esa manera se salva la controversia señalada.

Otras alternativas incluyen el lavado gástrico, aunque suele recomendarse más en casos de que el paciente hubiera ingerido grandes cantidades de planta. Es posible que esta estrategia fracase si los fragmentos de planta se atascan o incluso no logran ingresar en la sonda. En este sentido, se sugiere, siempre que la talla del paciente lo permita, elegir un calibre mayor al tamaño de la semilla. En estos pacientes, si se dispone, la remoción mediante endoscopia resultará de gran conveniencia, dado que permite la adecuada eliminación de los restos vegetales.

En caso de que la emesis o el lavado gástrico pudieran fallar, se puede considerar la remoción mediante endoscopia. Esta técnica es de gran utilidad en muchos casos, desafortunadamente, no siempre está disponible en la clínica de manera oportuna.

C. Neutralizante:

Si se le observa ingiriendo la planta, la administración de carbón activado es de gran utilidad. A dosis habituales de 1-4 gramos por kg se considera eficaz para impedir la



absorción de muchos tóxicos y, aunque no se ha reportado una especificidad respecto a la intoxicación por nochebuena, es recomendable utilizarlo a dosis repetidas cada 4-6 horas.

D. Signológico:

Emesis.

Con frecuencia, el paciente en la mayoría de los casos, presentará emesis persistente por lo que se recomienda, en atención a factores tales como riesgo de broncoaspiración, desequilibrio de líquidos y electrolitos, iniciar un tratamiento. De manera habitual se utilizará citrato de maropitant (1 mg/kg SC cada 24 h), ondansetrón (0.1-0.5 mg/kg IM cada 8-12 h. Aunque la mayoría de las formulaciones restringen su uso en gatos, se ha demostrado que lo toleran bien), metoclopramida (0.2-0.5 mg/kg IM, IV cada 8-12 h). De los cuatro, habrá de considerarse de elección el citrato de maropitant, toda vez que tiene una acción más prolongada, comparado con los otros dos fármacos señalados, de los cuales, la metoclopramida es la menos eficaz y por ello es la menos recomendada. Existen presentaciones de antieméticos para administración oral (cisaprida y los tres ya citados se disponen para dicha vía), sin embargo, es una clara incongruencia administrarlos por dicha vía puesto que existe gran probabilidad de que sea evacuada antes de alcanzar la absorción y en consecuencia se eficacia sería nula.

Protección gástrica.

Es de vital importancia el uso de fármacos protectores. De uso común encontramos a los inhibidores de la bomba de protones como el omeprazol (1 mg/kg VO si no hay emesis, IV cada 24 h), antagonistas de los receptores H₂ como la cimetidina (5-10 mg/kg VO cada 6-8 h), ranitidina (2 mg/kg VO si no hay emesis, IV lenta, cada 8 h) o famotidina (0.5-1 mg/kg VO si no hay emesis, SC, IM o IV lenta cada 12-24 h), aunque tienen un efecto más breve que el omeprazol. De manera adicional se puede considerar el uso del sucralfato (250 mg VO cada 8 h).

Dolor.

En bastante frecuente que el paciente manifieste dolor en cavidad oral y en casos severos, en todo el tracto digestivo. En atención a ello, es necesario iniciar con un protocolo que mitigue el malestar del paciente. En el mercado se dispone de una variedad de fármacos analgésicos, sin embargo habrá de tenerse cuidado al momento de elegir uno, considerando que, en principio, deberá ser eficaz para el dolor visceral y, que no represente riesgo de provocar y/o magnificar el daño gástrico presente en el paciente.

En este orden de ideas, si bien es cierto que, los AINE's son fármacos de uso frecuente en medicina veterinaria y su eficacia contra el dolor visceral se encuentra ampliamente demostrada, resulta importante considerar que de igual manera son conocidos por el potencial lesivo para sistema digestivo y renal. Y es esa situación la que



precisamente no se aconseja su uso en casos donde haya evidencia de daño gastrointestinal severo. Es por ello que, para esos pacientes, se consideran de elección los fármacos opioides como el tramadol (2-4 mg/kg IM, IV cada 8 h) y la buprenorfina (5-20 µg/kg IM, IV, SC, cada 8-12 h), siendo esta última la que tiene mayor duración en su efecto analgésico. En caso de que el daño se limite a cavidad oral, se puede recurrir a enjuagues con algún anestésico local.

E. Antidótico:

No hay antídoto.

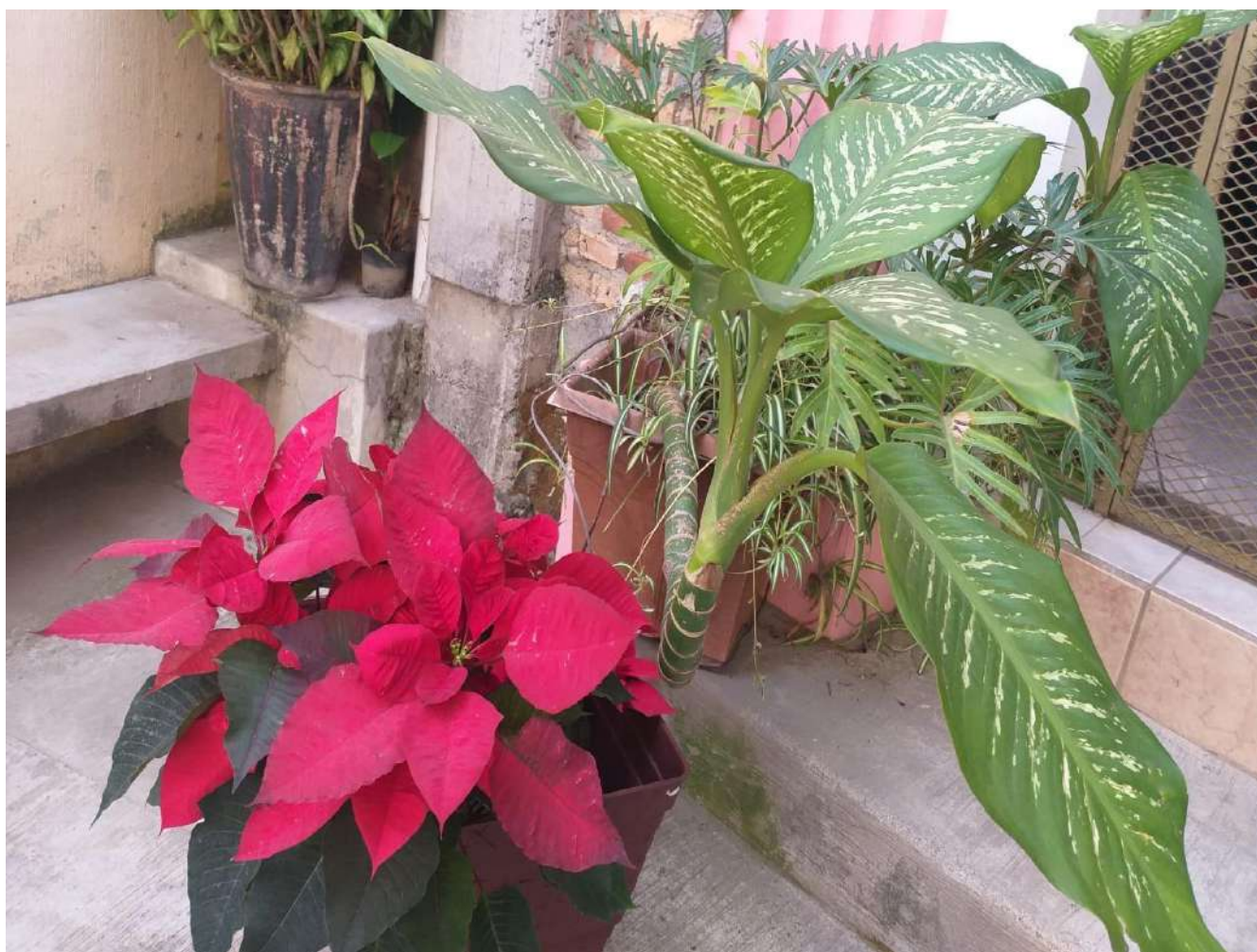


Figura 5. Flor de Nochebuena y planta de *Dieffenbachia*. Ambas se usan como plantas de ornato en casas y lugares públicos como parques.



F. Eliminatorio:

Es conveniente la administración de catárticos como el sulfato de magnesio (250 mg/kg VO) o sorbitol (al 70%, 3 ml/kg VO), a menos que el paciente presente diarrea, en cuyo caso estarán contraindicados estos fármacos.

G. Complementario:

Mientras el paciente presente emesis, deberá suspenderse la administración de alimento y agua, reiniciándose en pequeñas porciones una vez que el estómago se asiente. Después, en consideración al severo daño en mucosa gastrointestinal, el paciente deberá ingerir dieta blanda específica para cuidados GI.

De manera adicional se deberá incluir un antibiótico de amplio espectro dado que, las lesiones GI pueden ser el detonante para infecciones por patógenos oportunistas. Por considerar algún fármaco, se puede usar Amoxicilina (10-20 mg/kg VO).

Pronóstico

La mortalidad es poco frecuente. En general, es bueno siempre que se brinde un tratamiento oportuno e integral, además de una estrecha vigilancia de la evolución.

4. *Dieffenbachia* SPP.

Clasificación toxicológica: Planta que afecta al sistema digestivo.

Nombre científico: *Dieffenbachia* spp.

Nombres comunes: Flor de coche, matapuercos, lotería, caña muda, millonaria, lirio leopardo.

Generalidades

Es una planta ornamental de la familia de las Aráceas. Son plantas principalmente tropicales, aunque están ampliamente difundidas como ornamentales de interior. La característica de todas las aráceas consiste en presentar sus flores agrupadas en espádices protegidos por una bráctea llamada espata. La familia de las Aráceas incluye alrededor de 200 especies ampliamente distribuidas en todo el mundo.

Toxicidad

Especies afectadas:

Perros, gatos y en general todas las especies. Se consideran altamente tóxicas para canarios y otras aves de ornato.

Principios tóxicos y mecanismo de acción:

Los principios tóxicos son cristales puntiformes de oxalato cálcico insolubles que se



encuentran en el interior de las células especializadas llamadas idioblastos. Además contienen enzimas proteolíticas liberadoras de histamina, prostaglandinas, ácido oxálico y cininas. Al masticar las hojas y romperse la integridad de los idioblastos, los cristales se liberan y se clavan en la mucosa, produciendo una intensa irritación e inflamación de toda la cavidad bucal: lengua, labios, paladar y mucosa oral.

De toda la familia, la *Dieffenbachia* spp. es la involucrada con mayor frecuencia en intoxicaciones de los animales domésticos.



Figura 6. Planta de *Dieffenbachia*. Ornato en la vía pública, al alcance de animales, con el consecuente riesgo de intoxicación.

Etiología

Los perros y los gatos son las especies que con mayor frecuencia se intoxican con *Dieffenbachia* dado que es una planta habitual en el hogar. En el caso de los perros, los accidentes suelen estar relacionados con el juego y exploración en cachorros, aunque más comúnmente se reporta como consecuencia de los hábitos destructivos. Los gatos, eventualmente suelen mordisquear las hojas.

Aunque sin distinción etaria pueden ocurrir las intoxicaciones, se reportan con mayor frecuencia en animales jóvenes. De igual manera influyen los hábitos siendo los animales curiosos los más frecuentemente involucrados, así como aquellos que pasan mucho tiempo a solas o bien, tienen poca actividad, lo que predispone al aburrimiento y dicha situación se ha relacionado con accidentes tóxicos en el hogar.



Manifestaciones clínicas

El cuadro puede ser multisistémico.

Gastrointestinal:

- ☐ Dolor oral inmediato evidenciado por vocalizaciones. El paciente suele frotarse el hocico con los miembros.
- ☐ Hipersalivación.
- ☐ Eritema.
- ☐ Emesis que en casos severos evoluciona a hematemesis.
- ☐ Edema de labios, lengua e incluso faringe.
- ☐ Anorexia progresiva.

Respiratorio:

Existen pocos casos en los que se vea involucrado, sin embargo, ha llegado a reportarse:

- ☐ Disnea.
- ☐ Inflamación de la laringe. En casos severos puede ser tan extrema que ocasione obstrucción.

Ocular:

Es común, cuando existen salpicaduras, que los cristales se incrusten en el epitelio corneal y se produzca:

- ☐ Dolor severo.
- ☐ Sensibilidad a la luz.
- ☐ Edema conjuntival.

Dérmicos:

- ☐ Irritación.
- ☐ Eritema.
- ☐ Dolor moderado a severo.

Diagnóstico

Pruebas generales:

- ☐ Electrolitos y química sanguínea (es útil para determinar ciertos desequilibrios asociados a emesis persistente, pero de poca utilidad para esclarecer la causa).

Análisis químico toxicológico.

La toxicidad se atribuye a los cristales de oxalatos y, actualmente las técnicas de HPLC no se emplean para determinarlos, aunque si pueden utilizarse para identificar y cuantificar otros compuestos proteínas y compuestos nitrogenados que contribuyen a la toxicidad, especialmente a la respuesta inflamatoria que se presenta tras la exposición.



Diferencial:

- ☐ Enfermedad periodontal.
- ☐ Enfermedades sistémicas que involucren lesiones en cavidad oral y manifestaciones gastrointestinales.
 - Estomatitis urémica.
- ☐ Tóxicos:
 - Cáusticos (álcalis, ácidos).
 - Otros agentes que provoquen irritación gastrointestinal: permetrinas, detergentes, etc.).
 - Plantas que contengan aceites amargos.
 - Ortigas.

Hallazgos a la necropsia

En las intoxicaciones, es poco frecuente que se presenten lesiones patognomónicas, sin embargo eso no exenta de disponer de hallazgos que permitan enriquecer el historial clínico y perfilar el diagnóstico. En el caso de muerte tras la exposición a *Dieffenbachia*, las alteraciones reportadas incluyen:

- ☐ Eritema y edema en cavidad oral, faringe, esófago.
- ☐ Lesiones gastrointestinales erosivas.
- ☐ Eritema y edema en esclerótica.
- ☐ Apariencia nodular del epitelio corneal.

Protocolo terapéutico

Para la toma de decisiones respecto a la actuación del clínico, resulta fundamental considerar diversos factores que pueden determinar cuál será la mejor forma de implementar el protocolo terapéutico (anexo 1). En atención a ello, dentro de todos los aspectos que involucren una atención integral, encontramos los siguientes apartados:

A. Triage:

El abordaje inicial del paciente estará condicionado respecto al estado de salud (anexo 1) y, en caso de presentar un cuadro clínico de gravedad que ponga en riesgo inminente la vida del paciente, se deberá proceder con la estabilización aun cuando no se disponga con claridad la implicación de un tóxico o no. En este orden de ideas, en el anexo 2 se presenta el panorama del *triage* y, para el caso particular de un paciente intoxicado con lirios, se deben considerar los siguientes aspectos:

- ☐ Respiratorio: vigilar a los pacientes con disnea y edema en faringe. En caso de obstrucción se puede recurrir a traqueotomía y oxigenoterapia.
- ☐ Cardiovascular: en caso de sangrados profusos, se deben incluir en el tratamiento fluidos IV o en el mejor de los casos, transfusión de sangre fresca completa.



B. Evacuante:

En principio, en el paciente intoxicado, es más importante amortiguar el daño local, por lo que se considera fundamental iniciar la atención de acuerdo a la zona afectada:

- ☐ Cavity oral: Lavado abundante de cavidad oral, se recomienda usar fluidos fríos.
- ☐ Ojos: Lavado abundante con solución fisiológica durante 15 minutos. En caso de ser necesario, se podrá continuar por más tiempo y ante la evidencia de daño en el epitelio corneal, es conveniente el tratamiento (analgésicos, corticoides y antibióticos tópicos). Para ello es conveniente el uso de fluoresceína, que evidenciará la presencia y extensión del daño.

No se recomienda la inducción de la emesis ante el riesgo de agravar el daño provocado durante la ingesta de la planta.

En caso de ingesta de grandes cantidades, se puede considerar realizar el lavado gástrico, teniendo en consideración que deberá manipularse cuidadosamente al paciente en caso confirmado o sospechoso de ulceración, debido a que la sonda pudiera llegar a perforar la mucosa gástrica o bien, exacerbar el daño presente. Además, es necesario considerar el calibre de la sonda, para que sea suficiente y permita la extracción de los fragmentos de la planta ingerida.

C. Neutralizante:

El carbón vegetal no ofrece buena captación de los cristales de oxalato, por lo cual su uso no es recomendado. En estos casos es conveniente recurrir a los demulcentes en pequeñas cantidades (leche, yogurt, jugo de atún) o cualquier otro producto que contenga calcio para captar los cristales de oxalato. No existe claridad respecto a las cantidades a administrar, sin embargo, de manera general se considera que son productos inocuos, por lo que tampoco representa riesgo de exceder determinada cantidad.

D. Signológico:

Deshidratación:

Fluidos IV en pacientes con emesis persistente.

Emesis:

No suele ser frecuente que se manifieste de forma repetida y en consecuencia no revierte mucha importancia, sin embargo, en aquellos pacientes en los que sea la excepción, se deberá iniciar un tratamiento. De manera habitual se utilizará citrato de maropitant (1 mg/kg SC cada 24 h), ondansetrón (0.1-0.5 mg/kg IM cada 8-12 h. Aunque la mayoría de las formulaciones restringen su uso en gatos, se ha demostrado que lo toleran bien), dolasetrón (0.5-1 mg/kg IV cada 24 horas; misma condición del ondansetrón), metoclopramida (0.2-0.5 mg/kg IM, IV cada 8-12 h). De los cuatro, habrá de considerarse de elección el citrato de maropitant, toda vez que tiene una acción más prolongada,



comparado con los otros dos fármacos señalados, de los cuales, la metoclopramida es la menos eficaz y por ello es la menos recomendada. Existen presentaciones de antieméticos para administración oral (cisaprida y los tres ya citados se disponen para dicha vía), sin embargo, es una clara incongruencia administrarlos por vía enteral puesto que existe gran probabilidad de que sean evacuados antes de alcanzar la absorción y en consecuencia se eficacia sería nula.

Protección gástrica.

Es posible que se requiera el uso de fármacos protectores. De uso común encontramos a los inhibidores de la bomba de protones como el omeprazol (1 mg/kg VO si no hay emesis, IV, cada 24 h), antagonistas de los receptores H₂ como la cimetidina (5-10 mg/kg VO si no hay emesis, SC, IM, IV cada 6 h), ranitidina (2 mg/kg VO si no hay emesis, IV lenta, cada 8-12 h) o famotidina (0.5-1 mg/kg VO si no hay emesis, SC, IM o IV lenta cada 12-24 h), aunque tienen un efecto más breve que el omeprazol y, en felinos, se consideran poco eficaces. De manera adicional se puede considerar el uso del sucralfato (250 mg VO cada 8 h durante 5-7 días).

Dolor e inflamación.

- ☐ Antiinflamatorios no esteroideos (evitar si se sospecha o se tienen confirmadas las úlceras gastrointestinales). De elección se pueden considerar el carprofeno (perros: 2.2 mg/Kg VO [en ausencia de emesis], cada 12-24 h) (gatos: 1-2 mg/kg SC cada 24 h, limitado a dos dosis); Deracoxib (perros: 1-2 mg/kg VO [en ausencia de emesis]); Robenacoxib (gatos: 1 mg/kg VO [en ausencia de emesis] cada 24 h, limitado a tres dosis).
- ☐ Corticosteroides: Su uso es controversial, sin embargo, en pacientes con severa inflamación se ha demostrado la eficacia del fosfato de dexametazona (0.125-0.5 mg/kg IV, IM, SC).
- ☐ Opioides: Son una alternativa para el tratamiento del dolor, aunque no para la inflamación. De uso recurrente se considera el tramadol (2-4 mg/kg IM, IV cada 8 h) y la buprenorfina (5-20 µg/kg IM, IV, SC, cada 8-12 h), siendo esta última la que tiene mayor duración en su efecto analgésico.

E. Antidótico:

No existe un antídoto específico, sin embargo, en la práctica clínica, se ha utilizado gluconato de calcio en dosis de 0.2-0.5 mg/kg IV para perros.

F. Eliminatorio:

Los cristales de oxalato presentes en la *Dieffembachia* son insolubles por lo que la absorción es poco frecuente. En este orden de ideas, la eliminación se realizará mediante



el uso de laxantes y catárticos, como el sulfato de magnesio (250 mg/kg VO) o sorbitol (al 70%, 3 ml/kg VO), a menos que el paciente presente diarrea, en cuyo caso estarán contraindicados estos fármacos.

G. Complementario:

En estos casos resulta fundamental mantener una dieta palatable y blanda. Es preferente administrarla por lo menos durante 10 días, dependiendo de la severidad del daño.

Pronóstico

Suele ser favorable en la mayoría de los casos, en especial en aquellos pacientes con un cuadro clínico moderado. Este cuadro suele limitarse a daño local en cavidad oral y, eventualmente en estómago e intestinos. La afección ocular, aunque puede tardar algunas semanas, suele ser completa.

Anexo 1. Determinantes de la conducta terapéutica

Existen factores que van a determinar hasta qué punto el facultativo podrá desarrollar las estrategias o por el contrario en qué casos no debe recurrir a ellas, ya sea porque presentan al momento actual una eficacia nula o dudosa o bien, porque definitivamente están contraindicadas. Concretamente hay tres factores que deben tenerse en cuenta al momento de la toma de decisiones:

1. El momento de iniciarse el tratamiento.

En el tratamiento de una intoxicación, un factor determinante del abordaje terapéutico y, posiblemente del desenlace del evento, es el tiempo. Es completamente distinto el panorama de un paciente presentado a la consulta minutos después de haberse expuesto al tóxico o con prontitud una vez que evidenciaron alguna anormalidad a aquel que manifestó enfermedad y los propietarios decidieron esperar un tiempo «a ver si se le pasaba». En este sentido, por el tiempo transcurrido hay prácticas que ya no presentan eficacia, tales como la evacuación y/o neutralización para la vía gástrica, puesto que después de algunas horas el tóxico ya no se encontrará en tracto digestivo.

2. Conocimiento de la naturaleza del tóxico involucrado.

El hecho de conocer la naturaleza del tóxico, entendiendo como tal conocer su identidad, mecanismo de acción, manifestaciones clínicas y evidentemente la mejor manera de abordar terapéuticamente el evento que se presente en el paciente, es sin duda un parteaguas fundamental en el desarrollo del proceso médico. De entrada, nos permite determinar la existencia y disponibilidad de un antídoto, que será el medicamento que deberemos implementar inmediatamente, especialmente en casos de extrema gravedad. Conocer su mecanismo de acción, por otra parte, nos permite determinar cuáles de las



manifestaciones clínicas se pueden considerar como acción directa del compuesto lesivo y cuales son consecuencias de las primeras, entendiendo así que deberá el tratamiento enfocarse en los efectos directos y, si las manifestaciones clínicas derivadas no son de alto riesgo para la salud del paciente, podremos permitir que remitan una vez controlada la causa.

3. Gravedad de los síntomas presentes al momento de iniciarse el tratamiento.

Este punto es determinante del proceder del Médico Veterinario. Las intoxicaciones se pueden presentar de 3 formas: aguda, subaguda y crónica. Cada una de ellas plantea un contexto diferente y demanda una actuación diferente.

En los pacientes intoxicados de forma aguda o subaguda podremos encontrar dos panoramas diferentes:

❖ **Panorama A** (Paciente asintomático con exposición a un tóxico conocido o no).

Cuando el tóxico es conocido y el paciente esta asintomático, su estado se cataloga como estable y el protocolo terapéutico será enfocado a evacuar y eliminar el tóxico, así como prevenir la posible aparición de signos clínicos (mediante el uso de antídotos para los casos en que se disponga) y en su caso, atender cada uno de ellos (que pueden no presentarse).

En el mismo panorama, pero con un tóxico desconocido, el tratamiento evacuante se deberá realizar con las medidas precautorias dado el desconocimiento del tóxico y sus posibles contraindicaciones; limitando la posibilidad de utilizar un antídoto por la misma razón (no se puede saber si existe antídoto para un tóxico que no ha identificado).

❖ **Panorama B** (Paciente sintomático con tóxico generalmente desconocido).

En este caso, es posible que haya transcurrido mucho tiempo desde que el paciente se expuso al tóxico, entendiendo por mucho tiempo desde horas hasta días y, que posiblemente el propietario o encargado del cuidado del animal, se dio cuenta solo de que «algo» extraño pasaba con él (Manifestaciones como dolor, emesis, convulsiones, incoordinación motora, etc.), con una aparición «espontanea» (Porque «5 minutos antes no estaba así», cosa que eventualmente si es cierta a medias, porque seguramente no han sido esos 5 minutos pero sí que se manifestó con relativa rapidez).

En este caso, el abordaje terapéutico parte con una interrogación sobre el paciente y su valoración de forma rápida (A costa de que no sea completa) para proceder con el *triage* en los términos necesarios a la situación clínica para que una vez obtenida, se pueda retomar el interrogatorio y cumplimentar detalladamente el historial del paciente. El seguimiento del tratamiento podrá sustentarse entonces en un diagnóstico



presuntivo correctamente sustentado o bien, determinar la necesidad de analíticas que nos conduzcan a la causa del trastorno que aqueja al paciente.

Es importante señalar que pueden presentarse pacientes con ciertos signos clínicos que, cuando el propietario decidió acudir a la consulta, estaban presentes y ahora han remitido o bien, se puedan evidenciar algunos que en su momento no se habían presentado; por lo cual en la anamnesis habrá que indagar oportunamente la cronología y evolución de los signos clínicos.

El panorama en el que se presente el paciente es determinante respecto al desarrollo de las estrategias terapéuticas. En la tabla 2 se esquematizan las características clínicas de las intoxicaciones. En la tabla 3 (A-F) se presentan algunos aspectos relacionados a la viabilidad y/o pertinencia de las diferentes estrategias terapéuticas, en relación al estado de salud del paciente.

Tabla 2. Características clínicas de las intoxicaciones.

Aspectos:	Condición:	Panorama:	Observaciones:
Exposición al tóxico:	Reciente.	A	
	Retardada.	B	
Identidad del tóxico:	Conocida.	A	En el panorama A, con frecuencia el propietario sabe cuál es la identidad del tóxico implicado, pero no siempre ocurre así.
	Desconocida.	B	
Cuadro clínico:	Ausente.	A	En el panorama A, si el propietario acude de forma inmediata tras la exposición con el tóxico, con frecuencia el paciente estará asintomático, sin embargo, en ello también incide la dosis de tóxico ingerida y la naturaleza del compuesto.
	Moderado.	A/B	
	Crítico.	B	



Tabla 3 (a). Estrategia evacuante para el paciente intoxicado y su viabilidad y/o pertinencia en relación con el tiempo transcurrido y el conocimiento de la naturaleza del tóxico involucrado.

Evacuante		
Naturaleza del tóxico conocida:	Manifestaciones clínicas:	Observaciones:
Sí	Presentes.	Para la vía oral: Es posible que el tóxico no se encuentre en la puerta de entrada, siendo además de alto riesgo dependiendo de las manifestaciones clínicas, especialmente en pacientes con alteración de la conciencia.
	Ausentes.	Se puede realizar sin problema independientemente de la vía de entrada.
No	Presentes.	No es muy recomendado a menos que exista evidencia de que el tóxico aún está en la puerta de entrada, siendo más común en intoxicaciones por vía dérmica; sin embargo dependiendo de las manifestaciones clínicas presentes se deberá valorar la conveniencia o no de realizar esta práctica. El desconocimiento de la naturaleza del tóxico implica un factor de riesgo, porque puede estar contraindicado, por ejemplo en intoxicaciones por agentes cáusticos o cianuro.
	Ausentes.	Para la vía dérmica e inhalatoria se puede realizar sin inconvenientes, mientras que para la vía oral es de riesgo dado el desconocimiento del agente involucrado, por ejemplo en intoxicaciones con agentes cáusticos o cianuro está contraindicado. Generalmente en casos de etiología desconocida, el Médico Veterinario deberá decidir si corre el riesgo o no.



Tabla 3 (b). Estrategia neutralizante para el paciente intoxicado y su viabilidad y/o pertinencia en relación con el tiempo transcurrido y el conocimiento de la naturaleza del tóxico involucrado.

Neutralizante:		
Naturaleza del tóxico conocida:	Manifestaciones clínicas:	Observaciones:
Sí	Presentes.	Es posible que el tóxico ya no se encuentre en la vía de entrada (VO) y consecuentemente no tiene sentido realizarlo, con excepción de tóxicos que presentan una semivida de absorción prolongada o eliminación biliar con metabolitos activos.
	Ausentes.	Se recomienda realizarlo y no existe en principio riesgo alguno.
No	Presentes.	Se deberá valorar el cuadro clínico para determinar la pertinencia de implementar esta práctica, aunque el desconocimiento del agente involucrado conlleva a riesgo de fracaso ya que no hay un neutralizante universal.
	Ausentes.	Se puede realizar sin mayor riesgo para la salud, pero si con la posibilidad de que sea una práctica no eficaz debido a que el tóxico no tenga afinidad con el tóxico, sin embargo en estas condiciones si se recomienda.



Tabla 3 (c). Estrategia antidótica para el paciente intoxicado y su viabilidad y/o pertinencia en relación con el tiempo transcurrido y el conocimiento de la naturaleza del tóxico involucrado.

Antidótica:		
Naturaleza del tóxico conocida:	Manifestaciones clínicas:	Observaciones:
Sí	Presentes.	Siempre que se disponga de antídoto para el proceso tóxico habrá de utilizarse con la mayor diligencia posible.
	Ausentes.	El Médico Veterinario habrá de valorar la pertinencia de su uso. Se puede considerar que sí de manera preventiva, sin embargo es importante tener en cuenta que muchos de los antídotos pueden ser poseedores a su vez de un potencial tóxico de relevancia, por lo cual en todo caso debería ser más conveniente la observación cuidadosa del paciente en espera de evidencia del cuadro clínico, a menos que aun estando asintomático, se tenga certeza de que se ha expuesto a una cantidad suficiente para dañarlo.
No	-	Si no hay certeza de la naturaleza del tóxico involucrado es altamente riesgoso utilizar cualquier medicamento con fines de anular la acción lesiva.



Tabla 3 (d). Estrategia evacuante para el paciente intoxicado y su viabilidad y/o pertinencia en relación con el tiempo transcurrido y el conocimiento de la naturaleza del tóxico involucrado.

Sintomática:		
Naturaleza del tóxico conocida:	Manifestaciones clínicas:	Observaciones:
Sí	Presentes.	Se deben atender oportunamente, considerando cuales son derivados de la acción del tóxico y cuales son consecuencias de estas, asimismo el Médico Veterinario debe estar preparado para atender todas aquellas manifestaciones que pueden presentarse posteriormente al contacto inicial con el paciente.
	Ausentes.	Aun cuando el paciente se muestre inicialmente asintomático, de debe monitorear por un tiempo pertinente para que en caso de pasar al estatus de sintomático, sea atendido oportunamente.
No	Presentes.	Es la misma situación que cuando si se conoce la naturaleza del tóxico, aunque en este caso el Médico Veterinario estará limitado por la falta de información respecto a un mecanismo de acción que contrarrestar.
	Ausentes.	Es la misma situación que cuando la naturaleza del tóxico es conocida.



Tabla 3 (e). Estrategia evacuante para el paciente intoxicado y su viabilidad y/o pertinencia en relación con el tiempo transcurrido y el conocimiento de la naturaleza del tóxico involucrado.

Eliminatoria:		
Naturaleza del tóxico conocida:	Manifestaciones clínicas:	Observaciones:
Sí	Presentes.	De acuerdo a la vía de eliminación del tóxico se elegirá cual es la mejor alternativa para procurar que su permanencia en el organismo sea lo más breve posible; debiendo tener cuidado de no poner en riesgo la integridad del paciente. Por ejemplo, en un paciente intoxicado por algún AINE derivado arilpropiónico y que ya presente evidencia de insuficiencia renal, no es conveniente la inducción de la diuresis, porque se estaría forzando un órgano con una función limitada y puede conllevar a riesgo de muerte incluso.
	Ausentes.	Se puede implementar sin riesgo alguno, considerando la vía de eliminación del tóxico.
No	-	Independientemente de si el paciente presenta o no un cuadro clínico, si se desconoce la identidad del tóxico causante del evento, y consecuentemente su cinética, no es posible implementar una estrategia eliminatoria específica; en todo caso se puede inducir la diuresis, sin tener la certeza de que funcione para fines de retirar el tóxico del organismo, toda vez que no hay garantía que esta sea la vía de eliminación.



Tabla 3 (f). Estrategia evacuante para el paciente intoxicado y su viabilidad y/o pertinencia en relación con el tiempo transcurrido y el conocimiento de la naturaleza del tóxico involucrado.

Complementaria:		
Naturaleza del tóxico conocida:	Manifestaciones clínicas:	Observaciones:
Sí	Presentes.	En de gran importancia para favorecer una recuperación en menor tiempo y con mayor bienestar para el paciente.
	Ausentes.	En este caso no será necesaria.
No	Presentes.	Para esta estrategia no es muy relevante la naturaleza del tóxico y aunque será más completa cuando si se conozca, sigue siendo de gran utilidad para favorecer la recuperación del paciente.
	Ausentes.	En este caso no será necesaria.

Anexo 2. Aspectos que deben considerarse para la estabilización del paciente crítico, se ordenan por prioridad y se categoriza su nivel de compromiso.

Tabla 4. Nivel de prioridad de atención de los sistemas involucrados en una urgencia toxicológica y su nivel de compromiso.

Sistema afectado:	Nivel de prioridad:	Nivel de compromiso:
Respiratorio.	1	Muy severo.
Cardiovascular.	2	Severo.
Nervioso central.	3	Grave. Leve.
Temperatura.	4	Hipertermia. Hipotermia.

Indistintamente de la causa y situación, siempre es conveniente que el paciente sea canalizado, aun cuando no sea evidente una situación de deshidratación o pérdida de líquidos abundante ya que esto nos permite disponer de la vía intravenosa de forma rápida y repetida para la administración de medicamentos que se puedan requerir durante el tratamiento.



Bibliografía

- Aguilar, B.J. (2008). Examen físico general. En: Métodos y técnicas de diagnóstico. UNAM. México.
- Anadón, A., Martínez-Larrañaga, M.R. y Castellano, V. (2012). Poisonous plants of Europe. In: Veterinary toxicology: Basic and clinical principles. 2a. ed. Elsevier-Academic Press. USA.
- Bistner, I.S., Ford, B.R. y Raffae, R.M. (2002). Manual de terapéutica y procedimientos de urgencias en pequeñas especies. 7ª. Ed., Mc Graw-Hill Interamericana, México, DF.
- Campbell, A. (2000). Poinsettia / Euphorbia pulcherrima. In: Handbook of poisoning in dogs and cats. Blackwell Science. USA.
- Capó-Martí, M.A. (2006). Toxinología clínica, alimentaria y ambiental. Ed. Complutense. España.
- Delaporte, J. y Means, C. (2013). Plantas. En: Fundamentos de toxicología en pequeños animales. Multimedia Edición Veterinaria. España.
- González-García, K. E., Soto-Hernández, R. M., Colinas-León, M. T. B., García-Mateos, M. R. Garín-Aguilar, M. E. y Guerra-Ramírez, D. (2022). Polyphenols in five varieties of *Euphorbia pulcherrima* native to México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 13 (3), 433-442. DOI: <https://10.29312/remexca.v13i3.2831>
- Gwaltney-Brant, S. (2006a). Oxalate-containing plants. In: Small animal toxicology. 2ª. Ed. Elsevier-Saunders. USA.
- Gwaltney-Brant, S. (2006b). Christmatstime plants. In: Small animal toxicology. 2ª. Ed. Elsevier-Saunders. USA.
- Gwaltney-Brant, S. y Poppenga, R.H. (2013). Principios toxicológicos fundamentales. En: Fundamentos de toxicología en pequeños animales. Multimedia Edición Veterinaria. España.
- Hall, J.O. (2006a). Lilies. In: Small animal toxicology. 2ª. Ed. Elsevier-Saunders. USA.
- Illescas, F.G.J. (2006). Triage: Atención y selección de pacientes. *Trauma* 9(2); 48-56.
- Langston, C.E. (2012). Intoxicación por lirios. En: Blackwell's, La consulta veterinaria en 5 minutos: Emergencias en pequeños animales. Inter-médica. Argentina.
- Levine, G.J. y Levine, J.M. (2012). Convulsiones. En: Blackwell's, La consulta veterinaria en 5 minutos: Emergencias en pequeños animales. Inter-médica. Argentina.
- Lorgue, G., Lechenet, J. y Rivière, A. (1997). Toxicología clínica veterinaria. Ed. Acribia, España.
- Marks, S.L. (2012). Paro cardiopulmonar y resucitación cardiopulmonar-cerebral. En: Blackwell's, La consulta veterinaria en 5 minutos: Emergencias en pequeños animales. Inter-médica. Argentina.
- Murl-Bayley Jr., E. (2006). Ricin. In: Small animal toxicology. 2ª. Ed. Elsevier-Saunders. USA.
- Navarrete, C.R. y Mesa, S.I. (2015). Cómo llevar a cabo un plan de urgencia. En: Manual clínico del perro y del gato. Elsevier. España.
- Panther, K.E., Welch, K.D., Gardner, D.R., Lee, S.T., Green, B.T., Pfister, J.A., Cook, D., Davis, T.Z. y Stegelmeier, B.L. (2012). Poisonous plants of the United States. In: Veterinary toxicology: Basic and clinical principles. 2a. ed. Elsevier-Academic Press. USA.
- Pita, R., Anadón, A. & Martínez-Larrañaga, M. (2004). Ricina: una fitotoxina de uso potencial como arma. *Revista de Toxicología*, 21(2-3), 51-63.



- Plumb, D.C. (2010). Plumb: Manual de farmacología veterinaria. 6ª. Ed. Inter-Médica. Argentina.
- Rejas-López, J. (2017). Uso de fármacos en neurología y enfermedades del aparato locomotor. En: Guía terapéutica del animal de compañía. 6ta. Ed. Consulta de Difusión Veterinaria. España.
- Rejas-López, J. (Ed.) (2017). Guía terapéutica del animal de compañía. 6ta. Ed. Consulta de Difusión Veterinaria. España.
- Repetto, J.M. y Repetto, K.G. (2009). Toxicología fundamental. 4ª ed. Díaz de Santos. España.
- Reyers, F. y Naudé, T.W. (2012). Oxalate-containing plants. In: Veterinary toxicology: Basic and clinical principles. 2a. ed. Elsevier-Academic Press. USA.
- San Andrés, M.I., Jurado-Couto, R. y Ballesteros, M. E. (2000). Toxicología animal originada por plantas. Ed. Complutense. España.
- Santamarina, P.G. y Suárez, R.M.L. (2017). Uso de fármacos en cardiología. En: Guía terapéutica del animal de compañía. 6ta. Ed. Consulta de Difusión Veterinaria. España.
- Smith, K.L. (2013). Sistema cardiovascular. En: Fundamentos de toxicología en pequeños animales. Multimedia Edición Veterinaria. España.
- Urroz, M.C. (2000). Farmacología y manejo de productos veterinarios: Principios básicos. Ed. EUNED. Costa Rica.
- Vargas, F.T.I. y Rojas, C.K.J. (2014). Venenos vegetales y animales. Revista de Actualización Clínica. **43**; 2251-2255.
- Vigueras, G.I y Torrente, A.C. (2015). Urgencias toxicológicas. *Consulta de Difusión Veterinaria*. **22** (216); 45-55.
- Villar, D. y Ortiz, D.J.J. (2006). Plantas tóxicas de interés veterinario: Casos clínicos. Elsevier-Masson, España.
- Wismer, T. (2013). Antídotos. En: Fundamentos de toxicología en pequeños animales. Multimedia Edición Veterinaria. España.
- Wismer, T. (2013). Sistema nervioso. En: Fundamentos de toxicología en pequeños animales. Multimedia Edición Veterinaria. España.

Complejo respiratorio bovino: un enfoque desde los virus involucrados

Edith Rojas-Anaya.
Sergio Iván Román-Ponce.
Francisco Castillo-Rangel.
Israel Daniel Ricardo González.





Resumen

El Complejo Respiratorio Bovino (CRB) representa una de las principales causas de pérdidas económicas en la ganadería bovina, especialmente en el norte de México, donde predomina el sistema de producción vaca-cría orientado a la exportación. Esta enfermedad multifactorial afecta las vías respiratorias superiores e inferiores del ganado, y su etiología incluye una combinación de virus y bacterias. Entre los virus más relevantes se encuentran el virus de la parainfluenza 3 (vPI-3), el virus sincitial respiratorio bovino (VSRB), el herpesvirus bovino tipo 1 (BoHV-1), el virus de la diarrea viral bovina (VDVB) y el coronavirus bovino (CoVb). El CRB se caracteriza por signos clínicos como fiebre, tos, disnea, secreción nasal y anorexia, siendo esta última un factor crítico que reduce la eficiencia productiva. La transmisión ocurre principalmente por contacto directo y aerosoles, facilitada por condiciones de hacinamiento, estrés, transporte y deficiencias en bioseguridad. La coinfección entre virus y bacterias es común, lo que agrava el cuadro clínico y complica el diagnóstico. El capítulo destaca la alta prevalencia de estos virus en México, con tasas de seropositividad que superan el 70% en algunas regiones. Se subraya la necesidad de implementar estrategias integrales de manejo sanitario, incluyendo vacunación específica, protocolos de cuarentena, monitoreo clínico y mejoras en las condiciones ambientales. Además, se advierte sobre el uso indiscriminado de antimicrobianos, que contribuye a la resistencia bacteriana. En conclusión, el control del CRB requiere un enfoque multidisciplinario que combine diagnóstico temprano, vigilancia epidemiológica, educación técnica y políticas públicas efectivas. La integración de tecnologías moleculares y la cooperación entre el sector productivo y la comunidad científica son esenciales para mitigar el impacto del CRB y garantizar la sostenibilidad de la producción bovina.

Palabras clave: complejo respiratorio bovino, virus, coinfección, bioseguridad, vacunación.



Introducción

En las últimas décadas, la ganadería bovina del norte de México se ha venido consolidando como un pilar fundamental no solo para la economía regional, sino también para el abastecimiento nacional y en el mercado de la exportación de carne bovina. En este sentido, la presencia de agentes infecciosos que afectan no solo a la salud del ganado, sino también a la salud humana, adquiere especial relevancia. Ya que impacta directamente en la eficiencia productiva de los ranchos ganaderos y, en última instancia, en la estabilidad de los mercados, particularmente cuando hablamos de la exportación a los Estados Unidos de América.

La industria cárnica mexicana ha logrado producir anualmente más de dos millones de toneladas de carne bovina, lo que resulta del nacimiento de 11 y 12 millones de becerros cada año. Estas cifras, además de resaltar la magnitud del sector, evidencian que la demanda interna se satisface en gran medida con producción nacional; un logro que ha requerido de esfuerzos constantes en términos de manejo y estructuración de la cadena productiva.

El sistema de producción vaca-cría, predominante en la ganadería del norte, es una de las estrategias que ha permitido optimizar el uso extensivo de los pastizales y matorrales que caracterizan la región. En este esquema, las vacas manejadas en régimen de pastoreo son la base para la producción de becerros destetados, los cuales se comercializan en el mercado nacional o de la exportación de becerros. Este modelo no solo permite aprovechar de forma sostenible los recursos naturales, sino que también se orienta estratégicamente hacia la exportación, sobre todo hacia los Estados Unidos de América.

El sistema de producción vaca-cría se caracteriza por un manejo cuidadoso del ciclo reproductivo, donde la selección genética, el manejo nutricional y, de manera crucial, el manejo de la sanidad animal, son componentes esenciales para obtener un ganado de alto valor agregado en los mercados internacionales. Los ranchos ganaderos productores de becerros para la exportación, por lo general operan en condiciones por demás rústicas, con un bajo uso de tecnología y a merced de condiciones factores climáticos adversos, estos sistemas exigen innovaciones tecnológicas y protocolos sanitarios rigurosos para poder mantener una eficiencia productiva que permita optimizar los costos de producción, y que la calidad de los becerros sea la que el mercado de exportación está demandando.

Contexto del Complejo Respiratorio Bovino

En la producción de ganado bovino existe una enorme diversidad de agentes infecciosos que merman la producción de los individuos, desde aquellos que afectan el sistema reproductivo. Adicionalmente, existe una gran gama de síndromes y complejos que pueden asociarse y desafortunadamente actuar de manera concomitante, dejando a los animales en malas condiciones de salud que llevan a la pérdida del individuo. Ejemplo de



lo anterior es el conjunto de microorganismos que forman parte del complejo respiratorio bovino (CRB) o fiebre del embarque que ha sido identificado para denominar de manera general al proceso neumónico agudo de los bovinos cuya etiología puede ser muy variada. Los agentes infecciosos que pueden estar involucrados son virus y bacterias, algunos de ellos son atendidos y diagnosticados más comúnmente que otros, e incluso pueden pasar desapercibidos en su detección. En general, esta afección es completamente multifactorial y de distribución mundial. La enfermedad involucra afecciones de las vías respiratorias superiores como inferiores, lo cual es dependiente del agente etiológico. Por lo cual, los signos clínicos regularmente conllevan a una neumonía, aunque dichos signos no son limitativos, son los característicos de las infecciones respiratorias, tal como: la anorexia, la disnea, descargas nasales, fiebre y tos, entre otras. Especialmente la anorexia, va en detrimento de la producción y del rendimiento productivo de una unidad de producción. Además, derivado de la fácil transmisión por contacto directo, los animales susceptibles son contagiados con rapidez y, por tanto, la diseminación de los agentes ocurre en breves periodos de tiempo.

Se ha documentado que el costo total de un animal con signología relacionada con el CRB es entre \$26.62 y \$23.6 dólares en Brasil y Estados Unidos, lo cual está relacionado con el tratamiento de animales con enfermedad respiratoria; lo anterior puede diferir entre diversos estudios dependiendo de los países y poblaciones estudiados, además de las condicionantes al tipo de producción. Por otra parte, en México, se estima que la enfermedad es responsable de la pérdida de más de un millón de cabezas correspondiente a aproximadamente 14 mil millones de pesos anuales.

Como se mencionó, la signología es poco específica, por lo que se han realizado trabajos de identificación de las prevalencias de algunos de los agentes causales más comunes. Ferraro y colaboradores en 2021, realizaron una revisión de las publicaciones respecto a la enfermedad respiratoria bovina (ERB), encontrando que la identificación de alteraciones de la función respiratoria se notificó en el 96% de los trabajos publicados e incluidos en el estudio. Por otra parte, la secreción nasal se describió en 29%; caracterizaron además el tipo de secreción nasal como serosa, serosa a mucopurulenta y mucopurulenta. Por otra parte, el aumento de la frecuencia respiratoria se encontró solo en un 10% de las publicaciones incluidas en el estudio. El Cuadro 1 muestra el resumen de los hallazgos descritos en la investigación descrita por Ferraro y colaboradores (2021) respecto a la presentación de los signos clínicos.

Derivado de lo anterior, la detección e identificación oportuna de el o los agentes específicos que están afectando un hato permite implementar o mejorar las prácticas de manejo que atiendan de manera específica a los agentes causales además de poder identificar y atender los factores de riesgo específicos identificados en la unidad de producción, además de manera local e incluso regional. Aunque en la literatura los



estudios se focalizan como es de esperarse, en los extremos de la vida de los animales, especialmente en animales muy jóvenes cuyo sistema inmune está en desarrollo y por tanto son altamente susceptibles, así como animales que ya presentan patologías previas, viejos o animales de desecho. Sin embargo, la presentación de la enfermedad se da en todas las edades o sistemas de producción, es decir, tanto en ganado de leche como de carne o doble propósito.

Como parte del CRB se consideran como agentes virales: el virus respiratorio sincitial bovino (VRSB), herpesvirus bovino tipo 1 (HVB-1), el virus de la diarrea viral bovina (VDVB), el virus de la parainfluenza 3 (VPI 3) y coronavirus bovino (CoVb). Además de las bacterias: *Mannheimia haemolytica*, *Mycoplasma bovis*, *Pasteurella multocida* y *Haemophilus somnus*. Ya que los agentes infecciosos son de diferente etiología, se ha reportado que para el tratamiento del CRB se utilizan una gran diversidad de antimicrobianos, en ocasiones de manera indiscriminada sin análisis de resistencia, lo cual estaría contribuyendo al problema de resistencia antimicrobiana presente en el manejo de la salud animal. Para fines de este capítulo, se abordarán únicamente los virus relacionados con el complejo respiratorio bovino.

Cuadro 1. Porcentaje de la presentación de los signos clínicos en la enfermedad respiratoria bovina en vacas lecheras publicadas en 23 estudios. Tomado de Ferraro y colaboradores (2021).

Signo clínico	Porcentaje del total de estudios analizados (%)
Incremento de la temperatura	83
Cambios en la ingesta de alimento	26
Estado mental deprimido	22
Secreción de leche	17
Decúbito	9
Secreción nasal	74
Tos	65
Alteración de la dinámica respiratoria/disnea	61
Aumento de la frecuencia respiratoria	43
Secreción ocular/lacrimación	30
Cuello extendido/respiración con la boca abierta	9
Diarrea	9
Salivación	4
Enfisema subcutáneo	9



Epidemiología del CRB

Como en cualquier enfermedad, es importante que además de estudiar la etiología de la enfermedad se estudien, expliquen y atiendan aquellos factores de riesgo que están involucrados en la presentación de la enfermedad. En este sentido, al ser una enfermedad respiratoria, desde luego uno de los factores asociados es la transmisión por la inhalación de las secreciones que funcionan como vehículo de las bacterias y son el medio de infección para los animales susceptibles. Por lo que debe ser de especial interés atender los factores de riesgo como el tamaño de las instalaciones y el número de individuos en donde estos están alojados, además del mantenimiento de estas, ya que actúan como fómites para la diseminación de los agentes infecciosos. Por otra parte, se encuentran los medios de transporte, el hacinamiento de animales en ellos y la correcta desinfección de los mismos.

Los agentes etiológicos del CRB se encuentran mundialmente distribuidos, por lo que es considerado una afección que causa problemas en la salud general de los bovinos, además, el aumento en la producción y la manera intensiva de producción ha derivado en el incremento de la presentación en los hatos. Es de hecho considerada una de las principales patologías que causa pérdidas económicas graves en la ganadería, ya que se involucran los costos de tratamiento, manejo, disminución productiva, especialmente en los partos, además de la pérdida de los animales por la muerte de estos. En diferentes países se han hecho estimaciones de lo anterior, por ejemplo, en Estados Unidos de América, es considerada la causa más importante de mortalidad del ganado en corrales de engorda, correspondiente al 16% del total de las pérdidas de ganado de carne no causadas por depredadores.

La complejidad en la presentación de la enfermedad reside en que, de manera general, no limitativa, se ha documentado que los animales en los corrales presentan coinfecciones por patógenos víricos y bacterianos, postulando que probablemente los agentes víricos predisponen a los animales a una enfermedad bacteriana secundaria. Por otra parte, trabajos desarrollados con bovinos carne en Brasil sugieren que los patógenos bacterianos están probablemente asociados con estrés, vacunación y el transporte, especialmente en terneros con cuadros neumónicos. En dicho estudio se estimó que la morbilidad y mortalidad dentro del corral son muy similares entre lo reportado en Brasil y Estados Unidos, 6.13% y 0.21% respectivamente. La presentación de la ERB fue la más significativa, representando el 86.9% en los animales enfermos en el corral. En este sentido, Edwards y colaboradores (1996) en el centro de EE.UU. se identificaron incidencias de 67-82%.

Virus de parainfluenza 3 bovino (vPI3)

El virus de parainfluenza 3 bovino (vPI-3) es un virus que se propaga a través de las



secreciones respiratorias, afectando principalmente el epitelio del tracto respiratorio superior e inferior, y forma parte del complejo respiratorio bovino. Es de distribución mundial y es una infección considerada multifactorial, y las manifestaciones clínicas normalmente se presentan en coinfecciones con otros agentes del mismo complejo o concomitantes con otras.

El vPI-3 pertenece a la familia Paramyxoviridae y al género Respirovirus, contiene un genoma de ARN de cadena sencilla y polaridad negativa. Las partículas virales son envueltas y la estructura consta de glicoproteínas de envoltura (unión celular) y proteínas de nucleocápside que participan en la estabilidad del genoma durante la replicación. Mediante secuenciación masiva de nueva generación, se ha logrado la identificación de distintos genotipos y cepas virales, lo cual es fundamental para el desarrollo de vacunas y métodos diagnósticos actualizados. La transmisión del virus se facilita en condiciones de hacinamiento y estrés, mismas que regularmente se presentan durante el transporte o en instalaciones con alta densidad animal. Además, se ha notificado que factores como la falta de sistemas de bioseguridad y las condiciones ambientales adversas son determinantes en la propagación del virus. Es recomendable la integración de sistemas de vigilancia digital, lo cual permite anticipar brotes y establecer medidas de contención de manera oportuna.

Las manifestaciones clínicas por vPI-3 son variables. En animales adultos, el cuadro clínico suele ser leve e incluso subclínico, mientras que en terneros puede evolucionar hacia formas graves, que incluyen rinitis, bronquitis y bronconeumonía. Los síntomas comunes abarcan fiebre, tos, secreciones nasales y, en casos severos, disnea. Ya que el virus daña el epitelio respiratorio, predispone a los individuos a infecciones secundarias *Pasteurella multocida* y *Mannheimia haemolytica*. La inflamación aguda desencadenada por la infección y coinfecciones puede terminar en daños pulmonares irreversibles si no se controla adecuadamente. La cascada inflamatoria resultante de la infección incluye la activación de células inmunitarias locales y la liberación de citocinas proinflamatorias, lo que contribuye a la sintomatología, especialmente en coinfección con otros patógenos, agravando el cuadro clínico.

El diagnóstico del vPI-3 se realiza mediante diversas técnicas que incluyen ensayos tipo ELISA, PCR y, cuando es posible, se intenta el aislamiento en cultivos celulares. La elección del método depende de la etapa de la enfermedad y la finalidad del estudio (diagnóstico clínico o vigilancia epidemiológica).

Los avances tecnológicos permiten la detección temprana de brotes y, por tanto, una mejor toma de decisiones en medidas preventivas, esto mediante la integración de métodos serológicos y moleculares, lo cual proporciona un panorama más completo de la situación epidemiológica. No existe un tratamiento antiviral específico para el VPI-3 bovino, por lo que el manejo clínico está orientado a reducir la carga viral y las



complicaciones secundarias. El tratamiento incluye el uso de antiinflamatorios, además, en algunos casos, el uso de antibióticos para prevenir infecciones bacterianas oportunistas. La inmunización mediante vacunas es uno de los principales pilares en el control del vPI-3, las formulaciones vacunales están diseñadas para estimular tanto la respuesta humoral como la celular del hospedero. La vacunación ha demostrado reducir la incidencia y la severidad de los brotes, especialmente en terneros que son los más vulnerables.

Es recomendable llevar a cabo el enfoque terapéutico desde la atención integral que incluya el manejo del ambiente, la nutrición adecuada y el monitoreo continuo del estado clínico de los animales, que desde luego abonará al manejo de la ERB.

En cuanto a los estudios epidemiológicos, en general en América Latina se han notificado altas prevalencias. Por ejemplo, en Colombia se han notificado seroprevalencias desde un 31% hasta un 73.6% tanto en hembras bovinas como en búfalos. Aunque la prevalencia varía entre estudios y regiones, la constante es la alta circulación del virus. Por otra parte, en México, se han encontrado tasas del 60.8% y hasta 85.6% en diferentes poblaciones bovinas, por ejemplo, un estudio en Colima identificó una seroprevalencia del 60.8% a nivel animal y del 100% a nivel de hato en ganado de doble propósito no vacunado. Otro estudio encontró una seroprevalencia del 85.9% a nivel animal y más del 95% a nivel de hato para vPI-3. Estudios recientes han determinado que la implementación de protocolos de cuarentena y control sanitario en la introducción de nuevos animales es esencial para el mantenimiento de la salud del hato. Adicional a lo anterior es importante, el control ambiental, seguimiento a las prácticas de bioseguridad, como la desinfección regular de instalaciones y sistemas de ventilación adecuados.

Dentro de los retos que merecen atención en la investigación sobre el vPI-3 destacan: la incorporación de tecnologías moleculares que permitan obtener información de la diversidad genética del virus, facilitar la identificación de variantes emergentes que pueden ser más virulentas. Lo anterior, ya que se ha descrito recientemente la aparición de subgrupos dentro del vPI-3 que representan de igual manera nuevos desafíos en el diseño de vacunas.

El virus sincitial respiratorio bovino (VSRB)

El VSRB uno de los agentes virales económicamente más impactantes asociados al CRB, al igual que el vPI3, es de presencia multifactorial y cosmopolita. El VSRB es un virus de ARN monocatenario negativo, no segmentado, perteneciente a la familia *Pneumoviridae*, subfamilia *Orthopneumovirinae*, género *Orthopneumovirus*. Es un virus envuelto, pleomórfico, de aproximadamente 120 a 300 nm de diámetro y su genoma codifica para 10 proteínas, de las cuales tres son glicoproteínas de superficie y cuya función es la interacción con el hospedero: la proteína de unión (G), la proteína de fusión (F) y la



proteína pequeña hidrofóbica (SH). La proteína G tiene una alta variabilidad genética, lo que dificulta el desarrollo de vacunas universales. Por otra parte, la proteína F, es más conservada y permite la fusión de la envoltura viral con la membrana celular, y formación de sincitios, característica distintiva del VSRB en su aislamiento en cultivos celulares y tejido pulmonar infectado. La proteína SH juega un papel en la modulación de la respuesta inmune.

Los animales infectados, pueden manifestarse desde una forma subclínica hasta una enfermedad respiratoria grave y fatal, siendo más susceptibles los terneros de 1 a 6 meses de edad. La enfermedad se presenta con una variedad de signos clínicos de alguna manera no distinguibles de otras patologías como fiebre superior a 40 °C, tos, descarga nasal (serosa a mucopurulenta), descarga ocular, anorexia, letargo y taquipnea. Los casos severos desarrollan disnea marcada, respiración abdominal y signos de neumonía intersticial.

En cuanto a la patogenia, involucra tanto el daño directo a las células epiteliales respiratorias como una desregulación de la respuesta inmune, ya que el virus infecta principalmente los neumocitos tipo I y II, células bronquiolares y macrófagos alveolares, causando necrosis y descamación del epitelio respiratorio. Este daño epitelial compromete la barrera mucociliar, facilitando la colonización y proliferación de bacterias patógenas secundarias que también forman parte del CRB como *M. haemolytica*, *P. multocida* e *H. somni*; que contribuyen al aumento en las tasas de morbilidad y mortalidad del CRB. El VSRB puede inducir respuesta inflamatoria exacerbada en pulmones, con infiltración de neutrófilos y macrófagos. Por otra parte, el virus es causante de una inmunosupresión transitoria que juega un papel crucial en las infecciones secundarias.

El VSRB es endémico en la mayoría de las poblaciones bovinas a nivel mundial, y los estudios epidemiológicos de los últimos años han reafirmado su alta prevalencia y circulación. La transmisión del virus ocurre principalmente por contacto directo entre animales infectados y a través de aerosoles, lo que facilita la diseminación en las unidades de producción con pocas medidas de bioseguridad y factores de riesgo que se han descrito previamente.

En Latinoamérica, la seroprevalencia del VSRB es alta, recientemente se han reportado cifras que van entre el 40% y el 90% en diferentes países del continente. En Brasil, por ejemplo, se han notificado seroprevalencias elevadas de hasta el 80% en terneros menores de un año. Mientras que, en Colombia, se ha documentado la presencia del VSRB en diversas regiones, con prevalencias altas en hatos de cría y engorda. De manera similar en Argentina y Uruguay. En México, la situación epidemiológica del VSRB es importante ya que en bovinos de engorda en el centro de México, se ha documentado seroprevalencia considerablemente alta, hasta del 70% en algunos estudios. Por ejemplo, en hatos lecheros del estado de Jalisco y otras regiones productoras de leche, la



prevalencia del VSRB también es tan elevada como el mismo 70% e incluso más. Los factores de riesgo asociados a una mayor prevalencia incluyen el hacinamiento, el estrés por el transporte, la mezcla de animales de diferentes orígenes (común en corrales de engorda), la deficiencia de calostro en terneros y las condiciones ambientales desfavorables (fluctuaciones de temperatura y humedad).

Al igual que para el vPI3, la vacunación es una estrategia de control disponible, pero su eficacia puede verse comprometida derivado de la variabilidad antigénica del virus y la complejidad de la relación virus y el respuesta inmune.

Herpesvirus bovino tipo 1 (BoHV-1)

La Rinotraqueítis Infecciosa Bovina (IBR) es una enfermedad respiratoria y reproductiva causada por el herpesvirus bovino tipo 1 (BoHV-1), el cual es miembro de la familia *Herpesviridae*, subfamilia *Alphaherpesvirinae* y es caracterizado por su envoltura lipídica. Posee un genoma de ADN bicatenario con tres glicoproteínas principales (gB, gC, gD) que median la unión y entrada a las células hospederas, además posee la capacidad de establecer latencia en las neuronas sensoriales del ganglio trigémino, causando enfermedades persistentes. La replicación viral ocurre en el núcleo celular causando lisis celular y formación de cuerpos de inclusión intranucleares.

En cuanto a su patogenia, la infección inicial se produce por inhalación, el virus se replica en las células epiteliales del tracto respiratorio superior, causando daño tisular y respuesta inflamatoria aguda. A partir de aquí, el virus puede causar viremia e infectar otros órganos, incluyendo el tracto genital, con signos de vulvovaginitis pustular infecciosa o balanopostitis. Una de las características del virus es que el genoma viral persiste sin replicación productiva, donde una situación de estrés en el animal puede inducir la reactivación viral y la excreción intermitente del virus, esto incluso en animales aparentemente sanos.

La enfermedad principalmente se manifiesta como un síndrome respiratorio agudo, por lo que está clasificada dentro del CRB, donde los signos clínicos incluyen fiebre alta (40-42°C), descarga nasal serosa que progresa a mucopurulenta, conjuntivitis, disnea, tos persistente y anorexia. Las membranas mucosas de la cavidad nasal y la tráquea muestran hiperemia, petequias y necrosis. Sin embargo, también existe la presentación genital, donde se puede observar vulvovaginitis con pústulas y erosiones en la mucosa vaginal, o balanopostitis en machos; por lo anterior también se estudia dentro del complejo reproductivo bovino. Es una infección de especial atención clínica, ya que los signos son muy variables, además de llegar a otras presentaciones que incluyen enteritis, infección neonatal y encefalitis. El virus es causa de abortos en cualquier etapa de la gestación, aunque son más comunes en el segundo y tercer trimestre, asociados con



infertilidad y disminución en la producción de leche.

En cuanto a la epidemiología, el BoHV-1 es un virus de presencia mundial en la mayoría de las poblaciones bovinas y su transmisión ocurre principalmente por contacto directo entre animales infectados (excretores activos o reactivados) y susceptibles, o a través de fómites contaminados. Al ser una infección causada por contacto directo, un factor de riesgo altamente asociado es la introducción de animales portadores latentes en rebaños libres, favoreciendo la diseminación viral.

En general, en América, la IBR tiene una alta prevalencia; en estudios serológicos de países como Brasil, Argentina, Chile, Colombia, Perú, Estados Unidos y Canadá se han notificado prevalencias que oscilan entre el 50% y el 90% en bovinos, dependiendo de la región y el tipo de unidades y sistemas de producción. En donde, como se mencionó antes, la densidad animal, el manejo, el uso de vacunas y las prácticas de bioseguridad son los factores de riesgo que causan la variabilidad entre las prevalencias, por lo cual es importante conocerlos por cada región. Adicionalmente, sus características de latencia y reactivación viral, en los animales infectados, contribuyen significativamente a la persistencia en los hatos ganaderos, manteniendo la circulación viral incluso en ausencia de brotes. Por otra parte, en México, la IBR es una enfermedad prevalente y se han confirmado prevalencias serológicas elevadas, a menudo superiores al 60% - 70% tanto en ganado de carne como en ganado lechero, en algunos casos llegando al 90% en hatos lecheros intensivos, que favorecen la transmisión del virus. Es relevante mencionar que no está considerada dentro de las infecciones de notificación obligatoria en el país, lo cual hace complicado su estudio y vigilancia epidemiológica, ya que no hay una consolidación de todos los casos clínicos, y las notificaciones se ven reflejadas solamente en el ámbito académico y de investigación. Los brotes clínicos son frecuentemente notificados por veterinarios de campo, pero su registro oficial es limitado, sin embargo, las prevalencias serológicas notificadas a través de trabajos de investigación sugieren una amplia circulación del virus. Al igual que otros virus previamente descritos en el presente capítulo, la epidemiología de la enfermedad está asociada a la introducción de animales infectados y la ausencia de programas de control y erradicación que contribuyen a la persistencia de la enfermedad.

Por otra parte, el control de la IBR consta de estrategias de calendarios de vacunación para reducir la severidad de los signos clínicos, la excreción viral, así como la incidencia de abortos. Además de medidas de bioseguridad que deben incluir: cuarentena de animales introducidos, análisis serológico de animales de reemplazo, separación de animales por edad y categoría productiva, limpieza y desinfección de instalaciones. Aunque es entendible que en las unidades productivas es complejo, la eliminación de animales persistentemente infectados es imprescindible, debido a la latencia.



Virus de la Diarrea Viral Bovina (VDVB)

El agente etiológico es un virus que está formado por ARN monocatenario de sentido positivo de aproximadamente 12.5 kilobases con una cápside proteica y rodeada por una envoltura lipídica. El genoma codifica una poliproteína precursora que, mediante procesamiento proteolítico, da origen a proteínas estructurales (gp53, gp48, gp25, p20, p14) y no estructurales (p125, p80, entre otras). Pertenecen al género *Pestivirus* de la familia *Flaviviridae*.

Los virus causantes de la DVB se clasifican en tres especies: *Pestivirus A* (VDVB-1), *Pestivirus B* (VDVB-2), *Pestivirus H* (pestivirus tipo HoBi). A su vez, estas especies se subdividen en múltiples subgenotipos (al menos 21 para VDVB-1 y 4 para VDVB-2 y tipo HoBi), determinados mediante análisis filogenético de regiones como 5'UTR, Npro y E2. Además, las cepas de VDVB se clasifican en dos biotipos según su efecto en cultivos celulares: no citopático (NCP) y citopático (CP). Las cepas NCP predominan en la naturaleza y son responsables de la mayoría de las infecciones agudas y de la generación de animales persistentemente infectados (PI). Las cepas CP son raras y se asocian casi exclusivamente con la forma fatal de la enfermedad, conocida como enfermedad de las mucosas.

La diarrea viral bovina (DVB) es la enfermedad causada por este virus y es además de endémica en México, ampliamente distribuida en el país. El primer reporte en el país data de 1975, revelando una seropositividad del 75% en vacas con historial de problemas reproductivos y respiratorios. Desde entonces, son diversos los estudios serológicos que han confirmado la alta exposición del ganado mexicano al virus, con seroprevalencias que varían entre 7.4% y 100%, dependiendo de la región, el sistema productivo y el estado de vacunación de los hatos. Una seropositividad elevada en poblaciones no vacunadas indica una infección reciente o la presencia de un animal PI en el hato.

La diversidad genética del VDVB es un factor crucial para el diagnóstico y la eficacia de las vacunas. En México, se ha confirmado la circulación de al menos cuatro subgenotipos: VDVB-1a, VDVB-1b, VDVB-1c y VDVB-2a, siendo el subgenotipo VDVB-1c el más detectado, seguido por el 1b. El VDVB-1b es considerado el subgenotipo predominante a nivel mundial y frecuentemente aislado de terneros persistentemente infectados (PI), también ha sido identificado en un caso fatal de enfermedad de las mucosas en el Estado de México, lo que subraya su relevancia clínica en el país. La transmisión del VDVB ocurre por contacto directo con animales infectados, a través de secreciones como saliva, descargas oculonasales, heces, orina, semen y leche. Los animales PI son la principal fuente de diseminación, ya que excretan el virus de por vida. La transmisión también puede ocurrir por fómites, semen infectado, transferencia de embriones y vacunas contaminadas. El contacto con otras especies de rumiantes, tanto domésticos como silvestres, también facilita la transferencia viral, por lo que los



programas de vigilancia en fauna silvestre deberían estar considerados en los programas preventivos.

A pesar de su impacto, la DVB es una enfermedad no regulada en México, y no existen programas oficiales de control o erradicación al igual que las previamente mencionadas en este capítulo. La prevención mediante la vacunación depende de esfuerzos voluntarios, cuya cobertura nacional es desconocida.

La DVB presenta un amplio espectro de manifestaciones clínicas:

- Infección Aguda Postnatal: Generalmente subclínica. En casos sintomáticos (causados por cepas CP), se presenta fiebre transitoria, leucopenia, inapetencia y, a veces, diarrea. La infección causa inmunosupresión al inhibir la función de linfocitos y neutrófilos, lo que aumenta la susceptibilidad a infecciones secundarias y la convierte en un iniciador del Complejo Respiratorio Bovino (CRB).
- Infección transplacentaria y animales persistentemente infectados (PI): La infección de un feto con una cepa NCP durante los primeros 125 días de gestación puede resultar en el nacimiento de un ternero PI. Estos animales desarrollan inmunotolerancia a la cepa infectante, no producen anticuerpos contra ella y excretan grandes cantidades de virus durante toda su vida. Aunque pueden parecer normales, los animales PI suelen tener tasas de crecimiento reducidas y mayor susceptibilidad a otras enfermedades. Son la principal fuente de mantenimiento y diseminación del VDVB.
- Enfermedad de las mucosas (EM): Es una forma fatal que ocurre exclusivamente en animales PI. Se desencadena cuando el virus NCP que causa la infección persistente muta a un biotipo CP, o por una sobreinfección con una cepa CP homóloga. Los signos clínicos incluyen fiebre, anorexia, diarrea hemorrágica severa, ptialismo y lesiones erosivas y ulcerativas extensas en todo el tracto gastrointestinal. La muerte suele ocurrir en un plazo de dos semanas.

Coronavirus Bovino (CoVb)

El CoVB es un virus de ARN monocatenario de sentido positivo, pleomórfico y envuelto, con un genoma de hasta 32 kb, perteneciente al género *Betacoronavirus* (subgénero *Embecovirus*), especie *Betacoronavirus 1*. El CoVB es antigénica y genéticamente cercano a otros coronavirus como los virus de la encefalomiелitis hemaglutinante porcina, al coronavirus equino y a los coronavirus humanos OC43 y HECov-44. La partícula viral posee cinco proteínas estructurales principales: la Nucleocápside (N) interna y asociada al ARN viral, es altamente conservada, por lo que a menudo es el objetivo para ensayos de detección molecular. La proteína de membrana (M) que está integrada a la envoltura viral. La proteína de envoltura pequeña (E), involucrada en el ensamblaje y liberación del virus. La hemaglutinina-esterasa (HE) actúa como enzima destructora de receptores y participa



en la unión a receptores que contienen ácido siálico. La proteína Spike (S) es una proyección larga de la superficie viral que media la entrada a la célula hospedera y se divide en una subunidad S1, que contiene los principales epítomos neutralizantes, y una S2, que media la fusión de membranas. El gen que codifica la proteína S es altamente conservado entre cepas y es utilizado como gen en pruebas de diagnóstico molecular.

El CoVB tiene una distribución mundial y es endémico en unidades de producción tanto de ganado de engorda como de leche. En México, los estudios sobre su presencia son escasos. Recientemente, se ha confirmado su circulación en el noroeste del país, una de las principales regiones de engorda de ganado.

En un estudio realizado en el Valle de Mexicali, Baja California, se desarrolló un ensayo de diagnóstico mediante rt-PCR en tiempo real dirigido al gen de la proteína S para detectar CoVB en exudados nasales. Se encontró una prevalencia del 38% (19/50) en ganado de engorda, tanto en animales con signos respiratorios (10%) como en animales aparentemente sanos (28%). Este hallazgo representó el primer reporte de CoVB asociado al CRB en esta región productora.

Un estudio de seguimiento más reciente, utilizando qRT-PCR en la misma región, reveló un aumento significativo de la prevalencia al 61.7%. De los positivos, el 40.3% correspondía a animales asintomáticos y el 21.4% a animales enfermos. El ganado muestreado provenía de diversos estados productores como Sonora, Jalisco y Zacatecas, que mostraron positivos que fueron de 64.5%, 63.2% y 58.3%, respectivamente. Estos resultados sugieren circulación del virus en las poblaciones altamente productoras. El incremento del 23.7% en la prevalencia en aproximadamente cinco años evidencia la propagación viral, debida probablemente a la presencia de portadores asintomáticos que eliminan el virus y la falta de programas de vacunación específicos para este agente infeccioso.

La transmisión del CoVB se da principalmente por la vía fecal-oral, además por la vía respiratoria a través de aerosoles. La excreción del virus por secreciones nasales y heces es común en ganado de engorda, con eliminación que a menudo ocurre durante la primera semana después de las primoinfecciones en un corral y período de alto estrés.

El CoVB es un virus neumointestinal asociado a tres síndromes clínicos distintos en bovinos:

- ☐ **Diarrea Neonatal en Terneros (CD):** El virus infecta los enterocitos de las vellosidades del intestino delgado y grueso, causando atrofia vellositaria, malabsorción y diarrea severa, a veces sanguinolenta, que puede llevar a deshidratación, acidosis metabólica y alta mortalidad.
- ☐ **Disentería de Invierno (WD):** Se caracteriza por una diarrea hemorrágica en bovinos adultos, asociada a una drástica disminución en la producción de leche.



- Infecciones Respiratorias y Complejo Respiratorio Bovino (CRB): El CoVB infecta el epitelio respiratorio desde los cornetes nasales hasta los pulmones, causando desde rinitis leve hasta neumonía. Es un agente viral importante dentro del CRB, especialmente en ganado de engorda. La infección respiratoria puede preceder a la intestinal, y la replicación en el tracto respiratorio superior puede facilitar su paso al tracto gastrointestinal. Aunque la infección por CoVB por sí sola puede no causar una enfermedad respiratoria severa, su papel como incitador o potenciador del CRB en coinfección con otros patógenos virales y bacterianos está bien documentado.

Un hallazgo epidemiológico relevante es la alta proporción de animales asintomáticos que excretan el virus. Se ha demostrado que el ganado aparentemente sano que elimina CoVB por vía nasal tiene un riesgo 1.6 veces mayor de desarrollar enfermedad respiratoria y 2.2 veces mayor de presentar lesiones pulmonares en comparación con los animales que no lo excretan. Lo anterior evidencia la importancia de los portadores subclínicos en la dinámica de la enfermedad en los corrales de engorda.

Conclusiones

La investigación epidemiológica en México, aunque limitada, ha demostrado la amplia circulación y diversidad genética de cepas virales de los diferentes virus que forman parte del complejo respiratorio bovino, con patrones de prevalencia que pueden ser diferentes a los países vecinos con los que México tiene comercio ganadero. La confirmación de la presencia de todos estos virus en el hato nacional demuestra la necesidad urgente de establecer programas de control basados en la detección y vacunación estratégica basada en diagnósticos por hato, así como en el uso de vacunas eficaces contra las cepas circulantes en el país.

Es de resaltar, la evidencia reciente de un aumento en la prevalencia de CoVB en el noroeste de México lo posiciona como un patógeno emergente de relevancia para el CRB en la región. La alta tasa de portadores asintomáticos y su potencial de excreción viral subrayan la necesidad de implementar medidas de bioseguridad y desarrollar estrategias de vacunación que incluyan protección contra el CoVB para mitigar su impacto económico.

Perspectivas

Finalmente, es imprescindible que tanto la comunidad científica como el sector productivo continúen su esfuerzo colaborativo, promoviendo investigaciones que aporten nuevos conocimientos y soluciones innovadoras para enfrentar los desafíos que presenta el VPI-3 bovino en el siglo XXI. La sinergia entre la investigación básica y aplicada, junto con la implementación de políticas públicas efectivas, marcará la diferencia en la lucha



contra las infecciones respiratorias en el ganado, asegurando la sostenibilidad y excelencia en la producción animal a nivel global.

Bibliografía

- Aguilar-Rodríguez, H. E. (2024). Buenas prácticas en la ganadería bovina. *Revista Critica Transdisciplinar*, 7(2), 1–11. <https://zenodo.org/records/14028472>.
- Animal and Plant Health Inspection Service. (2013). Types and costs of respiratory disease treatments in U.S. feedlots. United States Department of Agriculture. https://www.aphis.usda.gov/animal.../feedlot/.../feedlot2011/Feed11_is_RespDis.pdf.
- Baptista, A. L., Rezende, A. L., Fonseca, P. A., Massi, R. P., Nogueira, G. M., Magalhães, L. Q., Headley, S. A., Menezes, G. L., Alfieri, A. A., & Saut, J. P. E. (2017). Bovine respiratory disease complex associated mortality and morbidity rates in feedlot cattle from southeastern Brazil. *Journal of Infection in Developing Countries*, 11, 791–799. <https://doi.org/10.3855/jidc.9296>.
- Carbonero, A., Maldonado, A., Perea, A., Garcia-Bocanegra, I., Borge, C., Torralbo, A., et al. (2011). Risk factors against bovine respiratory disease in suckling calves from Argentina. *Archivos de Zootecnia*, 60(229), 41–51.
- Contreras-Cantú, M. J., Ramirez-Martinez, L. A., Sarmiento-Silva, R. E., Cruz-Lazo, C., Prez-Torres, A., & Sanchez-Betancourt, J. I. (2017). Evidence of respiratory syncytial virus and parainfluenza-3 virus in Mexican sheep. *Virus Disease*, 28(1), 102–110. <https://doi.org/10.1007/s13337-016-0354-4>.
- Fernández, M. A., Bulla, D. M., Díaz, A. M., & Pulido, M. O. (2020). Seroprevalencia y factores de riesgo del virus de parainfluenza 3 en bovinos de Colombia. *Revista Veterinaria en Línea*, 31(2). <https://doi.org/10.30972/vet.3124737>.
- Ferraro, S., Fecteau, G., Dubuc, J., Francoz, D., Rousseau, M., Roy, J. P., & Buczinski, S. (2021). Scoping review on clinical definition of bovine respiratory disease complex and related clinical signs in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 104(6), 7095–7108.
- Francoz, D., Buczinski, S., Belanger, A. M., Forte, G., Labrecque, O., Tremblay, D., Wellemans, V., & Dubuc, J. (2015). Respiratory pathogens in Quebec dairy calves and their relationship with clinical status, lung consolidation, and average daily gain. *Journal of Veterinary Internal Medicine*, 29, 381–387.



- Fulton, R. W., Blood, K. S., Panciera, R. J., Payton, M. E., Ridpath, J. F., Confer, A. W., Saliki, J. T., Burge, L. T., Welsh, R. D., Johnson, B. J., & Reck, A. (2009). Lung pathology and infectious agents in fatal feedlot pneumonias and relationship with mortality, disease onset, and treatments. *Journal of Veterinary Diagnostic Investigation*, 21, 464–477.
- Gagea, M. I., Bateman, K. G., van Dreumel, T., McEwen, B. J., Carman, S., Archambault, M., Shanahan, R. A., & Caswell, J. L. (2006). Diseases and pathogens associated with mortality in Ontario beef feedlots. *Journal of Veterinary Diagnostic Investigation*, 18, 18–28.
- García, A., et al. (2019). Epidemiological study of Bovine Herpesvirus 1 in dairy cattle herds in Jalisco, Mexico. *Journal of Veterinary Science*, 20(3), e24.
- González, R., et al. (2022). Risk factors associated with Bovine Herpesvirus 1 infection in cattle in the North of Mexico. *Tropical Animal Health and Production*, 54(4), 215.
- González, C. B., Briñez, K., Tobón, J. C., Corredor, D. W. S., Bauermann, F. V., & Guzmán Barragán, B. L. Cross-sectional seroprevalence study of bovine herpesvirus 1, bovine respiratory syncytial virus, and parainfluenza virus 3 in cattle from Villavicencio, Colombia. *BMC Veterinary Research*, 21, 24. (2025). <https://doi.org/10.1186/s12917-024-04461-6>.
- Gaxiola Camacho, S. M., López Valencia, G., Trasviña Muñoz, E., Castro Del Campo, N., Herrera Ramírez, J. C., & Monge Navarro, F. J. (2025). Molecular follow-up study on the presence of bovine respiratory coronavirus in feedlot cattle in Northwest Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 16(3), 661–676. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v16i3.668>.
- Gómez-Romero, N., Ridpath, J. F., Basurto-Alcantara, F. J., & Verdugo-Rodriguez, A. (2021). Bovine Viral Diarrhea Virus in cattle from Mexico: Current status. *Frontiers in Veterinary Science*, 8, 673577. <https://doi.org/10.3389/fvets.2021.673577>.
- Hernández, E., et al. (2024). Impact of Bovine Herpesvirus 1 on reproductive performance in dairy herds in Querétaro, Mexico. *Animal Reproduction Science*, 262, 107071.
- Jaime, J. C., & Ramírez, G. N. (s.f.). Inmunosupresión e inmunotolerancia asociados a infección por el virus de la diarrea viral bovina (VDVB). *Revista de Medicina Veterinaria y Zootecnia*, Edición desconocida, 54–57.
- Jaramillo Arango, C. J., & Martínez Maya, J. J. (Eds.). (2010). *Epidemiología veterinaria*. Editorial El Manual Moderno.
- Kamel, M. S., Davidson, J. L., & Verma, M. S. (2024). Strategies for Bovine Respiratory Disease (BRD) diagnosis and prognosis: A comprehensive overview. *Animals*, 14, 627. <https://doi.org/10.3390/ani14040627>



- López, S., et al. (2023). Updates on Bovine Herpesvirus 1 vaccines and their efficacy in controlling IBR in Latin America. *Vaccine*, 41(28), 4165–4172.
- Makoschey, B., & Berge, A. C. (2021). Review on bovine respiratory syncytial virus and bovine parainfluenza—usual suspects in bovine respiratory disease—a narrative review. *BMC Veterinary Research*, 17, 261. <https://doi.org/10.1186/s12917-021-02935-5>
- Muñoz, M., et al. (2018). Seroprevalence of Bovine Herpesvirus Type 1 (BoHV-1) in cattle in Central Mexico. *Veterinary Microbiology*, 218, 123–128.
- Navarro-López, R., Perez-de la Rosa, J. D., Rocha-Martínez, M. K., Villarreal-Silva, M., Solís-Hernández, M., Rojas-Torres, E., & Gómez-Romero, N. (2023). Caracterización del virus de la diarrea viral bovino subtipo 1b aislado de un caso de la enfermedad de las mucosas. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 14(1). <https://doi.org/10.22319/rmcp.v14i1.6200>
- Orozco-Cabrera, C., López-Valencia, G., Muñoz-Del Real, L. M., Gaxiola-Camacho, S. M., Castro-del Campo, N., Cueto-González, S. A., Guerrero-Velázquez, J. G., Moreno-Torres, K., Espinoza-Blandón, K. O., Gómez-Gómez, S. D., & Monge-Navarro, F. J. (2020). Detección molecular de coronavirus bovino asociado al complejo respiratorio bovino en ganado de engorda del valle de Mexicali, Baja California, México. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 11(4), 933–945. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v11i4.5137>
- Pérez, C., et al. (2021). Molecular epidemiology of Bovine Herpesvirus 1 in Mexico: A retrospective study. *Research in Veterinary Science*, 137, 18–25.
- Peel, D. S. (2020). The effect of market forces on bovine respiratory disease. *Veterinary Clinics: Food Animal Practice*, 36(2), 497–508.
- Pérez-Torres, A., et al. (2017). [See Contreras-Cantú et al. for related Mexican respiratory virus evidence]. *Virus Disease*, 28(1):102–110. <https://doi.org/10.1007/s13337-016-0354-4>.
- Rodríguez, L., et al. (2020). Genetic characterization of Bovine Herpesvirus 1 strains circulating in dairy farms in Colombia. *Transboundary and Emerging Diseases*, 67(5), 2135–2144.
- Román-Ponce, S., Alvidrez-Hinojos, F., Carrera-Chávez, J. M., Rojas-Anaya, E., Espinoza-Velasco, B., Perez-Ruiz, E., & Garcia-Perez, J. L. (2024). Diagnóstico estático de ranchos ganaderos del ejido Huizopa en el municipio de Madera, Chihuahua. Memoria del VI Congreso Internacional Abanico Veterinario, Agroforestal, Ambiental, Pesquero, Acuícola y del Mar, 43–50.



- Saeed, I. K., Ali, Y. H., Abdellatif, M. M., Mustafa, A., & Abdel-Mageed, A. M. (2024). Coinfection of some respiratory viruses in cattle: An abattoir study. *Onderstepoort Journal of Veterinary Research*, 91, e1–e8. <https://doi.org/10.4102/ojvr.v91i1.2193>
- Saif, L. J. (2010). Bovine respiratory coronavirus. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*, 26(2), 349–364. <https://doi.org/10.1016/j.cvfa.2010.04.005>.
- Saucedo-Terán, R. A., & Jurado-Guerra, P. (2014). Paquete tecnológico para la producción de la leche de bovino en Chihuahua. INIFAP. *Folleto técnico* No. 54, p. 49. ISBN: 978-607-37-0281-2.
- Silveira, D. A., et al. (2020). Prevalence of Bovine Herpesvirus 1 antibodies in beef cattle in Brazil. *Preventive Veterinary Medicine*, 178, 104958.
- Solis-Calderon, J. J., Segura-Correa, J. C., Aguilar-Romero, F., & Segura-Correa, V. M. (2007). Detection of antibodies and risk factors for infection with bovine respiratory syncytial virus and parainfluenza virus-3 in beef cattle of Yucatan, Mexico. *Preventive Veterinary Medicine*, 82, 102–110. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2007.05.013>
- Trigo, F. J. (1987). El complejo respiratorio infeccioso de los bovinos y ovinos. *Ciencia Veterinaria*, 4(1), 1–37.
- United States Department of Agriculture. (2011). Cattle and calves nonpredator death loss in the United States 2010. Fort Collins, CO, USA. https://www.aphis.usda.gov/animal_health/nahms/.../cattle_calves_nonpred_2010.pdf
- Vargas, M., et al. (2024). Prevalence and genotypic diversity of Bovine Herpesvirus 1 in different cattle production systems in Argentina. *Veterinary Research Communications*, 48(1), 1–10.
- Vlasova, A. N., & Saif, L. J. (2021). Bovine coronavirus and the associated diseases. *Frontiers in Veterinary Science*, 8, 643220. <https://doi.org/10.3389/fvets.2021.643220>.

Evaluación de la respuesta inmune de la vacuna de subunidades PLD y CP40 frente a *Corynebacterium pseudotuberculosis* biovar *ovis*

Roberto Montes-de-Oca-Jiménez.
María Carla Rodríguez Domínguez.
Martha Elba Ruiz-Riva-Palacio.
Pilar Eliana Rivadeneira-Barreiro.
Pablo Cleomenes Zambrano-Rodríguez.
Fátima Ingrid López Vivas.





Resumen

La ganadería ovina y caprina se ve gravemente afectada por la linfadenitis caseosa (LAC), enfermedad infecto-contagiosa ocasionada por la bacteria Gram positiva *Corynebacterium pseudotuberculosis* biovar *ovis*. Las manifestaciones clínicas de la enfermedad se caracterizan por la formación de abscesos en nódulos linfáticos superficiales y/o viscerales. La enfermedad afecta la obtención de lana, carne, leche y causa daños en la reproducción provocando pérdidas económicas significativas en la industria de los pequeños rumiantes. En México los datos de prevalencia sobre LAC son limitados; sin embargo, se ha reportado una frecuencia de 33.3% de la enfermedad en los rebaños del Estado de Jalisco. A nivel mundial la profilaxis se lleva a cabo mediante la aplicación de vacunas comerciales formuladas con cultivos bacterianos totales inactivados, sin embargo, éstos no han sido eficaces para el control de la enfermedad. Las vacunas desarrolladas utilizando la tecnología del ADN recombinante son inocuas e inmunogénicas, permitiendo la activación del sistema inmune. Las proteínas PLD y CP40 son factores de patogenicidad de *C. pseudotuberculosis* biovar *ovis*, y sus potencialidades inmunogénicas han sido evaluadas de forma individual, confiriendo protección en animales infectados experimentalmente con *C. pseudotuberculosis*. Los programas para el control de la enfermedad están enfocados en la aplicación de profilácticos, y evitar el uso de antibióticos; sin embargo, en México no se comercializan vacunas contra esta enfermedad. Es por ello que el desarrollo de una vacuna, de producción nacional, utilizando aislados autóctonos constituye una alternativa para abordar esta problemática. En el presente capítulo se exponen los resultados de la respuesta inmune inducida mediante la aplicación de una vacuna experimental de subunidades PLD y CP40, evaluada en un modelo murino para la profilaxis contra *Corynebacterium pseudotuberculosis* biovar *ovis*.

Palabras Clave: *Corynebacterium pseudotuberculosis* biovar *ovis*, vacuna, PLD y CP40.



Introducción

Las vacunas constituyen una herramienta para el control y erradicación de las enfermedades, también evitando el uso de los antimicrobianos. A través de la inmunización se induce en el hospedero el desarrollo de los mecanismos de acción del sistema inmune, destinados a la eliminación del patógeno. Existen vacunas comerciales y experimentales para la profilaxis de la linfadenitis caseosa, cuya aplicación a nivel mundial reporta niveles de protección variable en los rebaños. En México las vacunas comerciales aún no están disponibles, por ello existe la necesidad de trabajar en el desarrollo de una vacuna, a partir de aislados autóctonos, que permita una protección completa y eficaz. Las proteínas PLD y CP40 constituyen factores de virulencia de *C. pseudotuberculosis* que han sido utilizadas como antígenos vacunales confiriendo protección en animales infectados experimentalmente. La toxina PLD causa daño tisular y favorece la diseminación del microorganismo en el hospedero. Por su parte, la proteína endoglicosidasa CP40 tiene la capacidad de romper los enlaces glucosídicos de la región Fc de los Ac IgG de los ovinos, causando la degradación de los mismos. La protección de las vacunas comerciales se asocia con la inducción de la respuesta humoral dirigida fundamentalmente contra la proteína exotoxina PLD. En su mayoría estas vacunas se formulan con cultivos totales de *Corynebacterium pseudotuberculosis* biovar *ovis* inactivados con formalina, con abundante proteína PLD. La neutralización de la PLD mediada por la respuesta humoral disminuye el daño tisular, sin embargo, la protección debe ser integral incorporando en las formulaciones vacunales moléculas que favorezcan la activación de la respuesta inmune mediada por células para eliminar la bacteria intracelular. Los resultados experimentales en modelos murinos y ovinos indican que el uso de CP40 en formulaciones vacunales favorece la activación de la respuesta inmune celular, a través de una respuesta que involucra la participación de los receptores tipo Toll 2.

La tecnología del ADN recombinante permite obtener antígenos con potencialidades inmunogénicas que pueden ser utilizados en nuevas vacunas. En este sentido las vacunas de subunidades recombinantes, que combinan más de un tipo de antígeno inmunogénico constituyen una ventaja para la activación de la respuesta inmune. En el presente capítulo se exponen los resultados de la respuesta inmune inducida mediante la aplicación de una vacuna experimental de subunidades PLD y CP40, evaluada en un modelo murino para la profilaxis contra *Corynebacterium pseudotuberculosis* biovar *ovis*.

Evaluación de la respuesta inmune humoral (IgG Totales murinos) contra PLD y CP40 mediante la técnica de ELISA

La respuesta inmune adaptativa generada por una vacuna depende en gran medida de la capacidad que tengan estas formulaciones para inducir activación de las células linfocitos



B y T. Los Linfocitos B son la población del sistema inmune encargada de la generación de los anticuerpos (Ac). La detección de la respuesta de Ac se utiliza como un indicador de la eficacia de las vacunas. Las IgM son la subclase de Ac que primero se sintetizan tras el contacto directo con el antígeno.

La detección de estas moléculas en el suero representa la respuesta ante una infección inicial o aguda, también son secretadas durante la respuesta inmune secundaria pero en una menor concentración. La subclase de Ac de tipo IgG se produce ante una respuesta secundaria contra los antígenos, son las moléculas con mayor concentración en el suero, y se relacionan con la respuesta de defensa sistémica y de memoria. Estos Ac son los encargados de llevar a cabo la neutralización de los patógenos, activación del complemento con opsonización y fagocitosis de patógenos, promueven la muerte de las células infectadas mediante la activación de citotoxicidad celular mediada por anticuerpos. Por tales motivos, la detección de los anticuerpos IgG es fundamental en la caracterización de la respuesta inmune producida por las vacunas.

En el trabajo realizado por Rodríguez-Domínguez, 2020, y Rodríguez-Domínguez, 2022, se obtuvieron los componentes activos de la vacuna experimental de subunidades PLD y CP40, vía recombinante utilizando cepas de *Escherichia coli* cepa BL21 (DE3) transformadas con los plásmidos pET28a-pld y pET28a-cp40. Los genes codificantes de las proteínas de interés se amplificaron mediante PCR a partir del genoma del aislado mexicano *Corynebacterium pseudotuberculosis ovis* 2J-L.

Para el estudio de desafío de los animales vacunados se utilizó la cepa de referencia *Corynebacterium pseudotuberculosis ovis* ATCC 43926, también identificada como *Corynebacterium pseudotuberculosis* (Buchanan) Eberson, originalmente designada como cepa 169, obtenida de un absceso formado en un nódulo linfático ovino (ATCC, 2024). La vacuna experimental se aplicó en un modelo murino (ratones BALB/c), utilizando 6 grupos de animales: Grupo 1 animales inoculados con PBS; Grupo 2 animales inoculados con Saponina (3.5µg); Grupo 3 animales inoculados con PLDr (50µg) + Saponina (3.5µg); Grupo 4 animales inoculados con CP40r (50µg) + Saponina (3.5µg); Grupo 5 PLDr (50µg) + CP40r (50µg) + Saponina (3.5µg) y Grupo 6 animales desafiados con 10⁴ UFC/mL *Corynebacterium pseudotuberculosis ovis* cepa ATCC 43926. Se administraron 200µL de los formulados vacunales o PBS, por vía subcutánea, 2 dosis separadas de 21 días. Luego de 21 días de aplicada la segunda dosis de la vacuna todos los grupos excepto el Grupo 1 fueron desafiados vía intraperitoneal con 200 µL de 10⁴ UFC/mL de la cepa virulenta ATCC 43926.

Los animales del grupo PLDr+CP40r presentaron títulos de IgG anti-PLD elevados, seguidos por el grupo PLDr, ambos con diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$). Los niveles de anticuerpos IgG anti-PLDr de estos grupos alcanzaron valores por encima de una DO=1.2 luego de 30 días del desafío. Se ha estudiado que la respuesta inmune en



ovejas infectadas con *C. pseudotuberculosis* luego de 5-10 días post-infección (p.i) comienza con el desarrollo de los piogranulomas y la producción de IgG anti-PLD es detectable luego de 6-11 p.i alcanzándose títulos máximos entre el día 11 y 21 p.i. Los niveles disminuyen hasta los 140 días y no todos los individuos permanecen positivos durante las 20 semanas siguientes. Por otra parte, Vale y colaboradores en el 2016 reportan valores de IgG anti-PLD en el suero de ratones BALB/c inoculados con la cepa atenuada T1 (10^7) siendo el valor máximo de DO de 0.5 alcanzado a los 120 días p.i. También se estableció que la subclase de anticuerpo IgG2 fue superior, manteniéndose elevada los 120 días de duración del experimento. Otro grupo de investigadores reportó valores de DO similares a los alcanzados en nuestro trabajo, con la diferencia de que los anticuerpos detectados fueron IgG anti-antígenos totales con valores de DO entre 0.8 y 1 en los animales vacunados con antígenos secretados (cepa T1) y con la cepa viva atenuada T1, mientras que luego del desafío se alcanzaron valores de DO entre 1 y 1.2. En otro trabajo los títulos de IgG de ratones BALB/c inmunizados con PLDr alcanzaron valores de DO=0.6 luego de 42 días post inoculación. Recientemente, Moreira y colaboradores en el 2022 evaluaron la respuesta humoral inducida en ovejas inoculadas con 4 proteínas recombinantes (SpaC, NanH, SodC, and PLD) y su asociación con la cepa T1 de *C. pseudotuberculosis* inactivada, adyuvadas con Montanide™ ISA 61 VG. En este trabajo la proteína rPLD indujo IgG en los grupos experimentales (G2: SpaC, SodC, PLDr + Montanide y G3: NanH, SodC, PLDr + Montanide) luego de la segunda dosis, mostrando valores de DO entre 1 y 1.5 y luego del desafío se alcanzaron valores superiores a 1.5, con diferencias estadísticas significativas ($p < 0.01$). En el modelo experimental cobayos, Park y colaboradores en el 2024 evaluaron la inmunización con diferentes dosis de *C. pseudotuberculosis* (G1: 10^7 , G2: 10^6 , G3: 10^5 . Transcurridas 6 semanas se evidenció un aumento en los niveles de anticuerpos anti-PLD con DO entre 1 y 1.5, con diferencias estadísticas significativas entre los grupos ($p < 0.05$).

En el presente trabajo los niveles de Ac anti-CP40 fueron superiores en el grupo PLDr+CP40r en comparación con el grupo CP40r tras 21 días de la primera inmunización. Los niveles de anticuerpos anti-CP40 fueron menores que los alcanzados para PLD, siendo los valores máximos de DO entre 0.25 y 0.3 luego de los 30 día post-desafío. Estos resultados son similares a los reportados por Droppa-Almeida y colaboradores en un experimento donde se inmunizaron ratones Swiss con 2 dosis de CP40r + saponina en un intervalo de 15 días y luego de 30 días de concluido el esquema de vacunación fueron desafiados con la cepa CPNS (10^7 UFC/mL). Los valores de absorbancias reportados fueron de 0.2 y 0.3 al día 60 de la primera inmunización, y se mantuvieron en ese rango luego de 120 días. Silva y colaboradores en el 2014 reportaron que en ratones BALB/c inmunizados con CP40r (50µg) los títulos de anticuerpos IgG1 anti-CP40r fueron elevados alcanzando valores de DO por encima de 0.4 a los 30 días post inoculación. Sin embargo, luego del desafío los valores disminuyeron con DO entre 0.2 y 0.3. En otro trabajo del



grupo de Droppa-Almeida y colaboradores en el 2016 se demostró que la inmunización de ratones BALB/c (2 dosis de CP40r + saponina) durante la primera etapa de la vacunación (30 días) los valores se mantuvieron por debajo de 0.3. Por otra parte, Barral y colaboradores no reportaron aumento en los niveles de anticuerpos IgG totales en ratones BALB/c vacunados con proteínas modificadas PLDr +CP40r (25µg), con valores de DO entre 0.05 y 0.1.

En el presente trabajo el análisis de los anticuerpos IgG totales utilizando el sistema de ELISA con ambos antígenos sugiere que la respuesta humoral se encuentra favorecida hacia el antígeno PLD, ya que los niveles de respuesta alcanzados por los animales del G3 y G4 fueron similares, siendo solo superiores en el grupo G3 a los 72 días del experimento. Por su parte los valores de IgG totales en el grupo G5 se mantuvieron por debajo en todo momento del experimento. Estos resultados se deben a que el antígeno PLD constituye el factor de virulencia principal de la bacteria, es una toxina con un elevado potencial para estimular la activación de la respuesta inmune de tipo humoral según lo demostrado en los trabajos anteriormente citados. En la formulación donde se combinaron ambas proteínas el aporte de anticuerpos anti-PLD fue superior con diferencias estadísticas significativas tanto en las etapas de vacunación como luego del desafío. Existe jerarquía entre los epítomos de las proteínas y la presencia de epítomos inmunodominantes en la proteína PLD es uno de los factores que influyen en el predominio de Ac contra esta molécula. La maquinaria de procesamiento de antígenos está optimizada para la selección de los epítomos inmunodominantes. Para la presentación en el contexto del MHC de clase II, los antígenos internalizados de fuentes exógenas se mueven a través de una serie de compartimentos endosómicos en las células presentadoras de antígenos (APC) que contienen moléculas accesorias como la DM y DO, y un conjunto de enzimas proteolíticas y desnaturizantes principalmente catepsinas y tiol reductasa lisosomal inducible por interferón gamma, que generan y recortan los determinantes antigénicos. La DM es una molécula necesaria para el desplazamiento eficiente del péptido CLIP del surco del MHC y su intercambio por los péptidos exógenos. Esta molécula es eficaz en disociar péptidos de unión débil con la hendidura P1 de las moléculas HLA-DR1 (DR). El intercambio de péptidos mediado por DM interactúa de manera transitoria y repetida con moléculas de MHC- II, generando continuamente una conformación receptiva de péptidos que puede escanear segmentos de antígenos parcialmente plegados uniéndose y disociándose rápidamente hasta encontrar un péptido óptimo. El estudio del complejo DM/DR1 reveló que, durante la interacción, DM provoca la inversión de un residuo de triptófano (DRα W43), que en el complejo peptídico DR1/HA interactúa con el residuo Tyr P1 del péptido y los residuos hidrofóbicos vecinos. La conformación dinámica general del MHC-II, además de la ocupación de la hendidura P1, determina la susceptibilidad al intercambio de péptidos mediado por HLA-DM y proporciona un mecanismo molecular para que el



HLA-DM se dirige de manera eficiente a los complejos de péptidos/MHC-II (pMHC-II) que no encajan bien, editándolos para que sean más estables. Tras la eliminación de CLIP, la molécula DM ayuda en la selección de epítomos inmunodominantes al sesgar el equilibrio del pMHC-II que es resistente a la disociación mediada por DM. Por otra parte, la proteína DO se plantea que puede intervenir de dos formas: uniéndose a DM para inhibir su actividad, principalmente la eliminación del péptido CLIP o afectando de manera diferencial la presentación de péptidos estructuralmente diversos y actuando como una segunda chaperona junto con la DM para ajustar la selección del repertorio MHC-II.

También influyen en las propiedades inmunodominantes de los epítomos factores estructurales como la ubicación y su accesibilidad para ser capturados por el surco de las moléculas MHC- II. Para la obtención de las proteínas recombinantes se utilizó un diseño con cola de Histidina para facilitar el proceso de purificación. Pero debe tenerse en cuenta que esta modificación podría interferir en las características inmunodominantes de los péptidos que involucran estos residuos de Histidina. Hillier y colaboradores en el 2005 muestran evidencias sobre este planteamiento; ya que, en el estudio de un candidato a vacuna recombinante contra la malaria, LSA-NRC, un epítomo inmunodominante, el LSA (434-453) ubicado en el extremo C de la proteína (residuos 434-443) contenía parte de una secuencia espaciadora y 4 residuos de Histidina añadidos artificialmente a la proteína con fines de purificación. El péptido que contenía la secuencia espaciadora fue el único que en ratones indujo respuestas fuertes de células T dependientes de la dosis. Sin embargo, en humanos no protegió a los individuos vacunados contra la malaria, probablemente porque los individuos inmunizados reconocieron selectivamente el epítomo que contenía el espaciador como el epítomo dominante, siendo diferente al péptido nativo.

Otro ejemplo lo constituye el estudio realizado con la proteína PAD4 obtenida vía recombinante. Esta fue incubada con DR1 y DM seguido de la adición de CatB, CatH y CatS, lo que permitió el procesamiento y la selección de antígenos. Los péptidos unidos a DR1 (8 secuencias de péptidos derivados de PAD4) se analizaron por espectrometría de masas y se verificó su inmunogenicidad. El único péptido que indujo una respuesta de memoria contenía una parte de la secuencia espaciadora N-terminal (YKKAGFT) y residuos PAD4 N-terminales adyacentes. Cabe destacar que el espaciador agregado a esta proteína PAD4 (que se llamará PAD4-A) era diferente en secuencia y su ubicación respecto del espaciador agregado a LSA-NRC. Por otra parte, otra proteína PAD4 recombinante (PAD4-B) idéntica en su secuencia PAD4 nativa, excepto por una secuencia espaciadora diferente, GSAEGSS, también demostró un cambio en su epítomo inmunodominante involucrando la región espaciadora. Estos resultados corroboraron que con la adición de la secuencia espaciadora la inmunogenicidad de la proteína PAD4-A se desplazó de sus secuencias naturales a una secuencia artificial. Por lo tanto, cuando



se trata del diseño de proteínas recombinantes como candidatos a vacunas, incluso los cambios más pequeños en la secuencia y/o la estructura de la proteína pueden alterar por completo el procesamiento natural y la selección del epítipo inmunodominante.

También se establece una jerarquía inmunitaria cuando dos epítopos de diferentes proteínas compiten por la misma molécula HLA-DR1, lo cual podría estar pasando en la formulación que combina PLDr 2J-L y CP40r 2J-L. Existen evidencias de esta afirmación demostradas por Sadegh-Nasseri y Kim, 2019 en un ensayo que utilizó una mezcla de LSA-NRC y proteína de influenza HA1-H5N1 en una proporción 1:1 para el procesamiento simultáneo. Los resultados de la espectrometría de masas indicaron solo una señal traza para LSA (436-449), pero picos prominentes derivados de H5N1-rHA1 que contenían HA (259-274). Los resultados se validaron *in vivo* cuando se inmunizaron ratones transgénicos DR1 con una mezcla de proteínas LSA-NRC y HA1-H5N1 en una proporción 1:1. El predominio del epítipo HA1-H5N1 no se redujo ni siquiera cuando las dos proteínas se mezclaron en proporciones de 2:1 o 4:1 a favor de LSA. Un ensayo de proliferación de células T de memoria mostró que las células T respondieron solo al HA1 y a su epítipo dominante HA (259-274), y no se observaron respuestas de memoria a LSA-NRC y LSA (436-449). Existen múltiples razones que pueden contribuir a la inmunodominancia, incluida la posibilidad de diferencias en la estabilidad y/o la resistencia a DM, sin embargo, se demostró que ambos péptidos formaban complejos estables con DR1 y eran insensibles a DM lo que valida que la falta de presentación de los epítopos dominantes de LSA no se debía a una mala unión a DR1 o a la falta de resistencia a la disociación mediada por DM. Las diferencias en la presentación de los epítopos inmunodominantes tampoco se debió a una falta de susceptibilidad a la digestión con cathepsina, ya que ambos epítopos sintéticos se digirieron cuando se incubaron solo con la mezcla de cathepsina. Sin embargo, como proteínas de longitud completa, la ubicación de los dos epítopos; en el extremo C de la proteína (epítipo LSA-NRC) o parte de la cabeza HA1 fuertemente plegada (epítipo H5N1-HA1 (259-274)), hizo que la accesibilidad a la cathepsina fuera más difícil. Por lo tanto, se proporciona evidencia de que la ubicación del epítipo y las restricciones estructurales son contribuyentes a la selección de epítopos dominantes. La jerarquía de epítopos probablemente se establece durante la competencia por la unión al surco MHC-II y, como tal, cualquier factor que pueda causar un aumento en la longevidad de un epítipo, o su captura rápida, podría contribuir a su surgimiento como dominante. Podría ser el caso de CP40 el que sus epítopos inmunodominantes puedan volverse subdominantes o crípticos cuando otros epítopos más robustos (PLD) están presentes simultáneamente. La ubicación de un epítipo en los extremos C o N de las proteínas podría aumentar la probabilidad de su captura por el MHC-II, así como la proteólisis por las enzimas de procesamiento.



Evaluación de la respuesta inmune celular de la vacuna de subunidades PLD y CP40 mediante la técnica de citometría de flujo

El desarrollo eficaz de las vacunas de nueva generación requiere de la evaluación de la respuesta inmune celular. Existe una deficiencia en la presentación de resultados de inmunogenicidad y seguridad a nivel celular, siendo mayormente presentados estudios de evaluación de respuesta humoral. En nuestro trabajo se utilizó la técnica de citometría de flujo para el análisis multiparamétrico de las principales poblaciones celulares que participan en la respuesta del sistema inmune. La inmunofenotipificación es la aplicación más utilizada en Citometría de Flujo, donde se usa la capacidad única de esta técnica de analizar simultáneamente poblaciones de células evaluando múltiples parámetros. En el presente trabajo se emplearon anticuerpos conjugados con fluorocromos dirigidos al reconocimiento de antígenos en la superficie de las células. La mayoría de las células inmunitarias tienen marcadores de CD específicos que las definen como una población de células. Estos marcadores de células se denominan marcadores de linaje (CD, Cluster de Diferenciación) y se utilizan para definir células específicas. La población de Linf B se identificó a través del marcaje de su antígeno de superficie CD19, el cual es una proteína que se expresa temprano durante la diferenciación de células pre-B y persiste hasta la diferenciación terminal en células plasmáticas. El porcentaje de LinF B a los 21 días de la primera dosis de los formulados fue superior en los animales de los grupos experimentales G3 y G4 sin diferencias estadísticas significativas. En el grupo G5 los Linf B aumentaron sus niveles en comparación con los grupos controles, pero los valores se mantuvieron por debajo de los alcanzados por los grupos donde estuvo presente el antígeno PLDr. Estos resultados están en concordancia con lo obtenido en el sistema ELISA donde el título de Ac fue superior en los grupos experimentales inmunizados con PLDr. El comportamiento tras una segunda inmunización (42 días) mostró un aumento en los niveles de LinF B en todos los grupos inmunizados (G3, G4 y G5) con diferencias estadísticas significativas en comparación con los grupos controles. Luego de 30 días del desafío se observó un aumento significativo en el porcentaje de LinF B en los grupos de animales vacunados, siendo superiores en el grupo G3 (PLDr + CP40r), seguido de G4 (PLDr) y G5 (CP40r). Anteriormente discutimos la importancia de la producción de anticuerpos y la relevancia de los resultados en comparación con otros formulados vacunales que han sido evaluados incluyendo estas moléculas como antígenos. Las células B de memoria son importantes en la inmunidad inducida por vacunas, ya que pueden responder rápidamente a la infección contra el patógeno para brindar protección. Esta población es heterogénea con múltiples subconjuntos funcionales únicos. Los estudios realizados por He y colaboradores en el 2017, sugieren que la funcionalidad de las células B de memoria podría estar determinada por los marcadores del subconjunto CD80, PD-L2 y CD73). La expresión de CD80 y PD-L2 marca un subconjunto de LinF B de memoria que pueden diferenciarse rápidamente en plasmablastos al reencontrarse con el antígeno según



Zuccarino-Catania *et al.*, 2014. Cuando se logra una afinidad elevada con los antígenos, un subconjunto de células B puede diferenciarse en células plasmáticas de larga vida (CPLV), las cuales son parte esencial del compartimento de memoria de las células B. Las CPLV secretan constantemente una gran cantidad de anticuerpos, que son responsables de mantener la concentración de los Ac circulantes después de la eliminación del antígeno. Autores como Brynjolfsson *et al.*, 2018; Khodadadi *et al.*, 2019 plantean que estas células residen principalmente en la médula ósea y son diferenciadas con una vida útil que varía de meses a décadas. Estos marcadores podrían ser evaluados en próximos estudios para establecer el comportamiento de células de memoria ante la aplicación de la vacuna.

El análisis de la población de LinF T CD4+ indicó que el grupo inmunizado con el formulado con ambas proteínas fue el que mayor porcentaje presentó durante la vacunación y el desafío. La evaluación del porcentaje celular de LinF T CD8+ luego de 30 días post desafío (72 días) indicó que el grupo G3 presentó los valores superiores, seguido de G5 y luego G4. Las células T CD8+ son responsable de controlar las infecciones provocadas por patógenos intracelulares, lo que proporciona una justificación para incluir estas respuestas en un diseño de vacuna. Generalmente, la respuesta inmune celular ha sido evaluada a través del análisis del perfil de citocinas o del tipo de isotipo de inmunoglobulina inducido por las vacunas contra la LAC. Droppa-Almeida y colaboradores en el 2016 identificó un perfil de IgG de tipo IgG2a, IgG2b e IgG3 (sin la identificación de IgG1) lo que sugiere que la respuesta inducida tras la vacunación con la proteína CP40r es de tipo Th1. Por otra parte Silva y colaboradores en el 2014, evidenciaron en el grupo de animales inmunizados con CP40r un aumento significativo de IgG1, cambiando el perfil a IgG2 luego del desafío. Este mismo grupo de investigadores en el 2019, también evaluó formulaciones con PLDr como parte de los antígenos y demostraron que aumentaba la IgG 2, IFN- γ , TNF- α , mientras que la IL-12 no fue detectada. Leal y colaboradores en el 2018 reportaron que la aplicación de una cepa de *Mycobacterium bovis* BCG transformada para la producción de PLDr indujo un aumento significativo en las IgG totales, IL-10 y IFN- γ . En el 2024 Pinho y colaboradores evaluó la respuesta inmune de ratones vacunados con *Mycobacterium bovis* BCG transformada para la producción de CP40 o CP09720. Se encontró una inducción significativa de IFN- γ e IL-10 en el grupo *M. bovis* BCG/cp40 y se registraron niveles más altos de IL-17 en el grupo *M. bovis* BCG/cp40 reforzado con CP40r en comparación con sus niveles en el grupo de control ($p < 0,05$). El análisis global del porcentaje de las poblaciones celulares involucradas en la respuesta inmune inducidas a los 30 días post desafío mostraron que estas fueron superiores en los animales que recibieron la inmunización con ambas proteínas PLDr 2J-L y CP40r 2J-L. Estos resultados demuestran el potencial de la formulación PLDr 2J-L y CP40r 2J-L para inducir una respuesta de tipo humoral y celular, señalando el aporte que cada antígeno brinda a la formulación final.



Los niveles de protección inducidos por las vacunas comerciales varían según el país donde han sido aplicadas, el tipo de hospedero ovino o caprino, las cepas bacterianas circulantes, entre otros factores, siendo un denominador común el efecto protector parcial. Estas vacunas disminuyen las manifestaciones clínicas de la enfermedad y reducen los granulomas en los animales vacunados pero el porcentaje de protección varía, reportándose valores que van desde 60 a 80 %. Las vacunas comerciales Glanvac 3 (Zoetis, London) y Glanvac 6 (Zoetis, West Ryde, Australia), presentan formulaciones compuestas por PLD de *C. pseudotuberculosis* y toxinas de *Clostridium perfringens* tipo D, *Clostridium tetani*, *Clostridium novy* tipo B, *Clostridium septicum* y *Clostridium chauvoei*. Los reportes de su aplicación en diversos países, principalmente Australia, indican que disminuye los signos y síntomas clínicos de la enfermedad, así como la producción de lesiones y abscesos.. En Australia se ha logrado una disminución en la incidencia de la enfermedad en ovinos y caprinos, con reportes de protección que van desde 25% hasta un 90% del total del rebaño. La evaluación en el 2009 mostró valores aún menores donde el rango de prevalencia fue de 26% a 5.9%. Las vacunas de gama Glanvac representan una opción para la inmunización de los rebaños; sin embargo, se asocia a ellas algunas reacciones adversas leves como alopecia y fistulas en el sitio de inoculación y otras de mayor complejidad que incluyen la formación de abscesos en el sitio de inoculación y choques anafilácticos, siendo estas reacciones más severas en los caprinos.

La vacuna Caseous D-T (Colorado Serum, EUA) es una variante que incluye toxinas de *Clostridium perfringens* tipo D, *Clostridium tetani*, y de *C. pseudotuberculosis*. Este inmunógeno se utiliza en Estados Unidos, los resultados de su aplicación indican protección asociada con un menor desarrollo de abscesos. También se reportan efectos adversos como: leve cojera y manifestaciones de molestias en ovinos jóvenes y letargo en general en gran parte de la población vacunada. Esta vacuna también puede ocasionar abscesos no deseados en el sitio de inoculación, letargo, rigidez y fiebre, siendo estas afectaciones de mayor envergadura en caprinos, incluyendo formación de edema ventral, ataxia y convulsiones, motivo que impide su aprobación para la profilaxis en caprinos. El estudio de esta vacuna en ovinos indicó una disminución en las lesiones característica de la LAC, donde de 20 animales solo 8 mostraron abscesos.

La vacuna Biodectin™ (Zoetis, España), incluye antígenos de *Clostridium septicum*, *Clostridium novyi* Tipo B, *Clostridium tetani*, *Clostridium perfringens* Tipo D, *C. pseudotuberculosis* y *Clostridium chauvoei* y es utilizada en España. El inmunógeno

LinfoVac (Laboratorios Vencofarma do Brasil) es fabricado en Brasil por la Empresa Baiana de Desarrollo Agrícola (www.ebda.ba.gov.br) en conjunto con el Instituto de Ciencias de la Salud de la Universidad Federal de Bahía. Está compuesta por la cepa viva atenuada de *C. pseudotuberculosis* 1002 y su evaluación experimental en ratones mostró un 80% de protección ante el desafío con una cepa virulenta.



Las vacunas comerciales favorecen la producción de anticuerpos anti-exotoxina PLD, los cuales protegen contra el daño tisular y la diseminación del microorganismo. Sin embargo, los grupos de investigación líderes en la temática continúan trabajando en el desarrollo de vacunas que activen la respuesta inmune de tipo celular, para lograr una mayor protección, y disminución en los efectos adversos.

Conclusión

La vacuna de subunidades PLD y CP40 mostró un aumento en la respuesta inmune humoral y celular con diferencias estadísticas significativas tanto en las etapas de vacunación como luego del desafío. El antígeno PLD constituye el factor de virulencia principal de la bacteria, es una toxina con un elevado potencial para estimular la activación de la respuesta inmune de tipo humoral. Existe jerarquía entre los epitopos de las proteínas y la presencia de epitopos inmunodominantes en la proteína PLD puede ser uno de los factores que influyen en el predominio de Ac contra esta molécula. La respuesta inmune celular evaluada mediante la fenotipificación de las poblaciones de LinF B (CD19+) y LinF T (CD4+, CD8+) por citometría de flujo fue superior en los animales del inmunizados con ambas proteínas PLDr 2J-L y CP40r 2J-L.

Bibliografía

- Brynjolfsson, S. F., Persson, B. L., Ekerhult, O. T., Rimkute, I., Wick, M. J., Martensson, I. L., Grimsholm, O. (2018). Long-lived plasma cells in mice and men. *Frontiers in Immunology*, 9, 2673. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2018.02673>.
- de Pinho, R.B., Barbosa, T.N., Dall'Agno, L., da Rocha- Fonseca, B., Bezerra, F.S.B., Sousa, F.S.S., Seixas, F.K., Collares, T., Borsuk, S. (2024). Mycobacterium bovis BCG expressing the proteins CP40 or CP09720 of *Corynebacterium pseudotuberculosis* promotes protection in mice after challenge. *Vaccine*, 42(1), 33-39. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2023.11.049>.
- de Pinho, R.B., de Oliveira-Silva, M.T., Bezerra, F.S.B., Borsuk, S. (2021a). Vaccines for caseous lymphadenitis: up-to-date and forward-looking strategies. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 105(6), 2287-2296. <https://doi.org/10.1007/s00253-021-11191-4>.
- de Pinho, R. B., de Oliveira Silva M. T., Brenner G., Dié Alves M. S., Azevedo V., Dias Portela R., Borsuk S. (2021b). A novel approach for an immunogen against *Corynebacterium pseudotuberculosis* infection: An *Escherichia coli* bacterin expressing phospholipase D. *Microbial Pathogenesis*, 151, 104746. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2021.104746>.
- Droppa-Almeida, D., Vivas, W.L., Silva, K.K., Rezende, A.F., y Simionatto, S. (2016). Recombinant CP40 from *Corynebacterium pseudotuberculosis* confers protection in mice after challenge



- with a virulent strain. *Vaccine*, 34 (8), 1091–1096. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2015.12.064>.
- Droppa-Almeida, D., Franceschi, E., Ferreira, F.P. (2018). Immune-informatic analysis and design of peptide vaccine from multi-epitopes against *Corynebacterium pseudotuberculosis*. *Bioinformatics and Biology Insights*, 12, 1–9. <https://doi.org/10.1177/1177932218755337>.
- Droppa-Almeida, D., Wanessa L.P., Fraga, R. E., Rezende, A. F. S., Alves, L. L., Meyer, R., Lima-Verde, I.B., Delagostin, O., Borsuk, S., Padilha, F.F. (2019). Response with TH1 profile obtained in vaccine formulation against Caseous Lymphadenitis in animal model C57 Black/6. *Biotechnology Research and Innovation*, 3(1), 192-196. <https://doi.org/10.1016/j.biori.2018.11.002>.
- Droppa-Almeida, D., da Silva, G. A., Gaspar, L.M.Dac., Pereyra, B.B.S., Nascimento, R.J.M., Borsuk, S. (2021). Peptide vaccines designed with the aid of immunoinformatic against Caseous Lymphadenitis promotes humoral and cellular response induction in mice. *PLoS ONE*, 16(11), e0256864. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0256864>.
- Fontaine, M.C., Baird, G., Connor, K.M., Rudge, K., Sales, J., y Donachie, W. (2006). Vaccination confers significant protection of sheep against infection with a virulent United Kingdom strain of *Corynebacterium pseudotuberculosis*. *Vaccine*, 24, 5986–5996. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2006.05.005>.
- Fontaine, M. (2015). Caseous lymphadenitis in sheep. *The Moredun Foundation News Sheet* 6(5). <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:31272268>.
- Khodadadi, L., Cheng, Q., Radbruch, A., Hiepe, F. (2019). The maintenance of memory plasma cells. *Frontiers in Immunology*, 10, 721. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2019.00721>.
- Moreira, L.S., Lopes, N.D.R., Pereira, V.C., Andrade, C.L.B., Torres, A.J.L., Ribeiro, M.B., Freire, S.M., Santos, R.M.D., D'ávila, M., Nascimento, R.M., Marchioro, S.B. (2022). The Association of Bacterin and Recombinant Proteins Induces a Humoral Response in Sheep against Caseous Lymphadenitis. *Vaccines (Basel)*, 10(9), 1406. <https://doi.org/10.3390/vaccines10091406>.
- Silva, J. W., Droppa-Almeida, D., Borsuk, S., Azevedo, V., Portela, R. W., Miyoshi, A., Rocha, F. S., Dorella, F. A., Vivas, W. L., Padilha, F. F., Hernández-Macedo, M. L., y Lima-Verde, I. B. (2014). *Corynebacterium pseudotuberculosis* cp09 mutant and cp40 recombinant protein partially protect mice against caseous lymphadenitis. *BMC Veterinary Research*, 10, 965. <https://doi.org/10.1186/s12917-014-0304-6>.



- Park, G.S., Lee, S., Jeong, M.A., Lee, S.Y., Cho, D.G., Cho, W., Kim, S.C., Kim, H.J., Lee, T.G., Jeong, C.G. (2024) . First trial of a novel caseous lymphadenitis inactivated vaccine in south korea: experimental evaluation across various animal models. *Pathogens*, *13*, 729. <https://doi.org/10.3390/pathogens13090729>.
- Leal, K. S., Silva, T.O., Silva, A.F.R., Brilhante, F.S.B., Begnini, K., Seixas, F., Collares, T. (2018). Recombinant M. bovis BCG expressing the PLD protein promotes survival in mice challenged with a *C. pseudotuberculosis* virulent strain. *Vaccine*, *36*, 3578–3583. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2018.05.049>.
- Rodríguez-Domínguez, MC. (2020). Obtención y caracterización de las proteínas recombinantes PLD y CP40, factores de virulencia de *Corynebacterium pseudotuberculosis* ovis con potencial inmunogénico [Tesis Maestría, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma del Estado de México]. Repositorio Institucional Universidad Autónoma del Estado de México. <http://hdl.handle.net/20.500.11799/110109>.
- Vale, V. L., Silva, M.daC., de Souza, A. P., Trindade, S. C., de Moura-Costa, L. F., Dos Santos-Lima, E. K., Nascimento, I. L., Cardoso, H. S., Marques, E.deJ., Paule, B. J., y Nascimento, R. J. (2016). Humoral and cellular immune responses in mice against secreted and somatic antigens from a *Corynebacterium pseudotuberculosis* attenuated strain: Immune response against a *C. pseudotuberculosis* strain. *BMC Veterinary Research*, *12*(1), 195. <https://doi.org/10.1186/s12917-016-0811-8>.
- Rodríguez-Domínguez, M.C., Montes-de-Oca-Jiménez, R., Barbabosa-Pliego, A., Díaz-Aparicio, E., Varela-Guerrero, J. A., y Tenorio-Borroto, E. (2022). Isolation, cloning and phylogenetic analysis of *pld* and *cp40*, virulence factors of a mexican isolate of *Corynebacterium pseudotuberculosis* ovis. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, *25*, 76. <http://dx.doi.org/10.56369/tsaes.3768>.
- Zuccarino-Catania, G. V., Sadanand, S., Weisel, F. J., Tomayko, M. M., Meng, H., Kleinstein, S. H., Good-Jacobson, K. L., y Shlomchik, M. J. (2014). CD80 and PD-L2 define functionally distinct memory B cell subsets that are independent of antibody isotype. *Nature Immunology*, *15*(7), 631–637. <https://doi.org/10.1038/ni.2914>.

Análisis de la metagenómica y resistencia antimicrobiana de *Corynebacterium pseudotuberculosis*

Dan Israel Zavala-Vargas.
Roberto Montes-de-Oca-Jiménez.
Martha Elba Ruiz-Riva-Palacio.





Resumen

La linfadenitis caseosa es una enfermedad contagiosa de evolución crónica, causada por la bacteria *Corynebacterium pseudotuberculosis*. Esta bacteria tiene la capacidad de evadir el sistema inmune del animal que infecta, utilizando diversos mecanismos para mantenerse dentro de las células del hospedero. Una vez que logra establecerse, puede provocar infecciones persistentes que pueden durar años o incluso toda la vida del animal. Uno de los principales desafíos de esta enfermedad es que no hay una respuesta óptima a los tratamientos con antibióticos, lo que dificulta tanto su control y erradicación. Además, las lesiones características que produce, conocidas como piogranulomas, facilitan su propagación entre los animales del rebaño. La enfermedad se agrava por algunas prácticas comunes en la ganadería, como la trasquila y el uso de alambres de púas, que pueden favorecer el contagio. Dada la dificultad para tratar esta enfermedad, su impacto en la producción ganadera y su potencial zoonótico es fundamental desarrollar estrategias integrales para prevenirla y controlarla. Debido a esto, el estudio de la linfadenitis caseosa es de gran relevancia para la medicina veterinaria. En este sentido, el uso de análisis metagenómicos ha resultado ser una herramienta muy útil para entender mejor los mecanismos de patogenicidad de *C. pseudotuberculosis*. La implementación de esta técnica permite caracterizar de forma más precisa los aislamientos bacterianos a nivel molecular, lo cual abre nuevas posibilidades para el diagnóstico, tratamiento y prevención de la enfermedad.

Palabras clave: *Corynebacterium pseudotuberculosis*, metagenómica, linfadenitis caseosa, resistencia antibacteriana



Introducción

Corynebacterium pseudotuberculosis (*C. pseudotuberculosis*) es una bacteria grampositiva pleomórfica, de dimensiones variables (0.5–0.6 μm de ancho por 1.0–3.0 μm de largo), intracelular y anaerobia facultativa. No forma esporas, carece de cápsula y no presenta motilidad. Pertenece a la familia *Actinomycetaceae*, junto con otros géneros de importancia veterinaria y biotecnológica como *Mycobacterium*, *Nocardia* y *Rhodococcus*, los cuales integran el grupo CMNR, caracterizado por una pared celular compleja compuesta de peptidoglicano, arabinogalactano y ácidos micólicos, una estructura clave en su resistencia antimicrobiana y su interacción con el sistema inmune del hospedero.

C. pseudotuberculosis es de especial interés para el campo de la veterinaria por su impacto en la producción pecuaria. Infecta múltiples especies animales y es el agente etiológico de enfermedades como linfadenitis caseosa en pequeños rumiantes, linfangitis ulcerativa en equinos y cuadros abscedativos en otros animales domésticos y silvestres. En condiciones óptimas, la bacteria desarrolla colonias secas y pálidas en medios sólidos, visibles inicialmente a las 24 horas y con diámetros de 1 a 2 mm, a las 48 horas de incubación.

Este patógeno ha sido objeto de estudios genómicos y proteómicos con el propósito de identificar antígenos candidatos para el desarrollo de vacunas, de esta forma mejorar las estrategias diagnósticas y terapéuticas. *C. pseudotuberculosis* es un patógeno zoonótico estrechamente vinculado con *Corynebacterium ulcerans* y *Corynebacterium diphtheriae*. Estas tres especies pertenecen al grupo de corinebacterias toxigénicas, ya que pueden ser infectadas por un corinebacteriófago que les transfiere el gen *tox*, responsable de codificar la toxina diftérica. La especie *C. pseudotuberculosis* se clasifica en dos biovars según sus características bioquímicas principalmente la capacidad de metabolizar nitratos, los animales que infecta y las enfermedades que provoca. El biovar *ovis* es responsable de la linfadenitis caseosa en pequeños rumiantes, como ovejas y cabras, y también puede causar mastitis en ganado lechero. Por otro lado, el biovar *equi* provoca abscesos, linfangitis ulcerosa en caballos y enfermedades cutáneas edematosas en búfalos.

La reducción de nitratos tiene relevancia en la fisiología bacteriana, particularmente en ambientes anaerobios, mediante dos rutas metabólicas clave. La reducción asimilatoria, asociada a la fijación de nitrógeno atmosférico, transforma el nitrato en compuestos gaseosos como óxido nítrico y dióxido de nitrógeno mientras que la reducción disimilatoria convierte el nitrato en amoníaco, que es secretado al medio. Estas vías no solo influyen en la virulencia y adaptación ecológica del patógeno, sino que también representan posibles dianas para el desarrollo de herramientas moleculares aplicadas en biotecnología veterinaria.



La comprensión detallada de la biología de *C. pseudotuberculosis* es fundamental para avanzar en la elaboración de vacunas efectivas, métodos de diagnóstico molecular y estrategias de control sanitario, especialmente en sistemas productivos de alto valor económico como los de ovinos, caprinos, bovinos y equinos. Dado que los hospederos son fundamentales para la producción de leche, carne, cuero y lana. Considerando la presencia global de este patógeno, las infecciones por *C. pseudotuberculosis* generan importantes pérdidas económicas. Además, al ser un agente zoonótico, también puede infectar a seres humanos, causando linfadenitis. Por ello, se han desarrollado diversos proyectos de secuenciación genética y estudios de metagenómica bacteriana, muchos de ellos con el objetivo de identificar posibles candidatos para vacunas y nuevos tratamientos para la infección generada frente a este patógeno. Además, han contribuido para ampliar el conocimiento sobre la adaptación microbiana en diferentes tipos de estrés ambiental, patogénesis, interacción hospedero-patógeno y metaproteómica microbiana.

Genómica de *C. pseudotuberculosis*

Bernardes y colaboradores realizaron un análisis pangenómico comparativo de 53 cepas de *C. pseudotuberculosis* basado en dominios funcionales y observaron que las cepas del biovar *equi* poseen más del doble de secuencias únicas que las cepas del biovar *ovis*, lo que se atribuye a una mayor variabilidad de secuencias en dicho biovar. Este hallazgo fue confirmado por medio de un análisis de ortólogos *in silico* por el que se detectaron 1138 grupos ortólogos en todas las cepas de ambos biovares con 83 grupos ortólogos pertenecientes a las cepas del biovar *ovis* y 266 para cepas del biovar *equi*. Este resultado confirma una menor variabilidad de secuencia en el biovar *ovis* en comparación con el biovar *equi*. La mayor diversidad del biovar *equi* también puede confirmarse observando el número de proteínas de cada cepa. En promedio, las cepas del biovar *equi* contienen 2022 proteínas mientras que las cepas del biovar *ovis* contienen 2012 proteínas. En el biovar *ovis*, la cepa con menor número de proteínas es P54B96, aislada de *C. taurinus* en Sudáfrica con 1950 proteínas y la cepa con mayor número de proteínas es 1002, aislada de *C. aegagrus hircus* en Brasil con 2090 proteínas que representa una diferencia de 140 proteínas entre ellas. En el biovar *equi*, la diferencia es mucho más aparente, la cepa con menos proteínas es 1_06-A, aislada de *E. caballus*, en USA, con 1860 proteínas y la cepa que tiene más proteínas es 258 con 2126 proteínas, también aislada de *E. caballus* pero en Bélgica, hace una diferencia de 266 proteínas entre ellas. Las cepas del biovar *ovis* tienen más o menos el mismo número de proteínas con una desviación estándar de 26, mientras que en el biovar *equi* se ha observado una variación, con una desviación estándar de 61 (casi 3 veces mayor que el biovar *ovis*).

Los dominios más abundantes observados en cepas del biovar *ovis*, presentan una mayor frecuencia en comparación con el biovar *equi*. Por ejemplo, el dominio



Glyco_hydro_15 está presente en todas las cepas del biovar *ovis*, frente a solo seis en el biovar *equi*. Cabe destacar que se encontraron dos copias de Glyco_hydro_15 en ambos biovares. Otro ejemplo es el dominio Cu-oxidasa 2 (multicobre oxidasa), presente en todas las cepas de la biovariedad *ovis* y solo en siete cepas de la biovariedad *equi*. Curiosamente, los macrófagos utilizan el cobre para eliminar bacterias patógenas, y las oxidasas multicobre son importantes en la desintoxicación del cobre en muchas bacterias y juegan un papel crucial en la virulencia de los patógenos. El dominio de la fosfolipasa D (PLD), asociado al principal determinante de virulencia, se identificó en todas las cepas de ambos biovares.

No se ha observado ningún dominio único en cepas de la biovariedad *ovis* aisladas en Argentina, Australia, Escocia y Sudáfrica. En el hospedero *L. glama* (llama) se logró detectar un dominio único, asociado a la función metalo-beta-lactamasa, en la cepa 267, aislada en USA. Las metalo- β -lactamasas son enzimas bacterianas que catalizan la hidrólisis de antibióticos β -lactámicos como penicilinas, cefalosporinas, carbapenémicos y monobactámicos, estos dominios confieren resistencia antimicrobiana. Además, de las 12 cepas aisladas de *C. aegagrus hircus*, solo tres cepas, aisladas en Brasil, presentaron dominios únicos. Sin embargo, presentan un patrón de dominios muy diferente, con solo dos dominios en común: DUF2326, marcado como de función desconocida y VRR_NUC, asociado con miembros de la superfamilia de nucleasas PD-(D/E)XK, que constituyen una superfamilia extensa y diversa de enzimas involucradas en numerosos eventos de escisión de ácidos nucleicos esenciales para diversos procesos celulares, estos hallazgos son consistentes con la clonalidad genómica del patógeno.

Resistencia antibacteriana de *C. pseudotuberculosis*

La multirresistencia antimicrobiana es la capacidad de un microorganismo para resistir a múltiples familias de antibióticos (más de tres fármacos) lo que limita gravemente las opciones de tratamiento. Los antimicrobianos se clasifican según su mecanismo de acción en familias como los inhibidores de la síntesis de la pared celular (penicilinas, cefalosporinas), inhibidores de la síntesis de proteínas (tetraciclinas, macrólidos, aminoglucósidos), inhibidores de la síntesis de ácidos nucleicos (quinolonas, rifampicinas) y otros como las sulfonamidas o los glucopéptidos. En el caso de *C. pseudotuberculosis*, se ha observado resistencia a varias de estas familias, lo que refleja su adaptación y la urgencia de buscar alternativas terapéuticas. Además, los estudios sobre la resistencia a los antibióticos de *Corynebacterium pseudotuberculosis* revelan patrones de susceptibilidad muy variables, estos coinciden en pocos antimicrobianos. En un estudio realizado por El Damaty y colaboradores, se observó una alta resistencia a la bacitracina y al florfenicol en el 92,6 % de estos aislados; también se obtuvo resistencia a la penicilina y la eritromicina. Mientras que otro estudio realizado por Abreu y colaboradores en donde 31 cepas fueron analizadas, reportó que el 87,1% de las muestras



fueron resistentes a novobiocina; 80,6% a neomicina; 41,9% a gentamicina; 19,3% a lincomicina; 16,1% a ampicilina, orbifloxacino y penicilina; 12,9% a sulfa-trimetoprim; 6,4% a cefazolina, norfloxacino y amoxicilina, y 3,2% a ciprofloxacino, cloranfenicol y tetraciclina. Un hallazgo importante fue que, 30 de estas cepas fueron multirresistentes en aproximadamente un 50 % de los antimicrobianos analizados. Otro estudio reciente, de İlhan y colaboradores en donde se analizaron 16 cepas, reportó que 13 (81,2%) cepas fueron sensibles a la neomicina/bacitracina/tetraciclina, 12 (75,0%) a la penicilina/novobiocina, 11 (68,7%) a la oxitetraciclina, 11 (68,7%) a la amoxicilina/ácido clavulánico, 10 (62,5%) a la cloxacilina, 9 (56,2%) a la tetraciclina, 5 (31,2%) a la ampicilina/sulbactam y 3 (18,7%) a la trimetoprima/sulfametoxazol. Ninguno de los aislados fue sensible a la estreptomina.

Por otro lado, la enrofloxacin, la neomicina/bacitracina/tetraciclina y la penicilina/novobiocina mostraron buena eficacia. Mientras que Gallardo y colaboradores, reportan buena sensibilidad a las cefalosporinas, los glucopéptidos, los macrólidos, las quinolonas y las tetraciclinas. Estos hallazgos resaltan la importancia de las pruebas de sensibilidad a los antimicrobianos para el tratamiento eficaz de las infecciones por *C. pseudotuberculosis*. Finalmente, en un estudio realizado por nuestro grupo de investigación se analizaron 227 genomas de cepas de *C. pseudotuberculosis* reportados en NCBI, en donde se realizó un análisis *in silico* para predecir los genes de resistencia antimicrobiana presentes, como resultado de este análisis, destaca la presencia de genes que confieren resistencia a antibióticos como macrólidos, rifampicinas, tetraciclinas, fluoroquinolonas, glucopéptidos y lincosamidas entre otros. Vale la pena destacar que, aunque, bibliográficamente hay reportes de genes de resistencia de beta-lactamasas nuestro análisis no logró predecir ninguna secuencia. La frecuente resistencia antimicrobiana reportada en diferentes zonas geográficas a nivel mundial podría atribuirse a las características estructurales y bioquímicas de *C. pseudotuberculosis*.

Evolución de *Corynebacterium pseudotuberculosis*

En otro estudio reciente Hiller y colaboradores sugieren que las cepas biovar *ovis* y biovar *equi* tienen un origen evolutivo común, aunque forman grupos genéticos distintos. Además, se ha postulado que el biovar *ovis* evolucionó del biovar *equi* a través de la anagénesis, que se ha definido como un cambio evolutivo progresivo que tiene lugar con el tiempo en un solo linaje. Estos cambios genéticos son impulsados por la pérdida de genes y mutaciones. En general, los aislados de *C. pseudotuberculosis* se han descrito como genéticamente homogéneos e incluso exhiben un alto nivel de homogeneidad clonal, a pesar de su amplio espectro de hospedadores. Sin embargo, las investigaciones de aislados de búfalo revelaron 48 genes únicos ubicados en la isla de patogenicidad PiCp12 que también portan el gen de la toxina de la difteria que podría desempeñar un papel en



la adaptación del hospedero. Se sabe que las bacterias patógenas que dependen de vivir en hospederos restringidos e intracelularmente experimentan una reducción adaptativa y evolutiva del genoma por mutaciones genéticas, pérdida de la función génica y, finalmente, pérdida génica. Esta pérdida gradual es una indicación de la necesidad constante de este patógeno para eliminar genes en el sentido de la selección negativa de genes redundantes o no vitales. *C. pseudotuberculosis* no solo experimenta un desarrollo genético en una dirección, sino también en paralelo en diferentes genotipos. Se han identificado diferentes genotipos caracterizados por diferentes inserciones y deleciones en los genes del locus de nitrato de aislados de *C. pseudotuberculosis* en camélidos. Esto, debido a que se ha observado que aislados de este patógeno tomados de camélidos (alpaca, llama, dromedario, camello) portan genes mutados CP258_RS01950, nar G y nar T del locus nitrato. Otro grupo separado se crea a partir de mutaciones encontradas en una llama alemana en los genes CP258_RS01950 y nar H, este grupo sería distinto a los aislados conocidos de *C. pseudotuberculosis* de biovar *ovis* y biovar *equi*. Teniendo en consideración las variaciones entre hospedadores, la distribución geográfica y las características de virulencia. Parece ser que la fuerza impulsora de estos cambios genéticos es la interacción hospedador-patógeno que resulta en coevolución del patógeno. Como resultado, los estudios han demostrado una asociación entre linajes adaptados a animales y diferentes regiones geográficas y posible adaptación a hospedadores específicos.

Respuestas transcriptómicas al estrés de *Corynebacterium pseudotuberculosis*

Una vez que *C. pseudotuberculosis* infecta a su hospedero se enfrenta a distintos estímulos importantes. Tras su fagocitosis sufre un abrupto descenso del pH dentro del fagosoma. Seguido de otros factores de estrés intracelulares, como el choque térmico oxidativo y el estrés nitrosativo, superficial, osmótico y por inanición. Para sobrevivir en este entorno, el patógeno debe montar una respuesta protectora inmediata y adecuada que se refleja inicialmente por cambios transcripcionales en conjuntos específicos de genes. En este contexto, los factores sigma, que coordinan la expresión de estos genes bajo diferentes tipos de estrés son importantes; uno de estos factores es σ^{70} en *E. coli*, que está involucrado en la síntesis de trehalosa durante el estrés osmótico, con trehalosa sirviendo como un osmoprotector importante.

La transcriptómica de *C. pseudotuberculosis* es un campo poco estudiado. Pinto y colaboradores analizaron la expresión de genes en diferentes condiciones de estrés. En condiciones de estrés ácido, la inducción de genes implicados en los procesos de adhesión celular y oxidorreducción en respuesta al estrés es de suma importancia. Los procesos de adhesión se componen de proteínas hipotéticas, una de las cuales se caracterizó como una proteína secretada que contiene un dominio LPxTG, que podría considerarse como un



posible candidato para vacunas. El gen Cp1002_2043 exhibe un cambio de 7,8 veces en la expresión. Este gen, que puede codificar la proteína Dps, se relacionó con los procesos de respuesta al estrés y oxidorreducción celular. Esta proteína protege al organismo contra el estrés oxidativo porque almacena hierro en una forma biodisponible, reduciendo la posibilidad de producción de moléculas reactivas de oxígeno. Bajo condiciones ácidas, hay un aumento en la producción de moléculas capaces de producir especies reactivas de oxígeno. Los informes han demostrado que en células en las que el pH disminuye, la relación de HOO– a O₂–aumenta, lo que incrementa la posibilidad de producir peróxido de hidrógeno (H₂O₂). Por lo tanto, se justifica el mayor número de genes que constituyen el proceso de oxidorreducción celular. Otro gen importante en el proceso de oxidorreducción fue Cp1002_0173, que exhibió un cambio de 4 veces en su expresión y se presume que codifica una catalasa que juega un papel en la reducción de la concentración de H₂O₂ en la célula. Otro gen sobre expresado fue Cp1002_1192 msrB (metionina sulfóxido péptido reductasa), que fue uno de los genes presentes en el proceso de oxidorreducción, el cual mostró una sobre expresión de 16 veces. Debido a que la proteína MsrA puede ser necesaria para mantener la función de las adhesinas, el alto aumento en la expresión de msrB sugirió que la proteína contribuye a la supervivencia del patógeno en el hospedero, la resistencia al estrés oxidativo *in vitro* y la capacidad de adhesión de las células eucariotas. El gen Cp1002_1785 (betA) también fue sobre expresado este gen puede codificar una colina deshidrogenasa. El gen inducido mostró un aumento de 5 veces en la expresión en comparación con el control. La proteína pertenece a la familia de las oxidoreductasas, que cataliza la oxidación de la colina a glicina betaína a través del intermediario betaína aldehído. Esta proteína promueve una mayor tolerancia a la hipersalinidad y la congelación y contribuye al equilibrio osmótico de la célula bajo estrés. El proceso de adhesión en *C. pseudotuberculosis* está comprendido en el gen Cp1002_1765, que podría codificar una proteína secretada. Este gen mostró una expresión dos veces mayor en comparación con el control, y es un candidato importante para estudios relacionados con el control de la linfadenitis caseosa. El gen Cp1002_1895, que puede codificar una proteína reguladora de choque térmico (HspR), también mostro un incremento en su expresión. Esta proteína actúa como un regulador negativo de la expresión de genes que codifican chaperonas y proteasas en diferentes bacterias bajo condiciones fisiológicas. Las proteínas de choque térmico juegan un papel clave en el metabolismo celular bajo todas las condiciones de crecimiento, monitoreando el plegamiento, ensamblaje y translocación de proteínas celulares.

Entre los genes reprimidos compartidos estaban aquellos que codifican proteínas relacionadas principalmente con el metabolismo energético, transporte de azúcar, aminoácidos que contribuyen en gran medida al mantenimiento y replicación del organismo en el entorno, como argJ, nanK, opp y proteínas hipotéticas. Estos datos son



consistentes con los experimentos de unidades formadoras de colonias, que demostraron una disminución en la replicación en los entornos estresantes. Una reducción en el crecimiento es una estrategia de supervivencia y ocurre esencialmente en todas las situaciones estresantes porque la capacidad del organismo para percibir el entorno y modular los mecanismos de control de respuesta de resistencia, metabolismo y otros procesos que aumentan, son específicos y adecuados para las nuevas condiciones.

En condiciones de estrés osmótico, por medio de análisis *in silico* se ha observado que los genes que codifican los factores sigma A y M se inducen. En condiciones ácidas, los genes que codifican los factores sigma B, E y H se expresaron diferencialmente, y en condiciones de estrés térmico, los genes que codifican los factores sigma A, D y H se consideraron diferencialmente expresados; sin embargo, la expresión de estos genes estuvo por debajo del límite establecido para el análisis.

Factores de virulencia de *Corynebacterium pseudotuberculosis*

Se consideran factores de virulencia a las estructuras y moléculas que confieren a la bacteria la capacidad de causar enfermedad. La transferencia horizontal de genes ha sido crucial en la evolución de la capacidad patógena de las bacterias, permitiéndoles adaptarse a diversos entornos, incluyendo la supervivencia en diferentes nichos durante la infección a los hospedadores. En *C. pseudotuberculosis*, la mayoría de los genes de virulencia se agrupan en regiones del genoma llamadas islas de patogenicidad (PAIs), identificándose 16 PAIs, a las que se ha nombrado PiCp. La presencia de un gen de transposasa en PiCp1 sugiere la incorporación de las PAIs al genoma. Estas regiones contienen genes relacionados con la adhesión, invasión, colonización, propagación dentro del hospedador, supervivencia en las células infectadas y evasión del sistema inmune. Las secuencias PiCp muestran una alta similitud intrabiovar en las cepas ovis, con una similitud del 78 % al 91 % con el biovar *equi*. Sin embargo, las cepas del biovar *equi* presentan grandes deleciones y menor similitud intrabiovar (77-88 %), en comparación con el PiCp del biovar *ovis* (62-74 %).

Factores de virulencia de la pared celular

La pared celular de *C. pseudotuberculosis* se compone de una capa de peptidoglicano que contiene ácido meso-diaminopimélico (meso-DAP), junto con arabinosa y galactosa. En la ruta de biosíntesis del peptidoglicano II, el ácido meso-DAP resulta de la reacción que cataliza la UDP-N-acetilmuramil-tripéptido sintetasa, enzima identificada en cepas de *Corynebacterium sp.* El peptidoglicano se une de forma covalente a arabinogalactanos, formando una red que, a su vez, se asocia a una capa externa de ácidos corynomicólicos (de 22 a 36 átomos de carbono), ligados a la trehalosa, siendo esta la parte más superficial. Esta estructura lipídica funciona como barrera, con una permeabilidad selectiva mediada por proteínas integrales de membrana, conocidas como porinas. Por otro lado, la



exotoxina Fosfolipasa D (PLD) se considera el principal o uno de los principales factores de virulencia y puede detectarse por medio de un ensayo de hemólisis sinérgica contra *Rhodococcus equi* o inhibiendo la β -hemolisina de *Staphylococcus aureus*, y otras técnicas de biología molecular como la PCR del gen *rpoB*.

Los principales factores de virulencia de la pared celular presentes en las bacterias del grupo *Corynebacterineae* son los lipoglicanos lipomanano (LM) y lipoarabinomanano (LAM) y los anclajes de fosfatidilmioinositol asociados a manosa (PIM). La distribución de estas moléculas parece ser específica de la especie: las moléculas similares a LM dominan en *Corynebacterium glutamicum*, en *Corynebacterium xerosis* y *Corynebacterium amycolatum* se encontraron preferentemente sustancias similares a LAM, mientras que se mostró una distribución casi igual de LM y LAM en una cepa de *Corynebacterium diphtheriae*.

Los ácidos corynomicólicos forman parte de la capa externa de la pared celular de la bacteria, que constituye una barrera protectora y permeable. La unión de estos a las moléculas de trehalosa conduce a la formación de estructuras curvas, lo que bloquea el acceso de moléculas (antibióticos o lisozimas) al peptidoglicano, confiriendo protección mecánica. A diferencia de los ácidos grasos lineales de los fosfolípidos, los ácidos corynomicólicos son ácidos grasos α -hidroxi-ramificados, que requieren la carboxilación y condensación de dos ácidos grasos para su síntesis. Las enzimas AccD2 y AccD3 son carboxilasas ampliamente conservadas en la familia *Corynebacteriaceae*, implicadas en la generación de intermediarios para la síntesis de ácidos corynomicólicos. Otras enzimas implicadas en la síntesis son AccD1, para la elongación de la cadena de ácido micólico, y FadD, una AMP ligasa. La inoculación de ácidos corynomicólicos en ovejas mostró que la haptoglobina triplicó su concentración, así como duplicó los niveles de amiloide sérico A, proteínas que indican inflamación e infecciones agudas. Estos resultados indican su potencial virulento, ya que, por sí solos, son capaces de inducir reacciones inflamatorias en el hospedero, lo que contribuye a la formación de granulomas.

Fosfolipasa D, PLD

Se ha observado que PLD tiene la capacidad de incrementar la permeabilidad vascular *in vivo*, tiene propiedades dermonecróticas, exhibe hemólisis sinérgica de células sanguíneas de oveja en presencia de productos de *Rhodococcus equi* y reduce la viabilidad de los polimorfonucleares neutrófilos ovinos *in vivo*. Además, estudios con cepas de *C. pseudotuberculosis* con PLD inactivado han demostrado convincentemente la necesidad de PLD para el establecimiento de CLA. Las cepas con mutaciones ausentes de PLD no pueden causar abscesos en los nódulos linfáticos.

Durante el curso de la infección, *C. pseudotuberculosis* se expone a diversos entornos, desde el punto de entrada, a través del sistema linfático, hasta el establecimiento



de lesiones purulento-caseosas en los órganos. Los nichos en los que la bacteria debe sobrevivir abarcan desde el entorno aeróbico del punto de infección inicial hasta la replicación intracelular en los macrófagos. Presumiblemente, los cambios en la expresión génica influyen en las adaptaciones y modificaciones necesarias para una infección exitosa. Este estudio demuestra que la regulación de la expresión del principal factor de virulencia PLD, es compleja y responde a diversas señales ambientales. Además de la regulación por choque térmico, previamente identificada, el gen también está regulado por la densidad de cultivo y presenta una alta expresión en macrófagos infectados, donde tiene un efecto pequeño pero significativo en su viabilidad. La acción enzimática de PLD hidroliza la esfingomielina, el principal componente de las membranas celulares, lo que conduce a una alteración de la morfología de la membrana diana. La PLD contribuye a la propagación y persistencia de la bacteria dentro de los macrófagos. El gen PLD presenta una secuencia ampliamente conservada en las cepas de *C. pseudotuberculosis*, y cuando ésta se modifica se dificulta la capacidad de producir la enfermedad.

Genes Fag

En PiCp1 se encuentra el operón (Fag ABCD) en *Corynebacterium pseudotuberculosis* estos genes desempeñan un papel crucial en la adquisición y transporte de hierro, un proceso esencial para la supervivencia y patogenicidad de esta bacteria. Estudios como los de Billington y colaboradores y Galvão y colaboradores, han demostrado que estos genes codifican proteínas homólogas a sistemas de captación de hierro férrico, cuya expresión se regula positivamente en condiciones de limitación de hierro. Funcionalmente, se ha identificado que FagA actúa como una proteína de membrana integral, FagB como transportador de enterobactina, FagC como proteína de unión a ATP y FagD como proteína de unión a sideróforos, integrando un sistema especializado en la adquisición de este metal. La relevancia de estos genes en la virulencia se ha demostrado en modelos animales, donde mutantes en FagB muestran una patogenicidad reducida, a pesar de no presentar defectos en condiciones de laboratorio. Esto sugiere que el entorno *in vivo* impone restricciones nutricionales, como el secuestro de hierro por proteínas del hospedero como la lipocalina 2, que hacen indispensable el sistema Fag para la infección. Además, su alta prevalencia en aislamientos clínicos de sitios invasivos, como observó Aquino de Sá y colaboradores, refuerza su asociación con la virulencia. La expresión de estos genes también está modulada por factores ambientales, como el estrés térmico, lo que refleja su adaptabilidad durante la infección. En conjunto, los genes Fag representan un mecanismo clave para la adquisición de hierro en entornos hostiles, lo que los convierte en determinantes fundamentales para la patogénesis de *C. pseudotuberculosis*.



Endoglicosidasa, CP40

Las glicosidasas son enzimas que catalizan la hidrólisis de los enlaces glicosídicos en las cadenas de glicano. Hay dos tipos de glicosidasas: las exoglicosidasas, que escinden los carbohidratos terminales de las estructuras de glicano, y las endoglicosidasas, que hidrolizan los enlaces dentro de las cadenas de glicano. Se han identificado y caracterizado numerosas glicosidasas de patógenos bacterianos con actividad en las glicoproteínas de mamíferos. Se ha demostrado que la proteína de 40 kDa, denominada CP40, es uno de los antígenos predominantes identificados durante el séptimo día de la infección por *C. pseudotuberculosis* en oveja. Análisis bioquímicos posteriores de la CP40 expresada de forma recombinante, incluyendo zimografía en gelatina e inhibición de la actividad enzimática mediante inhibidores de proteasa, han sugerido que posee actividad de serina proteasa. Está codificada por un gen con un marco de lectura abierto de 1.137 pb, que se localiza corriente abajo del gen *pld* en PiCp1. La función como factor de virulencia se ha asociado con la capacidad demostrada *in vitro* para degradar la región Fc de los anticuerpos IgG. La endoglicosidasa CP40 no hidroliza glicanos en IgG bovina y caprina, mientras que la IgG ovina se hidroliza parcialmente y la IgG equina completamente. El análisis también se realizó con subclases de IgG humana, presentando actividad en todas y parcialmente en IgG4. No hubo actividad enzimática detectable en otras glicoproteínas, incluyendo algunos de los otros isotipos de inmunoglobulina (IgA, IgD e IgE).

PAI PiCp2

En la isla de patogenicidad PiCp2 se encuentran los genes *potG*, *sigK* y *dipZ*, que responden a los mecanismos responsables del estilo de vida intramacrofágico de *C. pseudotuberculosis*. El gen *potG* codifica una proteína de membrana de unión a ATP que proporciona energía para la absorción de putrescina (poliamina) desde el espacio periplásmico, funciona como un sistema transportador de putrescina. Las putrescinas son poliamidas producidas por macrófagos que inducen una producción disminuida de especies reactivas de nitrógeno y síntesis de citoquinas proinflamatorias. El gen *dipZ* ha sido identificado en el filo *Actinobacteria*, está regulado por *sigK* y se activa durante la infección de macrófagos por *Mycobacterium tuberculosis*. En PiCp4, la presencia del gen que codifica el factor Sigma confiere la capacidad de proteger contra el estrés oxidativo, específicamente contra la acción de los productos intermedios de nitrógeno, producidos por los macrófagos.

Dianas moleculares vacunas de *Corynebacterium pseudotuberculosis*

Entre las vacunas comerciales contra linfadenitis caseosa se encuentran; Glanvac 3 y 6 (Zoetis): combinan toxinas de diversos *Clostridium* y *C. pseudotuberculosis*. Reducen las lesiones, pero no previenen la infección y pueden causar reacciones adversas, incluyendo



granulomas y shock anafiláctico en cabras. Su eficacia varía, y el uso adecuado por parte de los productores es bajo. Caseous DT y Case-Bac (Colorado Serum, USA): incluyen PLD y cultivos inactivados. Reducen abscesos, pero provocan efectos secundarios, más graves en cabras, como edema y convulsiones. Biodectin™ (Zoetis, España): vacuna combinada con seis antígenos bacterianos y un antiparasitario. LinfoVac (Brasil): contiene una cepa viva atenuada de *C. pseudotuberculosis*, con un 80% de eficacia en modelos experimentales. Estas vacunas utilizan como inmunógeno a PLD y ofrecen una protección parcial contra esta enfermedad. Por otro lado, las vacunas de toxoides inactivos están compuestas por bacterias y toxinas inactivas, inducen una respuesta inmunitaria principalmente humoral y requieren altas concentraciones y varias dosis. Se ha observado que, aunque no causan la enfermedad, pueden generar efectos adversos por contener todos los componentes bacterianos. Se han realizado estudios en ratones, alpacas, ovejas y cabras han mostrado que estas vacunas reducen la formación de abscesos y la severidad de la enfermedad, especialmente cuando incluyen toxina PLD en altas concentraciones. Aunque, su efectividad depende de la formulación y del adyuvante utilizado. Las vacunas que utilizan subunidades proteínas recombinantes, péptidos o lipopolisacáridos como antígenos parecen ser mucho más seguras que las anteriormente mencionadas, aunque, requieren adyuvantes para aumentar su inmunogenicidad, y en su mayoría están enfocadas en la proteína recombinante PLD.

Otra proteína recombinante que ha sido utilizada como diana es la proteína recombinante CP40, esta se ha utilizado en diferentes estudios y se ha observado que al combinarse con la cepa atenuada (CP09) protegió entre el 60 % y el 90 % de los animales probados. Mientras que cuando se utilizan adyuvantes como saponina o el adyuvante completo de Freund (ACF) mejoró la respuesta Th1 (inmunidad celular), sin diferencias significativas entre ellos. Dado que el ACF es tóxico en ovejas, se propone la saponina como alternativa segura y eficaz.

Conclusiones

C. pseudotuberculosis es un patógeno altamente complejo, y el uso de herramientas de genómica comparativa ha sido fundamental para identificar características específicas entre cepas y biovars, esto podría llevarnos al descubrimiento e implementación de nuevos fármacos y dianas moleculares. Uno de los hallazgos más característicos de *C. pseudotuberculosis* es que las cepas *ovis* altamente clonales, mientras que las cepas *equi* exhiben una mayor plasticidad genómica. Mientras que los mecanismos de patogenidad e interacción hospedero-patógeno más estudiados han sido; la capacidad de *C. pseudotuberculosis* de sobrevivir y multiplicarse dentro de las células hospederas; además, de la resistencia a la fagocitosis y la modulación de las respuestas inmunes. Algunos otros mecanismos que han sido estudiados son la capacidad de formar cápsulas, la secreción de toxinas y la expresión de genes de respuesta al estrés, además de resistencia



a los fagocitos y supervivencia intracelular. Por otro lado, PLD es el factor de virulencia más estudiado, y el más utilizado para la implementación de todo tipo de vacunas; sin embargo, hasta el momento no ha conferido una protección óptima contra este patógeno a pesar de los múltiples intentos de agregar adyuvantes y otros factores de virulencia. Finalmente, en relación con la adaptación y selección del genoma se han observado dos vertientes, los estudios que correlacionan la adaptación genómica a la influencia del medio ambiente y los estudios que relacionan la adaptación del genoma a la influencia del hospedero. En la última vertiente es necesario tener en consideración la influencia del hierro en el ciclo celular del patógeno ya que juega un papel vital en la biología y patogenicidad de la bacteria. Actuando como un cofactor esencial para el crecimiento, el metabolismo, la regulación genética y la virulencia, según evidencias descritas en múltiples estudios. Debido a esto es necesario reconsiderar el enfoque de los blancos vacunales. Teniendo en cuenta que *C. pseudotuberculosis* es un patógeno altamente especializado en la captación de hierro y aunque se han diseñado vacunas dirigidas contra PLD existen otros sistemas especializados en la captación de este, estos sistemas deben ser tomados en cuenta durante el diseño de blancos vacunales dirigidos contra la captación de hierro.

Bibliografía

- Bernardes, J. S., Eberle, R. J., Vieira, F. R. J., and Coronado, M. A. (2020). A comparative pan-genomic analysis of 53 *C. pseudotuberculosis* strains based on functional domains. *Journal of Biomolecular Structure and Dynamics*, 39(18), 6974–6986. <https://doi.org/10.1080/07391102.2020.1805017>.
- De Sá, M. C. A., Da Silva, W. M., Rodrigues, C. C. S., Rezende, C. P., Marchioro, S. B., Filho, J. T. R. R., De Jesus Sousa, T., De Oliveira, H. P., Da Costa, M. M., Figueiredo, H. C. P., Portela, R. D., De Paula Castro, T. L., Azevedo, V., Seyffert, N., and Meyer, R. (2021). Comparative Proteomic Analyses Between Biofilm-Forming and Non-biofilm-Forming Strains of *Corynebacterium pseudotuberculosis* Isolated From Goats. *Frontiers in Veterinary Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fvets.2021.614011>
- El Damaty, H. M., El-Demerdash, A.S., Abd El-Aziz, N.K., Yousef, S.G., Hefny, A.A., Abo Remela, E.M., Shaker, A. and Elsohaby, I., 2023. Molecular characterization and antimicrobial susceptibilities of *Corynebacterium pseudotuberculosis* isolated from caseous lymphadenitis of smallholder sheep and goats. *Animals*, 13(14), 2337. <https://doi.org/10.3390/ani13142337>.
- Gallardo, A.A., Toledo, R.A., González Pasayo, R.A., Azevedo, V., Robles, C., Paolicchi, F.A. and Estevao Belchior, S.G., 2019. *Corynebacterium pseudotuberculosis* biovar *ovis*: Evaluación de la sensibilidad antibiótica *in vitro*. *Revista Argentina de Microbiología*,



- 51(2), pp. 123–129. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2018.12.001>.
- Galvão, C. E., Fragoso, S. P., de Oliveira, C. E., Forner, O., Pereira, R. R. B., Soares, C. O., and Rosinha, G. M. S. (2017). Identification of new *Corynebacterium pseudotuberculosis* antigens by immunoscreening of gene expression library. *BMC microbiology*, 17(1), 202. <https://doi.org/10.1186/s12866-017-1110-7>.
- Hiller, E., Hörz, V., and Sting, R. (2024). *Corynebacterium pseudotuberculosis*: Whole genome sequencing reveals unforeseen and relevant genetic diversity in this pathogen. *PLoS ONE*, 19(8). e0309282. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0309282>
- Ibraim, I. C., Parise, M. T. D., Parise, D., Sfeir, M. Z. T., de Paula Castro, T. L., Wattam, A. R., Ghosh, P., Barh, D., Souza, E. M., Góes-Neto, A., Gomide, A. C. P., and Azevedo, V. (2019). Transcriptome profile of *Corynebacterium pseudotuberculosis* in response to iron limitation. *BMC genomics*, 20(1), 663. <https://doi.org/10.1186/s12864-019-6018-1>
- İlhan, Z. (2020). In Vitro Antimicrobial Susceptibility of *Corynebacterium pseudotuberculosis* Isolated from Sheep with Caseous Lymphadenitis. *Kocatepe Veterinary Journal*, 1. <https://doi.org/10.30607/kvj.738662>.
- McKean, S. C., Davies, J. K., and Moore, R. J. (2007). Expression of phospholipase D, the major virulence factor of *Corynebacterium pseudotuberculosis*, is regulated by multiple environmental factors and plays a role in macrophage death. *Microbiology*, 153(7), 2203–2211. <https://doi.org/10.1099/mic.0.2007/005926-0>.
- Möller, J., Bodenschatz, M., Sangal, V., Hofmann, J., & Burkovski, A. (2022). Multi-Omics of *Corynebacterium pseudotuberculosis* 12CS0282 and an in silico reverse vaccinology approach reveal novel vaccine and drug targets. *Proteomes*, 10(4), 39. <https://doi.org/10.3390/proteomes10040039>
- Pinto, A. C., De Sá, P. H. C. G., Ramos, R. T. J., Barbosa, S., Barbosa, H. P. M., Ribeiro, A. C., Silva, W. M., Rocha, F. S., Santana, M. P., De Paula Castro, T. L., Miyoshi, A., Schneider, M. P. C., Silva, A., and Azevedo, V. (2014). Differential transcriptional profile of *Corynebacterium pseudotuberculosis* in response to abiotic stresses. *BMC Genomics*, 15(1). <https://doi.org/10.1186/1471-2164-15-14>.
- Raynal, J. T., Da Rocha, M. S. N., Da Silva Cavalcanti, N. A., Bastos, B. L., De Farias, A. P. F., Da Costa Silva, M., Da Conceição Aquino De Sá, M., De Moura-Costa, L. F., Portela, R. W. D., Trindade, S. C., and Nascimento, R. J. M. (2022). Influence of Iron Chelating Agents on the *in Vitro* Growth Curve of *Corynebacterium pseudotuberculosis* Strains. *Ensaios E Ciência C Biológicas Agrárias E Da Saúde*, 26(2), 270–280. <https://doi.org/10.17921/1415-6938.2022v26n2p270-280>.



- Rhodes, D., Magdesian, K., Byrne, B., Kass, P., Edman, J., and Spier, S. (2015). Minimum Inhibitory Concentrations of Equine *Corynebacterium pseudotuberculosis* Isolates (1996–2012). *Journal of Veterinary Internal Medicine*, 29(1), 327–332. <https://doi.org/10.1111/jvim.12534>
- Ribeiro, D., Rocha, F.deS., Leite, K. M., Soares, S. de C., Silva, A., Portela, R. W., Meyer, R., Miyoshi, A., Oliveira, S. C., Azevedo, V., and Dorella, F. A. (2014). An iron-acquisition-deficient mutant of *Corynebacterium pseudotuberculosis* efficiently protects mice against challenge. *Veterinary research*, 45(1), 28. <https://doi.org/10.1186/1297-9716-45-28>.
- Rebouças, M. F., Loureiro, D., Barral, T. D., Seyffert, N., Raynal, J. T., Sousa, T. J., Figueiredo, H. C. P., Azevedo, V., Meyer, R., & Portela, R. W. (2020). Cell wall glycolipids from *Corynebacterium pseudotuberculosis* strains with different virulences differ in terms of composition and immune recognition. *Brazilian Journal of Microbiology*, 51(4), 2101–2110. <https://doi.org/10.1007/s42770-020-00343-9>
- Rodríguez Domínguez, M. C., Montes de Oca Jiménez, R., and Varela-Guerreo, J. A. (2021). Caseous lymphadenitis: Virulence factors, pathogenesis and vaccines. Review. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 12(4), 1221–1249. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v12i4.5699>.
- Shadnezhad, A., Naegeli, A., & Collin, M. (2016). CP40 from *Corynebacterium pseudotuberculosis* is an endo- β -N-acetylglucosaminidase. *BMC Microbiology*, 16(1). <https://doi.org/10.1186/s12866-016-0884-3>
- Zavala-Vargas, D. I., Montes-De-Oca-Jiménez, R., Ruiz-Riva-Palacio, M. E., Del Carmen Gutiérrez-Castillo, A., Rivadeneira-Barreiro, P. E., Arteaga-Troncoso, G., Zambrano-Rodríguez, P. C., Sánchez-Aparicio, P., Ibancovich-Camarillo, J. A., De-Castro-Soares, S., & De Carvahó Acevedo, V. A. (2025). Análisis de genotipo y fenotipo de los mecanismos de resistencia a los antimicrobianos en *Corynebacterium pseudotuberculosis*. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 28(2). <https://doi.org/10.56369/tsaes.6192>

Análisis de los mecanismos de resistencia antimicrobiana en *Corynebacterium pseudotuberculosis*

Dan Israel Zavala-Vargas.
Roberto Montes-de-Oca-Jiménez.
Martha Elba Ruiz-Riva-Palacio.
Pilar Eliana Rivadeneiro-Barreiro.
Pablo Cleomenes Zambrano-Rodríguez.
Pedro Sánchez Aparicio.





Resumen

Corynebacterium pseudotuberculosis biovar *ovis* (*C. pseudotuberculosis*), es un cocobacilo Gram positivo no esporulado, anaerobio facultativo y es el patógeno causante de la linfadenitis caseosa la cual es una enfermedad que genera grandes pérdidas económicas tanto a la ganadería nacional como la internacional. La enfermedad afecta la condición y rendimiento físico del animal, ocasiona baja producción de leche y carne. Existen vacunas comerciales disponibles a nivel mundial preventivas; sin embargo, la protección que confieren no es completamente eficaz en el control de la enfermedad. El tratamiento antibiótico es una opción viable para su tratamiento en las fases iniciales de la infección; sin embargo, muy poco eficaz en procesos crónicos. Por otro lado, el aumento de reportes de infecciones generadas por *C. pseudotuberculosis* multirresistentes incrementa la dificultad para tratar la linfadenitis casera. Por lo que el estudio de los mecanismos de resistencia antibacteriana es vital para comprender su complejo desarrollo evolutivo y optimizar la elección farmacológica para su tratamiento. En este capítulo se hace un análisis de los principales mecanismos de resistencia antibacteriana que han sido reportados en *C. pseudotuberculosis*.

Palabras clave: *Corynebacterium pseudotuberculosis*, linfadenitis caseosa, resistencia antibacteriana, antibióticos.



Introducción

Entre las enfermedades producidas por *C. pseudotuberculosis* se encuentran la linfangitis ulcerosa de los bovinos y equinos, la artritis supurativa y contagiosa en corderos, la orquitis supurativa en carneros y el acné contagioso en equinos, este último el de mayor relevancia. La linfadenitis caseosa consiste en la formación de abscesos en los nódulos linfáticos superficiales y en los órganos internos de los pequeños rumiantes. Esta patología está distribuida en zonas de producción ovina y caprina en todo el mundo y ocasiona grandes pérdidas económicas. Provoca deterioro general de los animales enfermos y reduce la producción de lana, carne y leche. También afecta de manera negativa el valor económico de los animales de raza y las carcasas de exportación, que son afectadas negativamente. Los signos clínicos relacionados con esta patología son; adenomegalia unilateral y presencia de abscesos o nódulos abscedados en el tejido subcutáneo y las zonas más afectadas por estos abscesos son la región de la cabeza, mejillas, región cervical y región del pecho. *C. pseudotuberculosis* se divide en dos biovars; biovar *ovis* y biovar *equi* diferenciados por los resultados de la prueba de reducción de nitrato. Aunque estos biovars no muestran una adaptación estricta al hospedero, los resultados de algunos estudios y principalmente los datos de secuenciación depositados en el Centro Nacional de Información Biotecnológica (NCBI), muestran que el biovar *ovis* se aísla principalmente de infecciones en pequeños rumiantes y el biovar *equi* de caballos y grandes rumiantes. Las vacunas disponibles comercialmente contra *C. pseudotuberculosis* no han logrado una protección completa. El tratamiento en fases iniciales de la infección es eficaz; sin embargo, la forma crónica de la infección hace complicado el tratamiento por el desarrollo de lesiones abscedativas con una capa gruesa y múltiple de tejido conjuntivo. Además, el tratamiento con antimicrobianos para *C. pseudotuberculosis* ha mostrado ser portador de diferentes mecanismos de resistencia.

La Resistencia antimicrobiana (RAM), es un proceso evolutivo estocástico, basado en una reacción específica de los microorganismos para sobrevivir a la exposición a los antibióticos. Sin embargo, la resistencia a los antimicrobianos se produce en un sistema ecobiológico extremadamente complejo y variable que abarcan todo el planeta y en el que intervienen muchas otras causas. En la RAM la existencia de causas no implica lógica en la evolución de la resistencia, que es un proceso ciego basado fundamentalmente en el azar. Lo que dificulta la capacidad de predecir el comportamiento de la RAM, basado en secuencias de resistencia, uso de antimicrobianos, adaptaciones ambientales o pruebas bioquímicas.

La resistencia a los antimicrobianos puede ser de origen intrínseco o adquirido. La resistencia intrínseca se manifiesta de manera constante en una especie bacteriana, esta forma de resistencia se considera un rasgo característico y común de toda la especie bacteriana, y no tiene relación con la transferencia horizontal de genes. Mientras que la adquirida puede ser inducida; en este caso, los genes responsables están presentes en el



genoma bacteriano, pero solo se activan y expresan niveles de resistencia tras la exposición a un antibiótico, aunque la presencia de los genes de resistencia no depende directamente de dicha exposición. Entre los mecanismos más frecuentes asociados a la resistencia intrínseca se encuentran la disminución en la permeabilidad de la membrana externa y la actividad natural de las bombas de eflujo. Estas bombas, especialmente las que expulsan múltiples fármacos.

En el caso de la resistencia adquirida, las bacterias pueden incorporar material genético que les confiere resistencia a través de tres mecanismos principales: transformación, transposición y conjugación, procesos conocidos en conjunto como transferencia horizontal de genes. Además, las bacterias pueden desarrollar resistencia mediante mutaciones en su propio ADN cromosómico. Dichas mutaciones pueden ser transitorias o permanentes y producirse por la acción de agentes físicos o químicos. Generalmente, las mutaciones que favorecen la resistencia antimicrobiana afectan un número limitado de genes, entre ellos los que codifican los sitios de acción de los fármacos, los transportadores de fármacos, los reguladores de estos transportadores y las enzimas encargadas de modificar los antibióticos.

C. pseudotuberculosis, al igual que otros microorganismos patógenos de relevancia en medicina veterinaria, presenta el grave problema de la resistencia antimicrobiana, producto del proceso evolutivo y de la presión selectiva ejercida por el ser humano. Es importante señalar que los mecanismos de resistencia no surgieron como una respuesta al uso continuo de antibióticos por parte del sector ganadero, sino que son mecanismos que originalmente tenían otra función dentro del ciclo de replicación celular de este patógeno y posteriormente se adaptaron como un mecanismo de supervivencia frente a estímulos ambientales. Estos mecanismos incluyen la tolerancia, evasión, expulsión o modificación de antibióticos, mediante la selección de las bacterias mejor capacitadas para sobrevivir.

Zavala-Vargas y colaboradores, 2025 ha logrado predecir 35 secuencias codificadoras de genes de resistencia antibacteriana, entre los cuales se encuentran mecanismos como; bombas de eflujo de antibiótico, inactivación de antibióticos, alteración de diana antibiótica, sustitución de objetivos antibióticos, protección antibiótica y permeabilidad reducida de antibiótico. Comprender la relación entre la expresión del genotipo es crucial para la elección de un buen antibiótico para su tratamiento.

Mecanismos de RAM reportados en *C. pseudotuberculosis*

C. pseudotuberculosis además de contar con mecanismos de resistencia antibacteriana expresados a partir de genes. Utiliza una serie de mecanismos que se han denominado intrínsecos; estos son una serie de características bioquímicas y estructurales que no



dependen necesariamente de la exposición a antibióticos para estimular su resistencia, sino que son características físicas de la bacteria como el piogranuloma que induce, los ácidos micólicos y el biofilm o biopelícula. A continuación, se mencionan los principales mecanismos de resistencia observados en *C. pseudotuberculosis* y su funcionamiento.

Piogranuloma

El absceso generado por *C. pseudotuberculosis* en la etapa tardía contiene pus de color amarillo verdoso que evoluciona hacia una lesión laminada múltiple, semejante a “anillos de cebolla”. Se caracteriza por piogranulomas y necrosis que comprimen el tejido circundante. El centro del absceso está formado por un núcleo necrótico y material purulento o caseoso, infiltrado principalmente por polimorfonucleares neutrófilos en diversas etapas de necrosis y rodeado por una capa delgada de neutrófilos polimorfonucleares activos. El material necrótico purulento está rodeado por un manto periférico de tejido conectivo y se acompaña de infiltrado inflamatorio compuesto por polimorfonucleares neutrófilos, macrófagos, células epitelioides, linfocitos y células plasmáticas. Al escapar las bacterias de manera centrifuga se desarrollan otras capas de tejido conectivo e infiltrado inflamatorio, lo que da la apariencia macroscópica de lesión multilaminada o apariencia de “aros de cebolla”. Las lesiones crónicas muestran una cápsula gruesa de tejido conectivo fibroso maduro compuesta por fibroblastos bien organizados e infiltrados por algunas células inflamatorias como macrófagos y linfocitos. Este tipo de lesiones se observan en nódulos linfáticos, pulmón, hígado, riñón y glándula mamaria, entre otros. La lesión granulomatosa inducida por *C. pseudotuberculosis* participa en dos mecanismos de resistencia antibacteriana que deben considerarse para elegir un tratamiento adecuado. La capa gruesa de tejido conectivo maduro del piogranuloma generado por *C. pseudotuberculosis* impide el acceso del antibiótico a la bacteria blanco. Además, la disminución de pH dentro del núcleo necrótico de material licuado en algunos casos disminuye la eficacia del antibiótico.

Biofilm o biocapa

La capacidad de las bacterias del género *Corynebacterium* para producir biofilm se considera un importante factor de virulencia y un mecanismo de resistencia. Esta estructura es un agregado de microcolonias rodeadas por una matriz compuesta por polisacáridos, formando comunidades organizadas que permiten la adhesión a superficies biológicas y se caracteriza por una mayor resistencia a los antimicrobianos y biocidas en la fase crónica de la enfermedad. El biofilm es capaz de producirse tanto en superficies inertes como en orgánicas, lo que facilita las infecciones en el ámbito de la salud humana y veterinaria. Las bacterias se unen gracias a una matriz de biopolímero autoproducida. En cuanto a su composición, la biopelícula es una estructura heterogénea y está formada principalmente de células microbianas entre un 10 al 25% y una matriz conocida como



sustancia polimérica extracelular (SPE) que forma entre un 75 al 90% de la biopelícula este tipo de interacciones puede estar formado por una o más especies bacterianas que viven de forma sociomicrobiológica. La SPE proporciona estabilidad estructural y protección a la biopelícula, además consiste principalmente de exopolisacáridos, proteínas, lípidos y ADN extracelular (eDNA). La formación de SPE a pesar de los altos requerimientos energéticos y celulares proporciona a las células bacterianas un entorno bastante funcional, ya que favorecen la transferencia horizontal de genes y las interacciones intercelulares, mejora la captura de recursos y la adhesión a la superficie, ofrecen protección contra agentes externos especialmente antibióticos e inhiben la deshidratación bacteriana.

En relación con la resistencia antimicrobiana conferida por la bioplaca, actúa por medio de la reducción y la penetración, además cuenta con la presencia de bombas de eflujo bacteriana capaces de extraer los antibióticos fuera de la biopelícula. Las colonias bacterianas tienden a mostrar una resistencia 1000 veces mayor a los antibióticos en comparación con sus cepas planctónicas y crean interacciones entre múltiples especies que favorecen la transferencia horizontal de genes. Los polisacáridos son una fracción importante de la matriz de SPE tanto en bacterias Gram positivas como Gram negativas. Los exopolisacáridos pueden ser homopolisacáridos (glucanos, fructanos o celulosa); o en su mayoría heteropolisacáridos que consisten en una mezcla de residuos de azúcar neutros y cargados. Muchos exopolisacáridos conocidos como: el alginato, el xantano y el ácido colánico, todos ellos polianiónicos. También existen exopolisacáridos policationicos, como PNAG (poli- β -(1 $\rightarrow$ 6)-N-acetilglucosamina) y Pel. Los polisacáridos en el SPE están involucrados en varias funciones en la formación y mantenimiento del biofilm. Permiten la colonización de superficies bióticas y abióticas por medio de células planctónicas que posibilitan la agregación de bacterias; estas forman una red polimérica hidratada que media la estabilidad mecánica del biofilm y previene la desecación bacteriana, lo que le confiere resistencia a la defensa específica y no específica del hospedero durante la infección y también son una fuente importante de nutrientes.

Por otro lado, el ADN incrustado en la matriz extracelular del biofilm cumple dos funciones principales: una función estructural y otra relacionada con la resistencia adquirida a los antibióticos. Se ha demostrado que, en *P. aeruginosa*, dicha resistencia se debía a una función desconocida del ADN extracelular (eADN) capaz de unirse y secuestrar cationes, incluido el magnesio, del entorno vecino. Además, se ha observado que el eADN incrementa la resistencia contra los péptidos antimicrobianos catiónicos, como los aminoglucósidos. A medida que el eADN bacteriano se acumula, se produce una acidificación de la biopelícula alterando la fuerza motriz de protones de la membrana interna de las bacterias anaeróbicas, lo que dificulta la absorción de aminoglucósidos cargados positivamente. Además, se han propuesto otras posibles funciones del ADN



dentro del biofilm como actuar como reserva energética y nutricional, así como constituir un acervo genético que facilita la transferencia horizontal de genes entre bacterias naturalmente competentes.

Los componentes proteínicos de la matriz del biofilm incluyen proteínas extracelulares secretadas, adhesinas de la superficie celular y subunidades proteicas de apéndices celulares como flagelos y pili. Estas proteínas cumplen diversas funciones en la formación y disolución del biofilm. Participan en la adhesión de las células a las superficies, en la estabilización de la matriz del biofilm mediante interacciones con componentes de exopolisacáridos y ácidos nucleicos, en el desarrollo de arquitecturas tridimensionales del biofilm y en la disolución de la matriz a través de la degradación enzimática de polisacáridos, proteínas y ácidos nucleicos. El proteoma del biofilm es muy amplio y presenta características únicas que funcionan de manera sinérgica con otros componentes de la matriz, como los exopolisacáridos y el eADN. Las proteínas de la matriz se organizan en módulos o dominios dentro de los cuales se incluyen FnIII, FG-GAP, VCBS, lectina, dominios de unión a azúcares ricos en glicina y motivos de secuencia RGD que participan en la adhesión célula-célula y/o la unión a la matriz extracelular, las proteínas de la superficie celular o los carbohidratos. En análisis pan-genómicos se ha demostrado que *C. pseudotuberculosis* es una bacteria formadora de biofilm, lo cual podría representar una ventaja para facilitar la transferencia horizontal de genes.

Aunque se ha reportado la formación de biopelículas para *C. pseudotuberculosis*, no todas las cepas demuestran esta propiedad en cultivo. De Sá y en un análisis proteómico comparativo de una cepa formadora de biopelículas (CAPJ4) y una cepa no formadora de biopelículas (CAP3W) aislada de cabras. Se obtuvieron extractos de proteína de célula completa bacteriana para análisis de espectrometría de masas. Usando LC-MS/MS, observaron tres y cuatro proteínas encontradas exclusivamente en el proteoma CAPJ4 y CAP3W, respectivamente. Además, el análisis cuantitativo sin etiqueta identificó 40 proteínas que mostraban valores al menos 2 veces más altos en CAPJ4 en comparación con el proteoma CAP3W. En particular, CAPJ4 sintetizó diferencialmente la proteína de unión a la penicilina, que participa en la formación de peptidoglicanos. CAPJ4 también exhibió una regulación positiva de la N-acetilmuramoil-L-alanina amidasa y la galactosa-1-fosfato uridililtransferasa, que están involucradas en la formación de biopelículas y la biosíntesis de exopolisacáridos. Se ha concluido que la formación de biopelículas en *C. pseudotuberculosis* probablemente está asociada con proteínas específicas, algunas de las cuales previamente se demostró que están asociadas con la virulencia.

C. pseudotuberculosis presenta biopelículas con características definidas que varían en el tiempo y muestran perfiles proteómicos específicos, según lo evidencian estudios que emplearon espectroscopía Raman, microscopía electrónica y ensayos de adhesión. La composición bioquímica de sus biopelículas cambia a lo largo de 24, 48 y 72



horas, reflejando variaciones en componentes moleculares como anillos fenólicos y grupos carboxilos. La morfología se caracteriza por agregados celulares incrustados en una matriz extracelular robusta, con diferencias dependientes de la cepa. La susceptibilidad a antimicrobianos y desinfectantes varía, dependiendo tanto del agente empleado como de las condiciones ambientales. En contraste, un estudio en *Corynebacteriaceae* (evaluado en un contexto invertebrado) informa de biopelículas con arquitectura radial y estratificada, evidenciando diferencias en la organización espacial y función (actividad larvicida). La comparación directa de parámetros bioquímicos y proteómicos entre *C. pseudotuberculosis* y otras especies del género se ve limitada, pero los datos disponibles indican que las diferencias principales se verifican en el formato estructural y en la respuesta a agentes antimicrobianos.

Ácidos micólicos

La envoltura de *C. pseudotuberculosis* es en parte responsable de su resistencia innata a los antibióticos. Debido a su baja permeabilidad e hidrofobicidad, este patógeno tiene la capacidad de evadir fácilmente antibióticos hidrofóbicos. La pared celular de *C. pseudotuberculosis* es muy compleja y se considera uno de sus principales factores de virulencia. La complejidad de esta pared celular se debe principalmente a la presencia de ácido micólico o ácidos corinomicólicos. Estas moléculas corresponden a ácidos grasos 3-hidroxi de cadena larga ramificada, considerados los más cortos dentro de este grupo lipídico, con longitudes de entre veinte y hasta treinta y seis átomos de carbono. En comparación, los ácidos corinomicólicos presentes en micobacterianos pueden alcanzar una longitud de entre sesenta y noventa átomos de carbono. Estas estructuras lipídicas en *C. pseudotuberculosis* desempeñan un papel vital en la supervivencia bacteriana dentro del hospedero. La naturaleza lipídica del ácido micólico es responsable de sus efectos citotóxicos. Se ha reportado que el ácido micólico, tras ser purificado e inoculado en modelos murinos, aumentó los signos clínicos y provocó congestión localizada, edema y necrosis hemorrágica.

Bombas de eflujo

Aunque previamente no se ha reportado la presencia de bombas de eflujo en *C. pseudotuberculosis*; recientemente nuestro grupo de trabajo mediante modelos predictivos, pone en evidencia la existencia de genes de resistencia codificadores de estas bombas. Además, dichos mecanismos se han identificado en otras cepas del género *Corynebacterium*, por lo que es necesario considerar que *C. pseudotuberculosis* emplea bombas de eflujo para la expulsión de antibióticos, siendo esta también una característica común de bacterias formadoras de biopelícula. Las bombas de eflujo disminuyen la concentración intracelular de antibióticos, lo que impide que alcancen su concentración



óptima. Cabe señalar que estos sistemas de transportes son anteriores al uso clínico de antibióticos y se ha demostrado que cumplen funciones vitales en la fisiología, patogenicidad y metabolismo de las bacterias, lo que sugiere que su función principal no es la expulsión de antibióticos. Algunas de estas actividades incluyen: regular los niveles de nutrientes y metales pesados, aliviar el estrés celular y extruir toxinas. Además, las bombas de eflujo pueden exportar sustancias tóxicas en el hospedero, como la bilis, para ayudar a las bacterias a sobrevivir, invadir y colonizar a su hospedero. Entre las bombas de eflujo descritas son: BmrA, NorA y MexAB-OprM que extruyen una variedad de compuestos antibacterianos estructuralmente no relacionados. En contraste, existen bombas específicas, como TetA y CmlA, que confieren resistencia intrínseca a las bacterias frente a antibióticos particulares mediante genes codificados cromosómicamente. Otras, como MefA y MefE, se localizan en transposones, mientras que OqxAB, qax, qepA y tet, pueden encontrarse en plásmidos o integrones. La exposición a antibióticos suele inducir a la sobreexpresión de estas bombas de eflujo o favorecer la aparición de mutaciones, especialmente en los genes reguladores, que les permiten expulsar los antibióticos de manera más eficiente. Cuando las bombas de eflujo se expresan de forma constitutiva, a menudo trabajan junto con otros mecanismos de resistencia, como las β -lactamasas, para aumentar su resistencia a los antibióticos.

β -lactamasas

El gen bla codifica β -lactamasas y es una de las clases más grande de genes de resistencia antimicrobiana. Estas enzimas tienen la capacidad de hidrolizar el anillo betalactámico de los antibióticos, impidiendo así su funcionamiento. Las betalactamasas pueden estar codificadas cromosómicamente o más frecuentemente, en plásmidos o transposones. Rizk y colaboradores en el 2019, detectaron genes de betalactamasa en aislados de *C. pseudotuberculosis* provenientes de Egipto. El cuarenta por ciento de los 26 aislamientos portaban el gen bla; estos aislamientos mostraron alta resistencia a los antibióticos betalactámicos (76,9% a amoxicilina/ácido clavulánico y 53,8% a amoxicilina). Por el contrario, Gallardo y colaboradores en el 2019, no informaron evidencia molecular de genes de betalactamasas. Al realizar un análisis a 15 aislados fueron fenotípicamente susceptibles a los betalactámicos. Aunado a esto, Zavala-Vargas y colaboradores en el 2025 en un análisis *in silico* no lograron predecir genes de betalactamasas en 227 genomas de *C. pseudotuberculosis* ovis reportados en el Centro Nacional de Información Biotecnológica (NCBI).

Por otro lado, Heggendorrn y colaboradores en el 2022, identificaron, dos genes relacionados con betalactamasas en *Corynebacterium amycolatum*. Detectando el gen bla, de betalactamasa de clase A, en dos cepas de *Corynebacterium* resistentes a la penicilina mediante reacción en cadena de la polimerasa. Este gen se asocia a mecanismos de resistencia múltiple en un contexto nosocomial. Además, Lavollay y colaboradores en



el 2024, describieron el gen jk0411 en diversas especies *C. jeikeium*, *C. urealyticum*, *C. amycolatum*, *C. tuberculostearicum* y *C. striatum*. Este gen codifica una proteína denominada Bla Cor, que presenta dominios similares a los de betalactamasas y transpeptidasas, pero que no hidroliza beta-lactámicos. Esta proteína forma parte de un sistema inducible de resistencia en el que se regula la expresión del gen pbp2c en cepas resistentes. Estos hallazgos indican que se han encontrado genes de betalactamasa en algunos entornos, pero no en otros, una diferencia que puede deberse al origen geográfico, la variación de la cepa o factores metodológicos.

Enzimas modificadoras de aminoglucósidos

El gen aph(3'')-Ib que codifica una aminoglucósido fosfotransferasa y aadA2 que codifica una aminoglucósido adeniltransferasas. Estos genes tienen la capacidad de conferir resistencia a aminoglucósidos, como gentamicina, kanamicina, estreptomycin, amikacina y neomicina y actúan inactivando los aminoglucósidos al catalizar modificaciones en los grupos OH o NH₂ de las fracciones de azúcar 2-desoxiestreptamina por fosforilación en el caso del aminoglucósido fosforiltransferasas, acetilación por el aminoglucósido acetiltransferasas o adenilación por el aminoglucósido nucleotidiltransferasas / adeniltransferasa. Los genes que codifican estas enzimas modificadoras tienen el potencial de propagarse entre especies, ya que al igual que las betalactamasas frecuentemente se encuentran rodeadas de elementos genéticos móviles como plásmidos, integrones, transposones, secuencias de inserción, fagos y elementos integrativos y conjugativos. Aunque, no se ha documentado la presencia de genes de enzimas modificadoras de aminoglucósidos Zavala-Vargas y colaboradores, lograron predecir el gen APH (3')-Ib en ocho genomas reportados en el NCBI. Además, en un estudio realizado a 64 aislados clínicos de *Corynebacterium striatum* por Navas y colaboradores, reportaron cuatro genes que codifican enzimas modificadas de aminoglucósidos, fosfotransferasas aminoglucósido aph (3')-Ic, presente en 26 aislados y asociados con alta resistencia a la kanamicina. También observaron la combinación de los genes aph(3'')-Ib y aph(6)-Id, hallada en 23 aislamientos con disposición tándem en al menos un caso, ligada a la resistencia a la estreptomycin. Otro gen encontrado fue el de acetiltransferasa aminoglucósido aac(3)-XI, detectada en 44 aislamientos y relacionada con resistencia a gentamicina y tobramicina.

Metiltransferasa del ARNr 16s

Las metiltransferasas rRNA 16S (16S-RMTasas), confieren resistencia a los antibióticos aminoglucósidos al modificar el sitio de acción de estos fármacos en el ARNr 16S del ribosoma 30S, que es esencial para la síntesis de proteínas. La resistencia de *C. pseudotuberculosis* a los aminoglucósidos es muy amplia lo que obliga a analizar los



distintos mecanismos que pueden llevar a la resistencia a este grupo de antibióticos. Como uno de los primeros grupos identificados y utilizados clínicamente, los antibióticos aminoglucósidos tienen un amplio espectro antimicrobiano y pueden inhibir tanto las bacterias Gram-negativas como parte de las bacterias Gram-positivas. En *C. pseudotuberculosis* existe una variedad de mecanismos de resistencia que conducen a la resistencia a los aminoglucósidos. Entre los mecanismos, la producción de 16S-RMTasas plantea una amenaza potencial. Ya que pueden conferir resistencia de alto nivel a los aminoglucósidos. Además, varios estudios han demostrado que muchos subtipos de genotipos correspondientes a menudo conducen a niveles más altos de resistencia a los aminoglucósidos, por ejemplo, *rmtF2* puede mediar la resistencia a la amikacina y la arbekacina con MIC > 1024 µg/mL. Y se ha observado que a menudo los genes que codifican las 16S-RMTasas se encuentran en plásmidos transferibles que tienen una amplia gama de hospederos, y que está rodeado por algún tipo de elementos genéticos móviles, incluidos transposones, integrones y secuencias de inserción, promoviendo la transferencia horizontal y regulando positivamente la expresión de los genes de resistencia, lo que resulta en una CMI más alta. Por otro lado, tres investigaciones sobre aislados clínicos de *Corynebacterium* informan sobre genes de resistencia a la ARN metiltransferasa únicamente en especies distintas de *Corynebacterium*. El Damaty y colaboradores, realizaron pruebas de susceptibilidad a antimicrobianos a 24 aislados, identificados como *C. pseudotuberculosis*, obtenidos de cabras y encontraron que el 73% contenía el gen de resistencia a macrólidos *erm(X)*. Ortiz-Pérez y colaboradores en el 2010 examinaron 254 aislamientos de siete especies, incluidas *C. urealyticum*, *C. amycolatum*, *C. jeikeium*, *C. striatum*, *C. coyleae*, *C. aurimucosum* y *C. afermentans*, detectando el gen de la metilasa del ribosoma de la eritromicina *erm(X)* en 171 aislamientos en total. Además, *erm(B)* apareció en 2 de 120 aislamientos de *C. urealyticum*. El estudio también señaló que 186 de 254 aislamientos presentaron el fenotipo de resistencia a macrólido-lincosamida-estreptogramina B, y 8 de 66 aislamientos de *C. amycolatum* mostraron un fenotipo M de resistencia únicamente a macrólidos. También, González y colaboradores analizaron 93 aislados de *C. amycolatum* y *C. jeikeium* e informaron que el 100% de los aislados resistentes a la eritromicina portaban *erm(X)*. Este estudio también encontró que *erm(X)* en *C. amycolatum* era 100% homólogo al de *C. striatum* y *C. diphtheriae*.

Cloranfenicol acetil transferasa

La resistencia al cloranfenicol se logra mediante O-acetilación, debido a que el fármaco modificado ya no se une al ribosoma bacteriano, en su sitio de acción normal, por lo que el fármaco pierde su efecto como antibiótico. La enzima responsable de esta acetilación es la cloranfenicol acetiltransferasa (CAT) (acetil-CoA:cloranfenicol acetiltransferasa, que cataliza la transferencia de un grupo acetilo del acetil CoA al hidroxilo primario del cloranfenicol. El gen CAT comúnmente, pero no exclusivamente, se transmite por



plásmidos en aislados naturales es un componente de los plásmidos que confieren resistencia a múltiples fármacos, especialmente en bacterias Gram negativas y *Enterobacteriaceae*. El Damaty y colaboradores, informaron que, en 24 aislados de *Corynebacterium pseudotuberculosis* de ovejas, el 83% presenta el gen *cat1*. De la misma manera Zavala-Vargas y colaboradores pudieron predecir la presencia del gen *catB2* en 227 genomas de *Corynebacterium pseudotuberculosis*, reportados en la plataforma NCBI. Aunque, es un tema poco estudiado, la presencia de genes codificadores de la enzima cloranfenicol acetil transferasa está documentada en *C. pseudotuberculosis* y es un punto para considerar en la elección de antibióticos para su tratamiento.

Mutación del gen *rpoB*

La rifampicina (RIF) es uno de los fármacos antituberculosos más importantes. Su actividad bactericida altamente eficaz contra *Mycobacterium tuberculosis* la ha convertido en un fármaco principal en el tratamiento de la tuberculosis. En relación con *C. pseudotuberculosis* la rifampicina es un fármaco reportado al menos por dos autores con resistencia. Además, la identificación de los aislados de *C. pseudotuberculosis ovis* se realiza mediante la amplificación múltiple de fragmentos de cuatro genes específicos 16S rRNA, *rpoB*, *pld* y *narG*. Siendo el gen *rpoB* el que presenta la mutación que confiere dicha resistencia. La RIF se dirige a la subunidad β de la ARN polimerasa dependiente de ADN, codificada por el gen *rpoB*. La *rpoB* mutada produce un cambio conformacional relevante para la afinidad de unión de RIF en la subunidad β de la ARN polimerasa (RNAP) y, en consecuencia, el fármaco se vuelve inactivo sin la unión adecuada al sitio diana. Se ha demostrado que aproximadamente el 90-95% de los aislados resistentes a RIF albergan mutaciones en el gen *rpoB*, y la resistencia a RIF está asociada en gran medida a mutaciones en un fragmento de 81 pb del gen *rpoB*, que se encuentra entre los codones *rpoB* 426 y 452 en *M. tuberculosis*. Sin embargo, el mecanismo de resistencia en relación con el 5% restante de aislamientos resistentes a RIF aún se desconoce, lo que indica que podría haber otros mecanismos, como una menor permeabilidad de la pared celular o una mayor bomba de eflujo.

En el estudio realizado por Markova y colaboradores se observó una identidad y cobertura relativamente bajas en aislados analizados de *Corynebacterium pseudotuberculosis*, con secuencias de referencia en las bases de datos del gen *rpoB* que codifica la subunidad β de la ARN polimerasa dependiente de ADN. En estos aislados no se observó resistencia antibacteriana a rifampicina, lo que indica que no hay una mutación que conduzca a la resistencia a la rifampicina. Por el contrario, en el análisis realizado por Abdulrahman, en aislados de *C. pseudotuberculosis* se reportó resistencia fenotípica a rifampicina en dos aislados. De la misma manera en el análisis *in silico* realizado a 227 genomas de *C. pseudotuberculosis* por Zavala-Vargas se observó la mutación en el gen



rpoB (D516G, H526T, L511R) reportada en *Mycobacterium gordonae* y descrita como de resistencia a rifampicina.

Conclusiones

Un punto importante a tener en cuenta para el análisis genómico de resistencia antibacteriana es que se ha observado por medio de análisis filogenómicos, pangenómicos, genómicos centrales y de singletons, relaciones estrechas entre las corinebacterias patógenas, el comportamiento de tipo clonal de *C. pseudotuberculosis*; esto conlleva a aumentos lentos en los tamaños de los pangenomas.

Por medio de extrapolaciones basadas en los pangenomas, genomas centrales y singletons, se ha observado que el biovar ovis de *C. pseudotuberculosis* muestra un comportamiento más de tipo clonal que el biovar equi. La mayor parte de los genes variables en las cepas del biovar ovis fueron adquiridos en conjunto a través de transferencia horizontal de genes y muestran un alto grado de conservación. Por esto, pudiera esperarse una baja cantidad de genes de resistencia antibacteriana facilitando su tratamiento. Por el contrario, se ha observado que este patógeno desarrolla resistencia a la mayoría de los antibióticos a los que está expuesto, lo que puede deberse a una gran cantidad de genes de resistencia mal caracterizados y/o que no se han considerado como tales.

La resistencia antibacteriana de *C. pseudotuberculosis* está compuesta de una serie de factores tanto genómicos como bioquímicos, debido a que por sí sola esta bacteria conlleva una serie de características intrínsecas que genera protección contra agentes antimicrobianos, y que no han sido analizadas a profundidad, debido a que no se consideran directamente un mecanismo de resistencia antimicrobiana. Una de estas, es el tipo de lesiones generadas por *C. pseudotuberculosis*, debido a la capacidad que presentan para impedir el paso del antibiótico por las diferentes capas de tejido conectivo características de las lesiones en nódulos linfoides y órganos primarios. También, es necesario considerar la capa de ácidos micólicos hidrofóbicos que recubren su característica membrana, impidiendo el acceso de antibióticos hidrofóbicos. Aunado a sus características bioquímicas *C. pseudotuberculosis* cuenta con diferentes genes que codifican mecanismos de resistencia antibacteriana, que nos obligan a realizar un análisis profundo para lograr optimizar el esquema de tratamiento contra este patógeno. Por lo tanto, para la implementación de una metodología que optimice el tratamiento farmacológico se debe tener en consideración una serie de parámetros que ayuden a valorar los constantes reportes bibliográficos de resistencia antibacteriana que surgen a nivel mundial. Recientemente la implementación de redes neuronales en el campo de la bioquímica ha contribuido al campo de la proteómica estructural para resolver plegamientos de complejos proteicos con una alta fiabilidad. Probablemente, la inteligencia artificial y las redes neuronales sean el camino más certero para la



optimización de esquemas de tratamiento contra patógenos multirresistentes. Finalmente, el aumento de información sobre los patrones de resistencia de *C. pseudotuberculosis* dan pie a una mejor comprensión de este problema presente en las diferentes zonas ganaderas, coadyuva a generar un mejor tratamiento contra este patógeno.

Bibliografía

- Abd El Tawab, A. A., Rizk, A. M., Afifi, S. E., and Mohamed, S. R. (2019). *Corynebacterium pseudotuberculosis* infection in small ruminants and molecular study of virulence and resistance genes in Beni-Suef governorate. *Benha Veterinary Medical Journal*, 37(1), 122–127.
- Abdulrahman, R. F. (2021). Virulence potential, antimicrobial susceptibility and phylogenetic analysis of *Corynebacterium pseudotuberculosis* isolated from caseous lymphadenitis in sheep and goats in Duhok City, Iraq. *Advances in Animal and Veterinary Sciences*, 9(6), 919–925. <https://doi.org/10.17582/journal.aavs/2021/9.6.919.925>
- Abebe, D., and Tessema, T. S. (2015). Determination of the prevalence of *Corynebacterium pseudotuberculosis* and the antimicrobial susceptibility pattern of isolates from lymph nodes of sheep and goats at an organic export abattoir, Modjo, Ethiopia. *Letters in Applied Microbiology*, 61(5), 469–476. <https://doi.org/10.1111/lam.12482>
- Aínsa, J. A., Pérez, E., Pelicic, V., Berthet, F. X., Gicquel, B., and Martín, C. (1997). Aminoglycoside 2'-N-acetyltransferase genes are universally present in mycobacteria: Characterization of the aac(2')-Ic gene from *Mycobacterium tuberculosis* and the aac(2')-Id gene from *Mycobacterium smegmatis*. *Molecular Microbiology*, 24(3), 431–441. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2958.1997.3601716.x>
- Ambler, R. P. (1980). The structure of β -lactamases. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 289(1036), 321–331. <https://doi.org/10.1098/rstb.1980.0049>
- Balducci, E., Papi, F., Capialbi, D. E., and Del Bino, L. (2023). Polysaccharides' structures and functions in biofilm architecture of antimicrobial-resistant (AMR) pathogens. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(4), 4030. <https://doi.org/10.3390/ijms24044030>
- Bhardwaj, A. K., and Mohanty, P. (2012). Bacterial efflux pumps involved in multidrug resistance and their inhibitors: Rejuvenating the antimicrobial chemotherapy. *Recent Patents on Anti-Infective Drug Discovery*, 7(1), 73–89. <https://doi.org/10.2174/157489112799829710>



- De Sá, M. C. A., Da Silva, W. M., Rodrigues, C. C. S., Rezende, C. P., Marchioro, S. B., Filho, J. T. R. R., De Jesus Sousa, T., De Oliveira, H. P., Da Costa, M. M., Figueiredo, H. C. P., Portela, R. D., De Paula Castro, T. L., Azevedo, V., Seyffert, N., and Meyer, R. (2021). Comparative Proteomic Analyses Between Biofilm-Forming and Non-biofilm-Forming Strains of *Corynebacterium pseudotuberculosis* Isolated From Goats. *Frontiers in Veterinary Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fvets.2021.614011>
- El Damaty, H. M., El-Demerdash, A. S., Abd El-Aziz, N. K., Yousef, S. G., Hefny, A. A., Abo Remela, E. M., Shaker, A., and Elsohaby, I. (2023). Molecular characterization and antimicrobial susceptibilities of *Corynebacterium pseudotuberculosis* isolated from caseous lymphadenitis of smallholder sheep and goats. *Animals*, 13(14), 2337. <https://doi.org/10.3390/ani13142337>
- Flemming, H. C., Neu, T. R., and Wozniak, D. J. (2007). The EPS matrix: The “house” of biofilm cells. *Journal of Bacteriology*, 189(22), 7945–7947. <https://doi.org/10.1128/JB.00858-07>
- Gallardo, A. A., Toledo, R. A., González Pasayo, R. A., Azevedo, V., Robles, C., Paolicchi, F. A., and Estevao Belchior, S. G. (2019). *Corynebacterium pseudotuberculosis* biovar *ovis*: Evaluación de la sensibilidad antibiótica in vitro. *Revista Argentina de Microbiología*, 51(2), 123–129. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2018.12.001>
- Leslie, A. G., Moody, P. C., and Shaw, W. V. (1988). Structure of chloramphenicol acetyltransferase at 1.75-Å resolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 85(12), 4133–4137. <https://doi.org/10.1073/pnas.85.12.4133>
- Li, H., Yang, H., Zhou, H., Li, Z., Yi, X., Xu, W., Wang, Y., and Hu, Z. (2018). Isolation, antibiotic resistance, virulence traits, and phylogenetic analysis of *Corynebacterium pseudotuberculosis* from goats in southwestern China. *Small Ruminant Research*, 168, 69–74. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2018.09.015>
- Markova, J., Langova, D., Babak, V., and Kostovova, I. (2024). Ovine and caprine strains of *Corynebacterium pseudotuberculosis* on Czech farms: A comparative study. *Microorganisms*, 12(5), 875. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12050875>
- Odah, M. N., Jesse, F. F. A., Bura, P., Chung, E. L. T., Mohamad Nor, N. F., Norsidin, J. M., Garba, B., and Mohd-Lila, M.-A. (2022). Current review on mycolic acid immunogen of *Corynebacterium pseudotuberculosis*. *Journal of Advanced Veterinary Research*, 12(2), 177–186.
- Tada, T., Shimada, K., Mya, S., Zan, K. N., Kuwahara, K., Kirikae, T., and Tin, H. H. (2018). A new variant of 16S rRNA methylase, RmtD3, in a clinical isolate of *Pseudomonas aeruginosa* in Myanmar. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, 62(1), e01806-17. <https://doi.org/10.1128/AAC.01806-17>



- Torky, H. A., Saad, H. M., Khaliel, S. A., Kassih, A. T., Sabatier, J. M., Batiha, G. E. S., Hetta, H. F., Elghazaly, E. M., and De Waard, M. (2023). Isolation and molecular characterization of *Corynebacterium pseudotuberculosis*: Association with proinflammatory cytokines in caseous lymphadenitis pyogranulomas. *Animals*, 13(2), 296. <https://doi.org/10.3390/ani13020296>
- Yeshitila, G., Gocmen, H., Tamakan, Y., and Hazel, H. (2023). Determination of antibiotic resistance pattern and molecular characterization of *Corynebacterium pseudotuberculosis* from lymph node samples of sheep and goats in Ethiopia. *Pakistan Journal of Zoology*, 55(1), 1–7. <https://doi.org/10.17582/journal.pjz/2023.55.1.1.7>
- Zhang, G., Zhang, L., Sha, Y., Chen, Q., Lin, N., Zhao, J., Zhang, Y., Ji, Y., Jiang, W., Zhang, X., Li, Q., Lu, J., Lin, X., Li, K., Zhang, H., Bao, Q., Lu, J., Hu, Y., and Zhu, T. (2023). Identification and characterization of a novel 6'-N-aminoglycoside acetyltransferase AAC(6')-Va from a clinical isolate of *Aeromonas hydrophila*. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1229593. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1229593>

Identificación de *Escherichia coli* O157:H7 productora de toxina Shiga por PCR en rumiantes

Mónica Silva-Vega.
Lucía Delgadillo-Ruiz.
Perla Ivonne Gallegos-Flores.
Carlos Meza-López.
Benjamín Valladares-Carranza.
Rómulo Bañuelos-Valenzuela.





Resumen

La *Escherichia coli* O157:H7 es una cepa patógena de gran relevancia en medicina veterinaria y salud pública, debido a su capacidad para producir toxina Shiga (Stx), causante de enfermedades graves como colitis hemorrágica y síndrome urémico hemolítico. Esta bacteria, presente en el intestino de rumiantes como bovinos, ovinos y caprinos, puede transmitirse al humano a través de alimentos contaminados, agua o contacto directo. El documento detalla los mecanismos de patogenicidad de *E. coli*, clasificándola en seis grupos principales, con énfasis en las cepas productoras de Stx. Se describen variantes de la toxina (Stx1 y Stx2), siendo esta última más virulenta. Además, se aborda el papel de genes como *eae* (intimina) y *ehxA* (enterohemolisina), que contribuyen a la adherencia y daño epitelial. Para su diagnóstico, se destacan técnicas moleculares como PCR, RAPD-PCR y ELISA, capaces de detectar concentraciones mínimas de la bacteria en muestras fecales. Estas herramientas permiten la subtipificación epidemiológica, esencial para prevenir brotes, especialmente en zonas turísticas o fronterizas. También se analiza la fisiología intestinal en corderos, los mecanismos de absorción y secreción de electrolitos, y cómo la infección por *E. coli* altera la homeostasis intestinal. Se concluye que un diagnóstico temprano y preciso mediante PCR es clave para reducir la mortalidad neonatal en sistemas ganaderos, evitando pérdidas económicas significativas.

Palabras clave: *Escherichia coli* O157:H7, toxina Shiga (Stx), PCR diagnóstica, diarrea neonatal, patogenicidad bacteriana.



Introducción

Los Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades (CDC, por sus siglas en inglés), dependientes del Departamento de Salud y Servicios Humanos de los Estados Unidos, señalan que *Escherichia coli* (*E. coli*) se encuentra de forma habitual en los intestinos de los animales, actuando como reservorio principal. No obstante, ciertos serotipos de esta bacteria son patógenos y pueden provocar diarreas o incluso enfermedades fuera del tracto intestinal.

Escherichia coli no solo representa un riesgo en los sistemas de producción ganadera, sino que también reviste gran importancia en el ámbito de la salud pública. Algunas cepas de *E. coli* están asociadas con cuadros clínicos graves, como colitis hemorrágica, púrpura trombocitopénica y síndrome urémico hemolítico. En función de sus características clínicas y mecanismos de patogenicidad, estas cepas se agrupan en seis categorías: *E. coli* enterotoxigénica, enteroinvasiva, enteroagregativa, enteropatógena, de adherencia difusa y productora de toxina Shiga.

Las cepas de *E. coli* productoras de toxina Shiga (Stx), particularmente las asociadas al síndrome urémico hemolítico, también se conocen como *E. coli* enterohemorrágicas. En estas cepas, la toxina Stx constituye el principal factor de virulencia. En el caso de *E. coli* O157:H7, se han identificado al menos dos variantes antigénicas de esta toxina: Stx1 y Stx2. La producción de dichas toxinas está relacionada con la presencia de un bacteriófago Stx integrado en el genoma bacteriano. Se ha observado que las cepas productoras de Stx2 provocan cuadros clínicos más severos que aquellas que solo producen Stx1.

Tanto en salud pública como en medicina veterinaria, identificar con precisión el agente causal de enfermedades gastrointestinales ya sean virus, bacterias o parásitos, resulta difícil si se basa únicamente en los signos clínicos. Por ello, *E. coli* O157:H7 se ha consolidado como un patógeno entérico de relevancia, capaz de generar síntomas lo suficientemente graves como para requerir hospitalización.

En este contexto, el uso de pruebas moleculares cobra gran importancia. Métodos como el polimorfismo de longitud de fragmentos de restricción (RFLP), la hibridación molecular, la reacción en cadena de la polimerasa (PCR) y la técnica RAPD-PCR (amplificación aleatoria de ADN polimórfico mediante PCR) permiten detectar concentraciones tan bajas como 10^2 unidades formadoras de colonias (UFC) por cada 0.1 gramos de materia fecal. Además, estas herramientas facilitan la subtipificación de cepas con fines epidemiológicos, lo cual es fundamental para la vigilancia y control de brotes.

Escherichia coli

E. coli es un bacilo gramnegativo, anaerobio facultativo, perteneciente a la familia *Enterobacteriaceae* y a la tribu *Escherichia*. Esta bacteria coloniza el intestino humano pocas horas después del nacimiento y, en condiciones normales, forma parte de la



microbiota intestinal. No obstante, algunas cepas pueden volverse patógenas y provocar diversas enfermedades, siendo la diarrea una de las manifestaciones clínicas más comunes. Para identificar el grupo patógeno al que pertenece una cepa, Kauffman desarrolló un esquema de serotipificación que ha sido actualizado con el tiempo. Actualmente, se reconocen 176 antígenos somáticos (O), 112 antígenos flagelares (H) y 60 capsulares (K). El antígeno “O” define el serogrupo, mientras que la combinación de antígenos somático y flagelar (O:H) determina el serotipo. En algunos casos, este serotipo se asocia con un cuadro clínico específico.

Patogenicidad de E. coli

Según el mecanismo de patogenicidad y la naturaleza del cuadro clínico, las cepas patógenas de *E. coli* se agrupan en dos grandes categorías: Cepa responsable de infecciones extraintestinales, como las del tracto urinario, meningitis neonatal y sepsis. Cepas patógenas intestinales, implicadas en un gran número de casos de enfermedades gastrointestinales. Dentro de las cepas intestinales, se reconocen seis grupos principales: *E. coli* enterotoxigénica, *E. coli* enteroinvasiva, *E. coli* enteroagregativa, *E. coli* enteropatógena, *E. coli* enterohemorrágica, *E. coli* de adherencia difusa.

Recientemente, se ha propuesto un nuevo grupo para aquellas cepas de *E. coli* productoras de toxina Shiga, también conocidas como verotoxinas. Estas cepas, denominadas *E. coli* productoras de toxina Shiga, incluyen a las enterohemorrágicas y a ciertos serotipos que, aunque carecen de otros factores clásicos de virulencia, son capaces de producir dicha toxina.

***E. coli* enterotoxigénica**

Las cepas enterotoxigénicas colonizan la mucosa del intestino delgado mediante estructuras filamentosas llamadas pilis o fimbrias, conocidas como antígenos de factor de colonización (CFA, por sus siglas en inglés). Su principal mecanismo de patogenicidad es la producción de una o ambas enterotoxinas: la toxina termolábil (LT) y la toxina termoestable (ST). Los genes que codifican estas toxinas se encuentran, en su mayoría, en plásmidos que también pueden contener los genes responsables de la síntesis de CFA. Además, algunos genes de la toxina ST han sido identificados en elementos genéticos móviles como los transposones. Las toxinas LT y ST alteran los niveles de nucleótidos cíclicos en las células intestinales: LT incrementa el AMP cíclico (cAMP), mientras que ST eleva el GMP cíclico (cGMP). Esta disrupción provoca una pérdida de agua y electrolitos hacia la luz intestinal, generando diarrea.

El cuadro clínico característico incluye diarrea aguda, acuosa, generalmente sin sangre, moco ni pus. En la mayoría de los casos, no se presenta fiebre ni vómito, aunque pueden ocurrir en menor medida. La infección puede ser leve y autolimitada, pero también puede llegar a ser severa. La principal vía de transmisión es la ingestión de agua



o alimentos contaminados con materia fecal. La dosis infectiva estimada es de aproximadamente 10^8 unidades formadoras de colonias (UFC).

***E. coli* enterohemorrágica**

Las cepas de *Escherichia coli* enterohemorrágica (EHEC) pueden producir dos variantes de la toxina Shiga: Stx1 y Stx2, las cuales son inmunológicamente distintas. Algunas bacterias sintetizan solo una de estas toxinas, mientras que otras son capaces de producir ambas. Sin embargo, la toxina no es el único factor de virulencia en estas cepas. Otro mecanismo importante de patogenicidad es el fenómeno de adherencia y esfacelación, mediado por el gen cromosómico *eae*, el cual codifica una proteína de membrana externa de 94 kilodaltones llamada intimina. Esta proteína es esencial para el establecimiento de lesiones características en el epitelio intestinal, y su expresión está regulada por genes presentes en plásmidos. Cabe destacar que el gen *eae* también está presente en cepas de *E. coli* enteropatógenas. Además, las cepas EHEC poseen un plásmido conocido como pO157, que codifica para otra toxina: la enterohemolisina, contribuyendo así a su capacidad patógena.

Las cepas EHEC se pueden clasificar de dos maneras principales: Según sus factores de virulencia: Cepas típicas: poseen el bacteriófago que codifica la toxina, el plásmido pO157 de 60 MDa y son capaces de inducir adherencia y esfacelación. Cepas atípicas: no generan lesiones de adherencia y esfacelación, y pueden carecer o no del plásmido de 60 MDa. Según su serotipo: *E. coli* O157:H7: este serotipo no fermenta D-sorbitol ni ramnosa, y no produce β -glucuronidasa. Está estrechamente asociado con cuadros clínicos severos como colitis hemorrágica (CH) y síndrome urémico hemolítico (SUH). Su principal reservorio es el intestino de ganado bovino, aunque también se ha identificado en caprinos, ovinos y, con menor frecuencia, en cerdos y aves de corral. La transmisión de *E. coli* O157:H7 puede ocurrir a través de: Carne cruda o insuficientemente cocida, leche no pasteurizada (bronca), agua contaminada, frutas y hortalizas como lechuga, rábanos, brotes de alfalfa, alimentos procesados como jugos de naranja o manzana no pasteurizados y mayonesa, esta cepa ha demostrado capacidad de supervivencia incluso en medios ácidos (pH de 3.4), lo que le permite persistir durante varios días en productos aparentemente seguros.

También se han identificado cepas no-O157, las cuales pueden causar brotes o infecciones esporádicas. Estas cepas suelen encontrarse en los mismos alimentos que el serotipo O157:H7, incluyendo carne de guajolote, ternera, pescado y mariscos. Su cuadro clínico se caracteriza inicialmente por diarrea acuosa acompañada de dolor abdominal, que puede evolucionar a colitis hemorrágica.

El principal factor de virulencia en las cepas no-O157 sigue siendo la producción de toxina Shiga (Stx), aunque muchas de ellas también expresan el fenómeno de adherencia y esfacelación, así como el plásmido pO157.



El periodo de incubación para infecciones por EHEC varía entre uno y ocho días. En etapas tempranas puede presentarse diarrea sin sangre, con o sin vómitos, fiebre y dolor abdominal. Posteriormente, entre uno y dos días después del inicio de los síntomas, la diarrea se vuelve sanguinolenta, con un aumento del dolor abdominal. Esta fase puede durar entre 4 y 10 días y se caracteriza por evacuaciones profusamente sangrientas.

Para su diagnóstico, las técnicas moleculares como RFLP, hibridación, electroforesis en campos pulsados, PCR y RAPD-PCR han demostrado alta sensibilidad, permitiendo la detección de hasta 10^2 unidades formadoras de colonias (UFC) por cada 0.1 g de materia fecal. Estas herramientas también permiten la subtipificación epidemiológica de las cepas circulantes. Finalmente, es fundamental la coordinación entre los laboratorios clínicos y los servicios de epidemiología para la vigilancia oportuna de *E. coli* O157:H7, especialmente en regiones turísticas o fronterizas de México, con el fin de prevenir brotes y proteger la salud pública.

***E. coli* enteroinvasiva**

Las cepas de *E. coli* enteroinvasiva comparten similitudes genéticas y bioquímicas con bacterias del género *Shigella*. Ambas no móviles, negativas a la descarboxilasa y no fermentadoras de lactosa, lo que refleja su estrecha relación filogenética. El principal mecanismo de patogenicidad de *E. coli* enteroinvasiva es la invasión del epitelio del colon. Para ello, la bacteria primero se adhiere a las vellosidades de la mucosa intestinal, proceso que requiere la acción de mucinas y adhesinas. Posteriormente, ingresa a la célula por endocitosis, se multiplica en el interior y luego se disemina a células epiteliales vecinas.

La información genética que regula este proceso se encuentra tanto en el cromosoma como en un plásmido específico. Este plásmido, denominado pInv, tiene un peso de 140 MDa y codifica las proteínas necesarias para la invasión. Además, algunas cepas pueden producir una o más enterotoxinas que podrían contribuir al desarrollo de la diarrea.

***E. coli* enteropatógena**

E. coli enteropatógena fue el primer grupo de esta especie en ser identificado mediante métodos serológicos y se ha asociado principalmente con diarrea en lactantes e infantes. Su principal mecanismo de virulencia es la adherencia íntima a las células del epitelio intestinal, seguida de la destrucción de las microvellosidades. Este proceso, conocido como adherencia y esfacelación, implica la polimerización de actina y la alteración del citoesqueleto celular, inducida por el aumento del calcio intracelular y la activación de la proteína cinasa C.

La adherencia es facilitada por estructuras denominadas pilis o fimbrias rizadas, llamadas Bfp (bundle-forming pilus), cuya información genética se encuentra en un



plásmido de 50 a 70 MDa conocido como EAF (EPEC adherence factor), así como en genes cromosómicos. También se requiere la presencia de una proteína de membrana externa de 94 kDa, llamada intimina, codificada por el gen *eae*, que actúa como señal para la esfacelación. En ensayos *in vitro*, las cepas EPEC se caracterizan por formar microcolonias sobre las células Hep-2. Su estudio incluye la evaluación de factores como la adherencia/esfacelación, presencia de plásmidos y expresión de fimbrias.

Las cepas se clasifican en: Típicas: poseen tanto el gen *eae* como el plásmido EAF. Atípicas: presentan únicamente el gen *eae*, pero carecen del plásmido EAF. Estas cepas pueden provocar brotes o infecciones aisladas. El cuadro clínico se manifiesta como diarrea aguda, que puede variar de leve a grave, acompañada de vómito, fiebre baja y mala absorción de nutrientes. El diagnóstico se basa en cultivos celulares y técnicas moleculares.

E. coli de adherencia difusa

Las cepas de *E. coli* con adherencia difusa no forman microcolonias cuando se adhieren a células Hep-2, a diferencia de otros grupos. Aunque su mecanismo de patogenicidad no está completamente esclarecido, se ha identificado una fimbria superficial denominada F1845, implicada en este tipo de adherencia. Los genes que codifican esta fimbria pueden localizarse tanto en el cromosoma como en plásmidos. Además, se ha asociado la adherencia difusa con una proteína de membrana externa de 100 kDa, identificada en una cepa del serotipo O126:H27. Aunque sus genes han sido secuenciados, solo se han encontrado en una minoría de cepas aisladas.

En estudios *in vitro* realizados en células CaCo y Hep-2, estas cepas inducen la formación de estructuras protuberantes tipo dedos, que parecen ofrecer protección a las bacterias. No obstante, tales estructuras aún no han sido observadas *in vivo*. El cuadro clínico se caracteriza por diarrea acuosa, sin sangre y sin leucocitos. Para su diagnóstico, se han utilizado sondas de hibridación derivadas del gen *daaC* (que codifica la fimbria F1845), aunque pueden generar falsos positivos. El uso de PCR específica para estas cepas aún está en desarrollo.

E. coli verotoxigénica

Las cepas verotoxigénicas de *E. coli* (VTEC) son patógenos emergentes de gran importancia debido a su capacidad para provocar enfermedades graves en el ser humano. Su nombre proviene de la producción de verotoxinas, que actúan sobre células Vero (línea celular de riñón de mono africano). Existen dos tipos principales de verotoxinas: VT1, que es casi idéntica a la toxina de *Shigella dysenteriae* tipo 1. VT2, que presenta múltiples variantes, una de las cuales se ha relacionado con la enfermedad del edema en cerdos.

Los rumiantes, especialmente los bovinos, actúan como portadores asintomáticos de cepas VTEC potencialmente patógenas para el ser humano. También se han aislado



cepas de otros animales domésticos, como cerdos (7.5%), gatos (13.8%) y perros (4.8%), aunque en estos la frecuencia de aislamiento es menor que en los rumiantes.

Métodos y técnicas de diagnóstico

A lo largo del tiempo se han desarrollado diversos métodos y estrategias para el diagnóstico de *Escherichia coli* productora de toxina Shiga. Estos métodos difieren en términos de complejidad, sensibilidad, especificidad y costo, por lo que su elección depende del contexto clínico, epidemiológico y de los recursos del laboratorio. El aislamiento de *E. coli* permite su caracterización mediante diferentes técnicas, como: Serotipificación O:H, tipificación de fagos, polimorfismo de fragmentos de restricción, electroforesis en gel de campo pulsado, amplificación y secuenciación de ADN. Aunque algunas de estas técnicas no están ampliamente disponibles en laboratorios clínicos por su alto costo y requerimientos técnicos, tienen un gran valor en estudios epidemiológicos, especialmente durante brotes de enfermedad.

Durante mucho tiempo, el agar MacConkey con sorbitol (AMCS) fue el medio de cultivo más empleado para el aislamiento de STEC, en particular por el predominio de los serotipos O157:H7 y O157:H2 en casos clínicos humanos de América del Norte y Europa. La mayoría de estas cepas no fermentan sorbitol, por lo que producen colonias incoloras en AMCS, lo que las distingue de otras *E. coli* fecales sorbitol-positivas. Para la confirmación, existen reactivos comerciales de aglutinación con látex que permiten detectar los antígenos O157 y H7. También pueden utilizarse ensayos ELISA para la detección rápida del antígeno O157 en muestras fecales, los cuales ofrecen buena sensibilidad. Sin embargo, es importante confirmar la producción de toxina Shiga (Stx), ya que no todas las cepas O157 la producen. Esto representa una limitación del AMCS, al igual que su baja sensibilidad cuando la concentración de STEC O157 es inferior al 1 % de la microbiota intestinal.

Para mejorar la eficacia del aislamiento, se ha optimizado el medio AMCS añadiendo cefixima, lo que inhibe el crecimiento de microorganismos competidores como *Proteus* spp. Además, se han introducido otras modificaciones como el shock ácido, que aumentan la selectividad del medio para detectar cepas O157. Es importante considerar que otros serogrupos de STEC, además del O157, pueden estar implicados en cuadros clínicos. Si bien algunos también son sorbitol-negativos, la mayoría fermentan sorbitol, lo que reduce la eficacia del AMCS en contextos donde estos serogrupos son más frecuentes. Por ello, utilizar exclusivamente este medio puede conducir a un sesgo diagnóstico.

No existe una característica bioquímica universal que permita distinguir fácilmente a todas las cepas de STEC no-O157. Sin embargo, muchas cepas O157 y un porcentaje considerable de cepas no-O157 producen enterohemolisina (Hly), una toxina asociada al subgrupo de *E. coli* enterohemorrágica (EHEC). Estas cepas muestran zonas hemolíticas



en agar sangre tras 24 horas de incubación. La detección de hemólisis tiene un alto valor predictivo positivo, ya que la mayoría de las cepas Hly-positivas también producen toxina Shiga. No obstante, se han documentado casos raros de cepas con gen Hly que no sintetizan Stx.

Otro método diagnóstico importante es el ensayo de citotoxicidad en cultivos celulares, en particular con células Vero (derivadas de riñón de mono verde). Estas células son altamente sensibles a la toxina Shiga debido a la presencia de receptores Gb3 y Gb4 en su membrana, lo que las convierte en el patrón de oro para la confirmación de STEC. También se han utilizado células HeLa (carcinoma cervical humano), aunque su falta de Gb4 las hace menos sensibles a Stx2. Este método presenta limitaciones logísticas, ya que requiere laboratorios con capacidad para cultivar líneas celulares, y el resultado puede tardar entre 48 y 72 horas, lo que limita su utilidad en contextos donde se requiere un diagnóstico rápido. Los ensayos ELISA (enzyme-linked immunosorbent assay) juegan un papel relevante al permitir la detección de toxinas Stx en muestras clínicas, independientemente del serogrupo bacteriano. Existen múltiples variantes de esta técnica, cuya sensibilidad puede verse influida por factores como: Tipo de anticuerpo utilizado, variante y concentración de Stx producida por la cepa, aunque el ELISA es generalmente menos sensible que los ensayos de citotoxicidad en células Vero, resulta más accesible para laboratorios clínicos convencionales. El interés por detectar directamente los genes *stx1* y *stx2* motivó el desarrollo de sondas de ADN. Inicialmente, estas sondas eran marcadas con isótopos radiactivos (P^{32} o S^{35}) y permitían identificar la presencia de estos genes mediante hibridación con ADN extraído de colonias bacterianas. Posteriormente, se desarrollaron sondas no radiactivas, marcadas con digoxigenina o biotina, sin pérdida de sensibilidad ni especificidad. Estas técnicas ofrecen un diagnóstico molecular preciso, permitiendo distinguir entre cepas portadoras de Stx1, Stx2 o ambas.

Pruebas moleculares y serológicas para el diagnóstico de *E. coli* productora de toxina Shiga. Las técnicas moleculares como el polimorfismo de los fragmentos de restricción (RFLP), hibridación, electroforesis en campos pulsados, la PCR y la RAPD-PCR, han demostrado una alta sensibilidad, permitiendo la detección de hasta 10^2 unidades formadoras de colonias (UFC) por cada 0.1 g de materia fecal. Estas herramientas también posibilitan la subtipificación de cepas con fines epidemiológicos, lo cual es esencial para la detección temprana de brotes, especialmente en regiones de alto riesgo como zonas turísticas y fronterizas en México.

Una de las técnicas más ampliamente utilizadas es la reacción en cadena de la polimerasa (PCR), que permite amplificar los genes responsables de la producción de toxina Shiga (*stx1* y *stx2*). El ADN extraído de colonias bacterianas aisladas se emplea como molde, y los productos amplificados son visualizados mediante electroforesis en gel de agarosa al 2%, teñido con bromuro de etidio. Esta técnica puede combinar distintos pares de oligonucleótidos para identificar las variantes de Stx, así como otros genes de



virulencia como eaeA (codificante de intimina) y ehxA (enterohemolisina). La detección simultánea de stx, eaeA y ehxA en una cepa se asocia con un mayor riesgo de complicaciones clínicas, como el síndrome urémico hemolítico (SUH).

En casos donde la carga bacteriana en heces es baja y la PCR puede no detectar STEC, el diagnóstico serológico representa una alternativa valiosa. Los anticuerpos contra Stx o contra lipopolisacáridos (LPS) se han propuesto como marcadores de infección reciente, aunque es necesario considerar el momento de la toma de muestras (fase aguda vs convaleciente), ya que el diagnóstico se basa en la variación de títulos de anticuerpos entre ambos periodos.

Entre las técnicas serológicas, el inmunoblot ha demostrado ser más específico y sensible que ELISA para la detección de anticuerpos contra Stx1, siendo útil para estudios seroepidemiológicos. Otro método complementario es la hemaglutinación con eritrocitos de oveja sensibilizados con LPS, útil para detectar anticuerpos anti-LPS frente a diversos serogrupos, incluido el O157.

La serotipificación mediante antisueros ha ganado popularidad en laboratorios clínicos por su bajo costo y facilidad de uso. Sin embargo, es importante señalar que no todos los serotipos son necesariamente patógenos, y que la presencia de un marcador serológico no implica, por sí sola, capacidad de patogenicidad. Además, reactividades cruzadas entre antígenos pueden generar falsos positivos, por lo que se recomienda utilizar PCR como técnica confirmatoria para aumentar la especificidad diagnóstica.

Selección del método diagnóstico más adecuado. La elección del mejor método para diagnosticar STEC debe considerar un equilibrio entre tiempo de respuesta, sensibilidad, especificidad y costos. El laboratorio clínico debe realizar el cultivo de muestras fecales como base para el diagnóstico microbiológico, complementado por métodos moleculares. Entre estos, la PCR sobre aislamientos de cultivo es, hasta el momento, la técnica más sensible y específica para detectar cepas productoras de toxina Shiga.

No obstante, muchos laboratorios carecen de infraestructura para aplicar PCR o ensayos de verocitotoxicidad, por lo que recurren a métodos alternativos como: ELISA, para Stx o enterohemolisina, detección de LPS, Serotipificación, ensayos de citotoxicidad (más lentos, pero eficaces), aunque estos métodos secundarios son útiles en ciertos contextos, su eficacia puede verse limitada por su menor sensibilidad o por su incapacidad de detectar todas las variantes de STEC.

Validación de métodos de diagnóstico molecular. Durante la última década, se han desarrollado múltiples técnicas basadas en PCR convencional y en tiempo real (RT-PCR) para la detección de patógenos en muestras clínicas, alimentarias, animales y ambientales. Sin embargo, pocas de estas metodologías han sido formalmente validadas.



El diagnóstico molecular de STEC enfrenta desafíos técnicos que pueden mitigarse mediante la combinación de métodos bacteriológicos y PCR, lo cual ha demostrado ser una estrategia eficaz. Hasta el momento, se han descrito distintas variantes de PCR con condiciones y oligonucleótidos diversos, pero pocos estudios abordan su validación sistemática. Clasificación de métodos según nivel de validación: Métodos del propio laboratorio, métodos publicados en revistas científicas, métodos oficiales, métodos estándar.

La validación se define como la confirmación, mediante evidencia objetiva, de que un método cumple los requisitos específicos para un propósito determinado. En el caso de métodos cualitativos (detección de presencia/ausencia del analito), los parámetros de evaluación se expresan de forma probabilística, principales parámetros de validación:

- a) **Rango de trabajo:** Es el intervalo de concentraciones donde el método opera con precisión aceptable. Incluye: Límite de detección (LOD): concentración mínima detectable del analito, límite de corte (cut-off): cantidad óptima de analito para establecer positividad, determinado mediante resultados consistentes en múltiples repeticiones del mismo ensayo.
- b) **Selectividad:** Capacidad del método para detectar el mayor número posible de microorganismos objetivos, sin reacción cruzada con especies no diana. Incluye: exclusividad: habilidad del método para no detectar cepas relacionadas que puedan causar reacciones cruzadas, inclusividad: capacidad del método para detectar con precisión todas las cepas verdaderamente positivas para los genes blanco (stx, eae, etc.). Se recomienda utilizar al menos 50 cepas relacionadas y 30 cepas competitivas en cultivos puros para estas evaluaciones.
- c) **Robustez:** Resistencia del método a pequeñas variaciones en las condiciones experimentales. Deben establecerse protocolos con cambios controlados para identificar los parámetros críticos. La robustez debe evaluarse en todas las etapas del análisis, desde la recolección y preparación de muestras hasta la ejecución técnica, idealmente con $n \geq 10$ repeticiones.

Incidencia de diarreas en corderos

La incidencia de diarreas en corderos previo al destete es difícil de establecer, ya que depende de diversos factores, entre los que destacan: la higiene y sanidad del lugar de nacimiento, así como la ingesta adecuada de calostro en las primeras horas de vida. No obstante, se reconoce que uno de los principales agentes etiológicos de la diarrea neonatal en corderos es *Escherichia coli*, que puede causar dos formas clínicas: sistémica y entérica. La presentación más común es la colisepticemia hiperaguda, que afecta principalmente a dos grupos etarios: corderos de 1 a 2 días de edad y de 3 a 8 semanas.

Las cepas de *E. coli* asociadas a colisepticemia en corderos pertenecen a serogrupos similares a los implicados en la septicemia de becerros. En corderos de 2 a 8 días de edad,



la diarrea colibacilar se manifiesta clínicamente con depresión, anorexia, deshidratación y, en algunos casos, muerte súbita. Entre los serotipos asociados se encuentran O8 y O121.

Dado que la producción ovina es menos intensiva que la bovina, existe poca información sobre las cepas específicas de virulencia en corderos. Sin embargo, debido a que ambas especies suelen compartir prácticas de manejo similares incluso sitios de pastoreo se presume que los corderos están expuestos a agentes infecciosos semejantes. Por ello, es útil referirse a la diarrea neonatal en terneros, considerada una enfermedad de gran relevancia a nivel mundial, sobre todo en sistemas intensivos de producción. Esta condición representa pérdidas económicas significativas debido a la mortalidad, el aumento en los costos veterinarios y laborales, y la reducción en el valor del animal afectado.

El término diarrea neonatal se refiere a un síndrome multifactorial caracterizado por una diarrea aguda indiferenciada en terneros jóvenes. En esta enfermedad influyen tanto el agente patógeno como factores del hospedador (edad, inmunidad), del manejo y del entorno. Diversos agentes infecciosos se han asociado a esta patología, incluyendo: *Escherichia coli* (especialmente enteropatógena), rotavirus, coronavirus, *Cryptosporidium* spp, *Salmonella* spp, virus de la diarrea viral bovina

La colibacilosis entérica por *E. coli* se manifiesta por diarrea de variable intensidad, acompañada de deshidratación severa, y puede evolucionar hacia un desenlace fatal. Los principales factores de virulencia de *E. coli* en diarreas neonatales bovinas incluyen el antígeno de adhesión F5 y la enterotoxina termoestable (STa).

Función del intestino por la presencia de diarrea aguda

Fisiología del intestino delgado

Estructura y función del intestino delgado el cual representa una extensa superficie de absorción de agua, electrolitos y nutrientes. En corderos, puede alcanzar una longitud de 18 a 35 metros, con un diámetro aproximado de 2.5 cm. Su pared está conformada por cinco capas, desde el exterior hacia el lumen, serosa continuación del peritoneo, muscular compuesta por fibras musculares lisas organizadas en capas longitudinal y circular, submucosa: tejido conjuntivo denso con glándulas de Brünner (en el duodeno), muscularis mucosae delgada capa muscular, mucosa: formada por epitelio simple que descansa sobre la lámina propia, un tejido conjuntivo especializado. La mucosa intestinal alberga los mecanismos principales para la absorción de agua y electrolitos, facilitados por tres estructuras que aumentan la superficie de contacto:

Válvulas conniventes (pliegues de Kerckring), vellosidades intestinales, microvellosidades. Las válvulas conniventes son pliegues visibles macroscópicamente, de



hasta 1 cm, que recubren transversalmente la luz intestinal. Se estima que hay cerca de 1,000 millones en el intestino delgado, multiplicando significativamente su superficie.

Las vellosidades intestinales son proyecciones digitiformes o laminares de la mucosa, visibles a lupa. Cada una contiene una red de vasos sanguíneos y un vaso linfático denominado lácteo, que facilita el transporte de lípidos absorbidos.

Las microvellosidades, presentes en la superficie de los enterocitos, conforman el borde en cepillo. Cada enterocito presenta alrededor de 600 microvellosidades de 1 μm de largo y 0.1 μm de ancho. En conjunto, se estima que 1 m^2 de mucosa intestinal puede albergar 50 millones de estas estructuras, alcanzando una superficie de absorción total de hasta 200 m^2 en adultos. Estas microvellosidades están recubiertas por una capa de glicoproteínas llamada *glicocáliz*, que contiene transportadores y enzimas digestivas como: glicoamilasa, sacarasa, maltasa, isomaltasa, lactasa, trealasa, enteroquinasa, oligopeptidasas.

Renovación epitelial y adaptación en la diarrea. Las criptas de Lieberkühn, ubicadas en la base de las vellosidades, son responsables de la producción continua de enterocitos. Los enterocitos inmaduros se originan en las criptas, migran hacia el ápice de la vellosidad, y en este trayecto maduran, adquiriendo funciones tanto secretoras como absorptivas. Este proceso culmina en la descamación celular hacia la luz intestinal, con un recambio cada 3 días, representando una de las tasas más altas de renovación celular del organismo. Durante procesos diarreicos, este equilibrio se altera, se acelera la descamación celular, disminuye la altura de las vellosidades, aumenta la actividad mitótica en las criptas, este mecanismo compensatorio permite mantener la integridad epitelial en condiciones adversas.

Función de los enterocitos. Los enterocitos presentan una membrana apical (orientada al lumen intestinal) y una membrana basolateral (en contacto con el espacio intercelular). Están interconectados por uniones estrechas y desmosomas, lo que crea un sistema de barrera selectiva. En la membrana basolateral se localiza la bomba sodio-potasio ATPasa (Na^+/K^+ -ATPasa), esencial para el transporte activo de iones y mantenimiento del gradiente osmótico.

La membrana apical es la responsable de la absorción de solutos y solventes a través de diferentes mecanismos: difusión, transporte activo, transporte facilitado. Estas sustancias se transfieren desde el lumen hacia el espacio intercelular y luego al compartimento vascular a través de la membrana basolateral, además de la vía transcelular, existe una vía paracelular mediada por los espacios intercelulares y las uniones estrechas. Esta ruta permite el paso de agua, iones y pequeñas moléculas, y es clave en la fisiología del transporte intestinal. Se considera que la mucosa intestinal actúa como una membrana porosa cargada de líquido, permitiendo el intercambio selectivo y regulado de sustancias, lo cual es fundamental para la absorción, la homeostasis y la respuesta a procesos patológicos como la diarrea.



Mecanismos de absorción de electrolitos

Mecanismos de absorción y secreción de electrolitos en el intestino. Tanto el intestino delgado como el grueso tienen la capacidad de absorber y secretar líquidos, manteniendo un equilibrio funcional conocido como tono del transporte intestinal. Este equilibrio se divide funcionalmente de la siguiente forma: Absorción ocurre principalmente en las vellosidades intestinales del intestino delgado y en el epitelio del colon, la secreción: se lleva a cabo en las criptas del intestino delgado y del colon.

La absorción intestinal de agua y electrolitos, la absorción de agua depende de la creación de gradientes osmóticos, principalmente provocados por la absorción activa de sodio desde el lumen intestinal hacia el interior del enterocito. El sodio y el cloro son los iones clave que regulan el movimiento del agua, mientras que azúcares y aminoácidos modulan el transporte de sodio.

En condiciones fisiológicas, los electrólitos y el agua ingresan al enterocito por la membrana luminal y se transportan hacia el plasma a través de la membrana serosa (basolateral). Se han descrito diversos mecanismos para la absorción de sodio en el intestino delgado:

- ☐ Difusión electrogénica directa de sodio.
- ☐ Transporte acoplado sodio-cloro.
- ☐ Intercambio sodio-hidrógeno.
- ☐ Transporte acoplado sodio-glucosa o sodio-aminoácidos.

Difusión electrogénica de sodio. La absorción de sodio se produce en dos fases:

Primera fase: entrada pasiva de sodio desde el lumen intestinal hacia el enterocito, mediante un mecanismo electrogénico por el borde en cepillo, segunda fase: transporte activo de sodio hacia el espacio intercelular por medio de la bomba Na^+/K^+ -ATPasa, localizada en la membrana basolateral, esta bomba expulsa tres iones de sodio por cada dos iones de potasio que ingresan al enterocito, utilizando ATP como fuente de energía. Este mecanismo mantiene una baja concentración intracelular de sodio, lo cual favorece el flujo continuo desde el lumen y genera un gradiente osmótico que facilita la absorción de agua.

Este gradiente eléctrico también impulsa la difusión de cloro hacia el espacio seroso, mediante rutas paracelulares o parcialmente transcelulares. Transporte acoplado sodio-glucosa y sodio-aminoácidos El sodio también entra al enterocito acoplado a glucosa o aminoácidos. La glucosa se une a un transportador específico que, junto con el sodio, ingresa al enterocito. Este mecanismo, energizado por el gradiente de sodio, permite una eficiente absorción de glucosa y grandes cantidades de agua. La salida de glucosa hacia el espacio seroso ocurre por difusión facilitada mediada por transportadores específicos.



Absorción colónica. En el colon, la absorción de sodio ocurre también por mecanismos electrogénicos, impulsados por el potencial electroquímico. Además, existe un intercambio aniónico donde los iones cloro son absorbidos a cambio de bicarbonato (HCO_3^-). La absorción de aniones orgánicos estimula el transporte paralelo de iones y agua a través de la mucosa colónica.

Secreción intestinal de agua y electrólitos. La secreción intestinal tiene lugar en las criptas del intestino delgado y del colon. El proceso inicia con el transporte de cloruro de sodio (NaCl) desde el espacio extracelular al interior del enterocito por la membrana basolateral. Luego, el sodio es devuelto al espacio extracelular por acción de la bomba Na^+/K^+ -ATPasa.

El cloro, por su parte, es secretado activamente hacia el lumen intestinal a través de canales específicos en la membrana luminal de los enterocitos de las criptas. Este movimiento genera un gradiente osmótico que promueve el flujo pasivo de agua y otros electrolitos hacia el lumen.

Control intracelular de la secreción. La secreción intestinal está regulada por mensajeros intracelulares que actúan en respuesta a secretagogos extracelulares. Entre estos mediadores se encuentran: AMP cíclico (AMPc) y GMP cíclico (GMPc), Prostaglandinas (PGs), Calcio intracelular

Mecanismo general. Los secretagogos activan receptores en la membrana basolateral, lo que desencadena cascadas de señalización mediante: Proteína G, adenilato ciclasa, fosfolipasa C, fosfolipasa A2. Esto produce la generación de segundos mensajeros como AMPc , GMPc , diacilglicerol (DAG), trifosfato de inositol (IP_3) y calcio, que activan proteinquinasas específicas. Estas enzimas regulan la fosforilación de canales iónicos o proteínas asociadas, modificando el transporte de electrolitos y agua.

Ejemplos de mediadores y efectos: AMPc : activado por el péptido intestinal vasoactivo (VIP). Estimula la secreción mediante activación de proteinquinasas dependientes de AMPc . Noradrenalina: inhibe la secreción intestinal vía receptores adrenérgicos alfa, que bloquean el adenilato ciclasa. Sustancia P: aumenta la permeabilidad de la membrana al calcio, acetilcolina, serotonina y PGE_2 : activan la fosfolipasa C, lo que conduce a la producción de DAG e IP_3 .

Trifosfato de inositol (IP_3): libera calcio desde organelos intracelulares y aumenta la entrada de calcio desde el medio extracelular.

Calcio citosólico: modifica proteínas transportadoras y enzimas, como la calmodulina, aunque su papel parece limitado según estudios recientes.

DAG: activa la proteinquinasa C, provocando una secreción sostenida que no depende directamente del calcio. **Ácido araquidónico:** derivado de la fosfolipasa A2 activada por DAG o calcio; se metaboliza en prostaglandinas, que también estimulan la secreción.



Agentes causantes de diarrea

En animales de granja la *Escherichia coli* representa una de las causas más relevantes de diarrea en animales de producción, especialmente en especies jóvenes como corderos y terneros. Si bien forma parte de la microbiota intestinal normal, ciertas condiciones predisponentes como sobrecarga alimentaria, exposición al frío o situaciones de estrés pueden favorecer una proliferación excesiva, con consecuencias patológicas.

En estos casos, *E. coli* puede dañar significativamente el epitelio intestinal, provocando diarrea de aspecto amarillento o verdoso, acompañada de signos sistémicos como fiebre, decaimiento (astenia), deshidratación, babeo y postración del animal afectado. Según sus factores de virulencia y el cuadro clínico asociado, las cepas patógenas de *E. coli* se agrupan en varios patotipos: *E. coli* enterotoxigénica, *E. coli* enteropatógena, *E. coli* productora de toxina Shiga, *E. coli* necrotoxigénica, *E. coli* enterotoxigénica. Esta cepa es una de las principales causas de diarrea neonatal en terneros, especialmente en los primeros días de vida, su patogenicidad está asociada a la producción de enterotoxina termoestable (STa) y a la presencia de fimbrias, que permiten la adherencia al epitelio intestinal. Las fimbrias más comúnmente asociadas a en terneros son: F5 (K99), F41, también se han aislado cepas con F17. La combinación de estos factores facilita la colonización y la liberación de toxinas, lo que genera una diarrea profusa, deshidratación y, si no se trata oportunamente la muerte.

E. coli productora de toxina Shiga también se han identificado como causantes de colibacilosis en terneros neonatos, tanto en casos clínicos como en animales aparentemente sanos. Si bien los terneros pueden albergar STEC de manera subclínica, diversos estudios (naturales y experimentales) han documentado su asociación con diarrea y disentería en animales jóvenes.

En humanos, estas cepas tienen un gran potencial zoonótico, ya que pueden provocar colitis hemorrágica y síndrome urémico hemolítico (SUH), enfermedades graves asociadas a la acción de las toxinas Shiga (Stx). Estas toxinas se clasifican en dos grupos principales: Stx1: con variantes Stx1, Stx1c y Stx1d. Stx2: más heterogénea, con subtipos como Stx2, Stx2c, Stx2d, Stx2e, Stx2f, Stx2g y la Stx2d activable. Además de las toxinas, las cepas STEC pueden portar otros factores de virulencia, entre ellos: Intimina: proteína de adhesión codificada por el gen eae. Enterohemolisina: codificada por el gen plasmídico ehxA. Factores de autoaglutinación y adherencia: que favorecen la colonización del epitelio intestinal.

Otros agentes causales: Rotavirus y Coronavirus Además de *E. coli*, también se ha identificado la presencia de rotavirus y coronavirus en las heces de animales jóvenes. Sin embargo, su sola detección no implica necesariamente un cuadro clínico, ya que muchos animales pueden portar estos virus sin desarrollar síntomas. La aparición de enfermedad clínica suele estar relacionada con déficits inmunitarios, particularmente en animales que



no han recibido una cantidad adecuada o una calidad suficiente de anticuerpos calostrales. Estos individuos son más susceptibles a la replicación viral y al daño intestinal consecuente.

Conclusiones

Debido a la alta mortalidad por diarreas provocadas por el agente causal *Escherichia coli* en los sistemas de producción de ganado, es importante establecer métodos de diagnóstico confiables para asegurar un tratamiento efectivo, no todos los serotipos de *E. coli* son patogénicos ya que las cepas bacterianas tienen diferente capacidad de sintetizar y secretar la toxina Shiga. El análisis de PCR de muestras aisladas de cultivos fecales, es probablemente el método más sensible y específico para la detección de *E. coli* productoras de toxina Shiga, aunque la técnica es lenta, es considerada una alternativa viable, sensible y específica para la detección de *E. coli* productoras de toxina Shiga. La pérdida económica de corderos y terneros es un problema significativo para los ganaderos. Un diagnóstico temprano y preciso de la presencia de *E. coli* en casos de diarrea durante las primeras semanas de vida es crucial.

Bibliografía

- Balakrishnan, S., Antony, P. X., Mukhopadhyay, H. K., Pillai, R. M., Thanislass, J., Padmanaban, V., Srinivas, M. V. (2016). Genetic characterization of fluoroquinolone-resistant *Escherichia coli* associated with bovine mastitis in India. *Veterinary World*, 9(7), 705. <http://doi.org/10.14202/vetworld.2016.705-709>
- Bou, G., Fernández-Olmos, A., García, C., Sáez-Nieto, J. A., Valdezate, S. (2011). Métodos de identificación bacteriana en el laboratorio de microbiología. *Enfermedades Infecciosas y Microbiología Clínica*, 29(8), 601-608. <http://doi.org/10.1016/j.eimc.2011.03.012>
- Daly, P., Collier, T., Doyle, S. (2002). PCR-ELISA detection of *Escherichia coli* in milk. *Letters in Applied Microbiology*, 34(3), 222-226. <https://doi.org/10.1046/j.1472-765x.2002.01074.x>
- Eppinge, M., Mammel, M. K., Lecler, J. E., Ravel, J., Cebula, T. A. (2011). Genomic anatomy of *Escherichia coli* O157:H7 outbreaks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(50); 20142-20147. <https://doi.org/10.1073/pnas.1107176108>
- Hannaoui-Rodríguez, E. J., Villalobos, L. B., Martínez-Nazaret, R. E. (2009). *Escherichia coli* shigatoxigénica: Patogénesis, diagnóstico y tratamiento. *Revista de la Sociedad Venezolana de Microbiología*, 29(1), 13-20. Recuperado en 21 de abril de 2025, de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1315-25562009000100004&lng=es&tlng=es.



- Kaper, J. B, O'Brien, A. D. (2014). Overview and historical perspectives. *Microbial Spectr*, 2(2). <https://doi.org/10.1128/microbiolspec.EHEC-0028-2014>
- Lara-Duran, J. A., Bañuelos-Valenzuela, R., Delgadillo-Ruiz, L., Delgadillo-Ruiz, O., Silva-Vega, M. (2019). Incidencia de *Escherichia coli* O157:H7 en heces de rumiantes lactantes con síndrome diarreico. *Revista MVZ Córdoba*, 24(3), 7339-7345. <https://doi.org/10.21897/rmvz.1232>
- Liu, C. J., Gong, F. M., Li, X. R., Li, H. Y., Zhang, Z. H., Feng, Y., Nagano, H. (2012). Natural populations of lactic acid bacteria in douchi from Yunnan Province, China. *Journal of Zhejiang University Science*, 13(4), 298-306. <https://doi.org/10.1631/jzus.B1100221>
- Pacheco, A. R., Sperandio, V. (2012). Shiga toxin in enterohemorrhagic *E. coli*: regulation and novel anti-virulence strategies. *Cellular and Infection Microbiology*. 2:1-12. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2012.00081>
- Rojas, S. A. S., Caycedo, M. I. T., Velandia, D. P. L. (2022). Genes y expresión de factores de virulencia en *Escherichia coli* aislada en animales de producción. *Ciencia y Agricultura*, 19(2), 63-75. <https://doi.org/10.19053/01228420.v19.n2.2022.13795>
- Sethulekshmi, C., Latha, C., Anus, C. J. (2018). Ocurrence and quantification of Shiga toxin-producing *Escherichia coli* from food matrices. *Veterinary World*, 11(2); 104-111. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2018>
- Silva-Vega, M., Bañuelos-Valenzuela, R., Delgadillo-Ruiz, L., Gallegos-Flores, P., Meza-López, C., Valladares-Carranza, B., & Echavarría-Cháirez, F. (2021). Caracterización química de extracto alcohólico de hoja de guayaba (*Psidium guajava*) y su efecto como inhibidor de movilidad para *Escherichia coli* O157: H7. *Abanico Veterinario*, 10(1), 1-13. 3. <http://dx.doi.org/10.21929/abavet2020.26>
- Zotta, C. M., Lavayen, S., Norio, F., Piquín, A. (2016). Detección de *Escherichia coli* productor de toxina Shiga en vísceras de animales bovinos y pollos destinados para el consumo humano. *J. Selva Andina Research Society*, 7(1); 2-9. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=361344736002>

ZOOTECNIA



Abanico Académico

La fibra dietética sobre la salud intestinal en el pollo de engorda: función digestiva y aplicaciones en nutrición aviar.

Mario Alberto Macías-Flores.
María Guadalupe Herrera-Hernández.
Osmar Antonio Jaramillo-Morales.
Carlos Omar De la Cruz-Moreno.
Carlos Alfredo Carmona-Gasca.
Sergio Martínez González.
Fidel Avila-Ramos.





Resumen

El uso de aditivos en la producción del pollo de engorda es una práctica común desde hace más de 70 años. Los antibióticos fueron los primeros aditivos usados para mejorar la función digestiva en el pollo, al usarlos se aprovechaban mejor los nutrientes, menor prevalencia de infecciones intestinales y aumento en el rendimiento productivo. Sin embargo, el uso no controlado generó cepas bacterianas resistentes de interés en salud pública hasta que fueron restringidos como medida de control en varios países. Sin embargo, durante su retiro, aumento la búsqueda de sustancias que puedan usarse sin causar efectos negativos como son los aditivos naturales que mantuvieran la producción. En los últimos años el uso de fibra en dieta se ha propuesto como alternativa al mejorar la función y morfométrica del tracto digestivo. Como efectos positivos se describe el correcto desarrollo de la molleja, secreción enzimática, desarrollo de las vellosidades intestinales, absorción adecuada de los nutrientes, modulación del microbiota y mantiene el rendimiento productivo. De forma general se ha descrito usar la adición de fibra en dieta del 3 al 5% en base a la fibra cruda. Sin embargo, el efecto específico depende del tipo de fibra, tamaño de partícula y nivel de inclusión en dieta. En la presente revisión se describe el sistema de producción de la industria avícola, el uso de la fibra dietética, el efecto en las diferentes estructuras intestinales y los niveles de adición de componentes estructurales vegetales utilizados.

Palabras clave: Pollo de engorda, fibra dietética, tracto digestivo, función digestiva



Introducción

En la producción intensiva del pollo de engorda la salud y función digestiva es clave para lograr adecuados rendimientos productivos. La entrada del pollo de engorda a un sistema intensivo al primer día de edad hace necesario implementar medidas estrictas de bioseguridad, de la dieta y manejo específicos que, al no cumplirse, amenazan la salud del ave.

El uso de aditivos ha sido una herramienta que complementa un sistema de producción seguro. Dentro de ellos, los antibióticos como promotores de crecimiento tenían como objetivo principal, reducir la carga bacteriana intestinal, mejorando el desempeño productivo. Debido a los riesgos en salud pública actuales fueron prohibidos con tal fin, dejaron una ventana para la búsqueda de nuevos aditivos seguros.

Dentro de las propuestas se postula la fibra dietética, compuesta principalmente por la celulosa, hemicelulosa, lignina, pectina como compuestos estructurales vegetales y otros compuestos asociados. Estos componentes son indigestibles por enzimas endógenas de los monogástricos, pero su función no se limita a su digestibilidad. La fibra dietética puede mejorar la secreción de HCl y pepsinógenos en molleja, mejorar la función de molienda, mezclado y reducción de partícula de la digesta, lo que mejora la funcionalidad distal.

En los intestinos la fibra dietética estimula la secreción de enzimas pancreáticas, el desarrollo de las vellosidades y modula el tiempo de retención del alimento. En la porción cecal el microbiota puede fermentar los componentes, modulando la microbiota con capacidad fermentativa y evitando la diversidad inespecífica que puede generar riesgos productivos. La fibra al adicionarse en la ración permite disminuir costos de producción, pues su inclusión se realiza contemplándola como ingrediente. De forma general, se recomienda su adición del 3 al 4%.

En la actualidad, se evalúa la adición de cascara de soya, cáscara de arroz, cáscara de avena o pulpa de remolacha azucarera, cada una mostrando una matriz y composición estructural diferente. El nivel de inclusión de estos componentes contempla la matriz total, la solubilidad y el tamaño de partícula.

Producción intensiva del pollo de engorda

Las líneas genéticas de pollo especializadas en la producción de carne son eficientes. En México tienen un ciclo productivo de 42 días, un índice de conversión alimenticia (ICA) descrito por las empresas de reproducción de 1.75 y un peso final superior a 3.0 kg. En la granja, el objetivo general es asegurar un crecimiento adecuado, la uniformidad de la parvada, la salud, el bienestar y la calidad de la carne.

En la producción intensificada el ciclo de producción es continuo, por lo que después de finalizado y antes del inicio de otro se deben de seguir programas de limpieza usando los principios “todo dentro/todo fuera”. En estos procesos de se deben de incluir



las áreas circundantes del complejo y el equipamiento en galpón.

La desinfección completa debe de estar lista 24 horas previo a la llegada del material de la cama. El manejo de bioseguridad también incluye la desinfección de vehículos, equipo y visitantes que entren a la granja. El manejo de residuos, especificaciones de la granja y medidas de bioseguridad se encuentran descritas a detalle en el Manual de Buenas Prácticas en Producción de Pollo de Engorda emitido por el Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria en el año 2019.

Como medidas generales de manejo, a las 24 horas antes de la fecha agendada del ave se debe asegurar la cama compuesta generalmente de viruta de madera. Al colocarse en el galpón se debe asegurar un espesor de 2 – 4 cm. Como medida de manejo se debe asegurar una temperatura interna de 30 °C, temperatura de la cama a 32 – 28 °C, humedad relativa de 70 – 60% y temperatura del agua de 18 – 21 °C.

Respecto a la cantidad de luz, esta se debe ajustar de 300 – 400 lux. La temperatura e intensidad lumínica adecuada estimula el apetito y consumo de alimento a la llegada del pollo al galpón. El comportamiento del pollo y el llenado del buche se monitorean a las 2, 4, 8, 12 y 24 horas después de su llegada, para asegurar que ha encontrado alimento. Las horas luz se establecen en 23 horas luz y 1 hora oscuridad los primeros 7 días y se ajusta a 18 horas luz y 6 horas oscuridad en días posteriores.

El peso de las aves se evalúa semanalmente, se toma el 1% del total de las aves o se toman 100 aves, la cantidad animal que sea más adecuada. Para evaluar la uniformidad de la parvada se puede determinar el coeficiente de variación (CV), calculado como: $CV (\%) = (\text{Desviación estándar} / \text{Peso promedio}) \times 100$. Dónde: $CV \leq 8\%$: excelente uniformidad, $CV \leq 10\%$: buena uniformidad y $CV \geq 12\%$: pobre uniformidad.

La uniformidad de la parvada es indicativa de un correcto desarrollo y salud en las aves, esta se evalúa generalmente de manera semanal. Después del día 1, la temperatura se ajusta de acuerdo con el comportamiento del ave. Al día 21 debe llegar a 22 °C en sistemas controlados o tratar de asegurar 25 °C en granjas con temperatura ambiental. Al llegar los 42 días de edad y 12 horas previas a la captura de las aves, se debe de retirar el alimento y mantener el acceso al agua.

En el manejo sanitario el calendario de vacunación debe adaptarse a las condiciones sanitarias de cada región, por lo que el momento de aplicación puede variar. Sin embargo, las principales vacunas empleadas a nivel mundial debido a su prevalencia son Newcastle, bronquitis infecciosa aviar, enfermedad de Gumboro (bursitis infecciosa), enfermedad de Marek, coriza infecciosa y viruela aviar.

En la nutrición, la dieta del pollo de engorda se formula en función de la etapa fisiológica, la cual se divide comúnmente en tres fases: iniciación (0–18 días), crecimiento (19–30 días) y finalización (31–41 días). A lo largo de estas etapas, el contenido de proteína cruda disminuye progresivamente (22%, 20% y 18%, respectivamente), mientras



que la energía metabolizable se incrementa (3050, 3100 y 3150 kcal/kg, respectivamente).

Este ajuste responde a los requerimientos fisiológicos del ave. En fases tempranas, es necesario proporcionar una mayor concentración de aminoácidos esenciales para el desarrollo acelerado de órganos y tejidos, considerando que la capacidad de consumo es limitada. Conforme el ave crece y su consumo voluntario aumenta, se reduce la concentración proteica de la dieta para optimizar el uso de ingredientes y reducir costos. En paralelo, se incrementa la densidad energética para satisfacer los requerimientos de mantenimiento y favorecer una ganancia de peso eficiente.

Factores críticos en la salud intestinal del pollo de engorda

En la avicultura, el pollo de engorda se incorpora a un sistema de producción intensiva desde el primer día de vida. En esta etapa temprana, el sistema digestivo, inmunológico y el microbioma intestinal del pollo está en proceso de maduración, lo que lo hace vulnerable a alteraciones ambientales, nutricionales y microbiológicas. La colonización inicial del tracto gastrointestinal depende del ambiente al que se expone el ave, como la incubadora, el transporte, el alimento, el agua y la cama de la granja.

El microbiota que coloniza el tracto digestivo del pollo durante los primeros días de vida desempeña un papel fundamental en la salud intestinal y en el desarrollo del sistema inmunológico del ave. Una colonización temprana por bacterias oportunistas puede favorecer la aparición de disbiosis, incrementar el riesgo de infecciones entéricas y comprometer el rendimiento zootécnico.

Cuando las prácticas de limpieza y desinfección de las instalaciones no son adecuadas, la carga microbiana ambiental aumenta. Entre las bacterias presentes, se encuentra *Salmonella spp.*, *Clostridium perfringens* o *Escherichia coli*. Su llegada al tracto digestivo puede generar un proceso infeccioso intestinal en aves individuales, pero se generaliza por el hacinamiento, generando una diseminación en la parvada.

Para prevenir y modular los efectos negativos, se ha propuesto usar aditivos naturales como probióticos, prebióticos, simbióticos, ácidos orgánicos o la fibra dietética. Estos compuestos promueven un microbiota intestinal benéfica, mejora la digestibilidad de los nutrientes, y reduce la carga de patógenos en el lumen intestinal. El uso de estos aditivos se consideran herramientas, por lo que el cuidado continuo del manejo, nutrición, calidad del agua, densidad de población y la bioseguridad de la granja siguen siendo factores críticos.

Evolución del uso de aditivos en avicultura

La avicultura moderna ha sido posible por el uso de aves especializadas en la producción de carne. La búsqueda y propuesta de hibridaciones genéticas que permitiera obtener líneas genéticas altas productoras se propuso en la década de 1950, debido al bajo rendimiento de razas comúnmente utilizadas para este fin. Entre ellas se encontraban la



White Leghorn, Rhode Island Red y New Hampshire cuyo ciclo productivo era de 12 semanas y un peso final de 1.2 a 1.4 kg.

En esta búsqueda de mejora productiva, en los mismos periodos se comenzaba a utilizar antibióticos a dosis subclínicas que actuaban en el ave como agentes promotores de crecimiento (APC). Las evaluaciones iniciales indicaban que la inclusión de sulfasuxidina, estreptotricina o estreptomicina en la dieta mejoraba el crecimiento de las aves. El mecanismo de acción que permitía esta mejora productiva se atribuía al efecto antimicrobiano que limitaba el crecimiento de bacterias infecciosas y que, en su ausencia en el intestino, el crecimiento del ave era favorecido.

Alrededor de 1960, la incorporación al sistema de producción intensiva de líneas genéticas como Arbor Acres, Hubbard, Ross y Cobb fue un hecho. Estas aves especializadas tenían un ciclo productivo de 8 semanas y peso final de 2.2 kg con un índice de conversión alimenticia (ICA) de 2.0 kg. Además, el uso de APC como aditivo permitía reducir el ICA en 3.48% e incrementar su peso vivo en 3.18%, mejorando con ello los beneficios productivos. A pesar de los beneficios productivos, en esa misma década, se advertía que el uso de antibióticos como APC podría inducir la aparición de cepas bacterianas resistentes.

En 1986, Suecia fue el primer país en implementar restricciones al uso de APC en la producción avícola. Dinamarca prohibió el uso de avoparcina y virginiamicina entre 1995 y 1998. La Unión Europea inició la prohibición de avoparcina en 1997, y en 1999 extendió la medida a la virginiamicina, tilosina, espiramicina y bacitracina, en respuesta a la creciente evidencia de resistencia bacteriana. Estas regulaciones incluyeron la exigencia de prescripción veterinaria y vigilancia sanitaria en su uso.

La prohibición de los APC provocó un aumento del ICA en 2.3%, de los costos de producción entre un 0.27% a 0.45% y la prevalencia de patógenos intestinales como *Salmonella typhimurium* y *Campylobacter spp.* A pesar de las medidas para limitar el uso de antibióticos, estos sucesos generaron la necesidad de regresar al uso de antibióticos, ahora con fines terapéuticos.

El efecto negativo en la producción de carne impulsó la propuesta de estrategias zootécnicas y de bioseguridad orientadas reducir estos efectos y limitar la dependencia de antibióticos usados como APC o con fines terapéuticos. Estas incluyeron la limitación de nutrientes fermentables mediante el uso de ingredientes de alta calidad, la adición de probióticos y prebióticos, y la implementación de programas de vacunación adecuados. Este enfoque integral, permitía establecer un entorno intestinal favorable que permitiera al ave expresar su potencial genético a través de la nutrición.

En la actualidad, el pollo de engorda alcanza un peso superior a los 3.0 kg en un periodo productivo de 42 días, con un ICA de 1.51 de acuerdo con la casa genética. Sin embargo, el promedio en México fue de 1.75 en el año 2024. La tendencia global continúa



orientada a reducir este indicador por la mejora genética, el uso estratégico de aditivos funcionales y un manejo sanitario integral. En China, el ICA disminuyó de 1.37 en el periodo 2019–2021 a 1.24 en 2021–2023. Países como Brasil, Estados Unidos y la Unión Europea han mantenido valores promedio de 1.73 en los mismos periodos. En este entorno, el uso y la búsqueda de nuevos aditivos naturales continua y aunque la prohibición del uso de los antibióticos sigue regulada, la búsqueda para reducir su uso sigue vigente.

Clasificación de los carbohidratos

Los carbohidratos son compuestos orgánicos esenciales en la dieta usados como fuente de energía. Su clasificación se basa en el tipo de unidad monomérica, el grado de polimerización y la configuración de los enlaces glucosídicos. Por el grado de polimerización, los carbohidratos se agrupan en azúcares simples (monosacáridos y disacáridos), oligosacáridos (de tres a nueve monómeros) y polisacáridos (con diez o más unidades monoméricas). Los polisacáridos se subdividen en polisacáridos almidonados (PA) y polisacáridos no almidonados (PNA).

Los polisacáridos almidonados, como la amilosa y la amilopectina, sirven como energía en plantas. Están constituidos por monómeros de glucosa unidos por enlaces glucosídicos tipo α (1-4) en la cadena lineal y α (1-6) en los puntos de ramificación. Estos enlaces determinan una estructura helicoidal que facilita su digestión por enzimas endógenas. Los PNA en las estructuras vegetales cumplen una función estructural por lo que aportan rigidez. Con excepción de la lignina, los PNA están compuestos por azúcares como glucosa, galactosa, manosa, xilosa, arabinosa, ramanosa, y ácidos urónicos.

Las unidades monoméricas están unidas por enlaces β -glucosídicos que permiten formar cadenas lineales y enlaces de hidrógeno entre cadenas permitiendo la rigidez estructural. Los PNA incluyen principalmente a la celulosa, hemicelulosa, pectina, mucilagos, gomas y oligosacáridos.

Los PNA se clasifican por su solubilidad como insoluble y soluble; los PNA insolubles incluye a la celulosa y hemicelulosa. La celulosa es un homoglucano de glucosa unido por enlaces β (1-4). Este enlace le permite formar cadenas lineales y enlaces de hidrógeno entre cadenas formando estructuras rígidas. La hemicelulosa, en cambio, es un grupo heterogéneo de polisacáridos ramificados, como los arabinoxilanos y los glucomananos, compuestos por diversas azúcares pentosas y hexosas.

Los PNA solubles están constituidos por polisacáridos que se disuelven y dispersan en agua, formando soluciones viscosas o geles. Entre ellos se encuentran las pectinas, ricas en ácido galacturónico con cadenas laterales de arabinosa y galactosa; las gomas vegetales, que son polisacáridos complejos exudados por las plantas; los mucílagos, estructuralmente similares, pero con funciones protectoras o de almacenamiento; y los fructanos, como la inulina y la oligofructosa, formados por cadenas lineales o ramificadas



de fructosa. También pueden incluirse en esta categoría algunas hemicelulosas solubles, como algunos arabinosilanos y β -glucanos, presentes en cereales como la avena y la cebada, con enlaces mixtos β -(1-2) y β -(1-4).

La fibra dietética

Los PNA son resistentes a la digestión enzimática en el tracto digestivo del ave debido a los enlaces β -glicosídicos que unen a sus monosacáridos y a las asociaciones fisicoquímicas que se establecen entre polímeros. En la estructura vegetal, los PNA se encuentran asociados con compuestos estructurales no polisacáridicos (CENP) como la lignina y compuestos fenólicos. En nutrición animal, la suma total de PNA y CENP se le denomina fibra dietética. La fibra dietética se adiciona de manera común en los ingredientes vegetales usados en la dieta y de forma externa por subproductos con alto aporte fibroso.

La adición externa de fibra tiene como objetivo estimular el crecimiento de bacterias benéficas, el desarrollo de los órganos del tracto digestivo, mejorar la digestión de los nutrientes y el rendimiento productivo. En la dieta se incorpora como parte del balance total de los ingredientes, diluyendo la densidad de nutrientes según el nivel de inclusión. A mayor contenido de fibra, mayor es la dilución, lo que puede afectar negativamente el rendimiento productivo.

Se recomienda adicionar del 2 al 4% de fibra cruda para mejorar la salud intestinal y disminuir el costo del alimento. Cuando la fibra se adiciona a concentraciones menores a las recomendadas, puede tener un efecto inerte y reducir solo los costos. En adiciones superiores a las recomendadas afecta la función digestiva con posibles efectos en el rendimiento productivo.

Fuente de fibra

La clasificación de la fibra en soluble e insoluble sirve para predecir, hasta cierto punto los efectos en el tracto digestivo de las aves. El contenido de celulosa, hemicelulosa, lignina o pectinas puede influir en el desarrollo de la morfometría del tracto digestivo, la función digestiva y su interacción con el microbiota intestinal. Diversas fuentes de fibra dietética, como alfalfa, cáscara de arroz, cáscara de cebada, celulosa purificada, lignina y pectina, han sido evaluadas en dietas para gansos con el objetivo de determinar sus efectos sobre el rendimiento productivo y la morfología intestinal. Los resultados muestran que la inclusión de alfalfa o cáscara de arroz mejora la ganancia de peso y el índice de conversión alimenticia, en contraste con la lignina. Esta última incrementó el consumo de alimento en 9.2% respecto a la alfalfa y 6.9% en comparación con la cáscara de arroz, pero redujo la ganancia de peso en 4.5% frente a ambas fuentes. Por otro lado, la adición de pectina disminuyó el consumo de alimento en 15.3% y la ganancia de peso en 18.3% en relación



con la alfalfa.

En cuanto a la morfometría intestinal, la inclusión de lignina afectó la integridad de las vellosidades del duodeno e íleon, mientras que la pectina no mostró alteraciones estructurales. Estas diferencias se asocian a la composición química de las fibras, la naturaleza de sus polisacáridos y su solubilidad. La lignina, al ser un polímero fenólico insoluble, no puede ser fermentada por la microbiota intestinal, lo que limita su aprovechamiento como fuente de energía y genera un tránsito intestinal acelerado. Además, su efecto abrasivo sobre la mucosa, especialmente en altas inclusiones, puede erosionar las vellosidades y reducir la capacidad digestiva. En contraste, la pectina, una fibra soluble, incrementa el tiempo de retención del alimento y forma compuestos viscosos que reducen el consumo y pueden interferir en la absorción de nutrientes, aunque sin causar daño estructural en el epitelio intestinal.

Tejeda y Kim (2020), reportaron que el uso de celulosa purificada a 4 ó 8% en el pollo de engorda se mantiene inerte en el tracto digestivo sobre la ganancia de peso a los 20 días del ciclo productivo. Contrario a la adición de cáscara de soya, que al ser adicionada al 4% es suficiente para incrementar el peso de las aves en un 4%, el tamaño de las vellosidades y aumentar el índice de relación vellosidad: cripta, efecto asociado a un proceso de absorción adecuado.

Se ha reportado que la adición de celulosa purificada a inclusión de 6% disminuye el índice de conversión alimenticia comparado con la viruta de madera o cáscara de trigo a las mismas proporciones. Esto evidencia que el impacto de la fibra está determinado por su composición química específica, grado de fermentación, origen vegetal y su nivel de inclusión a la dieta.

La edad del ave y la inclusión de fibra

Uno de los factores que deben considerarse en la adición de fibra es la edad del ave. Durante la fase inicial del pollo de engorda, la capacidad de consumo de alimento está limitada debido a la inmadurez general del sistema digestivo. En esta etapa, la adición de fibra dietética puede comprometer el rendimiento productivo. El uso de fibra soluble, como la cáscara de remolacha azucarera rica en pectina o la cáscara de avena rica en hemicelulosas soluble, puede aumentar la viscosidad del contenido intestinal debido a su alta capacidad de retención de agua. Esta característica favorece la formación de soluciones viscosas, procesos que disminuye el vaciamiento gástrico, reduce el consumo voluntario de alimento, disminuye la ganancia de peso y eleva el índice de conversión alimenticia.

Jiménez-Moreno *et al.* (2013) reportaron que la adición de 2.5, 5.0 y 7.5% de cáscara de remolacha azucarera redujo de manera lineal la ganancia de peso durante los primeros 6 días de vida. Conforme las aves se desarrollan, se incrementan su capacidad de consumo de alimento, la secreción de enzimas digestivas, la eficiencia en la absorción



de nutrientes y la diversidad de bacterias presentes en el intestino. Esta diversidad microbiana permite descomponer fracciones de fibra soluble, utilizarlas como fuente de carbono y producir metabolitos secundarios, como los ácidos grasos de cadena corta, que promueven la funcionalidad intestinal.

Aún con el desarrollo intestinal, el uso de niveles elevados en dieta aumenta la viscosidad del contenido intestinal, lo que dificulta la mezcla del alimento con las enzimas digestivas y altera el equilibrio del microbiota en el ciclo productivo total. Por otro lado, la adición de fibra insoluble en etapas tempranas puede estimular el desarrollo funcional del ventrículo, órgano encargado de macerar el alimento.

Las partículas de fibra con características rígidas e insolubles incrementan el tiempo de retención del bolo alimenticio en el tracto digestivo, favoreciendo la acción mecánica de la molleja. Este mayor tiempo de permanencia de la digesta permite un contacto prolongado con las enzimas proteolíticas secretadas por el proventrículo y con las sales biliares liberadas en el duodeno (que llegan a la molleja por peristalsis inversa), lo que optimiza la hidrólisis de proteínas y la emulsificación de lípidos, facilitando la formación de micelas.

Mantener un equilibrio adecuado entre fibra soluble e insoluble es esencial para conservar estos efectos funcionales positivos, ya que la fibra soluble contribuye a la fermentabilidad y producción de metabolitos beneficiosos, mientras que la insoluble estimula la motilidad y el desarrollo muscular del ventrículo.

Niveles de adición de la fibra dietética

La adición de fibra en la dieta del pollo de engorda tiene como objetivo reducir los costos de alimentación, así como mantener o mejorar la función digestiva y el rendimiento productivo. La fibra dietética mantiene en el tracto digestivo un efecto dosis dependiente según su tipo y composición. A niveles de adición bajos, la fibra pasa inerte por el tracto digestivo, pero a dosis elevadas puede tener efectos abrasivos en las estructuras intestinales, generar compuestos viscosos e interferir en el proceso general de digestión y absorción.

La dosis adecuada de fibra es diferente para cada compuesto fibroso, al diferir en sus proporciones de celulosa, hemicelulosa, lignina, pectinas y otros compuestos asociados (Cuadro 1). Como se describirá más adelante, la fibra dietética modula la función de la molleja, enzimática, estructura y desarrollo de vellosidades, microbiota y el TMR total. Otros efectos son la modulación de la respuesta inflamatoria e inmune, absorción de colesterol, producción de metabolitos bacterianos como son los ácidos grasos de cadena corta que quedan fuera del alcance del presente capítulo. A continuación, se describe el tipo las características generales y niveles de adición de compuestos estructurales fibrosos evaluados en la avicultura.



Cáscara de soja

La cáscara de soja es la cubierta exterior de la semilla de soja obtenida como subproducto del procesamiento industrial para producir aceite o harinas. Durante el proceso, se recupera del 5 al 8% de cáscara de soja, lo que representa de 50 a 80 kg por tonelada. El contenido de polisacáridos complejos en la cáscara de soja es de 86%, mientras que su contenido de fibra dietética total es de 66 – 88%. Valores que pueden variar de acuerdo con el cultivar y condiciones de crecimiento. La fibra dietética insoluble está compuesta por 50% de hemicelulosa, 30% de pectina y 20% de celulosa. El contenido de lignina en la cáscara de soja es bajo, en dieta su adición es de 3 – 4% de fibra cruda (FC).

Cuadro 1. Composición bromatológica de subproductos adicionados por su contenido de fibra dietética en dietas para pollo de engorda.

Contenido	CS	ST	CC	PRA	CV	CA
MO	92 - 95	84 - 90	88 - 92	83	31	90 - 91
Ceniza	4 - 7	4 - 8	2 - 7	2 - 6	4 - 6	12 - 17
Proteína	9 - 18	14 - 21	6 - 13	8 - 10	5 - 8	<1 - 3
EE	0.5 - 1	3 - 5	1 - 4	<1	<1 - 2	< 1
Almidón	-	9 - 39	8 - 14	-	9 - 18	9 - 15
Fibra cruda	9 - 18	11 - 15	17 - 26	15 - 18	22 - 27	44 - 56
FDN	49 - 64	28 - 50	74 - 81	43 - 57	57 - 79	71 - 77
FDA	35 - 46	8 - 19	37	22 - 25	29 - 39	49 - 62
FDT	63 - 88	33 - 63	73	59	66 - 71	64 - 73
FI	66 - 81	35 - 45	71	35 - 47	65 - 70	63 - 72
FS	4 - 18	1 - 4	2	11 - 24	0.7 - 10	<1 - 2
Celulosa	29 - 51	8 - 12	30 - 35	22 - 40	17 - 26	1 - 18
Hemicelulosa	10 - 25	10 - 32	30 - 33	24 - 32	24 - 35	11 - 22
Lignina	1 - 4	3 - 4	15 - 25	2 - 8	13 - 26	40 - 60
Pectina	8 - 13	< 1	1 - 2	24 - 32	<1	< 1

Mo, materia orgánica; EE, extracto etéreo, FDN, fibra detergente neutra; FDA, fibra detergente ácida; FDT, fibra detergente total; FI, fibra insoluble; FS, fibra soluble; CS, cáscara de soja; ST, salvado de trigo; CC, cáscara de cebada; PRA, pulpa de remolacha azucarera; CV, cáscara de avena; CA, cáscara de arroz.

Salvado de trigo

El salvado de trigo es un subproducto obtenido del trigo, recuperado por tamizaje después de la molienda del grano, su cáscara representa del 14 al 20% del peso del grano, se recupera por tonelada procesada de 140 a 200 kg. La fibra presente en su estructura principalmente son los arabinoxilanos (5 – 27%), β -glucanos (2 – 3%) y celulosa (6 – 31%). El salvado de trigo comúnmente se evalúa en dieta aun nivel de inclusión del 0.5 - 5.0%,



sin observar efectos negativos sobre el rendimiento productivo. El uso de salvado de trigo suele adicionarse junto con enzima exógenas como la xilanasa para disminuir su peso molecular, permitiendo su llegada a ciego y facilita la fermentación de los NSP. La degradación enzimática de los arabinosilanos y la formación de arabinosilooligosacáridos, disminuye la viscosidad intestinal y mejorar la acción fermentativa de las bacterias intestinales.

Cáscara de cebada

La cáscara de cebada se obtiene a través del descascarillado del grano y representa aproximadamente el 10 - 20% de su peso. La fracción de fibra está compuesta principalmente por celulosa (35–35%), hemicelulosa (30–33%) y una cantidad moderada de lignina (15–25%), lo que la convierte en una fibra estructuralmente rígida y menos fermentable que otras fuentes como la cáscara de soya. Contienen arabinosilanos como principal hemicelulosa en la estructura vegetal como fracción soluble. En el total de NSP representa el 45% de los polisacáridos totales. En la dieta de pollos de engorda, la inclusión de cáscara de cebada puede contribuir con 1.5% de fibra cruda (FC).

Cascarilla de arroz

La cascarilla de arroz es la cubierta externa del grano de arroz (*Oryza sativa*), obtenida como subproducto del descascarillado industrial durante el procesamiento para producir arroz pulido o blanco. Representa aproximadamente el 20 a 23% del peso total del grano, lo que equivale a 200 a 230 kg por tonelada de arroz procesado. La cascarilla de arroz se caracteriza por su alto contenido de fibra estructural, especialmente fibra dietética insoluble, con niveles totales que oscilan entre 63 - 72%. Su fracción de fibra está compuesta por celulosa (1 - 18%), hemicelulosa (11 - 22%), y una proporción considerable de lignina (40 - 60%), lo que le confiere una baja digestibilidad tanto en monogástricos como en rumiantes. A diferencia de otras fuentes de fibra como la cáscara de soya o la cebada, la cascarilla de arroz contiene sílice (15 - 20%), un compuesto mineral abrasivo que puede afectar la integridad del tracto gastrointestinal si se utiliza en altas concentraciones. Su valor energético es bajo y su utilización en dietas avícolas es limitada, aunque puede incorporarse a niveles del 3 al 4% de CF.

Cáscara de avena

La cáscara de avena es un subproducto del proceso de descascarillado industrial para producir avena pelada. Representa aproximadamente entre 25 y 35% del peso total del grano, lo que equivale a 250 a 350 kg por tonelada de avena procesada. La cáscara de avena contiene de 66 - 71 % de fibra dietética total, con un aporte importante de fibra insoluble de superior a 63%. La composición estructural incluye celulosa (18%),



hemicelulosa (22%) y lignina (60%), lo que la convierte en una fibra con bajo valor energético y limitada fermentabilidad en monogástricos. La hemicelulosa está constituida principalmente por arabinosilanos como fibra dietética soluble. La cáscara de avena puede ser utilizada en pequeñas proporciones en dietas para aves, especialmente para mejorar la función de la molleja, aumentar la motilidad intestinal y modular el microbiota, su inclusión suele estar en el rango de 3 - 5% de FC.

Pulpa de remolacha azucarera

La pulpa de remolacha azucarera es un subproducto de la extracción industrial de azúcar a partir de la remolacha azucarera. Después de extraer el azúcar soluble del tejido vegetal, el residuo sólido se seca y se prensa para obtener la pulpa deshidratada, que se utiliza en la alimentación animal. Representa entre 10 y 20% del peso fresco procesado, lo que equivale a 100–200 kg por tonelada de remolacha. Este subproducto se caracteriza por un alto contenido de fibra dietética con niveles entre 59% con aporte importante de fibra soluble.

Su composición incluye principalmente pectinas (32%), hemicelulosas (32%), celulosa (40%), y una baja proporción de lignina (8%), permitiendo su fermentación parcial en monogástricos. A diferencia de la cascarilla de arroz o avena, la pulpa de remolacha tiene una alta capacidad de retención de agua y viscosidad. Esto favorece a la hidratación, estimulación y refuerzo de la capa de mucina y favorece el desarrollo de la microbiota intestinal y producción de AGCC al ser fermentada. En la alimentación de aves, se debe adicionar a niveles límites por la formación de soluciones viscosas. El nivel de adición suele ser de 2 a 3% de FC. Adiciones mayores aumentan el consumo de agua, heces húmedas, menor digestibilidad de los nutrientes y rendimiento productivo.

La fibra y el tracto gastrointestinal

El tracto digestivo del pollo de engorda está compuesto por el pico, esófago, buche, proventrículo, ventrículo, intestino delgado, ciegos, colon y cloaca. La función del tracto digestivo está ligada con las secreciones digestivas de órganos accesorios como páncreas e hígado (Figura 1). En el proceso de digestión y absorción, interactúan de manera sincronizada procesos mecánicos que permiten el macerado y el peristaltismo, además de secreciones químicas como las ácidas (HCl), alcalinas (bicarbonatos), glucoproteínas (mucinas) y enzimáticas endógenas y bacterianas. La adición de fibra puede interactuar directamente sobre estos procesos digestivos, interactuando de manera específica con cada uno de los procesos mencionados.

El buche

El buche (ingluvies) es una dilatación fusiforme del esófago ubicada antes del proventrículo. Su función principal en el proceso digestivo es actuar como reservorio



temporal del alimento, permitiendo su humectación y ablandamiento previo a la digestión química. La retención del bolo en el buche depende del estado de ayuno y del tiempo de vaciamiento de la molleja.

Además, el buche es un importante nicho microbiano. En esta porción del tracto digestivo predominan bacterias con capacidad fermentativa, que utilizan carbohidratos solubles de la dieta para producir ácidos grasos de cadena corta (AGCC) como el acetato y otros metabolitos como el ácido láctico. El principal género presente es *Lactobacillus*, con especies dominantes como *L. reuteri*, *L. crispatus* y *L. salivarius*. Su abundancia varía de 1×10^8 a 1×10^9 UFC/g de digesta. También se detectan en menor abundancia géneros como *Enterobacter*, *Pseudomonas*, *Eubacterium*, *Escherichia*, *Klebsiella*, *Bifidobacterium* y *Sarcina*.

La colonización inicial de *Lactobacillus* ocurre en las primeras 4 horas post-eclosión, favorecida por la expresión de proteínas S-layer que facilitan su adhesión al epitelio. La provisión temprana de carbohidratos digestibles tras el arribo del pollito a la granja es fundamental para establecer una microbiota benéfica. El ácido láctico producido por estas bacterias ejerce un efecto bacteriostático, reduciendo la proliferación de enterobacterias patógenas como *Escherichia coli* y *Salmonella typhimurium*. De acuerdo con Hinton et al. (2000), para alcanzar este efecto se requieren concentraciones superiores a 1×10^8 UFC/g de Lactobacilos.

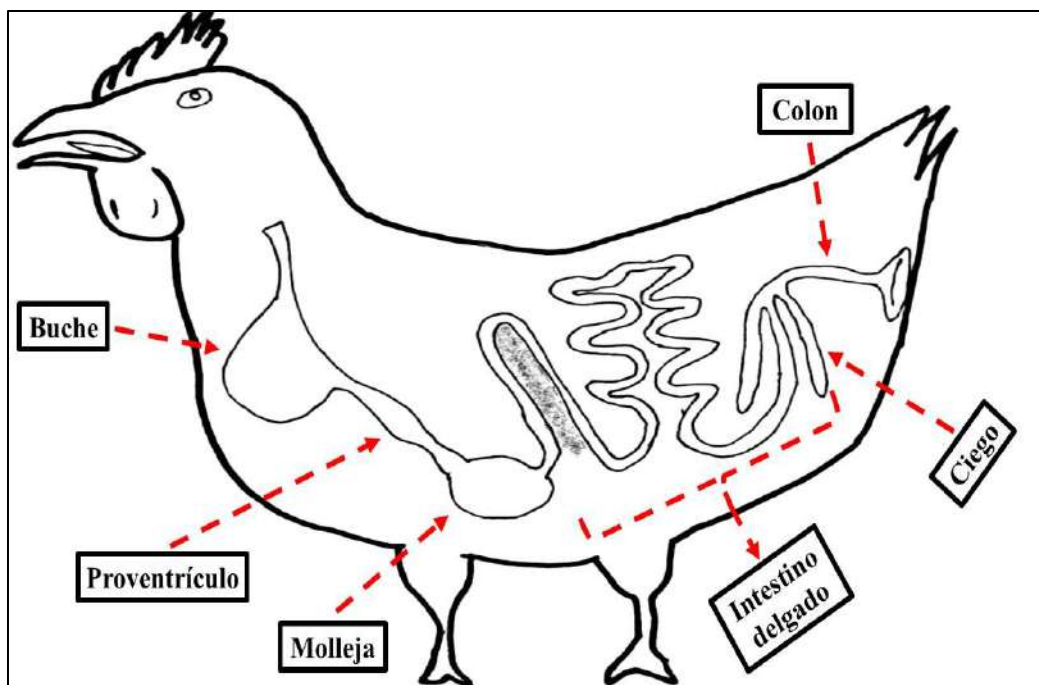


Figura 1. Estructura del tracto digestivo del pollo de engorda.



La fermentación en el buche es limitada en comparación con el ciego, pero suficiente para modificar el pH local. En pollos de engorda, el pH del buche varía entre 4.0 y 6.0, dependiendo de la edad y la carga de *Lactobacillus*, tendiendo a estabilizarse entre 4.0 y 5.0 en aves adultas. Este rango de acidez inhibe el crecimiento de patógenos, los cuales proliferan en valores de pH entre 6.0 y 8.0.

La adición de oligosacáridos no digeribles, como manano-oligosacáridos, galacto-oligosacáridos y fructo-oligosacáridos, puede actuar como prebiótico y sustrato fermentable para bacterias benéficas del buche. En estudios con pollos de engorda, Jiménez-Moreno et al. (2009) evaluaron el efecto de diferentes fuentes de fibra (celulosa, pulpa de remolacha y cáscara de avena) sobre el pH de esta sección, reportando valores entre 4.39 y 4.60, comparados con 4.91 en el control. Aunque todos los valores se mantuvieron dentro de rangos fisiológicos, el estudio resalta la importancia de la fermentación y producción de ácido láctico para mantener un ambiente intestinal estable y protector.

Proventrículo

El estómago de las aves se divide en dos porciones: proventrículo (estómago glandular) y ventrículo (molleja). El proventrículo es responsable de secretar ácido clorhídrico (HCl) y pepsinógenos, enzimas precursoras que, una vez activadas, participan en la digestión proteica. El HCl acidifica la digesta y activa el pepsinógeno, convirtiéndolo en pepsina, la cual inicia la hidrólisis de proteínas.

El pH del HCl es cercano a 2.0; sin embargo, tras mezclarse con la digesta, se incrementa a valores entre 2.67 y 3.15. Este ambiente ácido no solo favorece la digestión, sino que también modula la microbiota local. En esta sección, predominan bacterias del filo Firmicutes, principalmente *Lactobacillus* (94%), seguidas por *Bacillus* y *Enterococcus* (>2%).

El aporte de fibra insoluble puede modificar la fisiología gástrica. Yokhana et al. (2016) evaluaron la inclusión de fibra estructural (Arbocel®) al 1% en dietas de gallinas de postura, observando un incremento en el tamaño del proventrículo y la producción de pepsina tras 5 y 10 semanas, comparado con el control. Cuando el nivel de inclusión se redujo a 0.8% entre las semanas 22 y 31, el efecto positivo se mantuvo, aunque en menor magnitud. Estos resultados resaltan la dependencia dosis-efecto en la respuesta funcional del proventrículo.

El mismo estudio reportó un aumento en la expresión génica de pepsinógeno tipo A (cPgA) y tipo C (cPgC), alcanzando valores de 25.9 y 13.1 frente a 22.9 y 10.8 del grupo control a las 18 semanas. Este incremento sugiere una mayor secreción enzimática asociada a la adición de fibra insoluble.

El mecanismo propuesto involucra tanto factores mecánicos como químicos. La fibra insoluble prolonga el tiempo de retención de la digesta, activando



mecanorreceptores del proventrículo. A nivel químico, se ha sugerido un aumento en la secreción de colecistoquinina (CCK) en el duodeno proximal, estimulación celular por acción de las secreciones biliares presentes (vía peristalsis inversa) y la reducción del pH luminal. Estos factores podrían actuar de manera sinérgica, mejorando la secreción gástrica.

Ventrículo

El ventrículo, conocido como molleja, constituye el estómago muscular del pollo. Su función principal es triturar y mezclar la digesta con las secreciones gástricas procedentes del proventrículo y con los ácidos biliares que llegan desde el duodeno. Esta molienda mecánica reduce el tamaño de partícula, favoreciendo la hidrólisis inicial de proteínas y la formación parcial de micelas lipídicas.

La molleja está compuesta por dos músculos gruesos laterales y dos músculos delgados en las regiones anterior y posterior. Esta disposición asimétrica permite generar movimientos rotatorios (músculos delgados) y fuerzas de trituración (músculos gruesos). El epitelio interno se encuentra recubierto por koilina, una capa rígida formada por glicoproteínas secretadas por criptas glandulares bajo condiciones ácidas, que protege el tejido frente a la fricción mecánica. Durante la contracción, la molleja puede alcanzar presiones de hasta 58.5 kg/cm² desempeñando una función equivalente a la masticación en mamíferos (Figura 2).

El tránsito por la molleja varía entre 30 y 60 minutos, dependiendo del tamaño de partícula y la composición de la dieta. Partículas menores a 0.5 mm se liberan hacia el duodeno en el tiempo estimado, mientras que aquellas superiores a 1 mm permanecen más tiempo hasta ser reducidas. Tras la molienda, se liberan partículas en rangos de 0.500, 0.360, 0.150 y 0.040 mm, lo que facilita la acción enzimática en el intestino delgado.

La molleja presenta capacidad adaptativa frente a los componentes dietarios. En sistemas intensivos, donde predominan dietas finamente molidas y peletizadas, la falta de estímulo mecánico reduce su desarrollo funcional. En condiciones naturales, las aves consumen gravilla, lo que hipertrofia la musculatura y mejora la fricción. De manera similar, la adición de fibra insoluble y el manejo del tamaño de partícula en los ingredientes incrementan la actividad de la molleja.

Componentes estructurales como cáscara de arroz, salvado de trigo, cáscara de soya y avena, ricos en celulosa, hemicelulosa y lignina, estimulan la secreción de HCl, pepsinógenos y enzimas pancreáticas mediante mecanismos físicos (fricción), nerviosos (nervio vago) y hormonales (colecistoquinina). En contraste, fibras solubles como la pulpa de remolacha, rica en pectinas, no generan estímulos mecánicos por su baja de abrasión.



Estudios de fibra marcada con cromo, han demostrado que el tamaño de partícula modula el tiempo medio de retención (TMR). Con cáscara de trigo, el TMR fue de 5.4, 6.4 y 7.2 h para tamaños <0.5 mm, 1–1.5 mm y >2 mm, respectivamente. Con cáscara de arroz, los tiempos fueron de 5.1, 8.2 y 8.5 h en el mismo orden. Estos datos confirman que el tipo de fibra y el tamaño de partícula incrementan el TMR, de forma específica, aunque ambas incrementan el estímulo funcional de la molleja.

Un tamaño de partícula cercano a 1 mm promueve el desarrollo de la molleja en un 30%, mejorando el reflujo gastro-duodenal y favoreciendo la digestibilidad. Este efecto se relaciona con una reducción del índice de conversión alimenticia (ICA) y una mejora en el rendimiento productivo del pollo de engorda.

Intestino delgado

El intestino delgado se subdivide en tres partes, el duodeno, que se extiende desde el píloro hasta el punto terminal del asa duodenal; el yeyuno, que continúa desde el final del duodeno hasta el divertículo de Meckel; y el íleon, que va desde el final del yeyuno hasta la unión ileocecal. Este órgano tubular es el principal sitio de digestión y absorción de nutrientes. En el duodeno, se deposita el quimo procedente de la molleja, lo que estimula la actividad de células I que liberan colecistocinina (CCK).

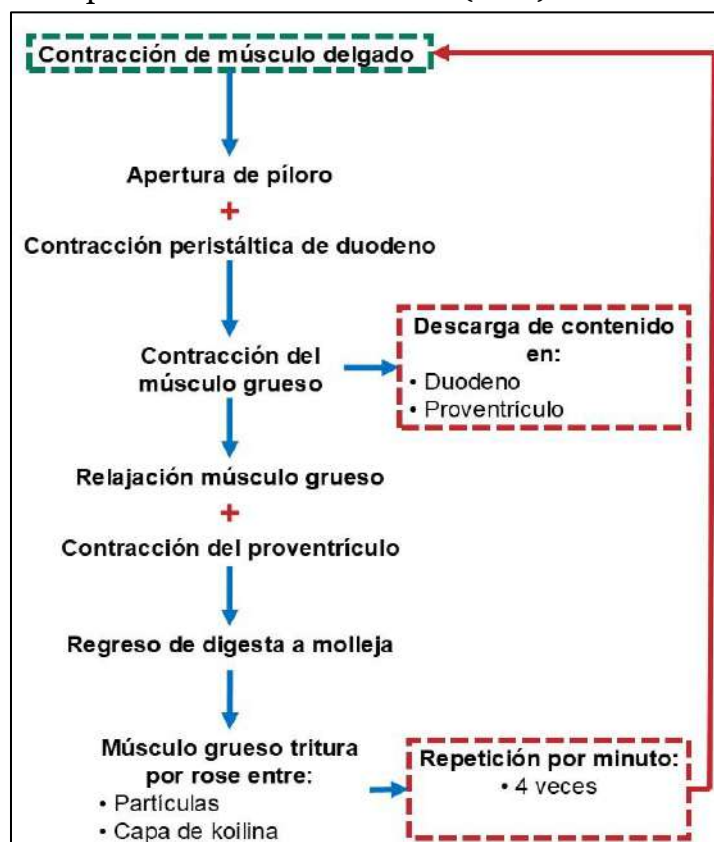


Figura 2. Ciclo del molido de la digesta por contracción muscular de la molleja.



Esta hormona promueve la liberación de bilis desde la vesícula biliar y la secreción de enzimas pancreáticas como tripsina, quimotripsina, amilasa y lipasa, que continúan la hidrólisis de los nutrientes. En yeyuno se realiza alrededor del 80% de la absorción de proteínas, carbohidratos y lípidos. El íleon se encarga de la absorción de agua, minerales y la reabsorción de sales biliares. La absorción de nutrientes se realiza por los enterocitos que recubren el epitelio intestinal.

Retención del alimento en el intestino delgado

En aves, el TMR en el intestino delgado se considera relativamente constante y poco dependiente del tipo de ingrediente utilizado. De manera general, la digesta permanece en el duodeno aproximadamente 5 minutos, en yeyuno de 45 a 60 minutos y en el íleon hasta 120 minutos.

Diversos autores han demostrado que la fibra dietaria, en función de su tipo, tamaño de partícula y solubilidad, modifica el TMR total y la dinámica de la digesta. Dorado-Montenegro et al. (2024) evaluaron el efecto de incluir cáscara de soya (CS) al 12% con tamaño grueso (1.13 mm) o fino (0.459 mm), con o sin arabinoxilanos (XA) al 5% como fibra soluble. Los resultados indicaron que el TMR en la fracción sólida aumentó 5.96% con CS gruesa frente a CS fina. La adición de XA incrementó el TMR en 4.83% (CS gruesa) y 3.30% (CS fina) respecto al control sin XA. La presencia de fibra soluble redujo la digestibilidad de almidón, materia seca y nitrógeno, mostrando un efecto negativo sobre la eficiencia digestiva.

Estos hallazgos confirman que el tamaño de partícula prolonga la retención en molleja, mientras que la solubilidad afecta principalmente la absorción de los nutrientes. Garçon et al. (2023) evaluaron cáscara de avena, cáscara de arroz (fibra insoluble) y pulpa de remolacha azucarera (pectina soluble) al 3%. Encontraron que, independientemente del tipo de fibra, la fracción soluble de la digesta presentó menor TMR intestinal que la fracción insoluble, debido a tránsito acelerado mediado por contracciones peristálticas.

Los subproductos agroindustriales contienen celulosa, hemicelulosa, lignina y pectinas en proporciones variables, determinando su comportamiento físico y funcional en el intestino. La ausencia de efectos negativos en algunos estudios podría deberse al nivel de inclusión y al uso de estructuras vegetales completas, que interactúan con la matriz alimenticia total, a diferencia de componentes aislados como los arabinoxilanos.

La fibra y las enzimas digestivas

El tracto gastrointestinal del pollo de engorda es relativamente corto en proporción a su peso corporal comparado con mamíferos como el cerdo. Para compensar esta limitación anatómica, las aves presentan peristalsis inversa, que permite el retorno parcial de la digesta desde el intestino delgado hacia segmentos proximales (desde la molleja hacia el



proventrículo y del yeyuno y duodeno hacia molleja y proventrículo).

Este mecanismo expone nuevamente la digesta a secreciones gástricas, pancreáticas y biliares, mejorando la hidrólisis y la digestión de nutrientes. La presencia de fibra en la dieta también se asocia con una mayor secreción enzimática del páncreas, mediada por el incremento de la motilidad digestiva y la consecuente liberación de colecistoquinina (CCK). Esta hormona regula la producción y liberación de enzimas pancreáticas.

Yokhana et al. (2016) reportaron que la inclusión de lignocelulosa (Arbocel RC Fine®) en dietas de gallinas de postura incrementó la actividad pancreática enzimática de forma dosis dependiente, siendo mayor con 1% de fibra comparado con 0.8%. Kheravii et al. (2018) observaron que la adición de bagazo de caña (fibra insoluble) al 2% estimuló la actividad proteolítica total, aumentando la producción de tripsina, quimotripsina y amilasa.

Estos hallazgos sugieren que el tipo de fibra y su nivel de inclusión son factores determinantes para modular la eficiencia enzimática pancreática, favoreciendo la hidrólisis del bolo intestinal.

Vellosidades intestinales

El proceso de absorción de nutrientes en aves ocurre principalmente en el intestino delgado, a través de las vellosidades intestinales, que son proyecciones digitiformes de la mucosa diseñadas para aumentar el área de absorción. Tras la digestión enzimática, los nutrientes son transportados a través del epitelio intestinal hacia la circulación.

El tamaño y la morfología de las vellosidades varían según la región intestinal: en el duodeno son más largas y delgadas, mientras que en el íleon son más cortas. Se ha establecido que vellosidades más largas y criptas menos profundas indican una mucosa funcionalmente eficiente.

Los parámetros más utilizados para evaluar la morfometría intestinal es la altura de la vellosidad, asociada a una mayor capacidad de absorción, la profundidad de la cripta, que indica la actividad proliferativa de las células madre y la relación vellosidad: cripta que integra ambos parámetros, donde valores altos reflejan un epitelio en equilibrio y maduración adecuada.

La fibra insoluble presente en cáscara de soya, avena, celulosa, favorece el desarrollo de las vellosidades intestinales mediante estimulación mecánica. Este tipo de fibra, al no degradarse, aumenta la motilidad intestinal, lo que induce adaptaciones estructurales como el aumento en la actividad celular en criptas para sostener la renovación epitelial y un engrosamiento del epitelio y elongación de las vellosidades.

Se ha propuesto que la fibra insoluble puede ejercer una abrasión mecánica moderada no lesiva, facilitando la eliminación de células apoptóticas y mejorando la



eficiencia de la renovación epitelial.

Por otro lado, la fibra soluble puede incrementar la viscosidad de la digesta, lo que reduce la motilidad y genera un ambiente hiperosmótico por nutrientes no absorbidos. Esta condición puede inducir adaptaciones como el aumento en la altura de las vellosidades para compensar la menor eficiencia absorptiva. Sin embargo, niveles excesivos de viscosidad promueven la proliferación de bacterias patógenas y procesos inflamatorios, asociados a la apoptosis celular inducida por estrés osmótico.

Estos cambios morfológicos determinan la eficiencia en la absorción de nutrientes y, por ende, el rendimiento productivo. Por ello, el tipo y nivel de fibra en la dieta debe ser controlado para estimular adaptaciones beneficiosas sin generar efectos adversos.

Ciegos

Los ciegos son estructuras pares, elongadas y saculares, localizadas en la unión entre el intestino delgado y el colon. Cada ciego puede dividirse en tres regiones: proximal, medial y distal. La porción proximal se caracteriza por presentar vellosidades desarrolladas, una apertura estrecha y tejido muscular, lo que actúa como un filtro selectivo de partículas de la digesta.

Se estima que solo ingresan al ciego fracciones solubles, moléculas de bajo peso molecular y partículas finamente molidas (<100 µm). Partículas mayores son escasas (1–15%), y las de más de 500 µm prácticamente no acceden. Por ello, el desarrollo funcional de la molleja, junto con la inclusión de oligosacáridos prebióticos, fibra fermentable y enzimas, puede facilitar la llegada de sustratos fermentables al ciego.

La digesta alcanza el ciego aproximadamente 3 horas después de la ingestión, y se mantiene 8–10 horas, descargándose unas dos veces en 24 horas. El tiempo de retención puede cambiar dependiendo de la composición de la dieta. De acuerdo con Garcon *et al.* (2023) el tiempo de retención en el ciego se puede extender a 16.48 horas en dieta a base de trigo, maíz y pasta de soya. Por otro lado, el uso de cáscara de avena o arroz pueden retener el contenido cecal por aproximadamente 24 horas, mientras que la remolacha azucarera por un periodo mayor a 8 horas. El TMR se asocia a la capacidad de fermentación del microbioma y al tipo de fibra utilizada.

El ciego contiene la mayor densidad bacteriana del tracto digestivo (10^{11} UFC/g), con un ambiente anaerobio y con amplio TMR, lo que favorece la fermentación de carbohidratos y compuestos nitrogenados. La degradación de fibra insoluble es limitada, pero las fracciones solubles son fermentadas en mayor proporción.

Los filos predominantes son Firmicutes, Bacteroidetes, Actinobacteria y Proteobacteria. Se han identificado al menos 31 taxones núcleo en aves de producción intensiva. Entre los géneros más comunes se encuentran *Ruminococcus*, *Clostridium*, *Butyricoccus*, *Lachnospira*, *Alistipes*, *Bacteroides fragilis*, *Azospirillum*,



Desulfovibrionaceae.

La inclusión de fibra estructural (insoluble) y soluble permite modular el microbioma, favoreciendo la proliferación de bacterias fermentadoras y la producción de AGCC como acetato, propionato y butirato, importantes para la salud intestinal.

Algunas interacciones bacterianas que se pudieran encontrar entre la microbiota y la fibra adicionada están relacionada con los componentes fibrosos y sus enlaces de unión. En alfalfa se estimula el crecimiento de *Ruminococcaceae*, *Lachnospiraceae*, *Clostridaceae*; Con celulosa amorfa a Alistipes; Con β - glucanos a *Lactobacillus*, *Bifidobacterium*, *Clostridaceae*, *Ruminococcus*; Con arabinosilanos a *Megamonas*, *Bifidobacterium*; Con oligosacáridos prebióticos a *Lactobacillus*, *Bifidobacterium*; Con pectina a *Lactococcus*, *Blautia*, *Faecalibacterium*.

Además, el uso de fibra disminuye bacterias del filo Proteobacteria como *Escherichia*, *Salmonella*, *Campylobacter*, *Helicobacter*.

Conclusiones

El uso de fibras en la dieta de pollos de engorda mejora el tránsito intestinal al estimular la motilidad y favorecer una digestión más eficiente. Las fibras insolubles aumentan el volumen de la digesta, acelerando su desplazamiento, mientras que las solubles contribuyen a la fermentación cecal y al desarrollo de un microbiota beneficioso. Estos efectos se traducen en una mejor absorción de nutrientes, menor incidencia de trastornos digestivos y mayor uniformidad en el crecimiento de los pollos. Además, el tránsito intestinal regulado mejora de los animales, pero la inclusión estratégica de fibras representará en aves una herramienta nutricional clave para optimizar el rendimiento productivo en sistemas intensivos en la actualidad y años venideros.

Bibliografía

- Ávila-Gómez, G., & Ávila-Ramos, F. (2022). Efecto prebiótico de la fibra de nopal en dietas con dos niveles de EM sobre las variables productivas en pollos de engorda. *Jóvenes en la Ciencia*, 16, 1–5.
<https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/3572>
- Dorado-Montenegro, S., Habibi, M. F., Gerrits, W. J., & De Vries, S. (2024). Effect of adding soluble viscous fibers to diets containing coarse and finely ground insoluble fibers on digesta transit behavior and nutrient digestibility in broiler chickens. *Poultry Science*, 103(4), 103487. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2024.103487>
- Garçon, C., Ellis, J., Powell, C., Villa, A. N., Ruiz, A. G., France, J., & De Vries, S. (2023). A dynamic model to measure retention of solid and liquid digesta fractions in chickens fed diets with



- differing fibre sources. *Animal*, 17(7), 100867. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2023.100867>
- Grove, A., Hepton, J., & Hunt, C. (2003). Chemical Composition and Ruminal Fermentability of Barley Grain, Hulls, and Straw as Affected by Planting Date, Irrigation Level, and Variety. *The Professional Animal Scientist*, 19(4), 273-280. [https://doi.org/10.15232/s1080-7446\(15\)31422-4](https://doi.org/10.15232/s1080-7446(15)31422-4)
- Hinton, A., Buhr, R., & Ingram, K. (2000). Physical, chemical, and microbiological changes in the crop of broiler chickens subjected to incremental feed withdrawal. *Poultry Science*, 79(2), 212-218. <https://doi.org/10.1093/ps/79.2.212>
- Jiménez-Moreno, E., González-Alvarado, J., De Coca-Sinova, A., Lázaro, R., & Mateos, G. (2009). Effects of source of fibre on the development and pH of the gastrointestinal tract of broilers. *Animal Feed Science And Technology*, 154(1-2), 93-101. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2009.06.020>
- Kheravii, S. K., Swick, R. A., Choct, M., & Wu, S. (2018). Upregulation of genes encoding digestive enzymes and nutrient transporters in the digestive system of broiler chickens by dietary supplementation of fiber and inclusion of coarse particle size corn. *BMC Genomics*, 19(1). <https://doi.org/10.1186/s12864-018-4592-2>
- Marcolla, C. S., Ju, T., Lantz, H. L., & Willing, B. P. (2023). Investigating the cecal microbiota of broilers raised in extensive and intensive production systems. *Microbiology Spectrum*, 11(5). <https://doi.org/10.1128/spectrum.02352-23>
- Reichembach, L. H., & De Oliveira Petkowicz, C. L. (2022). New findings on acid-extractable pectins from soy hull. *Carbohydrate Polymers*, 294, 119831. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119831>
- Ren, Y., Tian, Y., Hou, M., Zhao, Y., Li, J., Aftab, U., Rousseau, X., Jiang, R., Kang, X., Tian, Y., & Gong, Y. (2023). Evaluation of stimbiotic on growth performance and intestinal development of broilers fed corn- or wheat-based diets. *Poultry Science*, 102(12), 103094. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2023.103094>
- Sánchez-Torres, L., Macías-Flores, M., Gutiérrez-Arenas, D., Arredondo-Castro, M., Valencia-Posadas, M., & Avila-Ramos, F. (2022b). Fibra como prebiótico para aves de producción: una revisión. *Abanico Veterinario*, 12. <https://doi.org/10.21929/abavet2022.24>
- Saini, P., Islam, M., Das, R., Shekhar, S., Sinha, A. S. K., & Prasad, K. (2022). Wheat bran as potential source of dietary fiber: Prospects and challenges. *Journal Of Food Composition And Analysis*, 116, 105030. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.105030>



- Schmitz, E., Karlsson, E. N., & Adlercreutz, P. (2020). Warming weather changes the chemical composition of oat hulls. *Plant Biology*, 22(6), 1086-1091. <https://doi.org/10.1111/plb.13171>
- Svihus, B. (2011). The gizzard: function, influence of diet structure and effects on nutrient availability. *World's Poultry Science Journal*. 67(2); 207 – 224. <https://doi.org/10.1017/S0043933911000249>
- Svihus, B., & Itani, K. (2019). Intestinal Passage and Its Relation to Digestive Processes. *The Journal Of Applied Poultry Research*, 28(3), 546-555. <https://doi.org/10.3382/japr/pfy027>
- Svihus, B., Choct, M., & Classen, H. (2013). Function and nutritional roles of the avian caeca: a review. *World S Poultry Science Journal*, 69(2), 249-264. <https://doi.org/10.1017/S0043933913000287>
- Tejeda, O., & Kim, W. (2020). The effects of cellulose and soybean hulls as sources of dietary fiber on the growth performance, organ growth, gut histomorphology, and nutrient digestibility of broiler chickens. *Poultry Science*, 99(12), 6828-6836. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2020.08.081>
- Yokhana, J., Parkinson, G., & Frankel, T. (2015). Effect of insoluble fiber supplementation applied at different ages on digestive organ weight and digestive enzymes of layer-strain poultry. *Poultry Science*, 95(3), 550-559. <https://doi.org/10.3382/ps/pev336>
- Zhang, Z. Y., Zhang, S., Lai, C. H., Zhao, J. B., Zang, J. J., & Huang, C. F. (2018). Effects of adaptation time and inclusion level of sugar beet pulp on nutrient digestibility and evaluation of ileal amino acid digestibility in pigs. *Asian-Australasian Journal Of Animal Sciences*, 32(9), 1414-1422. <https://doi.org/10.5713/ajas.18.0181>

Manejo de la garrapata *Rhipicephalus microplus* en las unidades de producción de bovinos

Oscar Guadalupe Barrón-Bravo.
César Andrés Ángel-Sahagún.
Ricardo Avilés-Ruiz.
Pedro Mendoza-de Gives.
Juan Samuel Alcalá-Rico.
Maya-Cruz Nely Amairani.





Resumen

En México la ganadería bovina es una de las principales actividades productivas, utiliza sistemas para producir leche y carne aprovechando la alimentación en el pastoreo principalmente. El control de garrapata es parte importante del manejo sanitario de las unidades de producción de bovinos especialmente en las zonas con clima tropical. El uso de sustancias químicas ixodicidas es la base de los programas de control de estos ectoparásitos en los hatos, la aplicación se realiza de varias formas dependiendo la región agroecológica y la eficiencia del producto. Los métodos biológicos alternativos como el uso de entomopatógenos, bacterias y plantas con propiedades ixodicidas, ofrecen un control seguro y sustentable, que puede disminuir el uso de los productos químicos. Para controlar las infestaciones de garrapatas de manera efectiva, es esencial comprender estas interacciones y aplicar estrategias de manejo que tengan en cuenta todos estos aspectos, como el control ambiental, el manejo del ganado, y el uso racional de productos químicos. También se deben aprovechar los enemigos naturales de las garrapatas que pueden ser usados para su control, como lo son los hongos entomopatógenos como *Metarhizium* spp. y *Beauveria* spp., las bacterias entomopatógenas principalmente *Cedecea lapagei*, *Escherichia coli* y *Enterobacter agglomerans*, los nematodos entomopatógenos principalmente Heterorhabditidae y Steinernematidae, las hormigas reguladoras como las como hormigas de fuego y hormigas carpinteras, las aves como las gallinas, picabueyes y guajolotes, además también las lagartijas, serpientes, ranas y sapos, por lo que fomentar la biodiversidad es importante y puede ser un útil aliado en el control de la garrapata. Es de gran importancia el estudio y la investigación de la garrapata para generar mejores condiciones para un mejor desarrollo de los sistemas de producción de bovinos con un manejo integrado de garrapatas.

Palabras clave: Ganadería, ectoparásitos, entomopatógenos, sustentable.



Introducción

La garrapata es uno de los principales ectoparásitos con mayor importancia en México y en el estado de Tamaulipas que afectan la salud y la productividad de los bovinos, la infestación puede provocar pérdidas económicas significativas debido a la reducción de producción de leche y carne, también existen pérdidas considerables por transmisión de enfermedades como son piroplasmosis y anaplasmosis provocando un obstáculo en la producción de bovinos. El control de garrapata es parte importante del manejo sanitario convirtiéndose en una actividad fundamental en la producción bovina especialmente en pastoreo.

La aplicación de sustancias químicas ixodicidas sobre el cuerpo son la principal estrategia utilizada para el control en los hatos de animales infestados por estos ectoparásitos, la aplicación de estas sustancias se realiza dependiendo la infestación a ciertos intervalos de tiempo, los cuales están determinados por región ecológica y la eficiencia residual del producto. Los métodos biológicos alternativos como el uso de entomopatógenos, bacterias y plantas con propiedades repelentes e ixodicidas, ofrecen una solución más segura y sostenible para controlar la población de garrapatas en bovinos.

El uso repetido e indiscriminado de ixodicidas ha provocado resistencia por parte de las garrapatas. En México la resistencia de la garrapata se registró a partir de los años 80, principalmente la resistencia a los piretroides y organofosforados. El impacto económico de las garrapatas especialmente *Rhipicephalus (Boophilus) microplus* está asociado al daño que causa en la piel de los animales por acción de las picaduras, disminución en el desarrollo, disminución en la ganancia de peso y producción de leche, baja fertilidad del ganado y la transmisión de patógenos como *Babesia* spp. y *Anaplasma* spp.

Estas afecciones en la salud de los bovinos en México por la infestación de garrapatas de *R. microplus* han generado una creciente demanda de métodos de control y combate de las infestaciones a estos problemas. En México, el control de *R. microplus* se basa principalmente en el uso de antiparasitarios tales como: Lactonas macrocíclicas, Piretroides sintéticos, Organofosforados y Amidinas. Sin embargo, el uso continuo de antiparasitarios ha propiciado el desarrollo de poblaciones de garrapatas resistentes, con amplia distribución mundial, incluyendo a México. Esto ha propiciado la necesidad de buscar alternativas no químicas de control de garrapatas que no afecten al ambiente y a la salud de los humanos. Entre los métodos de control no químicos se encuentran la selección de razas de bovinos resistentes, vacunas antigarrapatas, manejo de praderas y el control biológico basado en el uso de hongos entomopatógenos, los cuales han demostrado buena eficacia para el control de varios géneros de garrapatas, entre los que se encuentran *Rhipicephalus* y *Amblyomma*.

Las especies de hongos entomopatógenos que han demostrado eficacia contra garrapatas son *Beauveria bassiana*, *Metarhizium anisopliae*, *Isaria farinosa* y



Lecanicillium lecanii, siendo *B. bassiana* y *M. anisopliae* las especies más estudiadas y las que han demostrado mayor eficacia contra garrapatas. El uso de dos o más estrategias para el control de este parásito se conoce como Manejo Integrado de la Garrapata, conforme se ha utilizado va tomando más relevancia debido a la importancia que tiene al influir en la sustentabilidad de las unidades de producción.

Sistemas de producción de bovinos

En México la diversidad ecológica y socioeconómica determina la existencia de diferentes tipos de ganadería, por lo que los programas y acciones de desarrollo deben reconocer la heterogeneidad socioeconómica y cultural de los productores, esto se da en función del tamaño de sus unidades de producción, bienes productivos, capacidad de producción para comercializar o el autoconsumo. Una de las actividades del medio rural más diseminadas en México y que no está exenta de la diversidad, es la ganadería bovina de doble propósito, este sistema basa su alimentación en el pastoreo y utiliza cruza *Bos taurus* con *Bos indicus* es decir razas europeas con razas cebuinas, para aprovechar las características productivas de ambas y así producir leche y carne.

Las vacas generalmente se ordeñan una vez al día con el apoyo del becerro y éstos son vendidos al destete aproximadamente a la edad de seis a ocho meses con destino a los corrales de engorda comúnmente para producir carne. La ganadería doble propósito se desarrolla en más de 48 millones de hectáreas y concentra 45% del inventario bovino nacional, siendo un eslabón muy importante en esta cadena productiva.

Los principales sistemas que se manejan en la región noreste de México son el sistema vaca cría para producción de becerros al destete y el sistema de bovinos doble propósito para producción de leche y becerros los cuales tienen como destino la exportación a los corrales de engorda en EUA. Dentro de las explotaciones dedicadas a la producción de bovinos en pastoreo, uno de los problemas que afecta seriamente la producción es la presencia de garrapata. El incremento en la presencia de altas poblaciones de garrapatas así como la presencia de garrapatas resistentes a los productos químicos en su combate, es un problema que está tomando dimensiones alarmantes por provocar altos costos en el control y disminuir drásticamente la producción en bovinos de carne, además de los daños indirectos como la transmisión de enfermedades como la fiebre de las garrapatas (anaplasmosis y babesiosis), provocando estados de anemia y depresión en los animales que poco a poco pierden su condición corporal, aunado a la problemática en las restricciones sanitarias que pueden poner barreras en la exportación de becerros mermando la economía de este sector productivo.

La caracterización de las unidades de producción de pequeños y medianos productores toma un papel fundamental en la generación de planes de desarrollo, como los programas de control de garrapatas y sus recomendaciones, por lo que en 2020 se



estudiaron la caracterización de unidades de producción de bovinos en Llera, Tamaulipas, se trabajó con 80 UPB, los autores reportaron que la familia se compone de cuatro a seis integrantes en total. El 77% maneja un sistema bovinos carne y 33% bovinos doble propósito, en agostadero. El hato promedio fue de 19.7 cabezas en sistema vaca-becerro, con características raciales Beefmaster (35%), Criollo (30%), y Charolais (15%).

El manejo sanitario incluye, participación en campañas zoonosanitarias (95.6%), vacunación (100%) y desparasitación (100%). La patología más común corresponde a rabia paralítica (56.8%), por lo que el 95.6% vacunan con Rhabdovirus. El 75% practica la monta libre, con relación macho-hembra de 1:16 y una fertilidad del 59%. El intervalo entre partos fue de 391.4 días. El peso al nacimiento fue de 31.8 kg. La ganancia diaria de peso es proporcional con el peso al destete.

De forma general los sistemas se caracterizan como bovinos carne tomando en cuenta el doble propósito como eslabón de esta cadena agroalimentaria, con hatos pequeños, de baja productividad y nivel tecnológico principalmente de subsistencia. Este tipo de sistemas son claves en la soberanía alimentaria y la sustentabilidad por su resiliencia, por lo que el seguimiento de la prevalencia de las garrapatas en estos hatos vulnerables es esencial para el manejo y control de estos parásitos, lo que permite evitar las enfermedades que transmiten. El municipio de Llera, Tamaulipas, que se localiza entre los 23° 35' y 23° 02' N y 99° 17' y 98° 25' O, con una altitud de entre 100 a 2,200 msnm. El clima predominante es cálido subhúmedo al semiseco muy cálido con lluvias en verano, con una temperatura de 14 a 26°C y una precipitación anual de 600 a 1,200 mm, aunque no es un municipio costero en el Estado de Tamaulipas, su clima favorece el desarrollo de los parásitos tal es el caso de la garrapata. Los ganaderos mencionan entre sus principales problemáticas la Anaplasmosis y Piroplasmosis, enfermedades también conocidas coloquialmente como fiebre de las garrapatas o tristeza de las garrapatas, la cual afecta hasta en 17.4% de los hatos.

En el manejo y aplicación de productos químicos para el control de garrapata, los ganaderos encuestados de las unidades de producción de bovinos en Llera, Tamaulipas, el 100% utiliza el baño por aspersión (con bomba de mochila), el 26% utilizan los tratamientos inyectados de forma subcutánea, el 17.3% aplica Pour on (tópico sobre el lomo del bovino), y el 4.3% baño sumergido en fosa. El 78.2% mencionó una vía solamente, el 8.8% mencionó dos vías y el 13.0% tres vías de aplicación.

Los productos químicos más utilizados por los productores son Garra Ban (Clorpirifos + Permetrina) en un 21.7%, Bovitraz (Amitraz) con un 13.0%, Tactic (Amitraz) con un 13.0%, Bayticol (Flumetrina) con un 13.0%, el Asuntol (Cumafós) con un 8.7%, el Butox (Deltametrina) con 4.3%; además, el 52.1% de los productores no especificó ningún producto aunque solo el 26.3% no aplicó nada por desconocimiento, el 21.8% mencionó un producto y el otro 21.8% dos productos, sin embargo solo el 4.3% mencionaron tres productos, estos resultados reflejan que los productores tienen gran interés en realizar el



manejo preventivo y control de parásitos, aunque es muy necesario el acompañamiento y la capacitación constante.

Manejo integrado de garrapatas

En la actualidad en el país existen más de 50 productos para el control de garrapatas o ixodicidas, los cuales incluyen seis grupos distintos con diferencias en sus mecanismos de acción y que se pueden aplicar por distintas vías como son aspersión, inmersión, de forma epicutánea (pour-on o derrame dorsal) y por vía parenteral (inyectables). Sin embargo, aunque el uso de ixodicidas continua siendo el pilar fundamental en el control de garrapatas, el control por medio del Manejo Integrado de Garrapatas es una opción que consiste en la asociación del medio ambiente y la dinámica de población de las garrapatas, utilizando una combinación de técnicas y métodos sustentables que sean compatibles y que mantengan niveles bajos de las poblaciones de garrapata, planificando en base a los monitoreos de las fechas con picos de población más altos, los cuales causan las pérdidas económicas más relevantes, estableciéndose umbrales económicos, los cuales indican en base a conteos cuando se debe hacer uso de los ixodicidas.

Este Manejo Integrado de Garrapatas combina adecuadamente varias herramientas, entre las principales la selección de razas de bovinos resistentes, vacunas antigarrapatas, manejo de praderas y el control biológico por medio de depredadores naturales como lo son los hongos entomopatógenos y las aves, todo esto con el objetivo de desestabilizar la formación de aquellas poblaciones con mayor proporción de garrapatas resistentes, lo que permite mantener un sistema de producción equilibrado con poblaciones de garrapatas susceptibles a los ixodicidas.

El control integrado de garrapatas generalmente se asocia a una drástica disminución de la frecuencia de tratamientos, para prevenir y manejar la resistencia, no sólo es suficiente disminuir la dependencia a los ixodicidas, sino también utilizarlos en épocas, momentos y animales de tal forma que no aumenten la presión de selección genética. Desde los años 80 la resistencia de la garrapata se observa en el país, el primer reporte de resistencia a las amidinas de *R. microplus* fue en el año de 2001 y en muchas regiones de México como es el noreste del país esta resistencia va en aumento. Similares resultados a la fecha se han encontrado en el estado de Tamaulipas donde la resistencia ha llegado a límites incontrolables en algunas zonas, por lo que es de mucha importancia encontrar métodos de control integrado químico y biológico que reduzcan las poblaciones y lleguen a controlar el crecimiento de la resistencia en garrapata.

Características generales de las garrapatas

Las garrapatas son artrópodos arácnidos, por lo que se les clasifica como similares a las arañas, los escorpiones y a los ácaros especialmente, tienen hábitos parasitarios que



atacan a diferentes vertebrados causando enfermedades y grandes pérdidas económicas a las explotaciones pecuarias en el mundo. Las garrapatas pertenecen al suborden Ixodoidea, que consta de tres familias: Ixodidae (garrapatas duras), Argasidae (garrapatas blandas) y Nuttalliellidae, esta última consta solamente de una especie conocida, Nuttalliella namaqua es originaria de África, y parece representar un eslabón perdido, algunos autores consideran que se trata de una rama biológica que debería situarse entre ambas. Se conocen unas 726 especies de Ixodidae repartidas en 12 géneros y alrededor de 220 especies de Argasidae, que se reparten en cuatro géneros (Cuadro 1). Debido a la diversidad de especies de garrapata existen discrepancias en el número total de especies e incluso nomenclaturas según las consideraciones de diferentes autores. Aunque existe una lista de consenso acerca de los nombres válidos de las especies de Ixodidae.

Cuadro 1. Clasificación taxonómica de las garrapatas duras y blandas.

CATEGORÍA		Taxon		
Phylum	Artropoda			
Clase	Arachnida			
Orden	Acarina			
Suborden	Ixodoidea			
Familia	Ixodidae	Argasidae	Nuttalliellidae	
Genero	<i>Ixodes</i>	<i>Argas</i>	<i>Nuttalliella</i>	
	<i>Amblyomma</i>	<i>Carios</i>		
	<i>Anomalohimalaya</i>	<i>Ornithodoros</i>		
	<i>Bothriocotoninae</i>	<i>Otobius</i>		
	<i>Cosmiomma</i>			
	<i>Dermacentor</i>			
	<i>Haemaphysalis</i>			
	<i>Hyalomma</i>			
	<i>Margaropus</i>			
	<i>Nosomma</i>			
	<i>Rhipicentor</i>			
	<i>Rhipicephalus</i>			
Especies	726	220	1	

Características morfológicas de la garrapata

Las garrapatas tienen el cuerpo redondeado con el nombre de idiosoma y no presentan segmentación, algunas especies tienen un par de ojos en los laterales del idiosoma, aunque dependiendo la especie pueden presentar dos pares de ojos. La familia Ixodidae conocidos como los ixódidos se caracterizan por presentar en su anatomía un escudo completo en los machos y parcial en la parte craneal las hembras, del cual reciben su nombre coloquial de garrapatas duras. Por otra parte, la familia Argasidae también conocidos como los



argásidos carecen de este escudo esclerotizado y su anatomía en la superficie externa se asemeja a un cuero con estructura resistente. Todas las garrapatas tienen un aparato bucal separado del idiosoma (Figuras 1 y 2). Las hembras de los ixódidos presentan unas áreas porosas en el escudo dorsal, y los machos de algunos géneros tienen escudos ventrales quitinizados, en cercanía con el ano, por parte de los argásidos no se presentan este tipo de poros. En su etapa de larvas, ninfas y adultos algunas de las garrapatas presentan placas espiraculares, las cuales dan inicio al sistema de traqueolas respiratorias. El hipostoma o aparato bucal, es el aparato de fijación de la garrapata a su hospedador, en los ixódidos se encuentra en la parte craneal, y en los argásidos se encuentra en la cara ventral, está formado por dos piezas simétricas unidas que funcionan como una unidad. La cara ventral del hipostoma presenta hileras de dentículos curvos ubicados en ambos lados que dificultan la remoción de la garrapata al quitarla de su hospedador.

La familia Ixodidae se caracteriza por una marcada diferencia sexual en los adultos, los cuales tienen de forma visible, la presencia de un escudo dorsal quitinizado el cual es duro y cubre por completo la superficie dorsal de los machos. Por otra parte, las hembras presentan su escudo dorsal solo en la mitad anterior de su anatomía. El escudo limita la expansión del cuerpo en los machos, al succionar sangre, esto debido a que es muy rígido y poco elástico. Las hembras adultas y los estadios inmaduros de larva y ninfa deben consumir una gran cantidad de sangre durante su ciclo de vida, puede expandir su volumen corporal en las zonas del cuerpo que no están cubiertas por el escudo. En la etapa de larva presentan tres pares de patas por lo que se denominan hexapodas y al llegar a la etapa de ninfa presentan cuatro pares de patas pasando a ser octópodos, al igual que las arañas y alacranes, aunque este término es más utilizado para los pulpos.

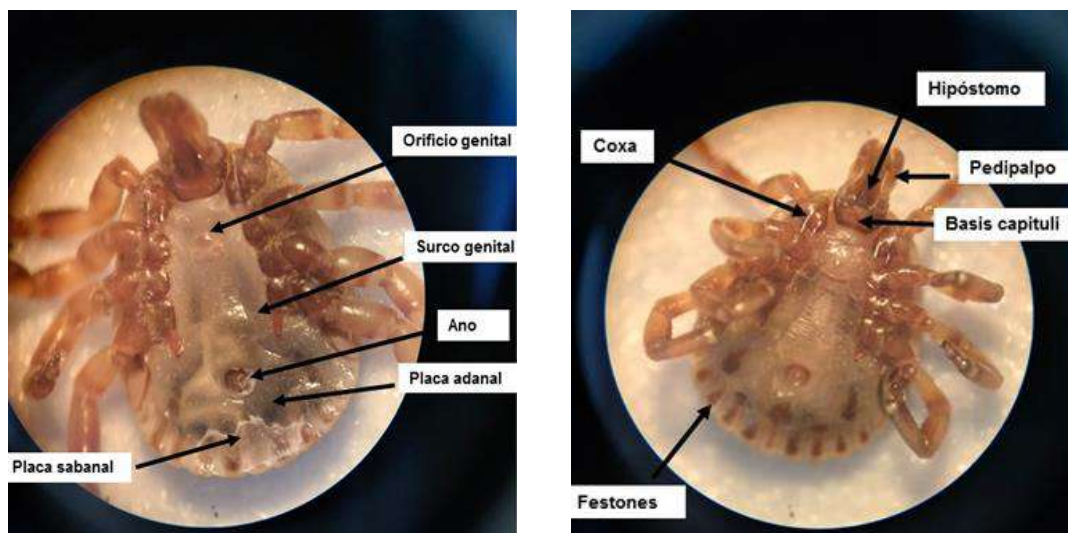


Figura 1. Anatomía de la garrapata (vista ventral).

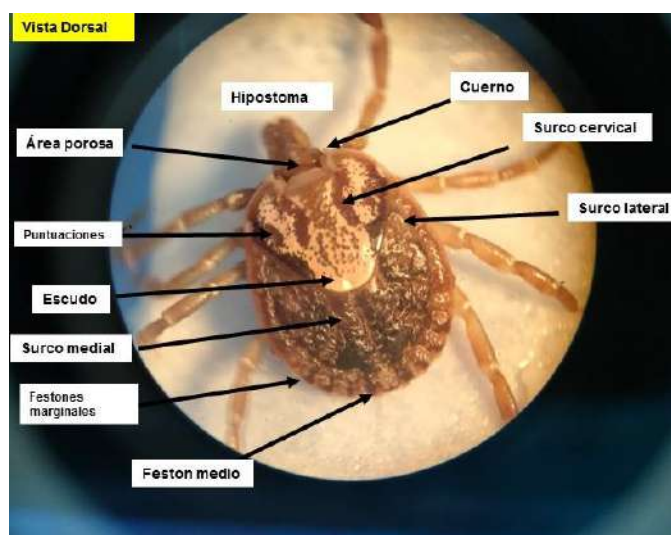


Figura 2. Anatomía de la garrapata hembra (Vista dorsal).

Ciclo de vida de la garrapata

La vida de la garrapata consta de cuatro fases iniciando con huevo, larva, ninfa y adulta. Esta última al reproducirse macho y hembra se producen huevos para cerrar el ciclo de vida y así continuar una nueva generación (Figura 3). Durante la etapa de vida libre que comienza con la hembra repleta de sangre, la cual se desprende del hospedador y al caer al suelo busca las condiciones ideales de humedad y temperatura para ovipositar, proceso por el cual atraviesa varios eventos: 1) Preoviposición, cuando la garrapata repleta se desprende y cae al suelo, donde busca un lugar protegido y oscuro para los huevos, puede durar 2 a 4 días en verano y 20 a 23 días en invierno; 2) Oviposición, la garrapata pone los huevos teniendo una capacidad promedio de 2,500-3,000, este periodo dura en verano de 5 a 15 días y puede triplicar su duración en invierno; 3) Postpostura, es la última etapa de vida desde que termina de ovipositar hasta que la garrapata muere, durando de 3 a 15 días aproximadamente; 4) La incubación dura desde que los huevos han sido depositados hasta que eclosionan. La viabilidad del huevo está influenciada por el ambiente, principalmente por temperatura y humedad.

Las condiciones óptimas de incubación se encuentran entre los rangos de temperatura de 24.9 a 35 °C, con una humedad relativa de 80 %. La eclosión en condiciones de laboratorio puede ser mayor al 80 % del total de los huevos. Por otro lado, este periodo en campo se ve afectado por las condiciones del medio ambiente, como por ejemplo en condiciones de temperatura del suelo por debajo de 16°C pueden inhibir el periodo. La larva de vida libre mide 0.5 mm aproximadamente y tiene forma oval con tres pares de patas, al eclosionar son generalmente de color ámbar y posteriormente cambia a su color más oscuro. Estas larvas se protegen de las condiciones abióticas adversas en cuanto a temperatura y humedad, las larvas suben hasta las porciones más altas de los



pastos, esperando un hospedador.

El conocimiento de ciclo de vida es muy importante, debido a que se debe tomar en cuenta al establecer programas de control de garrapata, de aquí la relevancia en los tiempos de viabilidad de la larva, que puede llegar en verano de los 10 a 70 días y hasta los 250 días en las demás estaciones del año, algunos autores mencionan que bajo condiciones controladas de laboratorio una larva puede sobrevivir hasta 300 días.

El manejo de praderas en los sistemas de producción de bovinos debe tomar en cuenta estos periodos de tiempo para la rotación de praderas, los cuales pueden ser usados para saber los periodos de descanso para las praderas, haciendo énfasis en los periodos donde la población de garrapatas es más alta, este tipo de manejos reduce la posibilidad de que se complete el ciclo de vida de estos parásitos. La capacidad de reproducción de la garrapata hace que sea un grave problema en las unidades de producción de bovinos ya que se ve afectada la salud animal por su alta prevalencia, especialmente en las ganaderías que se encuentran ubicadas en el trópico donde las condiciones ambientales les favorecen.

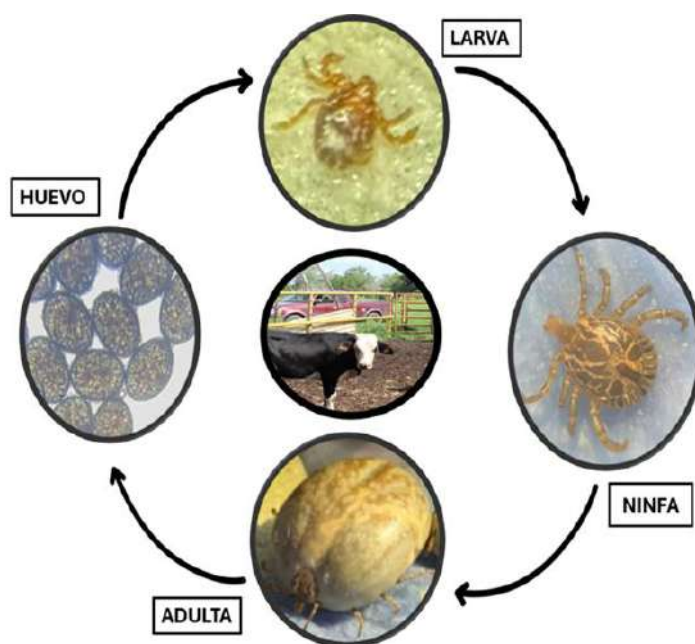


Figura 3. Ciclo biológico de la garrapata en sus fases: huevo, larva, ninfa y adulta.

Control biológico por medio de enemigos naturales

Los enemigos naturales de las garrapatas son los agentes biológicos que potencialmente pueden ser usados para su control, estos se clasifican en: 1) Los hongos entomopatógenos principalmente *Metarhizium* spp. y *Beauveria* spp.; 2) Las bacterias entomopatógenas principalmente *Cedecea lapagei*, *Escherichia coli* y *Enterobacter agglomerans*; 3) Los



nematodos entomopatógenos principalmente los géneros Heterorhabditidae y Steinernematidae; 4) Las hormigas reguladoras como las hormigas de fuego y hormigas carpinteras; 5) Las aves que generan una relación de simbiosis con los bovinos en donde ambas especies salen beneficiadas como las gallinas, las aves picabueyes y los guajolotes o pavos.

Todos estos agentes controlan en algunos de los estadios de vida a las garrapatas, además, en la fauna silvestre también las lagartijas, serpientes, ranas y sapos consumen garrapatas. Entre los hongos entomopatógenos *Metarhizium anisopliae* ha sido evaluado ampliamente para el control de *Rhipicephalus microplus*, ya sea, sobre el animal o aplicado en pasturas. El hongo entomopatógeno *Metarhizium anisopliae* pertenece a la clase Hyphomycetes, familia Moniliaceae. Este hongo es anamorfo y facultativo, fue aislado por primera vez en 1879 del escarabajo Anisoplia.

Actualmente, se ha aislado de insectos, suelo, sedimentos del río y material orgánico en descomposición. La clasificación taxonómica del género *Metarhizium* spp., ha tenido cambios de acuerdo a los autores que lo han estudiado, en 1976 Tulloch M. clasifica con base en sus características morfológicas y diferencia dos especies *M. anisopliae* y *M. flavovovoride*, los posteriores estudios filogenéticos han permitido reubicar a las especies de *Metarhizium* spp. al grupo de los Ascomycetes, al considerar además de su origen e implicaciones evolutivas como reproducción, hábitat, tipo de hospedero y otros invertebrados como fuente de alimento. Morfológicamente, las colonias de este hongo se caracterizan por tener una textura aterciopelada con bordes definidos y colores que van desde el verde oscuro al verde claro.

La mayoría de las colonias de este hongo presentan un borde blanco de grosor variable. Por otra parte, se ha empleado la nanotecnología para desarrollar formulaciones fúngicas, por ejemplo, la microencapsulación de las conidias para protegerlas de las condiciones climáticas adversas como la radiación solar, temperatura, humedad, entre otras para incrementar su eficacia. La palabra entomopatógeno es de raíces grecolatinas y significa que “causan enfermedad en los insectos”, los primeros microorganismos que se observaron con esta cualidad fueron los hongos entomopatógenos, esto debido a que estos hongos crecen en los insectos, invadiendo varias partes de su cuerpo hasta consumirlos, lo cual se puede observar incluso a simple vista en la naturaleza. Los hongos entomopatógenos penetran, invaden y se multiplican dentro del insecto, sin necesidad de ser ingeridos, su crecimiento y desarrollo está limitado por condiciones medioambientales como la radiación solar, la humedad y las altas temperaturas. Las esporas o conidias son las unidades de reproducción de los hongos, y además son también las que infectan generalmente a los insectos.

Este tipo de hongos inicia su proceso infectivo cuando las esporas son retenidas en la superficie del tegumento, iniciando la formación hacia el tubo germinativo, donde comienzan a excretar enzimas como proteasas, quitinasas, quitobiasas, lipasas y



lipooxigenasas, encargadas de degradar la cutícula del insecto y favorecer la penetración por presión mecánica. Una vez dentro del insecto, el hongo desarrolla cuerpos hifales que se diseminan a través del hemocele e invade diversos tejidos musculares, cuerpos grasos, tubos de malpighi, mitocondrias y hemocitos, ocasionando la muerte del insecto después de 3 a 14 días de iniciada la infección.

Otro importante hongo entomopatógeno es *Beauveria bassiana* el cual es un ascomiceto que produce esporas endógenas, crece de forma natural en los suelos de todo el mundo, y se ha aislado de insectos, la superficie de las hojas de las plantas y en algunas ocasiones, del mismo tejido vivo de plantas. Este hongo tiene la capacidad de atacar insectos, debido a que genera ácido cítrico y oxálico, los cuales pueden desintegrar péptidos y proteínas de la cutícula de los insectos. Sus cualidades entomopatógenas hacen posible que parasite diferentes especies de insectos, causando en los insectos una patología conocida como enfermedad blanca, donde el insecto muere y generalmente es cubierto por una capa de hongo con este color.

Actualmente es utilizado como insecticida biológico para controlar un gran número de parásitos de las plantas como son orugas, termitas, moscas blancas, áfidos o escarabajos siendo la especie comercialmente más utilizada en el mundo para este fin, además tiene una capacidad de defensa en su organismo que ha permitido numerosos estudios con aplicación en inmunología humana. Las formulaciones con este hongo consisten en la combinación de ingredientes de tal forma que las esporas se mantienen estables, efectivas y fáciles de aplicar. Desde la llegada de la broca del café (*Hypothenemus hampei*), a Colombia este hongo ha sido asociado como el mayor controlador natural de esta plaga con buenos índices de mortalidad. En cuanto a sus características morfológicas puede decirse que las colonias de este hongo se caracterizan por su color blanquecino amarillento con una textura algodonosa o velutinosa que se convierte en farinácea o polvosa a medida que se acumulan las conidias en la superficie de las colonias que van envejeciendo. Las conidias de este hongo se caracterizan por su forma globosa o elipsoide y poseen hifas aéreas ramificadas, hialinas, que son septadas con paredes delgadas. Los conidióforos se observan en grupos densos o solitarios de hifas aéreas y pueden estar agrupados o solos y poseen una base típicamente subesférica o en forma de ampolla que alberga las conidias agrupadas y juntas.

Aunado a esto, el seguimiento de las poblaciones de garrapata es parte importante de los métodos de control, y brinda gran apoyo en la reducción en el uso de productos químicos, generando menor impacto ambiental, reduciendo los costos económicos a mediano y largo plazo, esto mejora la salud de los bovinos y de los humanos que se relacionan con su entorno, por lo que la investigación es una herramienta fundamental que contribuye a profundizar sobre las mejores maneras de aprovechar las opciones que existen para el control de garrapata por medio de manejo integrado usando varias



estrategias, reduciendo la dependencia de insecticidas químicos, beneficiando así al medio ambiente, preservando la salud y productividad de los bovinos.

Interacciones de la garrapata con el medio ambiente

Las interacciones de las garrapatas con su ambiente son complejas y multifacéticas, los factores como la temperatura, la humedad, la vegetación, la disponibilidad de hospedadores y las actividades humanas afectan tanto su ciclo de vida como su prevalencia (Cuadro 2).

Cuadro 2. Factores que influyen en el comportamiento de búsqueda de larvas de garrapatas fuera del hospedador (Leal *et al.*, 2020).

Factores abióticos/bióticos	Óptimo para la búsqueda de larvas	Descripción
Humedad	≥80–85%	Las larvas limitan su actividad de búsqueda a niveles óptimos de humedad relativa. Las condiciones secas provocan que las larvas se deshidraten.
Temperatura	3–38 °C	Se ha demostrado que las garrapatas adaptadas a temperaturas frías, como <i>I. ricinus</i> , comienzan a buscar a temperaturas tan bajas como 3 °C, mientras que se ha demostrado que la actividad de búsqueda se reduce a ≥ 38 °C.
Precipitación	Precipitaciones a finales de primavera/principios de verano	Las precipitaciones contribuyen a mayores niveles de búsqueda de larvas al proporcionar una humedad óptima, temperaturas más suaves y un menor déficit de saturación.
Agrupamiento	Clústeres más grandes	Los racimos más grandes reducen la pérdida de humedad y maximizan la adhesión del huésped.
Fotoperiodo	Presencia de luz durante el fotoperiodo adecuado	Las garrapatas comienzan a buscar dependiendo del fotoperiodo específico de la especie de garrapata.
Estacionalidad	Relación dependiente de las especies entre la fisiología adaptativa y la ecología	Las fluctuaciones del clima, para una región determinada, determinan pronunciadas desviaciones en la maduración del desarrollo, que crean períodos estacionales de búsqueda.

Para controlar las infestaciones de garrapatas de manera efectiva, es esencial comprender estas interacciones y aplicar estrategias de manejo que tengan en cuenta todos estos aspectos, como el control ambiental, el manejo del ganado, y el uso racional de productos químicos. Al igual que la gran diversidad que existen entre las bacterias, los artrópodos son el grupo de animales más megadiversos en la tierra, encontrándose



prácticamente en todos los ecosistemas. Para subsistir los artrópodos son capaces de aprovechar diversas fuentes de alimento, esto en gran medida debido a la presencia de diversos microorganismos que les permiten obtener y metabolizar nutrientes. En el caso de las garrapatas deben buscar hospederos para abordarlos y poder alimentarse de manera hematófaga.

Hábitat de las garrapatas

Las garrapatas buscan para prosperar los ambientes cálidos y húmedos, donde las temperaturas son moderadas y la humedad es alta, lo que facilita su desarrollo y supervivencia. El clima cálido y húmedo proporciona un entorno favorable para que las garrapatas se reproduzcan y se mantengan activas, especialmente durante la primavera y el verano, épocas del año en las cuales se observan sus poblaciones más numerosas en la región Noreste del País.

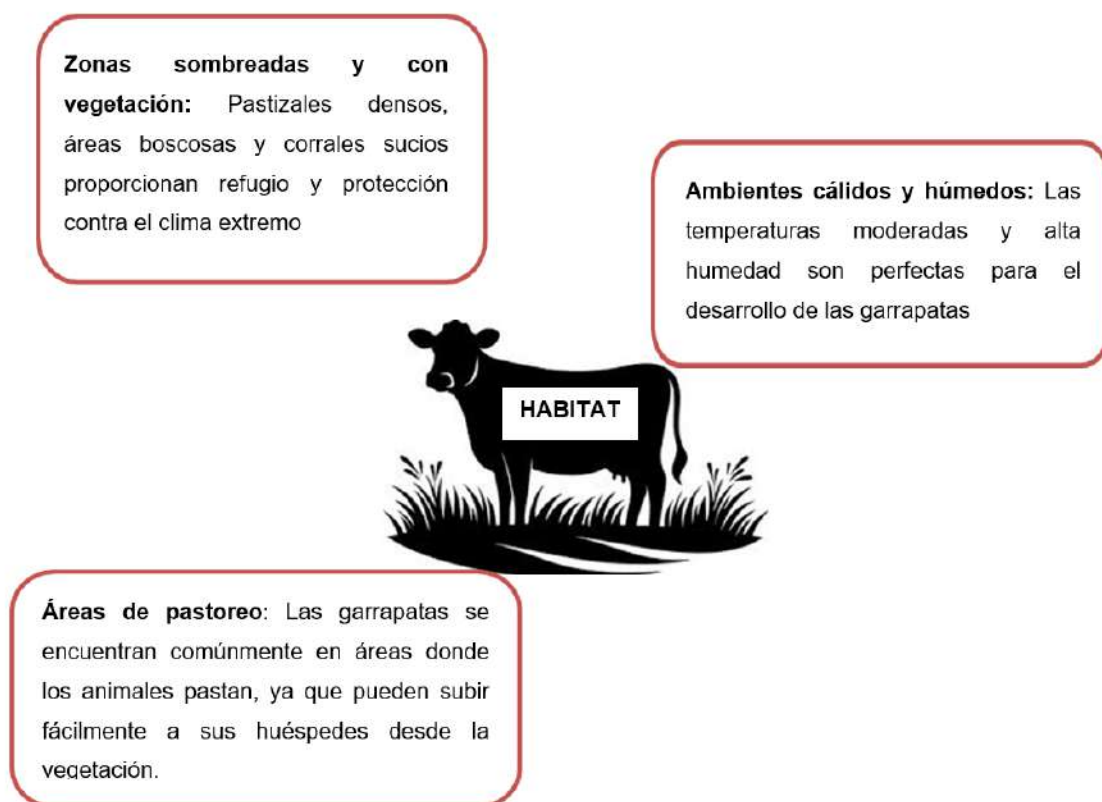


Figura 4. Hábitat de la garrapata el cual busca para completar su ciclo de vida.



Conclusiones

Es de gran importancia fomentar la investigación y el estudio de las garrapatas, debido a la complejidad de su ciclo de vida, así como su diversidad y capacidad de adaptarse a las condiciones adversas de sus diferentes entornos, todo el conocimiento generado es utilizado en los programas de control de estos parásitos, ya sea a nivel de cada unidad de producción, así como en los programas regionales de las organizaciones locales y gubernamentales, generando así mejores condiciones para el desarrollo de los sistemas de producción de bovinos con un manejo integrado de garrapatas.

Bibliografía

- Barrón-Bravo, O., Avilés-Ruiz, R., Ángel-Sahagún, C., Alcalá-Rico, J., Arispe-Vázquez, J., Garza-Cedillo, R. (2023). Caracterización de unidades de producción familiar de bovinos, Llera, Tamaulipas, México. *Abanico Boletín Técnico*. 2: e2023-23. <https://abanicoacademico.com/abanicoboletintecnico/article/view/115>
- Cantú A., Almazan C., García Z., Kunz S. (1999). Evaluación de la resistencia de los mosquicidas contra mosca del cuerno (*Haematobia irritans*) en Tamaulipas. En “Control de la resistencia en garrapata y mosca de importancia veterinaria y enfermedades que transmiten”. IV Seminario Internacional de Parasitología Animal. Puerto Vallarta, México.
- Cen-Aguilar, J.F., Rodríguez-Vivas, R.I., Domínguez-Alpizar, J.L., Wagner, G.G. (1998). Studies on the effect of infection by *Babesia* sp. on oviposition of *Boophilus microplus* engorged females naturally infected in the Mexican tropics. *Veterinary Parasitology*, 78(4), 253-257. doi.org/10.1016/S0304-4017(98)00148-4. [https://doi.org/10.1016/S0304-4017\(98\)00148-4](https://doi.org/10.1016/S0304-4017(98)00148-4)
- Ebani, V.V., Mancianti, F. (2021). Entomopathogenic fungí and bacteria in a veterinary perspective. *Biology*. 10: (6): 479. <https://doi.org/10.3390/biology10060479>
- Estrada-Peña, A. (2015). Arachnida, C. Orden Ixodida: Las garrapatas. *Revista IDE@ - SEA*. 13: 1–15. http://sea-entomologia.org/IDE@/revista_13.pdf
- Fernández-Salas, A, Rodríguez-Vivas, R.I., Alonso-Díaz, M.A. (2012). First report of a *Rhipicephalus microplus* tick population multi-resistant to acaricides and ivermectin in the Mexican tropics. *Veterinary Parasitology* 186: 338-342. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2011.07.028>
- Góngora-Botero C.E., Marín, M.P., Benavides, M.P. (2009). Claves para el éxito del hongo *Beauveria bassiana* como controlador biológico de la broca del café. *Avances Técnicos Cenicafé*. (16) 3–8. <https://www.cenicafe.org/es/publications/avto384.pdf>



- Guglielmone, A.A., Robbins, R.G., Apanaskevich, D.A., Petney, T.N., A. Estrada-Peña, Horak, I.G., Shao, R., Barker, S.C. (2010). The Argasidae, Ixodidae and Nuttalliellidae (Acari: Ixodida) of the world: a list of valid species names. *Zootaxa*. 2528: 1-28. <https://pdfs.semanticscholar.org/3374/403d4b7cad2910caod138301d123878057b9.pdf>
- Guzmán Cornejo, M.C. (2020). Importancia e historia sobre garrapatas en vertebrados de México. XII Seminario Rafael Martín del Campo y Sánchez. <https://www.youtube.com/watch?v=di93q34FmzA>
- Kamp-Fernandes, E.K., Pinheiro-Bittencourt, V.R.E. (2008). Entomopathogenic fungi against South American tick species. *Experimental of Applied Acarology*. 46: 71-93. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10493-008-9161-y>
- Leal, B., Zamora, E., Fuentes, A., Thomas, DB, Dearth, RK. (2020). Questing by Tick Larvae (Acari: Ixodidae): A Review of the Influences That Affect Off-Host Survival. *Annals of the Entomological Society of America*. 113 (6): 425-438, <https://doi.org/10.1093/aesa/saaa013>
- Lew-Tabor, A.E., Rodríguez-Valle, M.R. (2016). A review of reverse vaccinology approaches for the development of vaccines against ticks and tickborne diseases. *Ticks and tick-borne diseases*. 7 (4): 573-585. <https://doi.org/10.1016/j.ttbdis.2015.12.012>
- Nath, S., Mandal, S., Pal, S., Jadhao, S., Ottalwar, N., Sanyal, P. (2018). Impact and management of acaricide resistance-pertaining to sustainable control of ticks. *International Journal of Livestock Research*. 8 (10): 46-60. <https://doi.org/10.5455/ijlr.20180402121612>
- Ojeda-Chi, M.M., Rodríguez-Vivas, R.I., Galindo-Velasco, E., Lezama-Gutiérrez, R. (2010). Laboratory and field evaluation of *Metarhizium anisopliae* (Deuteromycotina: Hyphomycetes) for the control of *Rhipicephalus microplus* (Acari: Ixodidae) in Mexican tropics. *Veterinary Parasitology* 170: 348-354. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2010.02.022>
- Ojeda-Chi, M.M., Rodríguez-Vivas, R.I., Galindo-Velasco, E., Lezama-Gutiérrez, R., Cruz-Vázquez, R. (2011). Control de *Rhipicephalus microplus* (Acari: Ixodidae) mediante el uso del hongo entomopatógeno *Metarhizium anisopliae* (Hypocreales: Clavicipitaceae). *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 2 (2): 177-192. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=265619710005>
- Osorio-Arce, M.M., Segura-Correa, J.C., 2005. Factores que afectan la curva de lactancia de vacas *Bos taurus* x *Bos indicus* en un sistema de doble propósito en el trópico húmedo de Tabasco, México. *Técnica Pecuaria en México*. 43 (1): 127-137. <https://www.redalyc.org/pdf/613/61343109.pdf>



- Piesman J., Eisen L. (2008). Prevention of tick-borne diseases. *Annual reviews of entomology*. 53: 323-343. <https://doi.org/10.1146/annurev.ento.53.103106.093429>
- Pucheta-Díaz, M., Flores-Macías, A., Rodríguez-Navarro, S., Torre, D.M. (2006). Mecanismo de acción de Los Hongos Entomopatógenos. *Interciencia*. 31(12): 856-860. https://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S0378-18442006001200006&script=sci_arttext
- Rehner, S., Minnis, A.M., Sung, G.H., Luangsa-Ard, J.J., Devotto, L., Humber, R. (2011). Phylogeny and systematics of the anamorphic, entomopathogenic genus *Beauveria*. *Mycologia*. 103 (5): 1055-1073. <https://doi.org/10.3852/10-302>
- Rodríguez-Vivas, R.I., Grisi, L., Pérez-de León, A.A., Silva-Villela, H., Torres-Acosta, J.F., Fragoso-Sánchez, H., Romero-Salas, D., Rosario-Cruz, R., Saldiema, F., García Carrasco, D. (2017). Potential economic impact assessment for cattle parasites in Mexico. Review. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*. 8 (1): 61-74. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11242017000100061
- Rodríguez-Vivas, R.I., Ojeda-Chi, M.M., Pérez-Cogollo, L.C., Rosado-Aguilar, J.A. (2011). Epidemiología y control de *Rhipicephalus (Boophilus) microplus* en México. Capítulo 33. En: Epidemiología de enfermedades parasitarias en animales domésticos. Editores: Quiroz RH, Figueroa CJA, López AME. AMPAVE. pp: 477-504. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/848424/8381_T_1_S_1_-_Epidemiologia_de_enfermedades_parasitarias-compressed.pdf
- Rodríguez Vivas, R.I., Rosado, A.A., Basto, E.G., García, V.Z.S., Rosario, C.R., Fragoso, S. (2006). Manual técnico para el control de garrapatas en el ganado bovino. Publicación Técnica No. 4, CENID- PAVET. Jiutepec, Morelos, México. pp. 1-11.
- Rodríguez-Vivas R.I., Rosado-Aguilar, J.A., Ojeda-Chi, M.M., Pérez-Cogollo, L.C., Trinidad-Martínez, I., Bolio-González, M.E. (2014). Control integrado de garrapatas en la ganadería bovina. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*. 1 (3): 295-308. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-90282014000300009&lng=es&tlng=es.
- Rodríguez-Vivas, R.I., Rivas, A.L., Chowell, G., Fragoso, S.H., Rosario, C.R., García, Z., Smith, S.D., Williams, J.J., Schwager, S.J. (2007). Spatial distribution of acaricide profiles (*Boophilus microplus* strains susceptible or resistant to acaricides) in southeastern Mexico. *Veterinary Parasitology*, 146: 158-169. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2007.01.016>
- Soberanes-Céspedes, N., Santamaría-Vargas, M., Fragoso-Sánchez, H., García-Vázquez, Z. (2002). Primer caso de resistencia al amitraz en la garrapata del ganado *Boophilus*



microplus en México. *Técnica Pecuaria en México*. 40 (1): 81-92.
<https://cienciaspecuarias.inifap.gob.mx/index.php/Pecuarias/article/view/1312>

Strydom, T., Lavan, R.P., Torres, S., Heaney, K. (2023). The economic impact of parasitism from nematodes, trematodes and ticks on beef cattle production. *Animals*. 13 (10): 1599.
<https://doi.org/10.3390/ani13101599>

Showler, A.T., Saelao, P. (2022). Integrative alternative tactics for ixodid control. *Insects*. 13 (3): 302. <https://doi.org/10.3390/insects13030302>

Stafford, K.C., Williams, S.C., Molaei, G. (2017). Integrated pest management in controlling ticks and tick-associated diseases. *Journal of Integrated Pest Management*. 8 (1): 28.
<https://doi.org/10.1093/jipm/pmx018>

Tulloch, M. 1976. The genus *Metarhizium*. Transactions of the british mycological Society. 66: 407-411. [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(76\)80209-4](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(76)80209-4)

Xiao, G., Sheng-Hua, Y., Zheng, P., Zheng-Liang, W., Zhang, S., Xie, XQ, Shang, Y., Leger, R.J.S., Zhao, G.P., Wang, C., Feng, M.G. (2012). Genomic perspectives on the evolution of fungal entomopathogenicity in *Beauveria bassiana*. *Scientific reports*. 2 (1): 483.
<https://doi.org/10.1038/srep00483>

Prácticas tecnológicas en ranchos ganaderos en el norte de México

Sergio Iván Román-Ponce.
José María Carrera-Chávez.
Francisco Castillo-Rangel.
Edith Rojas-Anaya.





Resumen

Este capítulo aborda la importancia de la adopción de prácticas tecnológicas para mejorar la productividad, competitividad y sostenibilidad del sistema "vaca-cría" en la región. Se enfatiza: sanidad, reproducción, genética, nutrición y manejo de pastizales. En sanidad se resalta la necesidad de implementar medidas preventivas contra enfermedades virales, bacterianas y parasitarias, la bioseguridad, el diagnóstico adecuado y aplicación de calendarios de vacunación, advirtiendo sobre la resistencia a los antibióticos y desparasitantes por uso indiscriminado. La reproducción se enfoca en el sistema "vaca-cría", comparando el empadre continuo con el controlado y destacando las ventajas de este último para una mejor planificación y eficiencia reproductiva, además de mencionar herramientas como la inseminación artificial y la sincronización de celos. El mejoramiento genético se aborda mediante sistemas de cruzamiento (rotacional y terminal) para explotar la heterosis, lo que resulta en mejoras de hasta un 14-16% en el rendimiento al destete y una mayor adaptabilidad. Respecto a la nutrición, se proponen estrategias como la suplementación energética y proteica, el uso de bloques multi-nutricionales y la gestión de minerales para compensar deficiencias del forraje, logrando incrementos significativos en la ganancia de peso y la eficiencia reproductiva. Finalmente, el manejo de pastizales subraya la importancia de la rotación de potreros, el control del sobrepastoreo y las prácticas de manejo sustentable del suelo para la regeneración de la vegetación, la conservación del suelo y el aumento de la producción de forraje. El documento también introduce el modelo GGAVATT (Grupos Ganaderos de Validación y Transferencia de Tecnología) como una estrategia efectiva para la organización de productores y la transferencia de conocimiento, demostrando incrementos en la productividad de hasta 13-16%. Sin embargo, se reconocen desafíos institucionales, como la fragmentación del apoyo gubernamental, la limitada vinculación entre investigación y educación, y la burocracia, que impiden la plena realización del potencial de estos modelos. En conclusión, la integración de estas prácticas tecnológicas, respaldada por la capacitación y la coordinación interinstitucional, se considera esencial para un sector ganadero resiliente y competitivo en el norte de México.

Palabras clave: Ganadería bovina, Innovación tecnológica, Manejo de ranchos, Productividad pecuaria, Norte de México.



Introducción

La ganadería bovina en México es una de las principales actividades del sector agropecuario, por la contribución que realiza a la cadena productiva de cárnicos, así como su participación en la balanza comercial del país. Es la segunda actividad productiva más difundida en todo el país, después de la agricultura, se realiza en casi todo el territorio nacional, en diferentes condiciones climáticas y con sistemas de producción adaptados a cada región.

El sistema “vaca-cría” es el más utilizado en la zona norte del país, y más de la mitad de los 196 millones hectáreas en México se utilizan para la producción de ganado. En la región norte de México, la producción de bovinos carne se realiza principalmente con razas europeas especializadas (*Bos taurus taurus*), entre las que predominan Angus, Charolais, Hereford, entre otras alternativas raciales con cruces de cebú (*Bos taurus indicus*) en las zonas tropicales como es el caso de Tamaulipas.

El sistema “vaca-cría” consiste en la producción de ganado bajo condiciones extensivas de pastoreo, aprovechando el forraje disponible de la vegetación nativa de los agostaderos y tiene como finalidad la producción y venta de crías al destete, de los 6 a 12 meses de edad. En el país, la mayoría de los becerros destetados se venden para engorda dentro del territorio nacional. Sin embargo, en el norte de México, un mayor porcentaje de estos son exportados (20.8 %), principalmente en las zonas cercanas a la frontera que conservan un estatus sanitario adecuado para la exportación a los Estados Unidos de América en donde tienen un mejor precio.

En los últimos años, las exportaciones han variado entre 768,983 cabezas en 2009 y 1,405,888 en 2020. Para el ciclo 2023-2024, se exportaron 1,323,565 cabezas de ganado, de las cuales 844,441 fueron becerros y 479,124 fueron vaquillas. Los estados con mayor participación en la venta de bovinos en pie hacia Estados Unidos de América son Chihuahua (556,263 cabezas), Sonora (497,696 cabezas), Durango (211,545 cabezas), Tamaulipas (70,975 cabezas), y Coahuila (61,722 cabezas).

En general, en los últimos ciclos se han presentado incrementos en las exportaciones de ganado en pie, con especial énfasis en los becerros al destete, en gran medida derivado de mejoras en los protocolos sanitarios, el cumplimiento de estándares internacionales en colaboración con el país vecino y la intensificación de la capacitación de los productores que ha dado como resultado en la adopción de prácticas tecnológicas en los ranchos ganaderos que han permitido mejorar la productividad de las unidades de producción en el norte de México.

El objetivo de este capítulo es revisar las prácticas tecnológicas en las áreas de sanidad, reproducción, genética, nutrición y manejo de pastizales; que a consideración de los autores; pudieran ser consideradas como esenciales para que un rancho ganadero con el sistema vaca cría, productor de becerros para la engorda o para la exportación en el norte de México pueda ser productivo, competitivo y sustentable.



Impacto de los microorganismos en los ranchos ganaderos; efectos y medidas preventivas

En los ranchos ganaderos independientemente del tipo de ganado, sistema productivo o nivel de tecnificación, una de las principales actividades que requiere atención tanto técnica como económica es la implementación de medidas de manejo preventivo contra enfermedades infecciosas. Los responsables de dichas enfermedades incluyen virus, bacterias, hongos, endo y ecto parásitos, para los cuales existen medidas específicas de prevención y control que juegan un papel crucial en el mantenimiento de la sanidad de los ranchos ganaderos. Sin embargo, su implementación, en ocasiones puede representar algunos desafíos.

La transmisión y establecimiento de alguno de los agentes infecciosos, es derivado de pocas o nulas medidas de bioseguridad, además de la implementación de medidas no adecuadas para el tipo de producción, practicas mal ejecutadas, así como el uso de tratamientos o vacunas no indicados. En cuanto a la bioseguridad, es un término absoluto, en donde se pueden implementar de manera escalonada dependiendo del tamaño del hato, pero no de manera parcial o incompleta, ya que esto lleva al fracaso en la implementación de las buenas prácticas. Para lo anterior, tanto el productor como el asesor técnico especializado deberán realizar de manera conjunta, el diagnóstico in situ de las condiciones de producción de la unidad, lo cual desde luego debe incluir además de la inspección y encuestas, el diagnóstico de algunas de las enfermedades de impacto sanitario y económico; además de aquellas que sean obligatorias bajo el marco legal aplicable en México. Por lo que son de observancia, para implementar las medidas y protocolos que son establecidos para las Normas Oficiales Mexicanas, según la región geográfica en la que se encuentra la unidad de producción. Adicional a las medidas de prevención, desde luego debe darse seguimiento mediante la vigilancia epidemiológica con los ensayos de laboratorio específicos. Los dos principales ejemplos de lo anterior es la atención a las campañas de que atienden brucelosis y tuberculosis bovina. Adicional a lo anterior, cuando se habla de ganado lechero el monitoreo y control de la mastitis, de los agentes infecciosos causantes, sus efectos y consecuencias de esta que van en detrimento de la producción. Estas tres son un ejemplo de enfermedades que provocan la disminución significativa en la producción y tienen un importante impacto económico en las unidades de producción de bovinos.

Especialmente en el caso de las enfermedades bacterianas presentes, es relevante la atención al adecuado diagnóstico de estas, que permita a los técnicos que atienden el hato, proporcionar los tratamientos profilácticos específicos para el agente infeccioso detectado. La falta de atención a este diagnóstico deriva en la administración inadecuada de antibióticos, que contribuyen de forma directa a pérdidas económicas ya que se está gastando en tratamientos no funcionales que no solucionarán el problema, por otro lado, se contribuye a tener bacterias cada vez más resistentes a una amplia gama de antibióticos.



En la actualidad se han observado bovinos con resistencia a más de siete antibióticos derivado de las malas prácticas sanitarias, por lo que la capacitación continua y el seguimiento es de gran relevancia.

Por otra parte, los virus pueden causar enfermedades como la rabia, el complejo respiratorio bovino o complejo abortivo, entre muchas otras que en la actualidad son consideradas como exóticas en nuestro país; y que, sin embargo, se debe poner atención a las medidas de bioseguridad con la finalidad de que estas no reemerjan como la fiebre aftosa, entre otras. En general, las infecciones virales pueden propagarse rápidamente entre los animales por sus mecanismos de transmisión y ciclos de replicación particulares. Para ello la medicina veterinaria ha desarrollado un sinnúmero de vacunas que deben ser aplicadas según los factores de riesgo de la región en donde se encuentre la unidad de producción. Aunque es pertinente mencionar, que en México existen agentes infecciosos que son endémicos en la mayor parte del territorio nacional como son la rabia parálitica, el virus causante de la diarrea viral bovina, el virus causante de la rinotraqueitis infecciosa entre otras, y que han causado brotes que pueden tener consecuencias devastadoras para los ranchos. Por lo cual, los calendarios de vacunación deben establecerse diseñados teniendo en consideración la edad de los animales de la unidad de producción, la estacionalidad de manejo y en la medida de lo posible en pleno conocimiento de los resultados de laboratorio pertinentes de los hatos, además del historial clínico que el asesor técnico lleve a cabo en la unidad de producción.

En el ámbito de la sanidad animal, las infecciones parasitarias, a menudo relegadas a un segundo plano, requieren una atención constante en las unidades de producción bovina. A pesar de la existencia de protocolos para ectoparásitos, como los garrapaticidas, su aplicación inoportuna o indiscriminada ha propiciado la resistencia a los productos farmacéuticos, replicando una problemática similar a la observada con los antibióticos. Por ello, se subraya la importancia de una evaluación exhaustiva en cada rancho para implementar baños de inmersión, aspersion o tratamientos tópicos adaptados a las instalaciones y al manejo específico de la unidad. Se recomienda un manejo integrado de parásitos para prevenir el desarrollo de resistencia, el cual implica diversas estrategias adaptadas a las zonas geográficas y periodos de infestación. Un desafío particular lo representa la mosca *Cochliomyia hominivorax*, conocida por causar el gusano barrenador del ganado, un parásito silencioso que deposita sus huevos en heridas abiertas de animales de sangre caliente. Las larvas resultantes se nutren de los tejidos vivos del hospedero, perforando y profundizando las lesiones debido a sus ganchos bucales y espinas en forma de tornillo, lo que genera heridas cavernosas. Esta mosca es endémica de América, y aunque prefiere climas tropicales y subtropicales, puede hibernar en temperaturas inferiores a los 16 grados Celsius. El tratamiento de las infestaciones, que incluye la limpieza minuciosa de la herida, la aplicación de insecticidas adecuados y el uso de cicatrizantes, conlleva elevados costos económicos y puede imponer restricciones al



comercio pecuario. Si bien es inusual en humanos, los bovinos, especialmente los becerros, son los principales hospederos. Estados Unidos implementó un método de erradicación mediante la liberación de machos estériles, aunque la evolución de las hembras para detectar la esterilidad ha incrementado la necesidad de liberar un mayor número de insectos estériles. México ha logrado mantener esta plaga fuera de su territorio por más de tres décadas, sin embargo, su avance en Centroamérica ha activado el Dispositivo Nacional de Emergencia de Sanidad Animal (DINESA) en 2024 para reforzar la vigilancia epidemiológica en el sureste del país. Ante cualquier detección, se debe notificar a la Comisión México-Estados Unidos para la Prevención de la Fiebre Aftosa y otras Enfermedades Exóticas de los Animales (CPA). Además de los ectoparásitos, es crucial el diagnóstico clínico y laboratorio de infecciones por protozoarios, nematodos, cestodos y trematodos, como la tricomoniasis, neospora, fasciolosis, trichostrongilosis, babesiosis y anaplasmosis, las cuales pueden ocasionar anemia, diarrea, pérdida de condición corporal y, en casos graves, la muerte de los animales.

A manera de conclusión, la atención a la sanidad de cualquier unidad de producción de ganado bovino es integral, las medidas siempre son acumulativas y es necesario siempre hacer el diagnóstico inicial por parte del asesor sanitario de la unidad. Los microorganismos que ingresen a un hato por desatención a las medidas preventivas y de bioseguridad, pueden tener efectos devastadores en los ranchos ganaderos, afectando la salud de los animales y causando pérdidas económicas severas. Además, esto debe ser pensado también de manera colectiva por las asociaciones o uniones ganaderas regionales para una mejor prevención y capacitación. El trabajo conjunto, el cuidado de los tratamientos adecuados, así como el diagnóstico oportuno, permiten la implementación de medidas preventivas pertinentes y es posible controlar y disminuir su impacto, asegurando un ambiente saludable y productivo para el ganado.

Sistemas ganaderos y manejo reproductivo en México

En México, la ganadería bovina se desarrolla bajo esquemas diversos: extensivo, semi-intensivo e intensivo. Las regiones tropicales, como Sinaloa, concentran unidades de producción de doble propósito, en las cuales se combina la producción de leche y carne con bajo uso de tecnología. En Tamaulipas se cuenta con ambos tipos de sistemas, en mayor porcentaje los especializados en carne y menos cuantiosas los de doble propósito. En contraste, regiones como el norte del país, incluyendo estados como Chihuahua y Zacatecas, presentan sistemas especializados en carne bajo esquemas más organizados.

Uno de los aspectos clave en estos sistemas es la gestión del empadre. El empadre continuo se define como el acceso permanente del toro al grupo de vacas durante todo el año. Es una práctica común en sistemas de bajos recursos debido a su simplicidad de manejo. Sin embargo, esta estrategia dificulta la planificación del ciclo productivo, ya que



los partos se distribuyen a lo largo del año, lo que complica las labores de alimentación, sanidad, y comercialización.

Por su parte, el empadre controlado limita el periodo de monta a una ventana de 60 a 90 días, lo que permite concentrar los partos en épocas estratégicas. Esto no solo mejora la eficiencia reproductiva, sino que también permite la preparación de los toros y las hembras, permitiendo un manejo más ordenado, planificado y sistematizado del hato, así como una mejor respuesta a condiciones climáticas y forrajeras.

Comparación entre empadre controlado y empadre continuo

Estudios comparativos realizados en distintas regiones del país han mostrado que el empadre controlado presenta ventajas claras frente al empadre continuo. Por ejemplo, en un estudio llevado a cabo en ganado Charoláis con época de empadre restringido, se observaron menores intervalos entre partos y mayor eficiencia reproductiva. Asimismo, en investigaciones realizadas en Zacatecas y Sinaloa, los productores que implementaron empadre estacional lograron una mejor sincronía en las actividades productivas, reduciendo los costos operativos y mejorando la rentabilidad.

Santamaría y Ledezma en 1987 evaluaron tres prácticas de manejo reproductivo en ganado de carne y encontraron que los sistemas con empadre corto (60 días) obtuvieron mayores tasas de preñez (78%) en comparación con empadres largos o continuos (65%), además de una menor dispersión de los partos. Estos resultados concuerdan con hallazgos más recientes de Román-Ponce et al. (2024), quienes documentan que los ranchos del norte de Chihuahua con empadre controlado logran índices de parición más altos y menores tasas de vacas vacías al final del ciclo productivo. Cabe destacar que la implementación del empadre controlado requiere ser acompañada por una suplementación nutricional específica y un manejo estratégico integral, con el propósito de garantizar la obtención de los resultados esperados.

A pesar de estos beneficios, el empadre continuo continúa siendo prevalente en muchas unidades de producción. Las razones incluyen la falta de infraestructura, el desconocimiento técnico, y la escasa asistencia técnica en zonas rurales. Esta realidad limita el aprovechamiento del potencial genético del hato y genera ineficiencias que afectan tanto la rentabilidad como la sostenibilidad del sistema vaca-cría.

Impacto de las técnicas reproductivas en la eficiencia del sistema vaca-cría

La eficiencia del sistema vaca-cría no depende únicamente del tipo de empadre, sino también de la integración de herramientas reproductivas modernas. Entre ellas destacan la inseminación artificial, la sincronización de celos, el diagnóstico temprano de gestación, y el uso de registros productivos y reproductivos impresos o digitalizados.

Ruíz et al. (2024) destacan que las unidades de producción con mayor nivel de tecnificación presentan intervalos entre partos de 12 a 14 meses, en contraste con



promedios nacionales de hasta 18 meses en sistemas tradicionales. Asimismo, la tasa de parición puede incrementarse en 15 a 25% cuando se aplican protocolos de sincronización en combinación con inseminación artificial.

No obstante, la adopción de estas técnicas presenta desafíos significativos. Diversos autores señalan que, en varias regiones del país como por ejemplo Sinaloa, muchos productores enfrentan limitantes económicas y técnicas que impiden la adopción generalizada de estas prácticas. Además, la capacitación del personal, la disponibilidad de técnicos reproductivos, y el acceso a tecnologías apropiadas son factores determinantes para su éxito.

A pesar de estas limitaciones, los casos documentados en Zacatecas y Chihuahua demuestran que la implementación progresiva de técnicas reproductivas, incluso en condiciones semi-intensivas, puede generar mejoras sustanciales en la eficiencia del sistema vaca-cría.

El manejo reproductivo es una herramienta esencial para optimizar la productividad en los sistemas vaca-cría de México. La comparación entre empadre continuo y controlado evidencia que este último permite mejorar la eficiencia reproductiva y facilita una mejor planificación de recursos. A pesar de los beneficios demostrados, su adopción aún es limitada en muchas regiones del país debido a factores estructurales, económicos y de capacitación.

La incorporación de técnicas reproductivas modernas representa una alternativa viable para incrementar la rentabilidad y sostenibilidad del sector, y se fortalece al estar acompañada de estrategias de extensión, financiamiento rural y fortalecimiento institucional. Las políticas públicas orientadas a la capacitación y el acceso tecnológico pueden facilitar la transición hacia sistemas de producción más eficientes y resilientes.

Impacto del manejo del agostadero en ranchos ganaderos en el sistema vaca cría

En las últimas décadas, la sostenibilidad de los sistemas ganaderos se ha convertido en una prioridad para la soberanía alimentaria, especialmente en regiones de climas áridos y semiáridos como el norte de México. La evidencia científica reciente resalta la necesidad de implementar prácticas de manejo que promuevan la regeneración de pastizales, la conservación del suelo y el aumento de la productividad animal. En este contexto, estrategias como la rotación de potreros, el control del sobrepastoreo y las técnicas avanzadas de manejo sustentable del suelo son fundamentales para enfrentar los desafíos ambientales y económicos de los ranchos ganaderos en la región.

Rotación de potreros

La rotación de potreros permite distribuir equitativamente la carga animal en diversas



áreas, así como planificar el desarrollo del hato en base a la existencia de alimento, ofreciendo periodos de descanso esenciales para la recuperación y regeneración de la vegetación. Numerosos estudios han demostrado que la alternancia de zonas de pastoreo y descanso no solo reduce el estrés en la vegetación, sino que también mejora la diversidad forrajera y favorece la infiltración de agua en el suelo. De acuerdo con la literatura, la implementación de esta práctica puede incrementar la producción de forraje entre un 20% y un 30%, lo que se traduce en una mejora sustancial de la calidad del pasto y, por ende, del rendimiento y la salud del ganado.

Control del sobrepastoreo

El sobrepastoreo constituye uno de los principales riesgos para la conservación de los pastizales y praderas. Una carga animal excesiva o distribuida inadecuadamente puede disminuir la cobertura vegetal de manera significativa y promover la erosión del suelo, llegando incluso a provocar la pérdida irreversible de su capacidad productiva, fertilidad y biodiversidad. La revisión de literatura indica que, mediante una regulación estricta de la carga animal y la planificación adecuada de descansos, es posible reducir la erosión en hasta un 50% y aumentar la cobertura vegetal en torno a un 35 – 40% en comparación con sistemas de pastoreo continuo. Además, la adopción de tecnologías para el monitoreo –como sensores remotos y análisis de imágenes aéreas– permite evaluar en tiempo real las condiciones del pastizal, facilitando intervenciones precisas basadas en datos empíricos y cuantitativos.

Estrategias de manejo sustentable del suelo

El manejo sustentable del suelo se centra en la conservación de la materia orgánica y el ciclo del carbono y del agua, el mantenimiento de la estructura edáfica y la prevención de procesos erosivos. En el contexto de la ganadería extensiva, la aplicación de tecnologías orgánicas, la integración de cultivos de cobertura y la adopción de sistemas de labranza reducida o mínima, los sistemas silvopastoriles en todas sus variedades, resultan esenciales para recuperar las propiedades de suelos degradados. Diversos trabajos han observado que estas prácticas pueden aumentar el contenido de materia orgánica en el suelo en un 10– 20% y mejorar la retención de agua en proporciones similares, lo cual favorece la disponibilidad de nutrientes y fortalece la resiliencia del ecosistema frente a la variabilidad climática. La combinación de la agricultura de conservación y técnicas de agroforestería potencia estos efectos, ofreciendo beneficios ambientales y económicos a corto, mediano y largo plazo.

Recomendaciones para ranchos ganaderos en el Norte de México

Considerando la diversidad de condiciones climáticas y edáficas en el norte del país, las siguientes recomendaciones se diseñan para adaptarse y optimizar el manejo de cada



rancho:

- a. Implementación planificada de la rotación de potreros: Establecer calendarios que permitan tiempos de recuperación óptimos, considerando las particularidades locales y las especies forrajeras predominantes. Esta práctica puede aumentar la producción forrajera en un 20–30%, repercutiendo positivamente en la salud y el rendimiento del ganado y de la unidad de producción en general.
- b. Regulación rigurosa de la carga animal: Realizar un monitoreo continuo de la cobertura vegetal y aplicar sistemas de pastoreo rotacional para prevenir el sobrepastoreo. Este control contribuye a reducir el riesgo de erosión hasta en un 50% y a mantener una cobertura vegetal un 35 – 40% mayor que en sistemas no gestionados.
- c. Adopción de estrategias de manejo sustentable del suelo: Integrar el uso de enmiendas orgánicas, cultivos de cobertura y prácticas de labranza reducida, lo cual puede mejorar la calidad del suelo aumentando la materia orgánica y la capacidad de retención de agua en un 10–20%, lo que implica estar mejor preparado para la época seca y fortalecer la agrobiodiversidad de la unidad de producción.
- d. Incorporación de tecnologías de monitoreo: Utilizar herramientas como drones, imágenes satelitales y sensores de humedad para evaluar de forma precisa y oportuna las condiciones del pastizal, facilitando intervenciones basadas en datos cuantificables.
- e. Capacitación continua de los productores: Promover el intercambio de experiencias y garantizar el acceso a asistencia técnica especializada y con el seguimiento adecuado. La formación integral de los productores puede traducirse en incrementos de la productividad animal de hasta un 15%, gracias a una mejor aplicación de las prácticas recomendadas.

La integración de estas prácticas permite optimizar el uso de recursos naturales, mejorar la resiliencia de los sistemas de producción, favorece la agrobiodiversidad de especies animales, vegetales y organismos del subsuelo, para de esta manera contribuir significativamente a la conservación ambiental.

La información aquí presentada evidencia que el manejo integral del agostadero, basado en la rotación de potreros, el control del sobrepastoreo y la adopción de estrategias sustentables para el manejo del suelo, es esencial para garantizar la productividad y sostenibilidad de los ranchos ganaderos en el norte de México. Las ventajas cuantificadas –incluyendo aumentos del 20 – 30% en la producción forrajera, reducciones de hasta un 50% en la erosión y mejoras del 10 – 20% en la calidad del suelo– demuestran el potencial de estas prácticas. Sumado al uso de tecnologías de monitoreo y a la capacitación continua



de los productores, este enfoque integrado tiene un impacto positivo tanto en el rendimiento económico como en la preservación ambiental, marcando un camino claro hacia la mejora continua y la resiliencia de los sistemas productivos.

Impacto de prácticas tecnologías de alimentación en ranchos ganaderos del Norte de México

En las zonas semiáridas y áridas del norte de México, la variabilidad en la calidad y cantidad del forraje constituye un desafío relevante para la nutrición en sistemas de pastoreo. En estos ranchos, orientados a la producción de becerros para engorda y exportación, la adecuada provisión de nutrientes es esencial para asegurar la salud, el crecimiento, la reproducción y la rentabilidad de los sistemas de producción. La implementación de estrategias tecnológicas —como la suplementación energética y proteica, la utilización de bloques multi-nutricionales y la suplementación con sales minerales— se ha convertido en una herramienta fundamental para optimizar el desempeño productivo y mejorar la eficiencia económica.

Suplementación energética y proteica

La suplementación energética y proteica se utiliza para compensar las deficiencias nutricionales y el balance energético negativo, propios de las dietas basadas en el pastoreo, sobre todo durante periodos críticos como las sequías o la baja calidad del forraje. En ranchos destinados a la producción de becerros, esta práctica resulta decisiva para garantizar que tanto el ganado lactante como los becerros en desarrollo reciban los nutrientes necesarios para alcanzar un crecimiento óptimo. Diversos estudios han registrado incrementos en la ganancia de peso entre un 12% y un 25%, junto con mejoras en la condición corporal y en índices reproductivos—reflejados en aumentos en la tasa de preñez aproximados del 10% al 15%. Estos efectos influyen positivamente en aspectos críticos para la engorda y la exportación de becerros y en condiciones severas de sequía pueden salvar la vida de los bovinos.

Utilización de bloques multi-nutricionales

Los bloques multi-nutricionales constituyen suplementos sólidos formulados a partir de forrajes triturados, concentrados energéticos, subproductos agroindustriales, minerales y en ocasiones, aditivos que facilitan su conservación y manejo. Su modalidad de consumo lento y controlado resulta especialmente adecuada para sistemas de pastoreo, ya que asegura una ingesta gradual de nutrientes sin incurrir en consumos excesivos. En ranchos dedicados a la producción de becerros, la adopción de estos bloques ha permitido mejorar la digestibilidad del forraje y estabilizar la ingesta, traduciéndose en incrementos de la ganancia diaria de peso de hasta un 20% en comparación con sistemas que no emplean esta tecnología. Además, la utilización de insumos locales y un proceso de elaboración de



bajo costo hacen de esta práctica una alternativa viable y rentable para pequeños y medianos productores.

Suplementación con sales minerales

La gestión de minerales abarca la planificación y suplementación de elementos inorgánicos esenciales—como calcio, fósforo, magnesio, zinc y cobre— críticos para la salud ósea, el funcionamiento inmunológico y las funciones productivas y reproductivas. En los sistemas de pastoreo propios del norte de México, el forraje a menudo presenta niveles insuficientes de estos nutrientes. Mediante una estrategia de suplementación mineral adecuada, se logra una mejora en la eficiencia de conversión del forraje a peso vivo, en torno a un 10%–15%, al tiempo que se reduce la incidencia de enfermedades nutricionales y reproductivas. La corrección de estas deficiencias repercute en una disminución de los costos veterinarios y en una mayor estabilidad productiva y reproductiva, factores decisivos para la competitividad y rentabilidad de los ranchos dedicados a la engorda y exportación de becerros.

La adopción de prácticas nutricionales en ranchos ganaderos de pastoreo en el norte de México, orientados a la producción de becerros para engorda y exportación, contribuye de forma decisiva a la mejora del rendimiento productivo y económico. La integración de estrategias como la suplementación energética y proteica, la utilización de bloques multi-nutricionales y la eficaz gestión de minerales ha generado incrementos en la ganancia de peso, optimización en la conversión de materia seca y mejoras en la salud reproductiva. Estos avances se traducen en un retorno de inversión favorable y en una reducción de los costos operativos, permitiendo enfrentar de manera efectiva los desafíos de los sistemas de pastoreo en condiciones ambientales adversas.

Asimismo, se proponen tres líneas de acción que ofrecen ideas concretas para potenciar la innovación en el sector:

- a. Estudios de campo comparativos: Su realización permitirá evaluar las variaciones en el rendimiento productivo en diferentes condiciones y regiones, ajustando las prácticas a contextos específicos, así como la interacción de técnicos con los ganaderos para su desarrollo.
- b. Análisis costo-beneficio a largo plazo: Estos estudios contribuirán a una toma de decisiones fundamentada, demostrando la sostenibilidad económica de la implementación de estas técnicas, en sistemas de producción que pueden servir como ranchos modelo.
- c. Estrategias de capacitación y difusión tecnológica: La promoción de programas orientados a productores y técnicos facilitará la adopción y optimización de estas prácticas, fortaleciendo la competitividad y sostenibilidad del sector ganadero.



Estas recomendaciones se perfilan como alternativas sólidas para avanzar hacia modelos de producción ganadera más competitivos y sostenibles, adaptados a las particularidades de los ranchos del norte de México dedicados a la cría, engorda y exportación de becerros.

Impacto de prácticas tecnológicas sobre mejoramiento genético en el sistema vaca-cría

Sistemas de Cruzamiento para la producción de becerros para la exportación. El cruzamiento es una técnica reproductiva ampliamente adoptada en la industria animal por su capacidad para explotar la heterosis, fenómeno que permite obtener descendientes con mejoras en crecimiento, salud y fertilidad en comparación con sus progenitores. Esta estrategia facilita además el aprovechamiento óptimo de la diversidad genética presente entre razas y líneas. En este documento se analizan las alternativas de sistemas de cruzamiento empleadas en la producción de becerros destinados a la exportación.

Diversidad genética y mejoramiento genético

Las distintas razas de ganado de carne presentan atributos particulares —como tamaño, velocidad de crecimiento, composición corporal, capacidad productiva de leche y adaptación a variaciones ambientales (calor, humedad, insectos, frío, etc.), lo cual ofrece múltiples oportunidades para implementar programas de mejoramiento genético. Estas variaciones permiten a los productores disponer de un abanico de soluciones para seleccionar y combinar razas, esto de acuerdo a las condiciones específicas de cada región, maximizando así el potencial productivo del hato.

Debido a que la producción de carne se desarrolla en entornos muy diversos, una raza que demuestra un desempeño sobresaliente en una determinada área puede no ser la opción óptima en otra. Por ello, se han diseñado sistemas de cruzamiento adaptados a las particularidades ambientales y productivas locales, permitiendo explotar la diversidad genética de manera eficiente.

Estrategias de cruzamiento

El ganado de carne presenta una tasa reproductiva inferior a la de especies como las aves o los cerdos, lo que limita la aplicación de sistemas de cruzamiento extremadamente especializados. En este contexto, se opta mayormente por métodos que incluyan cruzamientos rotacionales o una combinación de cruzamientos rotacionales y terminales, diseñados para que el propio hato pueda proveerse de animales de reemplazo sin sacrificar la calidad genética.



Fundamentos de los sistemas de cruzamiento

Cruzamiento rotacional: En esta modalidad se alternan las razas de toros utilizadas para inseminar al grupo de vacas. Esta práctica garantiza el mantenimiento de un elevado índice de heterosis a lo largo de varias generaciones; las hembras retienen sus cualidades adaptativas propias, mientras que la incorporación de genes foráneos potencia atributos productivos. Este método resulta especialmente valioso cuando se busca asegurar la continuidad y mejora del potencial genético del hato.

Cruzamiento terminal: A diferencia del rotacional, en el sistema terminal se seleccionan toros cuyo único fin es incrementar los rendimientos productivos de la descendencia destinada al mercado. No se espera que las hembras resultantes se integren al programa reproductivo, lo que permite concentrar la selección en la obtención de becerros con mayor crecimiento, eficiencia alimentaria y salud, orientados directamente a la venta principalmente a la exportación.

La integración de ambos sistemas — aprovechando vacas de un programa rotacional que posteriormente se aparean con toros terminales— permite separar claramente la producción de animales de reemplazo y la cría destinada al mercado. Las cifras indican que esta estrategia puede lograr incrementos de entre un 14% y un 16% en el rendimiento del destete, lo cual constituye un argumento robusto para su aplicación en mercados internacionales exigentes.

Impacto y beneficios en la producción de becerros para exportación

El empleo combinado de cruzamientos rotacionales y terminales proporciona ventajas medibles por medio de parámetros a lo largo de toda la cadena productiva. En el contexto del norte de México, donde las exigencias ambientales y de calidad son particularmente elevadas, la producción de becerros con destetes de alta calidad se traduce en un mejor precio por kilogramo y una aceptación superior en mercados internacionales.

Este sistema integrado permite equilibrar la producción de animales de reemplazo con alta adaptabilidad a las condiciones locales y la cría de becerros de alto rendimiento para exportación. Más allá del incremento en peso y conversión alimenticia, se han observado mejoras en la fertilidad, facilidad de parto y supervivencia neonatal. Estos beneficios, al reducir costos operativos y asistenciales, contribuyen a la estabilidad y sostenibilidad del sistema productivo.

Los sistemas de cruzamientos bien estructurados tienen un impacto positivo en parámetros clave del rendimiento productivo, posicionando esta estrategia como una opción competitiva para productores que aspiran a expandirse en mercados internacionales.



Uso de vacas cruzadas en programas de exportación

Dentro de los esquemas de cruzamiento, el uso de vacas cruzadas destaca por su potencial para producir becerros con mayor peso y vigor al destete, ya que son bovinos adaptados a su entorno. La combinación genética sinérgica con razas especializadas, resulta en una mejor conversión alimenticia y una reducción en la mortalidad de las etapas iniciales. Además, se ha documentado que estos animales presenten índices superiores de fertilidad y facilidades en el parto, lo que reduce los costos asociados al manejo reproductivo y al soporte prenatal.

El aprovechamiento de las Diferencias Esperadas de la Progenie (EPD) ha agilizado la toma de decisiones en la elección de sementales, permitiendo que cada cruce aporte mejoras específicas al sistema productivo, en función de variables económicas relevantes. Al identificar y seleccionar animales con altos valores EPD, se optimiza el programa de cruzamientos, potenciando tanto la calidad del destete como la rentabilidad global del hato.

La aplicación de sistemas de cruzamientos rotacionales combinados con apareamientos terminales se configura como una estrategia sólida, lo cual se aprovecha para elevar la calidad y el rendimiento de los becerros destinados a la exportación, especialmente en regiones exigentes como el norte de México. La evidencia cuantitativa disponible respalda incrementos en torno al 14–16% en el rendimiento del destete, junto con mejoras en la eficiencia reproductiva y la adaptación ambiental, lo que refuerza la competitividad y sostenibilidad del sistema ganadero.

El diseño cuidadoso de programas de cruzamiento, apoyado en herramientas de selección genómica como las EPD, permite a los productores responder a las demandas del mercado internacional y optimizar los recursos disponibles. Futuras investigaciones podrían profundizar en la integración de estrategias nutricionales y sanitarias, las cuales potencien aún más estos beneficios, asegurando así un avance constante hacia la producción ganadera de alta calidad y sustentable.

Modelo GGAVATT: Una estrategia para la adopción de tecnologías en la ganadería del norte de México

La modernización del sector ganadero ha representado un pilar fundamental para potenciar la productividad y competitividad de la cadena de producción cárnica en el norte de México. En este sentido, la incorporación de innovaciones tecnológicas y la cohesión de los productores en estructuras organizadas han posibilitado la transición de prácticas tradicionales hacia sistemas de mayor eficiencia. Dentro de este marco, el modelo GGAVATT (Grupos Ganaderos de Validación y Transferencia de Tecnología) emergió como una herramienta metodológica clave para la validación, transferencia y adopción de tecnologías avanzadas en unidades pecuarias. El Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) fue la institución pionera en desarrollar e



implementar este modelo. Sus cimientos se establecieron entre 1970 y 1982, con la transformación tecnológica del Rancho “Bella Esperanza” (RBE) en la Huasteca Veracruzana, bajo las directrices del Campo Experimental “La Posta” del INIFAP. Posteriormente, la inquietud de ganaderos vecinos condujo a la formación del modelo entre 1983 y 1989 con la integración del Programa Ganadero Tepetzintla (PROGATEP), compuesto por 28 productores en Tepetzintla, Veracruz. Para 1989, esta iniciativa se formalizó como el modelo GGAVATT, siendo Tepetzintla reconocida como la “cuna de los GGAVATT”. Este modelo tiene como propósito fortalecer la producción, optimizar la rentabilidad y afrontar los desafíos inherentes a las condiciones ambientales cambiantes y las dinámicas del mercado.

Metodologías de organización y el modelo GGAVATT

El modelo GGAVATT fue concebido como una estructura colaborativa para productores, facilitando la validación y difusión de innovaciones ganaderas mediante capacitación y pruebas en campo. Esta metodología, caracterizada por el principio de “enseñar haciendo”, posibilita la adaptación del conocimiento técnico y científico a las particularidades regionales, fomentando la integración de mejoras en ámbitos esenciales como la sanidad animal, la alimentación, el manejo reproductivo y la genética. Además de la transferencia directa de tecnologías, el GGAVATT ha cultivado un fuerte sentido comunitario entre los productores, promoviendo la adopción sistemática de prácticas innovadoras que no solo incrementan la productividad, sino que también reducen la vulnerabilidad ante factores de riesgo como el cambio climático. A pesar de desafíos y periodos de menor expansión, el modelo GGAVATT ha demostrado su resiliencia y continuidad en diversas regiones de México. Algunos estados han mantenido activamente su implementación, destacando ejemplos como Guanajuato, donde se ha sostenido un promedio anual de 77 grupos y 1,352 ganaderos beneficiados, llegando incluso a financiar completamente los salarios de los asesores ante la retirada de recursos federales. Sinaloa también se presenta como un caso relevante, con la formación de 499 grupos y el apoyo de Fundaciones PRODUCE para asegurar la continuidad del trabajo. En Veracruz, donde el modelo tiene profundas raíces, se implementó entre 2013 y 2017 un proyecto de “Integración de la Red Bovinos Carne” bajo la metodología GGAVATT, beneficiando a 202 ganaderos. Asimismo, Tamaulipas constituyó 34 grupos en 2009, demostrando la aplicación del modelo en distintas geografías y con diversas especies productivas. Otros estados como Guerrero, Michoacán, Morelos, Nayarit, Colima, Campeche y Nuevo León también han continuado aplicando el modelo en sus estrategias de asistencia técnica e innovación.



Logros y beneficios del modelo GGAVATT

La experiencia acumulada mediante la implementación del modelo GGAVATT ha permitido constatar beneficios medibles en la producción ganadera por medio de los parámetros productivos y reproductivos. Entre los logros más destacados se encuentran:

- a. Incremento en la productividad: Los productores organizados en GGAVATT han experimentado un aumento promedio en la producción de carne y en el rendimiento del destete que oscila entre el 13% y el 16%. Este crecimiento se debe a mejoras en los índices de conversión alimenticia, la eficiencia reproductiva y el manejo integral de los recursos, lo cual incide directamente en la rentabilidad de las unidades productivas.
- b. Fortalecimiento del capital humano y organizacional: La metodología “enseñar haciendo” ha permitido que los productores adquieran conocimientos técnicos y competencias gerenciales; tales capacidades se han traducido en una mayor toma de decisiones basadas en datos y en la capacidad de adaptarse rápidamente a nuevos desafíos. Documentos evaluativos han señalado que la integración de tecnologías a través del GGAVATT ha generado incrementos significativos en la competitividad de las unidades ganaderas organizadas.
- c. Impacto socioeconómico: La formación de grupos organizados no solo ha mejorado los indicadores productivos, sino que también ha favorecido el empleo y el bienestar familiar en zonas tradicionalmente marginadas. La aplicación de tecnologías adaptadas localmente ha contribuido a estabilizar las fuentes de ingreso y a potenciar el desarrollo rural, generando un efecto multiplicador en las economías locales.

Estos resultados evidencian que la organización de productores a través de modelos colaborativos y de transferencia de tecnología no solo impulsa la eficiencia técnica, sino que también favorece el desarrollo socioeconómico de la región donde han sido implementados, como lo ha sido en el norte de México.

Desafíos Institucionales en apoyo a estrategias de adopción de tecnologías en la ganadería

A pesar de los beneficios y avances registrados, el modelo GGAVATT y otros esfuerzos en la adopción de tecnologías han enfrentado notables limitaciones derivadas de la falta de coordinación y apoyo a distintos niveles de gobierno:

Fragmentación en el apoyo gubernamental: Existen deficiencias significativas en la implementación de políticas públicas orientadas a la innovación en la ganadería. A nivel municipal, estatal y federal se observa una desconexión en la asignación de recursos, la formulación de estrategias integradas y el seguimiento de proyectos de transferencia tecnológica. Esta fragmentación limita la potenciación de los logros alcanzados por



modelos colaborativos como el GGAVATT, lo cual genera incluso competencia entre los diferentes niveles en vez de la colaboración.

Inadecuada vinculación de instituciones de investigación y educación: Las universidades y centros de investigación a menudo no logran establecer alianzas eficaces y sostenibles con los productores organizados. La rigidez en los programas académicos y una desconexión entre la teoría y la práctica reducen la capacidad de respuesta de las instituciones para formar profesionales que comprendan las realidades del campo y colaboren en la adaptación de tecnologías, esto se convierte en un círculo vicioso, ya que los profesores formadores de profesionistas vienen de este mismo sistema, el cual no incentiva las prácticas de campo en el medio real.

Burocracia y lentitud en la toma de decisiones: La excesiva burocracia en la administración pública y los marcos regulatorios demasiado rígidos generan retrasos en la implementación de proyectos y en la asignación de apoyos financieros y técnicos. Esto impacta negativamente en la capacidad de respuesta de los productores ante eventos críticos, como sequías prolongadas o brotes de enfermedades, afectando la resiliencia del sector ganadero.

Estas limitaciones institucionales sugieren la necesidad de una reforma estructural que fortalezca la coordinación intergubernamental y fomente una relación más estrecha entre la academia, la investigación y la práctica productiva.

La adopción de tecnologías en la ganadería productora de carne en el norte de México puede ser notablemente beneficiada, mediante la organización de productores en modelos colaborativos como el GGAVATT. La evidencia disponible demuestra que se pueden generar incrementos cuantificables en la productividad (entre el 13% y el 16% de mejora en el rendimiento), fortalecer el capital humano y contribuir al desarrollo económico de las regiones rurales.

Sin embargo, estos avances se encuentran parcialmente limitados por deficiencias en la coordinación y apoyo institucional, evidenciadas tanto en los distintos niveles de gobierno como en la interacción con las instituciones de investigación y enseñanza para formación de profesionistas. En este sentido, es imperativo promover reformas integrales que impulsen la articulación entre el sector público, el académico y el privado, de modo que el potencial transformador de los modelos colaborativos pueda realizarse plenamente para dar resultados de manera eficiente acorde a las problemáticas reales.

El futuro de la ganadería en el norte de México dependerá, en gran medida, de la capacidad para integrar tecnología, conocimiento, organización y seguimiento continuo, en una estrategia común que responda tanto a las demandas del mercado global como a las condiciones particulares de la región.



Implicaciones

Las evidencias recopiladas demuestran que la adopción de prácticas tecnológicas en los ranchos ganaderos del norte de México, especialmente en lo relativo a la nutrición (suplementación energética y proteica, bloques multi-nutricionales y suplementación mineral), el manejo reproductivo, la rotación de potreros y el cruzamiento genético ha permitido mejorar significativamente la productividad, la eficiencia y la rentabilidad de los sistemas dedicados al sistema de vaca cría en la producción de becerros para engorda y la exportación. El manejo integral de estas estrategias se traduce en incrementos cuantificables en la ganancia de peso y desarrollo del ganado, en la eficiencia de conversión del forraje y en la eficiencia reproductiva, aspectos que permiten hacerle frente a las condiciones ambientales adversas, que en sistema de producción extensivos basados en el pastoreo se han venido experimentando en años recientes el norte de México.

La incorporación de prácticas tecnológicas en los ranchos ganaderos del norte de México implica importantes beneficios económicos y medioambientales en el contexto regional y nacional. Se ha constatado que la aplicación ordenada de tecnologías innovadoras, no solo optimiza el uso de los recursos forrajeros, sino que además fortalece la competitividad y la sostenibilidad de esta actividad ganadera del sector pecuario nacional, generando mayores retornos de inversión y reduciendo los costos operativos. Asimismo, la combinación de técnicas de manejo y producción, respaldada por modelos organizativos como el GGAVATT, facilita la transferencia de conocimientos y la adopción de buenas prácticas, lo cual representa un factor clave para mantener la resiliencia y modernización de las unidades de producción.

Se recomienda establecer y fortalecer de manera decidida un enfoque coordinado entre productores, instituciones de enseñanza e investigación, entidades gubernamentales y organismos de extensión técnica para impulsar la adopción de estas herramientas tecnológicas. Es imperativo promover programas de capacitación continua y generar alianzas estratégicas que faciliten la implementación de tecnologías en nutrición, manejo sanitario, manejo reproductivo, manejo del agostadero y mejoramiento genético que son las bases de los sistemas de producción ganadera. La consolidación de estos esfuerzos contribuirá a fortalecer la estructura productiva del sector ganadero en el Norte de México, desarrollando sistemas ganaderos eficientes, sustentables y competitivos en el mercado nacional e internacional de la cadena productiva de carne de bovino.

Bibliografía

Aguilar-Rodríguez, H.E. (2024). Buenas prácticas en la ganadería bovina. *Revista Critica Transdisciplinar*, 7(2), 1-11. DOI: <https://zenodo.org/records/14028472>.



- André Mauric F Ribeiro, Leticia P Sanglard, Warren M Snelling, R Mark Thallman, Larry A Kuehn, Matthew L Spangler, Genetic parameters, heterosis, and breed effects for body condition score and mature cow weight in beef cattle, *Journal of Animal Science*, Volume 100, Issue 2, February 2022, skac017, <https://doi.org/10.1093/jas/skac017>.
- Augustine, D. J., Derner, J. D., Fernández-Giménez, M. E., Porensky, L. M., Wilmer, H., & Briske, D. D. (2020). Adaptive, multipaddock rotational grazing management: A ranch-scale assessment of effects on vegetation and livestock performance in semiarid rangeland. *Rangeland Ecology & Management*, 73(6), 796–810. <https://doi.org/10.1016/j.rama.2020.07.005>.
- Barrón-Bravo O, Avilés-Ruiz R, Ángel-Sahagún C, Alcalá-Rico J, Arispe-Vázquez J, Garza-Cedillo R. Caracterización de unidades de producción familiar de bovinos, Llera, Tamaulipas, México. *Abanico Boletín Técnico*. 2023. 2. e2023-23.
- Barrón-Bravo, O. G., Garza-Cedillo Rubén D., Arispe-Vázquez, J.L., Patishtan- Pérez, J., Ángel-Sahagún, C.A., Alcalá-Rico, J.S.G.J., Díaz-Nájera, J. F., Avilés- Ruiz, R. (2024). Adaptation of calves in the transition from intensive to dual-purpose system during extreme drought. *Agro Productividad*. <https://doi.org/10.32854/agrop.v17i10.2900>.
- Barrón-Bravo, O. G., López-Guzmán, J. A., Ruiz-Albarrán, M., Gutiérrez-Chávez, A. J., Alcalá-Rico, J. S. G. J., Avilés-Ruiz, R. (2025) Development of dual-purpose heifers under grazing and captivity, during drought and rainy seasons. *Revista Bio Ciencias*, 12, e1771. <https://doi.org/10.15741/revbio.12.e1771>.
- Burrow H. M., Moore S. S. , Johnston D. J. , Barendse W. Bindon B. M. (2001) Quantitative and molecular genetic influences on properties of beef: a review. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 41, 893-919. <https://doi.org/10.1071/EA00015>.
- Carrera, B. C., Schwentesius, R. R., Gómez, M. Á. C., Olivares, R. P. (2008). Contribución al estudio de la ganadería bovina de carne: el caso de los distritos de Río Grande y Ojocaliente, Zacatecas, México. *Revista Investigación Científica*, 4(3), 1-17.
- Cortés-Girón, E., García-Elizondo, R., López-Trujillo, R., & Ruíz-Zárate, F. (2017). Efecto de los días al parto sobre el comportamiento reproductivo de vacas Charolais, con época de empadre restringido. *Agraria*, 14(1), 01-07.
- Cuevas Reyes, V., Baca del Mora, J., Cervantes Escoto, F., Espinosa García, J. A., Aguilar Ávila, J., & Loaiza Mezac, A. (2010). Factores que determinan el uso de innovaciones tecnológicas en la ganadería de doble propósito en Sinaloa, México. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 4(1), 33–46. Recuperado de <https://scielo.org.mx/pdf/rmcp/v4n1/v4n1a3.pdf>.



- Cuevas-Reyes, V., Loaiza-Meza, A., Espinosa-García, J. A., Vélez-Izquierdo, A., & Montoya-Flores, M. D. (2016). Tipología de las explotaciones ganaderas de bovinos doble propósito en Sinaloa, México. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 7(1), 69-83.
- Gordon E. Dickerson, INBREEDING AND HETEROSIS IN ANIMALS, *Journal of Animal Science*, Volume 1973, Issue Symposium, 1973, Pages 54-77, <https://doi.org/10.1093/ansci/1973.Symposium.54>
- INEGI (2022). Censo Agropecuario 2022. Resultados definitivos. <https://www.inegi.org.mx/programas/ca/2022>.
- John W. Walker. (1995). Viewpoint: Grazing Management and Research Now and in the Next Millennium. *Journal of Range Management*, 48(4), 350-357. <https://doi.org/10.2307/4002488>.
- Gregory, K. E., & Cundiff, L. V. (1980). Crossbreeding in beef cattle: Evaluation of systems1. *Journal of Animal Science*, 51(5), 1224-1242. <https://doi.org/10.2527/jas1980.5151224x>
- Gregory, K. E., Cundiff, L. V., Koch, R. M., Laster, D. B., & Smith, G. M. (1978). Heterosis and breed maternal and transmitted effects in beef cattle i. preweaning traits2,3,7. *Journal of Animal Science*, 47(5), 1031-1041. <https://doi.org/10.2527/jas1978.4751031x>
- Cundiff, L. V. (1970). Experimental results on crossbreeding cattle for beef production. *Journal of Animal Science*, 30(5), 694-705. <https://doi.org/10.2527/jas1970.305694x>
- Loaiza, A. C., Cuevas, V. R., Moreno, T. G., Reyes, J. E. J., & González, D. G. (2018). Innovaciones tecnológicas diferenciadas en el sistema de producción de bovinos doble propósito del trópico seco en Sinaloa. Libro Técnico Núm. 1. Campo Experimental Valle de Culiacán, INIFAP. Culiacán, Sinaloa, México. 91 páginas.
- Méndez Bahena, B. (2014). Siete problemas de las instituciones de gobierno en México. *Revista RC & Ratio*, 13, 25-39. Recuperado de https://contraloriadelpoderlegislativo.gob.mx/Revista_Rc_et_Ratio/Rc_et_Ratio_13/Rc13_05_Benjamin_Mendez_Bahena.pdf.
- National Center for Foreign Animal and Zoonotic Disease Defense. Bioseguridad en las instalaciones de ganado bovino para carne. (14 de mayo de 2025). https://iiad.tamu.edu/wp-content/uploads/2012/02/BeefCattle_FAZD_41.pdf.
- Porensky, L. M., Augustine, D. J., Derner, J. D., Wilmer, H., Lipke, M. N., Fernández-Giménez, M. E., & Briske, D. D. (2021). Collaborative adaptive rangeland management, multipaddock rotational grazing, and the story of the regrazed grass plant. *Rangeland Ecology & Management*, 78, 127-141. <https://doi.org/10.1016/j.rama.2021.06.008>.



- Koch, R. M., Dickerson, G. E., Cundiff, L. V., & Gregory, K. E. (1985). Heterosis Retained in Advanced Generations of Crosses among Angus and Hereford Cattle. *Journal of Animal Science*, 60(5), 1117–1132. <https://doi.org/10.2527/jas1985.6051117x>
- Rojas-Anaya E, Castañeda Chaparro JI, Cerón Téllez F, Román-Ponce, S., Ricardo González ID, Martínez Quintana JA, Herrera Lopez E, Castillo Rangel F & Chavez Ruiz, MG (2025). Detección molecular de agentes infecciosos en bovinos de Chihuahua. Memoria del VII Congreso Internacional Abanico Veterinario, Agroforestal, Ambiental, Pesquero, Acuícola y del Mar, 68–71.
- Román Ponce, H., Rodríguez Chessani, M. A., Espinosa García, J. A., González Orozco, T. A., Véliz Izquierdo, A., & Zárate Martínez, J. P. (2021). Historia y perspectivas del modelo GGAVATT (Grupos Ganaderos de Validación y Transferencia de Tecnología). *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 12(supl.3), 1–13. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v12s3.5846>.
- Román-Ponce, S., Alvidrez-Hinojos, F., Carrera-Chávez, J. M., GAC-CMD, Rojas-Anaya, E., Espinoza-Velasco, B., Perez-Ruiz, E., & Garcia-Perez, J. L. (2025). Análisis de Practicas tecnológicas en ranchos ganaderos del ejido Huizopa en el municipio de Madera, Chihuahua. Memoria del VII Congreso Internacional Abanico Veterinario, Agroforestal, Ambiental, Pesquero, Acuícola y del Mar, 118–123.
- Román-Ponce, S., Alvidrez-Hinojos, F., Carrera-Chávez, J. M., Rojas-Anaya, E., Espinoza-Velasco, B., Perez-Ruiz, E., & Garcia-Perez, J. L. (2024). Diagnóstico estático de ranchos ganaderos del ejido Huizopa en el municipio de Madera, Chihuahua. Memoria del VI Congreso Internacional Abanico Veterinario, Agroforestal, Ambiental, Pesquero, Acuícola y del Mar, 43–50.
- Rowntree, J. E., Stanley, P. L., Maciel, I. C. F., Thorbecke, M., Rosenzweig, S. T., Hancock, D. W., Guzman, A., & Raven, M. R. (2020). Ecosystem impacts and productive capacity of a Multi-Species pastured livestock system. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.544984>
- Ruíz, R. A., Bravo, O. G. B., Chávez, A. J. G., & Albarrán, M. R. (2024). Principales sistemas de producción de leche en México: Recopilación actual de parámetros productivos, reproductivos y de manejo. *Ciencias Veterinarias y Producción Animal*, 32-47.
- Santamaría, L. A. C., & Ledezma, J. H. (1987). Evaluación de tres prácticas de manejo reproductivo en ganado bovino productor de carne durante épocas cortas de empadre. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 25(3), 296-301.



Saucedo-Terán, R.A., Jurado-Guerra, P. (2014) Paquete tecnológico para la producción de la leche de bovino en Chihuahua. INIFAP. Folleto técnico No. 54. p 49. ISBN: 978-607-37-0281-2

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (2014) Manual de buenas prácticas pecuarias de ganado bovino en confinamiento para la producción de carne. p 74 consultado el 24 de mayo de 2025; https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/924850/Manual_BPP_ganado_confinamiento_2024.pdf).

Conceptos básicos sobre el calostro bovino

Karla Rodríguez-Hernández.





Resumen

El calostro bovino es una secreción láctea rica en nutrientes e inmunoglobulinas que se acumula en la glándula mamaria antes del parto. Su función principal es proporcionar inmunidad pasiva, nutrición y apoyo al desarrollo del sistema inmune de las becerras recién nacidas, quienes nacen inmunológicamente ingenuas debido a la placentación epiteliocorial que impide la transferencia de anticuerpos maternos. Durante la lactogénesis I, se transfiere IgG desde la sangre materna al calostro, mientras que IgA e IgM se producen localmente. La calidad inmunológica del calostro depende de su contenido de inmunoglobulinas, especialmente IgG1, que representa hasta el 90% del total. IgA e IgM también son esenciales para la protección mucosal y prevención de enfermedades como la colibacilosis. Además de las inmunoglobulinas, el calostro contiene proteínas como lactoferrina, lisozima, lactoperoxidasa y albúmina, todas con funciones inmunomoduladoras, antimicrobianas y antioxidantes. También aporta factores de crecimiento (IGF-I, EGF, TGF- α/β , PDGF), hormonas (GH, GHRF), vitaminas (A, D3, E, complejo B), minerales (Ca, P, Zn) y lípidos esenciales. Nutricionalmente, el calostro tiene casi el doble de sólidos totales que la leche, con mayor contenido energético, proteínas y grasa. Su adecuada administración en cantidad, calidad y tiempo es crucial para cubrir los requerimientos de mantenimiento, crecimiento y activación del sistema inmune. Se recomienda ofrecer al menos el 10% del peso vivo en calostro de alta calidad (≥ 80 g/L IgG) en las primeras 24 horas. El calostro también regula el metabolismo, mejora la digestión y modula el microbioma intestinal, siendo clave para la salud y desarrollo inicial de las becerras.

Palabras clave: inmunoglobulinas, calostrogénesis, lactoferrina, energía metabolizable, sistema inmune, calidad del calostro.



Introducción

El calostro bovino, es una mezcla de secreciones lácteas, componentes del suero sanguíneo como lo son compuestos bioactivos, inmunes y células, densa en nutrientes y que se acumula en la glándula mamaria durante el periodo preparto y puede colectarse inmediatamente o después del parto. Las funciones principales del calostro son brindar protección para las crías después del nacimiento a través de la transferencia de inmunidad pasiva, apoyar el desarrollo del sistema inmune, y ser una fuente de nutrientes para apoyar al crecimiento y desarrollo de los animales recién nacidos.

Importancia del calostro

En el caso de las becerras lecheras el calostro es de vital importancia, esto, debido a que el tipo de placentación de los rumiantes es epiteliocorial, por lo que no hay transferencia de inmunoglobulinas maternas a través de la placenta hacia el feto. Por lo que, las becerras al nacimiento, para defenderse de los patógenos dependen principalmente de la inmunidad pasiva brindada por los anticuerpos o inmunoglobulinas maternas que provienen del calostro y que son absorbidas a nivel intestinal durante sus primeras 24 horas de vida. Adicionalmente, se han identificado más de 200 sustancias bioactivas en el calostro, y aunque aún no se tienen identificadas las funciones de todas, muchas tienen relación con el mantenimiento de la salud y el crecimiento de las becerras.

El sistema inmune de la becerro al nacimiento

Para una mejor comprensión de las funciones del calostro, es importante repasar algunos conceptos básicos sobre el sistema inmune. El sistema inmune se divide en innato y activo o adaptativo. El sistema inmune innato brinda una respuesta genérica, no tiene memoria a largo plazo y está constituido por varios componentes como las barreras físicas incluidas la piel y las membranas mucosas; los mecanismos de eliminación de microorganismos invasores como el toser, estornudar, vomitar y la diarrea; así como la secreción de factores antimicrobianos producidos por las células epiteliales. También, forman parte del sistema innato los macrófagos, neutrófilos, células dendríticas, eosinófilos, basófilos, mastocitos, células NK, células T gamma delta ($\gamma\delta$) y el complemento.

Por otra parte, el sistema inmune activo o adaptativo brinda una respuesta específica y tiene memoria a largo plazo, esto es que produce anticuerpos, y está conformado por los linfocitos T y B. De manera general, los linfocitos B son los responsables de producir los anticuerpos después de ser estimulados por los linfocitos T. Los linfocitos T, también promueven la inmunidad mediada por células y algunos tienen capacidades citotóxicas. Los anticuerpos, son parte del sistema inmune adaptativo y en bovinos se producen al menos cinco clases de Ig de cadena pesada (IgM, IgG, IgA, IgD e IgE), con tres subclases de IgG (IgG₁, IgG₂ e IgG₃), dos subclases de IgM (IgM₁ e IgM₂) y dos tipos de cadenas ligeras (λ y κ). En general, las funciones de las inmunoglobulinas



incluyen la neutralización por anticuerpos, activación del complemento, fagocitosis mediada por el receptor Fc y citotoxicidad celular dependiente de anticuerpos.

En la becerria, la respuesta inmune innata mediada por las células fagocíticas como los macrófagos y los neutrófilos se desarrolla hasta el periodo de gestación tardía; sin embargo, hay una disminución en la capacidad funcional de estas células al momento cercano al parto debido al incremento en las concentraciones de cortisol fetal; también otros componentes del sistema innato de defensa de la becerria al nacimiento disminuyen su actividad como el complemento. Sin embargo, lo anterior no significa que las células inmunes no tienen actividad o que los otros componentes del sistema innato no están funcionando.

Entonces, es importante tener claro que la susceptibilidad de la becerria a los patógenos no se debe a una “incapacidad” del sistema para montar una respuesta inmune, sino a que el sistema inmune de la becerria aún no ha sido “entrenado” por lo que su respuesta es débil, lenta y, por lo tanto, más fácil de vencer. Así que es importante considerar que el sistema inmune de las becerras recién nacidas tiene como función principal “moderar” el curso de la enfermedad más que prevenirla.

Cuando se menciona que las becerras al nacimiento son inmunológicamente “ingenuas”, es que se hace referencia a que no pueden montar una respuesta inmunológica adaptativa, esto es “por experiencia”, ya que carecen de anticuerpos debido a que han sido protegidas en el ambiente uterino durante la gestación. Sin embargo, dependiendo de la etapa de la gestación y del tipo de antígeno, cuando hay exposición del feto a antígenos externos puede haber respuesta inmune y generación de anticuerpos, por ejemplo, por exposición al virus de la parainfluenza-3 a los 120 días de gestación, a los 190 días de gestación exposición al virus de la diarrea viral bovina, aunque en este caso en particular se puede desarrollar inmunotolerancia. Finalmente, la exposición a la bacteria *Brucella abortus* puede derivar en la producción de anticuerpos al nacimiento. Por lo anterior, al nacimiento, en algunas ocasiones las crías pueden responder a una variedad de antígenos, pero no a tantos como cuando el sistema inmune se encuentra completamente maduro.

Síntesis del calostro

La formación del calostro en la glándula mamaria se lleva a cabo durante la fase de Lactogénesis I. Durante la lactogénesis ocurren tres eventos importantes en las células epiteliales de la glándula mamaria: crecimiento, diferenciación y calostrogénesis. Durante la calostrogénesis se transfieren las inmunoglobulinas (Ig) desde la circulación sanguínea hacia la luz de los alveolos de la glándula mamaria. La calostrogénesis depende de la acción de las hormonas estradiol y progesterona, específicamente de un cambio en la proporción de progesterona:estradiol, que actúan sobre las células epiteliales de la glándula mamaria conocidas como alveolitos e inicia aproximadamente 4 a 5 semanas



previas al parto. Durante esta etapa, por semana, se transfieren desde la circulación materna hacia la luz alveolar más de 500 gramos de IgG. Adicionalmente, las células del sistema inmune cercanas a las células epiteliales de la glándula mamaria producen IgA e IgM de forma local, las cuales también son secretadas a la luz de los alveolos de la glándula mamaria.

Lo anterior es importante, debido a que los esquemas de vacunación de las vacas y vaquillas gestantes contra patógenos que producen diarrea predestete, deberían ser programados tomando en cuenta para que la vaca o vaquilla sea capaz de producir y transferir los anticuerpos en “tiempo y forma” al calostro, la vacunación se debe realizar a más tardar 28 días antes de la fecha esperada de parto y así aprovechar la transferencia de IgG que sucede durante la calostrogénesis.

Posteriormente, aún en la etapa de calostrogénesis, pero más cercano al momento del parto, unos 5 días antes; otras hormonas como la hormona del crecimiento, la prolactina y los glucocorticoides, así como la caída marcada de progesterona 2 días antes del parto, estimulan a que en los alveolitos, se inicie la síntesis de componentes lácteos como la lactosa, proteínas como la caseína y proteínas del suero de la leche, así como triglicéridos, ácidos grasos de cadena corta y larga, los cuales son secretados junto con agua hacia la luz de los alveolos donde se acumulan hasta el momento del parto.

Posterior al parto, se inicia la etapa de lactogénesis II y con esto, la producción y secreción copiosa de componentes de la leche, razón por la que es de suma importancia que se ordeñe el calostro lo más rápido posible después del parto para que no se diluya principalmente su contenido de inmunoglobulinas. Conforme avanza el tiempo y con los posteriores ordeños, la composición del calostro comienza a cambiar hasta ser la de la leche.

Composición del calostro

El calostro al igual que la leche, está compuesto por proteínas, carbohidratos, grasas, minerales y vitaminas, pero en diferentes cantidades, lo cual le otorga sus características funciones en la salud y desarrollo de las crías recién nacidas. La principal diferencia es la cantidad de sólidos totales (ST) o materia seca (MS), la cual es mucho mayor en el calostro de primer ordeño (entre 24 a 28%) que en la leche (entre 11.9 a 12.9%).

Las proteínas y los péptidos son los componentes de mayor cantidad en el calostro de primer ordeño (entre 14 y 16%). Este grupo de componentes está constituido principalmente por inmunoglobulinas, albúmina y caseína, y en menor cantidad por otras proteínas del suero de la leche como lactoferrina, α -lactoalbúmina, β -lactoglobulina, lactoperoxidasa, glico-macropéptidos, citocinas, así como varios factores del crecimiento.

En segundo lugar, se encuentran las grasas y los lípidos, constituyen entre 6 y 7% de la MS del calostro. La grasa del calostro se encuentra formada por glóbulos grasos que contienen ácidos grasos poliinsaturados con enlaces ω -3 y ω -6, ácido linoléico, ácido



palmítico, ácido mirístico, ácidos grasos de cadena corta, gangliósidos y fosfolípidos.

Los carbohidratos se encuentran en tercer lugar, donde la lactosa es el principal carbohidrato (entre 2 a 4%), pero el calostro también contiene oligosacáridos, glicolípidos, glicoproteínas y nucleótidos.

El siguiente grupo de componentes está constituido por los minerales, siendo los principales el calcio (2.6 a 4.7 g/ kg MS) y el fósforo (4.5 g/kg MS), también incluye potasio, sodio, magnesio y zinc.

Finalmente, se encuentran las vitaminas donde destacan la vitamina A (25 µg/mL u 83 UI/mL), la D en sus formas D2 y D3 (0.89 a 1.81 µg/mL o 36 a 72 UI/mL), E o tocoferol (2.92 a 5.63 µg/mL o 2 a 8 UI/L) y la riboflavina (4.5 a 4.83 µg/mL), seguidas por otras del complejo B como tiamina, niacina y cobalamina.

Funciones inmunológicas del calostro

Las inmunoglobulinas son el componente del calostro al que siempre se le ha conferido la mayor importancia por la protección que confieren contra los patógenos; sin embargo, muchos otros de sus componentes igualmente tienen funciones inmunológicas y también serán revisados en esta sección.

En el calostro, la principal clase de inmunoglobulinas es la IgG y comprende entre el 85 y 90% del total de las inmunoglobulinas presentes en el calostro; de esta clase en el calostro, la forma IgG₁ es la más abundante (90%) y la IgG₂ sólo representa una pequeña parte (10%), debido a que permanece en su mayoría en la sangre de la madre, lo que, al parecer, la protege de una pérdida excesiva de inmunoglobulinas. El resto de las inmunoglobulinas presentes en el calostro está comprendido por las inmunoglobulinas secretoras IgA e IgM (también pueden encontrarse en la literatura como sIgA y sIgM), estas se conocen así porque son secretadas hacia las membranas mucosas; un punto de relevancia sobre estas dos inmunoglobulinas es que cuando provienen del calostro, primero requieren ser absorbidas para después ser secretadas a las mucosas donde sean requeridas mediante su unión a una molécula conocida como componente secretor. El componente secretor ayuda a la endocitosis y transporte de la IgA e IgM a través de las células epiteliales y a su vez las protege cuando salen a la mucosa.

La IgG, es una inmunoglobulina monomérica con forma de “Y”. Debido a su tamaño, la IgG puede penetrar en diferentes áreas del organismo de la becerria y se le encuentra en el torrente sanguíneo y en los epitelios. La IgG proveniente del calostro tiene una vida media de 16 a 17.5 días, y la becerria comienza a producir su propia IgG hasta después de los 13 días de edad. Existen reportes en los que se menciona que la vida media de la IgG es mayor y casi cercana a los 30 días; sin embargo, en esos estudios no se contempló la producción endógena de IgG. Su función principal es opsonizar patógenos, esto es se unen a los patógenos para que puedan ser fagocitados por las células del sistema



inmune como los neutrófilos y los macrófagos.

La IgA, es una inmunoglobulina dimérica, es de tamaño intermedio entre la IgG e IgM. Tan sólo constituye un 5% del total de las inmunoglobulinas del calostro y su vida media es muy corta (2.5 días). Posteriormente, hasta después de los 56 días de edad es que la becerria la produce en cantidades adecuadas. Sin embargo, junto con la IgM del calostro, es de vital importancia para evitar colibacilosis en las becerras en los primeros días de vida porque tiene el doble de sitios de unión que la IgG y puede neutralizar mayor número de patógenos evitando que estos se unan a los enterocitos.

Finalmente, se encuentra la IgM, esta inmunoglobulina es la de mayor tamaño en el calostro y en general su estructura es pentamérica, aunque una parte puede tener estructura hexamérica. Y si bien representa alrededor del 7% de las inmunoglobulinas del calostro, su capacidad inmunogénica es mayor a la de la IgG debido a su estructura y capacidad para unirse a los antígenos; sin embargo, su absorción después del nacimiento disminuye más rápido que la de la IgG, por lo tanto, cuando se retrasa la administración de calostro las becerras pueden ser deficientes en IgM. Tiene una vida media de 3.5 días, y su producción alcanza concentraciones de importancia hasta después de los 7 días de edad de la becerria. En la circulación, aproximadamente, sólo el 50% de las IgM pentaméricas se une a las cadenas J, las cuales son necesarias para su transporte a través de las membranas mucosas y poder ser secretada, por lo que una parte siempre estará en la circulación. La IgM al ser pentamérica tiene mayor número de regiones Fc (fragmento cristizable), por lo que es muy eficiente activando el complemento, se estima que su eficiencia es 1,000 veces la de la IgG, y de ahí también radica su importancia para el control de las septicemias.

De acuerdo con algunos autores, también hay IgE en el calostro bovino, pero en cantidades menores a la IgA, y aunque no se encontró información específica sobre su función en las becerras recién nacidas, debido a que es la inmunoglobulina que se encarga de unirse a los parásitos y activar a los eosinófilos, existe la posibilidad de que su función sea la de inactivar parásitos como el *Cryptosporidium*, pero se requiere investigación al respecto; además de que también se encarga de inactivar sustancias tóxicas y alérgenos.

Otras sustancias y nutrientes del calostro también tienen funciones inmunológicas. La lactoferrina, cuya función más conocida es su efecto bacteriostático ya que al incrementar la absorción de hierro, éste no queda disponible para el crecimiento de bacterias patógenas, y al mismo tiempo el secuestro de hierro disminuye los efectos adversos del estrés oxidativo hacia las células del organismo. Sin embargo, la lactoferrina tiene muchas más funciones, es bactericida ya que se une al lipopolisacárido (LPS) de las bacterias favoreciendo su fagocitosis, la adhesión de leucocitos y controlando la liberación de citocinas proinflamatorias. También tiene acción antiviral, antiparasitaria y antifungal. Indirectamente impide la invasión por patógenos al interferir con la unión de estos a los receptores celulares. Modula al sistema inmune adaptativo mediante la promoción de la



maduración de las células precursoras de linfocitos T y la diferenciación de linfocitos B inmaduros. La lisozima causa la lisis de bacterias Gram-negativas como la *E. coli* (este efecto es incrementado por la lactoferrina) e inhibe el crecimiento de bacterias Gram-positivas. La lactoperoxidasa inhibe el metabolismo de las bacterias y tiene efecto tóxico sobre las bacterias a través de la producción de especies reactivas de oxígeno. Los oligosacáridos tienen funciones inmunomodulatorias, prebióticas al estimular el crecimiento de bacterias benéficas en la luz del intestino y antimicrobianas al competir por sitios de unión en las células con bacterias patógenas.

En el calostro bovino hay vesículas extracelulares que contienen microRNAs asociados con la regulación del sistema inmune y el metabolismo; así como proteínas asociadas con la transducción de señales y la respuesta inflamatoria. Debido al contenido de citocinas en el calostro, se mejora rápidamente la habilidad de los neutrófilos para fagocitar a las bacterias, ya que estas citocinas ayudan a la modulación del sistema inmune. También, el calostro contiene leucocitos los cuales apoyan a que las becerras desarrollen células presentadoras de anticuerpos más rápido; gran parte de estos leucocitos en el calostro son monocitos y macrófagos (40 al 50%).

Los nutrientes como la vitamina D₃, también tienen funciones inmunomodulatorias. La vitamina D₃ induce la producción de proteínas antimicrobianas en los monocitos e inhibe la secreción de citocinas pro-inflamatorias (IL-6 y TNF- α) inducidas por lipopolisacáridos. La alfa lactoalbúmina estimula la reparación tisular y tiene actividad antimicrobiana. Y la caseína incrementa la mielopoyesis.

Adicionalmente, el calostro contiene grandes cantidades de albúmina, del contenido de proteínas exceptuando las inmunoglobulinas y después de la caseína, aproximadamente el 55% es albúmina. Al nacimiento, la albúmina proveniente del calostro, la cual tiene una vida media de 14 a 16 días, es clave debido a que es hasta después de los 14 días de edad que el hígado de las becerras se encarga de producir albúmina que las becerras requieren. La albúmina es una proteína clave para la salud y crecimiento de las becerras, debido a todas las funciones que lleva a cabo como lo son el regular el volumen sanguíneo, transporte de ácidos grasos libres, calcio, algunas hormonas esteroides, bilirrubina y fármacos; así mismo, tiene funciones antioxidantes y es inmunomodulatoria. De hecho, se ha observado que la incidencia de diarrea es menor cuando las becerras aparte del calostro reciben albúmina o concentrado de suero bovino con 60% de albúmina; sin embargo, estos han sido hallazgos y se requieren investigaciones específicas sobre el efecto directo de la albúmina del calostro en la salud de las becerras.

El calostro como promotor del crecimiento

La ingesta de calostro afecta positivamente el desarrollo del tracto gastrointestinal (TGI)



y su función. Dichos efectos van desde un incremento en la capacidad para la digestión y absorción de nutrientes, así como la motilidad del TGI; mejora la unión de los factores de crecimiento a las células del epitelio gastrointestinal; aumenta la proliferación de las células epiteliales, así como su migración, diferenciación y apoptosis; mejora la síntesis de proteínas y su degradación, y hasta tiene un efecto modulador en la población de microorganismos del TGI.

Varios de los componentes del calostro tienen efectos sobre el crecimiento, la diferenciación, el desarrollo y hasta la reparación de las células del intestino. Entre ellos se encuentran el factor de crecimiento similar a la insulina tipo I (IGF-I), el factor de crecimiento epidermal (EGF), los factores transformadores del crecimiento alfa (TGF- α) y beta (TGF- β) y el factor de crecimiento derivado de plaquetas (PDGF). También hormonas como la hormona del crecimiento (GH) y el factor de liberación de la hormona del crecimiento (GHRF) tienen efectos proliferativos sobre el TGI y posiblemente también favorezcan su función.

Funciones nutricionales del calostro

El calostro contiene leptina, y aunque no se tiene bien dilucidada su función específica cuando se ingiere con el calostro, posiblemente regule el metabolismo de la becerro mediante su efecto sobre el centro de la saciedad, controlando el apetito de la becerro y regulando el metabolismo de la glucosa al controlar el ingreso de glucosa a los adipocitos.

La caseína, además de funcionar como nutriente, regula la digestión de los componentes del calostro; esto a través de la formación del cuajo, lo que hace que los nutrientes lleguen al intestino delgado en pequeñas cantidades, y también a través de sus péptidos con acción de tipo opioide que disminuyen la velocidad de vaciamiento del abomaso. Además, el calostro contiene factor inhibidor de tripsina, una proteasa que inhibe la acción proteolítica de la tripsina del abomaso evitando la desnaturalización de las inmunoglobulinas y algunos otros componentes proteicos del calostro.

El calostro es una fuente concentrada de nutrientes; en principio, contiene casi el doble de sólidos totales que la leche, 23.9 % vs. 12.9 % para calostro y leche, respectivamente. Aunque su contenido de lactosa es menor al de la leche (2.7 vs. 5.0%), contiene 1.7 veces más grasa (6.7 vs. 4.0%) y 3.6 veces más proteína (10.8 vs. 3.0%) contabilizando sólo a la caseína y a la albúmina, sin tomar en cuenta el contenido de inmunoglobulinas. El contenido energético de un litro de calostro calculado con los valores nutricionales anteriores es de aproximadamente 1.25 megacalorías (Mcal) de energía metabolizable (EM) por litro; en cambio, la energía de un litro de leche es de aproximadamente 0.69 Mcal de EM. Lo anterior, implica que el calostro tiene aproximadamente 1.8 veces más energía que la leche, por lo que el calostro también está diseñado para cubrir los requerimientos de energía de la becerro para mantenimiento y para crecimiento, esto último siempre y cuando el calostro se administre en cantidades



adecuadas.

En el Cuadro 3, se presenta la cantidad en litros de la toma de calostro que requiere ofrecerse a una becerro siguiendo la recomendación de administrar 10% del peso vivo, así como el aporte de EM de la toma.

Cuadro 1. Requerimiento de energía metabolizable (EM) para mantenimiento y ganancia de 600 gramos por día para becerros con diferentes pesos al nacimiento en condiciones de termoneutralidad = 15 a 25 °C de temperatura ambiental (calculado del NRC, 2001).

Peso al nacimiento, kg	EM para mantenimiento, Mcal/día	EM para ganancia (EMg) de 600 g/día, Mcal/día	Total de EM requerida, Mcal/día
35	1.2	1.8	3.0
40	1.4	1.9	3.3
45	1.5	2.0	3.5

Cuadro 2. Requerimiento de energía metabolizable (EM) para mantenimiento y ganancia de 800 gramos por día para becerros con diferentes pesos al nacimiento en condiciones de termoneutralidad = 15 a 25 °C de temperatura ambiental (calculado del NRC, 2001).

Peso al nacimiento, kg	EM para mantenimiento, Mcal/día	EM para ganancia (EMg) de 800 g/día, Mcal/día	Total de EM requerida, Mcal/día
35	1.2	2.5	3.7
40	1.4	2.6	4.0
45	1.5	2.7	4.2

Cuadro 3. Toma de calostro en litros expresada en equivalente al 10% del peso vivo y cantidad de energía metabolizable (EM) total que aporta para becerros con diferentes pesos al nacimiento.

Peso al nacimiento, kg	Toma de calostro en litros equivalente al 10 % del peso vivo	Aporte total de EM de la toma de calostro, Mcal
35	3.5	4.4
40	4.0	5.0
45	4.5	5.6



De la información de los cuadros anteriores, se debe tener en cuenta que cualquier desviación a la baja en la cantidad de calostro ofrecida durante el primer día de vida de la becerria, no sólo afectará la transferencia adecuada de la inmunidad pasiva, sino que también no se cubrirá el requerimiento de energía de la becerria.

Finalmente, aunque aún no se ha añadido a los modelos de estimación del requerimiento de energía de las becerrias, es importante incluir el requerimiento de energía del sistema inmune cuando se activa; que como se expuso previamente, ya es capaz de montar una respuesta inmune. Cuando hay un desafío, el sistema inmune se vuelve más sensible a la insulina y tras su activación, consume grandes cantidades de glucosa para poder dar soporte a la proliferación celular y procesos biosintéticos. En este caso, si bien no hay estudios en becerrias, se ha estimado que en cerdos en crecimiento (que sería lo más similar a una becerria pre-rumiante), el requerimiento de glucosa del sistema inmune es de 1.1 g por cada kilogramo de peso metabólico por hora. Lo anterior, por ejemplo, en una becerria que pesa al nacimiento 40 kg representa 1.68 Mcal extra por cada 24 horas que esté enferma. Por lo tanto, es de suma importancia que se asegure no sólo que las tomas de calostro se ofrezcan considerando la cantidad de inmunoglobulinas, sino que también se cubran los requerimientos nutricionales de las becerrias para mantenimiento, crecimiento y el sistema inmune.

Puntos clave para obtener lo mejor del calostro

Para que la becerria obtenga la mayor parte de los beneficios del calostro, existen cuatro factores principales, la calidad inmunológica del calostro, la cantidad de calostro con que se alimenta a la becerria, el tiempo en el que la becerria consume calostro por primera vez después de su nacimiento y la calidad sanitaria del calostro.

La calidad inmunológica del calostro está dada por la cantidad de inmunoglobulinas que contiene. La medición del contenido de Ig del calostro se realiza por varias técnicas como lo son la inmunodifusión radial, la espectroscopía de transmisión infrarroja, el ELISA, la cromatografía y la electroforesis; siendo la primera técnica la más común y aceptada. Sin embargo, estas técnicas son costosas y no se pueden realizar a nivel de campo, así que, para fines prácticos se emplean dos técnicas. La primera es estimando la densidad del calostro empleando un pesaleche con una escala definida ya para el calostro, que se conoce como calostrómetro, y el segundo es mediante el empleo de un refractómetro Brix. Ambas técnicas estiman la calidad del calostro de manera indirecta ya que no miden directamente la cantidad de inmunoglobulinas, sino que estiman la cantidad basándose en la correlación que hay entre la densidad del calostro y la cantidad de IgG, en el caso del calostrómetro y, en el caso del refractómetro Brix, la correlación entre la cantidad de sólidos disueltos y la cantidad de IgG, con lo que se fabricó a través de regresiones lineales una escala de equivalencias.



En el siglo pasado y a principios del presente, el calostro de calidad verde o equivalente a 50 g/L registrada en el calostrómetro, se clasificaba como de buena calidad o de primera calidad. Esto porque se consideraba que para que se obtuviera una buena protección contra los patógenos que ocasionan diarrea, con 100 g de IgG que consumiera una becerra, se obtenían al menos 10 g de IgG/L de plasma y que eran suficientes. Lo anterior, basado en investigaciones donde se realizaron cálculos estimando el contenido de plasma como porcentaje del peso vivo de la becerra, el contenido de IgG en el plasma y el calostro, así como la cantidad con que se alimentó a la becerra, donde obtuvieron lo que se conoce como eficiencia aparente de absorción (EAA) y se encontró que el 100% de las inmunoglobulinas no son absorbidas en el intestino, sino que en promedio la EAA es de sólo 35%. Aunque hay trabajos posteriores donde se encontraron rangos de EAA entre 32.6 a 76.9%; donde esta variabilidad puede ser debida a diferentes formas de medir el peso vivo de las beceras, así como la estimación del volumen de plasma, y el tiempo en el que se alimentó con el calostro.

Por lo anterior, inicialmente se recomendaba ofrecer 2 litros de calostro con calidad 50 g/L, tomando en cuenta una EAA de 35% y considerando que el volumen de plasma en la becerra fuera de entre 7 y 9% del peso vivo, se estimó que para que se alcanzaran concentraciones de al menos 10 g de IgG/L de plasma en una becerra de 40 kg, se requería que la becerra consumiera al menos dos litros de calostro con calidad de 50 g/L. Lo anterior, equivaldría a una dosis de 100 g multiplicada por 35% de EAA, resultante en 35 g absorbidos divididos entre 3.2 L de plasma, dando como resultado final 10.9 g/L de IgG en el plasma.

Posteriormente, en la década pasada, se determinó que, para considerar una transferencia de la inmunidad pasiva exitosa, se requieren entre 18 a 25 g de IgG/L de plasma. Por lo que la recomendación actual es ofrecer al menos el 10% del peso vivo al nacimiento de calostro con una calidad de al menos 80 g/L de calificación con el calostrómetro o 25% Brix en el refractómetro, en las primeras 24 horas de vida. Sin embargo, lo anterior ha derivado en diversas recomendaciones y tipos de manejo donde es común observar que se ofrecen sólo de 2 a 3 litros de calostro de primera calidad después del nacimiento y entre 8 a 12 horas después 1 o 2 litros de calidad variable.

El tercer factor es el tiempo en el que se le alimenta con calostro después del nacimiento, o lo que comúnmente se conoce como ofrecerle a la becerra la primera toma de calostro. Lo ideal es que esto se realice en la primera hora después del nacimiento, aunque en la literatura es común encontrar que sea en las primeras dos horas de vida. Sin embargo, entre menor sea el tiempo, será mejor. Lo anterior se debe a que durante aproximadamente las primeras 24 horas de vida el intestino es permeable y permite la entrada de macromoléculas como las inmunoglobulinas y, conforme va pasando el tiempo, el intestino va perdiendo esa permeabilidad de manera gradual, esto es, que deja



pasar cada vez menor cantidad de inmunoglobulinas hasta que cesa la absorción. Además, el tiempo que el intestino permanece permeable es diferente para cada tipo de inmunoglobulina; para la IgG es de 27 horas, para la IgA de 21 horas y para la IgM de sólo 16 horas.

Conclusiones

La calidad sanitaria del calostro es importante ya que, aunque el calostro de manera general dentro de la ubre no contiene patógenos, al momento de su colecta puede contaminarse y volverse una fuente de infección para las becerras. Por lo tanto, se recomienda que no se permita a la becerro amamantarse directamente de la madre porque la ubre puede tener estiércol y con ello, la becerro consuma calostro y la vez patógenos como *E. coli* y *Salmonella* spp. entre otros. Otra de las recomendaciones es que el calostro sea ordeñado de la manera más higiénica posible, siguiendo toda la rutina de ordeño tal y como se hace cuando se ordeña la leche para consumo humano. Adicionalmente, existen otras tecnologías que permiten disminuir el contenido de bacterias en el calostro, como la pasteurización por lotes o tratamiento térmico. De manera general, esta tecnología tiene los mejores resultados cuando se realiza a 60 °C por 60 minutos, pero es importante también mantener un manejo higiénico del calostro pasteurizado durante su pasteurización, su almacenamiento ya sea en refrigeración (no más de 2 días a 4°C) o congelación (-18 a 20 °C hasta por un año), así como al momento de su calentamiento o descongelación y hasta su administración.

Bibliografía

- Actor, J. K., Hwang, S., and Kruzel, M. L. (2009). Lactoferrin as a natural immune modulator. *Current Pharmaceutical Design*, 15(17), 1956-1973. <http://dx.doi.org/10.2174/138161209788453202>
- Baldassarre, M., Naldi, M., Domenicali, M., Volo, S., Pietra, M., Dondi, F., Caraceni, P., and Peli, A. (2017). Simple and rapid LC–MS method for the determination of circulating albumin microheterogeneity in veal calves exposed to heat stress. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 144, 263-268. <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2017.04.041>
- Barrington, G. M., McFadden, T. B., Huyler, M. T., and Besser, T. E. (2001). Regulation of colostrogenesis in cattle. *Livestock Production Science*, 70, 95-104. [https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(01\)00201-9](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(01)00201-9)
- Barrington, G. M., and Parish, S. M. (2001). Bovine neonatal immunology. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*, 17(3), 463-476. [https://doi.org/10.1016/S0749-0720\(15\)30001-3](https://doi.org/10.1016/S0749-0720(15)30001-3)



- Baumrucker, C. R., and Bruckmaier, R. M. (2014). Colostrogenesis: IgG1 transcytosis mechanisms. *Journal of Mammary Gland Biology and Neoplasia*, 19, 103-117. <https://doi.org/10.1007/s10911-013-9313-5>
- Blum, J. W. (2006). Nutritional physiology of neonatal calves. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 90: 1-11. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0396.2005.00614.x>
- Chase, C. C. L., Hurley, D. J., and Reber, A. J. (2008). Neonatal immune development in the calf and its impact on vaccine response. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*, 24, 8-104. <https://doi.org/10.1016/j.cvfa.2007.11.001>
- Cortese, V. S. (2009). Neonatal immunology. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*, 25, 221-227. <https://doi.org/10.1016/j.cvfa.2008.10.003>
- Fischer-Tlustos, A. J., Hertogs, K., van Niekerk, J. K., Nagorske, M., Haines, D. M., and Steele, M. A. (2020). Oligosaccharide concentrations in colostrum, transition milk, and mature milk of primi- and multiparous Holstein cows during the first week of lactation. *Journal of Dairy Science*, 103, 3683-3695. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-17357>
- Godden, S. M., Lombard, J. E., and Woolums, A. R. (2019). Colostrum management for dairy calves. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*, 35, 535-556. <https://doi.org/10.1016/j.cvfa.2019.07.005>
- Gomes, R. D. S., Anaya, K., Galdino, A. B. S., Oliveira, J. P. F., Gama, M. A. S., Medeiros, C. A. C. X., Gavioli, E. C., Porto, A. L. F., and Rangel, A. H. N. (2021). Bovine colostrum: a source of bioactive compounds for prevention and treatment of gastrointestinal disorders. *NFS Journal*, 25, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.nfs.2021.10.001>
- Guy, M. A., McFadden, T. B., Cockrell, D. C., and Besser, T. E. (1994). Regulation of colostrum formation in beef and dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 77, 3002-3007. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(94\)77241-6](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(94)77241-6)
- Hiatt, A. (2014). Designed IgM from glycoengineering. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(17), 6124-6125. <https://doi.org/10.1073/pnas.1404904111>
- Hunt, E., Fu, Q., Armstrong, M. U., Rennix, D. K., Webster, D. W., Galanko, J. A., Chen, W., Weaver, E. M., Argenzio, R. A., and Rhoads, J. M. (2002). Oral bovine serum concentrate improves cryptosporidial enteritis in calves. *Pediatric Research*, 51, 370-376. <https://doi.org/10.1203/00006450-200203000-00017>
- Hurley, W. L., and Theil, P. K. (2011). Perspectives on Immunoglobulins in Colostrum and Milk. *Nutrients*, 3(4), 442-474. <https://doi.org/10.3390/nu3040442>



- Kvidera, S. K., Horst, E. A., Al-Qaisi, M., Dickson, M. J., Rhoads, R.P., Keating, A.F., and Baumgard, L. H. (2017). Leaky Gut's Contribution to Inefficient Nutrient Utilization. *WCDS Advances in Dairy Technology*, 29, 137-143.
- Larson, B. L., Heary Jr., H. L., and Devery, J. E. (1980). Immunoglobulin production and transport by the mammary gland. *Journal of Dairy Science*, 63, 665-671. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(80\)82988-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(80)82988-2)
- Lopez, A. J., and Heinrichs, A. J. (2022). The importance of colostrum in the newborn dairy calf. *Journal of Dairy Science*, 105, 2733-2749. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-20114>
- Martínez, A. A. (2018). *Manual de crianza de becerras*. (3ª ed.). Simiente.
- Menichetti, B. T., Garcia-Guerra, A., Lakritz, J., Weiss, W. P., Velez, J. S., Bothe, H., Merchan, D., and Shuenemann, G. M. (2021). Effects of prepartum vaccination timing relative to pen change with an acidogenic diet on serum and colostrum immunoglobulins in Holstein dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 104, 11072-11081. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-20243>
- NRC. (2001). Nutrient requirements of dairy cattle. (Second Ed.), *National Academy Press*.
- Playford, R. J., and Weiser, M. J. (2021). Bovine Colostrum: Its Constituents and Uses. *Nutrients*, 13, 265. <https://doi.org/10.3390/nu13010265>
- Ramani, A., Taheranbbas, S., and Manik, S. (2024). Bovine colostrum as a promising nutraceutical: a systematic review. *Sustainable Food Technology*, 2, 531-547. <https://doi.org/10.1039/D3FB00256J>
- Rodríguez, H. K., González, A. R., y Núñez, H. G. (2013). *Pasteurización del calostro*. (Folleto para Productores Núm. 2). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- Sangild, P.T., Vonderohe, C., Hebib, V.M., and Burrin, D.G. (2021). Potential benefits of bovine colostrum in pediatric nutrition and health. *Nutrients*, 13:2551. <https://doi.org/10.3390/nu13082551>
- Sherwin, G., and Down, P. (2018). Calf immunology and the role of vaccinations in dairy calves. *In Practice*, 40,102-114. <https://doi.org/10.1136/inp.k952>
- Tóthova, C., Nagy, O., Kováč, G., and Nagyová, V. (2016). Changes in the concentrations of serum proteins in calves during the first month of life. *Journal of Applied Animal Research*, 44, 338-346. <https://doi.org/10.1080/09712119.2015.1031791>



- Vlasova, A. N., and Saif, L. J. (2021). Bovine immunology: implications for dairy cattle. *Frontiers in Immunology*, 12, 643206. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2021.643206>
- Vongbhavit, K., and Underwood, M.A. (2016). Prevention of necrotizing enterocolitis through manipulation of the intestinal microbiota of the premature infant. *Clinical Therapeutics*. 38(4), 716-732. <https://doi.org/10.1016/j.clinthera.2016.01.006>
- Willoughby, R. A., Butler, D. G., and Thornton, J. R. (1970). The influence of management and bovine serum protein on the incidence of diarrhea in calves. *Canadian Veterinarian Journal*, 11, 173-177.

Parámetros reproductivos en bovinos del sistema familiar-traspatio

Ricardo Avilés-Ruiz.
Oscar Guadalupe Barrón-Bravo.
Rubén Darío Garza-Cedillo.
Miguel Ruiz-Albarrán.
Abner Josué Gutiérrez-Chávez.
Juan Samuel Guadalupe Jesús Alcalá-Rico.





Resumen

Si no se alcanza una eficiencia reproductiva en los sistemas de producción de bovinos lechero familiar-traspatio en México, la rentabilidad se verá afectada. En este sentido, dicha eficiencia reproductiva puede evaluarse al comparar los parámetros reproductivos de estos sistemas con los parámetros reproductivos de los sistemas intensivo-especializado. Los parámetros reproductivos sencillos de calcular en los sistemas familiar-traspatio pueden ser el anestro posparto, los días abiertos, el porcentaje de vacas gestantes, servicios por concepción, fertilidad al primer, segundo y tercer servicio, edad al primer servicio y edad al parto. Sin embargo, la ausencia de registros en estos sistemas hace imposible conocer el hato y ver en que se está fallando. El objetivo del presente manuscrito fue conocer cómo se pueden editar, calcular y analizar los parámetros reproductivos de los sistemas lecheros familiar-traspatio en México de una forma sencilla. La metodología que se llevó a cabo fue mediante la consulta de artículos científicos, revisiones, capítulos de libros y boletines, los cuales contienen información que retroalimentó el capítulo. De la redacción y análisis del manuscrito, se llegó a la conclusión que el uso de parámetros reproductivos como indicadores de la eficiencia, tanto en lo reproductivo, productivo, económico, y como en el bienestar animal aun presentan limitaciones en los sistemas de producción de leche en pequeña escala en México. Sin embargo, se requiere continuar registrando los eventos productivos y reproductivos en estos hatos para lograr generar información robusta; así mismo, utilizar programas computacionales o de telefonía móvil (softwares) que faciliten dicha tarea al productor, todo esto con el fin de tener mejor eficiencia productiva y reproductiva.

Palabras clave: Bovinos leche, granja rentable, inseminación artificial, registros..



Introducción

La producción de bovinos lecheros se practica a lo largo de la República Mexicana; sin embargo, no se ha alcanzado la soberanía en cuanto a alimentos lácteos en este país. Por su parte, en la Región de Los Altos de Jalisco (Aguascalientes, Jalisco), el Bajío (Guanajuato y Querétaro) y los estados de Hidalgo, Estado de México y Puebla se albergan la mayoría de hatos lecheros llamados sistemas familiar-traspatio o sistema de producción en pequeña escala y éstos son caracterizados así, por un tamaño de hato menor a 100 vientres en ordeño y un nivel tecnológico pecuario medio.

Debido a que generalmente los sistemas familiar-traspatio no están constituidos como empresas y la rentabilidad del negocio es baja, los integrantes de la familia llevan a cabo las actividades pecuarias. Sin embargo, se descuidan aspectos que pueden incrementar dicha rentabilidad. Un ejemplo de ello son los registros reproductivos y productivos, los cuales dan origen a la evaluación de los parámetros reproductivos.

Los parámetros reproductivos son los datos obtenidos de la anotación de eventos en las vacas de la unidad de producción pecuaria como: la fecha de parto y fecha del servicio ya sea inseminación artificial o monta natural. Proporcionan información para el análisis de las características o parámetros importantes. Además, conocer los valores de los parámetros muestran información objetiva y clara del funcionamiento general del sistema de producción. Por lo tanto, ayudan en la toma de decisiones para modificar cualquier manejo o técnica reproductiva que no esté dando resultados e influya negativamente en la rentabilidad. Por lo anterior, es de gran importancia monitorear todas las actividades reproductivas por insignificantes que parezcan y que posteriormente la información sea procesada, analizada, evaluada e interpretada. En este sentido, la evaluación de la eficiencia reproductiva del sistema familiar-traspatio permite determinar si se están alcanzando los objetivos para llegar a una reproducción eficiente.

Bases de datos para calcular los parámetros reproductivos

Las variables o los parámetros reproductivos son los datos obtenidos de los registros de las unidades de producción pecuaria, los cuales sirven de referencia para planear, en cuanto a mejorar la producción de leche y ciertas características importantes. Además, conocer los valores de algunos parámetros proporciona una visión clara del funcionamiento general del hato ganadero. Mientras que, pueden incrementar la producción, al identificar y modificar cualquier parámetro que influya negativamente en la producción con la sencilla tarea de llevar a cabo registros. Por ejemplo, al momento del parto se pueden registrar, ya sea en papel o en forma digital, todas las actividades o intervenciones llevadas a cabo como: la fecha de parto, si necesito asistencia, si retuvo membranas fetales, el sexo de la cría, peso de la cría, el nombre de la persona que realizó el servicio, si fue propio productor o un técnico, entre otros datos o registros como los abortos (fechas y causas), si es posible la duración del estro, entre otras. Además, otras



consideraciones postparto que pueden registrarse son: infecciones uterinas, frecuencia de mastitis, en fin, todo el conjunto de enfermedades frecuentes en el postparto.

Por lo anterior, los registros deben generarse independientemente del tamaño del hato y pueden ser tan simples como anotaciones en un cuaderno (figura 1), hoja de cálculo, hasta complejos en un programa computacional. En la actualidad, se ha observado que en los sistemas familiar-traspatio se opta por realizar anotaciones en cuaderno, donde generalmente consisten de la identificación de la vaca, fecha de parto, fecha de inseminación (primera, segunda, tercera, y más). De tal forma, mediante las fechas de parto e inseminación se puede calcular el intervalo entre partos, los días abiertos, servicios por concepción, porcentaje de abortos, edad del feto abortado, fertilidad al primer servicio, fertilidad al segundo servicio, fertilidad al tercer servicio, etc. Por otro lado, mediante las fechas de parto de la madre, de la cría de reemplazo (peso al nacimiento y destete) y su fecha de inseminación se puede calcular la ganancia de peso al destete, días al destete, edad al primer servicio y a la concepción. Todos los anteriores, son considerados parámetros reproductivos que reflejan la situación de una unidad de producción pecuaria al obtenerse promedio de ellos.

Cabe mencionar que el principal objetivo por el que los productores de sistemas familiar-traspatio realizan dichas anotaciones, es la necesidad de conocer en qué momento iniciar con la terapia de secado, dado que ellos reconocen que, al no realizar un periodo seco, la curva de lactancia de la vaca se ve afectada drásticamente, lo que compromete la rentabilidad del negocio.

A	B	C	D	E
TECHA	VACA	SEMEN	INS	
30/03/24	R-26	GYR (LUNA) VENDIDA	L	STENO VENDIDA
05/04/24	22-7 BURNET	BOGADOR BIEN	L	2 CARGADA
28/04/24	B9	BEEF MASTER MURTO CRIA	L	3 CARGADA
04/05/24	3A	SIMENTAL BIEN	O	2 CARGADA
09/05/24	R-28 VENDIDA	HOLSTEIN VENDIDA	O	2 CARGADA
10/05/24	M4	BLAEMERLE VENDIDA	O	2 CARGADA
14/05/24	21-10	SIMENTAL	O	2 CARGADA
16/05/24	M6 MULONA HIJA	HOLSTEIN BIEN	L	2 CARGADA
29/05/24	L1 MULONA PANDA	ANGUS VENDIDA	L	2 CARGADA
02/06/24	ACTURA (R-7)	GYR LECHERO	L	2 CARGADA
14/06/24	M4 CHICHA PISADA	GYR LECHERO ABORTO	L	2 CARGADA
21/06/24	(LIMA) M8			
24/07/24	22-7 CUERPODA MANANA FRONTE	SUIZO	L	2 CARGADA
04/08/24	M8 CHICHIS FIDEO	HOLSTEIN	L	2 CARGADA

Figura 1. Cuaderno de registros de un sistema familiar-traspatio, donde se puede apreciar en las columnas de izquierda a derecha, la fecha de inseminación (A), la



identificación de la vaca (B), la raza del semen de toro que se utilizó (C), inicial del técnico inseminador (D) y resultado del diagnóstico de palpación (E).

Con respecto a la rentabilidad en los sistemas de producción de bovinos lecheros familiar-traspatio, sea reportado que es baja, aun cuando llevan a cabo las actividades pecuarias los integrantes de la familia. Sin embargo, al enfocarse en la labor del día a día, se descuidan aspectos que pueden incrementar dicha rentabilidad como es el análisis de los parámetros reproductivos.

Otro aspecto importante es que en las últimas décadas la inseminación artificial es una práctica reproductiva común en los sistemas familiar-traspatio, lo cual es una ventaja para obtener bases de datos certeros específicos de cada hato lechero. Sin embargo, los productores no tienen los conocimientos y el tiempo para editar y analizar dichos registros y, así evaluar los parámetros antes mencionados. De hecho, otro parámetro que se puede incluir y, el cual muchos productores no monitorean, es la condición corporal de la vaca lechera en momentos críticos, es importante para poder hacerlo saber distinguir en que condición corporal se encuentra (tabla 1). Por lo que a continuación se describen y ejemplifican los parámetros reproductivos que se pueden calcular sencillamente a partir de registros de los sucesos de cada vaca.

Tabla 1. Etapas en las que se debe verificar la puntuación de la condición corporal.

Etapas fisiológicas	Condición corporal
Al parto	>2.5, Pero <3.25
A la inseminación	2.5
Al secado	>2.5 a 3.25

Parámetros reproductivos

La eficiencia reproductiva de un hato ganadero es derivada de la respuesta en particular del genotipo del animal a su ambiente. La capacidad genética de los animales se determinará por su capacidad de enfrentarse con un ambiente bajo estrés, como el clima, las enfermedades endémicas, parasitismo y el manejo de la vaca previo y posterior al parto, en cuanto a su desequilibrio metabólico (enfermedades metabólicas) durante el parto, al mantener una alta producción de leche y retornar a la ciclicidad ovárica lo antes posible.

En lo particular, los sistemas de producción familiar-traspatio cuentan con hatos reducidos en el número de cabezas de ganado, y se caracterizan por no implementar programas de manejo reproductivo ni mejoramiento genético. El manejo reproductivo y genético en este tipo de sistemas, en menor proporción se lleva a cabo mediante el uso de toros de la región de diversas razas (Holstein, Pardo Suizo y Jersey) y en mayor proporción con la inseminación artificial; no obstante, el alto costo de las pajillas de semen importado



de toros probados para los productores de este sistema es considerable, por lo que se emplean por lo general pajillas de semen de toros nacionales. Además de la inseminación artificial, es reducido el uso de otras biotecnologías reproductivas para la detección de calores y la sincronización de los animales con inseminación a tiempo fijo con pajillas de semen probado e incluso sexado, entre otras.

Entre los parámetros reproductivos más simples que se pueden obtener de los sistemas familiar-traspatio tenemos:

Fertilidad

Este término se describió como el porcentaje del número total de vacas preñadas en el hato con respecto al número total de hembras en el hato. Posteriormente, se modificó el término como la proporción de vacas que pueden quedar preñadas del total de vacas elegibles para inseminación con un ciclo estral activo y normal, el cual es expresado como la tasa de preñez o gestación y en algunos casos se conoce como tasa de concepción. Dicho parámetro se puede obtener mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Fertilidad} = \left(\frac{\text{Total de vacas que quedaron preñadas}}{\text{Total de vacas que fueron servidas}} \right) 100$$

Otra forma de conocer el porcentaje de vacas gestantes en el hato sería mediante la palpación rectal a todas las vacas con más de 38 días post-inseminación hecha por un técnico especializado, en un momento determinado.

Además, se puede obtener la fertilidad al primer, segundo y tercer servicio, calculándose mediante las siguientes fórmulas:

Fertilidad al primer servicio

$$= \left(\frac{\text{Número de vacas que quedaron preñadas en el 1er. servicio}}{\text{Total de vacas que fueron servidas por primera vez}} \right) 100$$

Fertilidad al segundo servicio

$$= \left(\frac{\text{Número de vacas que quedaron preñadas en el 2do. servicio}}{\text{Total de vacas que fueron servidas por segunda vez}} \right) 100$$

Fertilidad al tercer servicio

$$= \left(\frac{\text{Número de vacas que quedaron preñadas en el 3er. servicio}}{\text{Total de vacas que fueron servidas por tercera vez}} \right) 100$$



Intervalo entre partos

Este parámetro es la diferencia en tiempo, comúnmente días, entre dos partos consecutivos de la vaca. Dicho parámetro se obtiene de forma sencilla en los sistemas de producción de bovinos lecheros familiar-traspatio debido a que los productores generalmente anotan la fecha de parto (figura 2) y posteriormente en hojas de cálculo de Excel® (figura 3) se puede obtener al restar las fechas de los partos.

Días abiertos

Se define como el tiempo (días) que ha transcurrido desde el día del parto hasta el día que la vaca se le dio servicio y quedó gestante. Este parámetro es afectado directamente por el anestro posparto, el cual, a su vez en vacas altas productoras de leche, se ha demostrado que es afectado por situaciones como la pérdida de condición corporal y balance energético negativo, desórdenes metabólicos y patologías uterinas, salud de la ubre y cojera. Por otro lado, en los sistemas de producción de bovinos lecheros familiar-traspatio otros factores a considerar son el manejo del semen al momento del servicio, la deposición en cuanto número de espermatozoides en el sitio ideal del tracto reproductivo en el tiempo del ciclo estral apropiado (tabla 2). De hecho, la inseminación artificial en este tipo de sistemas es una biotecnología usual. Sin embargo, los ranchos dependen de la mano de obra de un técnico, quién presta sus servicios en varias unidades de producción, lo cual es causa de constantes retrasos y no se brinda el servicio a la vaca en el momento óptimo.

Tabla 2. Intervalos que muestran el momento correcto en que se debe llevar a cabo la inseminación artificial o la monta con toro en la vaca.

Método reproductivo	Tiempo después del inicio del estro (horas)				
	0-5	6-11	12-17	18-23	>24
Inseminación Artificial	Precipitado	Bueno	Óptimo	Bueno	Tardío
Monta	Precipitado	Óptimo			Tardío

En la práctica los días abiertos en los sistemas de producción de bovinos lecheros familiar-traspatio es sencillo calcular mediante las fechas de parto y la fecha de inseminación (figura 4) en la cual la vaca logró una gestación.





	A	B	C	D	E	F	G	H
1	ID	F. PARTO	1	2	3	4	5	6
69	118 0756	28-feb-23	192	145				
70	117	18-ago-22	139	198				
71	115			148	47			
72	113 0763	11-sep-21	270	67	183			
73	108 0752	24-sep-20	149	39	52	281		
74	107 0762	24-ene-20	192	83	65	152	74	
75	105 0780	10-abr-20	213	111	263	106	182	62
76	104 0748	03-mar-20	252	128	229	126	85	
77	103 0751	07-ene-20	115	345	168	222		
78	98 0774	22-feb-20	213	121	129	149		

Figura 4. Registros de un conjunto de vacas en hoja de cálculo de Excel® de un sistema de producción de bovinos lecheros familiar-traspatio, donde se puede apreciar en las columnas de izquierda a derecha la identificación de la vaca [número de control interno (rectángulo azul) y últimos cuatro dígitos de arete SINIIGA (rectángulo rojo; A], la fecha del primer parto (B), el primer (C), segundo (D) y n días abiertos, los cuales se obtuvieron restando a la fecha de inseminación artificial (no mostrada), la fecha del primer parto (B) y así consecutivamente.

Nota: cada fila corresponde a la información a cada una de las vacas y en otras hojas de cálculo se registró la fecha de las inseminaciones subsecuentes.

Una práctica que es poco común en sistemas de producción de bovinos lecheros familiar-traspatio, es la sincronización hormonal de las vacas con el fin de reducir los días abiertos. En este aspecto, se puede mencionar que el ciclo estral en vacas lecheras es un proceso dinámico y que el desarrollo y crecimiento de folículos y el cuerpo lúteo son regulados por cambios en la secreción y patrones de diferentes hormonas endócrinamente, las cuales en la actualidad se encuentran de forma sintética y se pueden administrar a la vaca para control y manejo del ciclo estral. Sin embargo, la habilidad y capacidad de entendimiento del ciclo estral será lo que dará resultados favorables a los técnicos, incluyendo a los propietarios de los sistemas a pequeña escala.

Número de servicios por concepción

Cantidad de inseminaciones (servicios) promedio que se requieren para lograr la gestación en un hato determinado. Se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$\text{Número de servicios por concepción} = \left(\frac{\text{Número total de servicios realizados}}{\text{Total de vacas que fueron servidas}} \right)$$



En la figura 5 se muestra cómo se puede organizar las inseminaciones que se realizan a cada vaca con el fin de calcular el número de servicios por concepción en una hoja de cálculo del programa Excel®.

	A	B	C	D	E	F
1	ID	PRIMERA IA	SEGUNDA IA	TERCERA IA	CUARTA IA	QUINTA IA
16	225	22-ene-25				
17	222	21-nov-24	27-ene-25			
18	221					
19	220	27-ene-25	01-abr-25			
20	138	07-oct-24	08-nov-24			
21	219	29-ago-24				
22	218	30-ene-24				
23	217	18-abr-24				
24	216	29-abr-24	26-jul-24			
25	215					
26	214	20-ago-24	11-sep-24	18-nov-24	17-dic-24	
27	213	08-sep-24				
28	212	19-may-24				
29	211	31-ago-24	07-nov-24			
30	209	24-jun-24	15-ago-24	11-sep-24	29-oct-24	
31	208	23-may-24	20-ago-24			
32	207	11-jun-24	24-sep-24			
33	205	07-oct-24				

Figura 5. Registros de un conjunto de vacas en hoja de cálculo de Excel® de un sistema de producción de bovinos lecheros familiar-traspatio, donde se puede apreciar en las columnas de izquierda a derecha la identificación de la vaca (rectángulo azul; A), la fecha de la primera (B) y, si es el caso, segunda (C) y n inseminación. En vacas que no han sido inseminadas o servidas en ninguna ocasión, la fila está en blanco (rectángulo rojo).

Nota: cada fila corresponde a la información a cada una de las vacas.

Edad al primer servicio

Es importante resaltar que a la par con la edad al primer servicio, el peso o en su caso la condición corporal de la vaquilla es lo que define el estímulo del eje hipotalámico-gonadal. En este sentido, las reservas corporales de tejido adiposo juegan un rol determinante para que se lleve a cabo la pubertad. Sin embargo, en los sistemas de producción de bovinos lecheros familiar-traspatio, el desarrollo de becerras para repoblación del hato por lo general es deficiente, dado que a esta edad representan una carga económica para el



productor por no percibir un ingreso de ellas por varios meses.

Se ha encontrado que en los sistemas de producción de bovinos lecheros familiar-traspatio, monitorear el peso de los animales es una tarea complicada, debido a la carencia de básculas para este fin en las granjas. Lo anterior, aunado a lo que caracteriza a estos sistemas que es su reducido número de cabezas, por lo cual no resulta factible el adquirir este equipo.

No obstante, registrar la fecha al primer servicio es importante, dado que con ello se puede calcular la edad al primer servicio (figura 6), lo cual nos brindará una idea si estamos produciendo reemplazos eficientemente.

Peso al primer parto

Durante el crecimiento, el destete de las becerras, crianza artificial, en los sistemas familiar-traspatio en el Bajío Mexicano es una de las etapas que repercute directamente en un bajo peso al primer servicio (342 kg), así como al primer parto (507.5 kg), los cuales están por debajo en comparación con los de producción de leche intensivo-especializado (>550 kg). Por lo que el bajo peso al primer servicio y al parto, se consideran un problema para los sistemas familiar-traspatio, debido a la alta probabilidad de que la vaquilla no logre una gestación a causa de factores como deficiencias nutricionales y, en caso de quedar gestante, las vaquillas con baja corpulencia tienden a presentar partos distócicos.

Al no producir reemplazos con parámetros adecuados, estos sistemas productivos resultan deficientes productiva y reproductivamente, por tanto, menos rentables.

Condición corporal

La condición corporal es un método subjetivo para determinar la cantidad de reserva energética que se puede metabolizar (catabolismo) y que se encuentra almacenada como tejido adiposo y muscular en el bovino. De tal forma que la evaluación de la condición corporal se ha utilizado como una herramienta para predecir el estado nutricional de los bovinos.

En el caso del ganado bovino lechero, la cantidad de reservas adiposas que la vaca tiene al parto influye en la presentación de mayor probabilidad de presentar un parto distócico, menor producción láctea y problemas reproductivos. En este último, probablemente un mayor tiempo de retorno a la ciclicidad y, mayor número de días abiertos, lo cual se puede prevenir con el simple hecho de monitorear la condición corporal. Dentro de las ventajas que presenta son:

- ☐ Una vez que se tiene práctica es fácil de estimar.
- ☐ Con el simple hecho, de que los animales crucen o pasen ante el ojo y tacto del técnico, se puede determinar rápido.
- ☐ Con la ayuda de un lápiz y un cuaderno, se registran los valores de condición



corporal junto con la identificación del animal, en su caso nombre de la vaca, por lo que es un parámetro de muy bajo costo.

- ☐ Al tener práctica, se tendrá el mismo criterio de evaluación para todos los animales.

1		FEBRERO	1
2	ID	230	
3	F. DE NACIMIENTO	13-feb-24	
4	EDAD (M)		
5	# DE PARTO	2	
6	PADRE	BOAZ RC 202HO01001	
7	ABUELO PATERNO	Superstition	
8	ABUELA PATERNA	Alchemy	
9	MADRE	125	
10	PESO	41	
11	A. A LA CRUZ		
12	LARGO DE PELVIS		
13	ANCHO DE PELVIS		
14	ALTURA A LA GRUPA		
15	P. TORÁCICO		
16	LARGO		
17	EVENTOS DE DIARREA		
18	EVENTOS DE NEUMONÍA		
19	GDP AL DESTETE	0.418	
20	DÍAS AL DESTETE	118	
21	retención de placenta	sí	
22	asistencia al parto	sí	
23			
24	PRIMERA IA	08-abr-25	
25	DÍAS A LA 1RA IA	420	

Figura 6. Hoja de cálculo de Excel® del registro de una cría de reemplazo, la cual tuvo el número interno de identificación 230 (rectángulo negro) en un sistema de producción de bovinos lecheros familiar-traspatio, donde se puede observar la fecha de nacimiento (rectángulo azul) y primera inseminación (rectángulo rojo), con las cuales se obtuvo la edad (días) a la primera inseminación (rectángulo verde).

Por lo anterior, la condición corporal es el parámetro por excelencia para adoptarse en los sistemas familiar-traspatio, que será de gran utilidad para subsanar problemas subsecuentes del ganado. Sin embargo, presenta algunas desventajas como:

- ☐ Al ser subjetivo, que no hay un dispositivo que realice la medición, queda a



criterio de cada evaluador. Al respecto, en la actualidad se han desarrollado aplicaciones que se pueden descargar al teléfono móvil y por medio de fotografías determina un valor, el cual no es del todo confiable aún.

- ☐ Al momento de realizar la evaluación, en realidad su alta o baja condición corporal, fue consecuencia de su manejo nutricional en el pasado del animal y no del momento en que se está evaluando.

Los propietarios de los sistemas familiar-traspatio, en su mayoría, no han implementado dicho parámetro porque se requiere práctica y experiencia para evaluar correctamente a los animales. Al respecto se requiere asesoría de un técnico con experiencia. De hecho, algunos productores han aprendido a evaluar la condición corporal con la ayuda de videos de YouTube, grupos de ganaderos de WhatsApp y en podcast. Además, para que dichos productores le encuentren un sentido a realizar este parámetro productivo deben conocer los beneficios a corto y largo plazo; así mismo, se debe tener en cuenta factores como la raza, estado fisiológico, edad, época del año y momento en que es necesario una evaluación de la condición corporal. Para lo anterior, el productor debe tener en cuenta que una vaca al parto que se encuentran demasiado delgada, muy probablemente presentará una menor curva de lactancia, mayor incidencia de trastornos metabólicos como: cetosis, retención de membranas fetales, hipoglucemia, en fin, todo el conjunto de problemas que inciden posteriormente en una eficiencia reproductiva. Por otro lado, la vaca que llega al parto obesa es muy probable que presente complicaciones al momento de la expulsión de la cría (parto distócico) y posteriormente, una menor ingesta de materia seca en la lactancia temprana e incluso en su periodo de transición. Lo anterior puede provocar que aumente la probabilidad de que presente un desorden metabólico, culminando en los problemas anteriormente mencionados será muy probable.

La condición corporal para el ganado bovino lechero se mide en una escala que va del 1 al 5, donde 1 = muy delgada, 2 = delgada, 3 = regular, 4 = gorda, y 5 = muy gorda.

De forma general, el parámetro denominado condición corporal, es una herramienta que se utiliza para tomar decisiones en cuanto a las prácticas de alimentación y manejo, con el fin de maximizar el potencial de producción de leche y minimizar los trastornos reproductivos. Dado que los cambios en la condición corporal a lo largo del ciclo productivo de la vaca están en cambio constante, se pueden evaluar de forma certera, determinando el grado en que el bovino engorda, simplemente palpando y observando ciertas regiones anatómicas (figura 7). En este sentido, la condición corporal se asigna de acuerdo a la cantidad de tejido adiposo subcutáneo presente en las áreas de la pelvis, la espina dorsal, la grupa y la base de la cola, con especial énfasis en estas dos últimas. En general, esta medida es la herramienta más común y económica para tomar decisiones correctas sobre el hato. Sin embargo, surgen algunas preguntas sobre su uso.

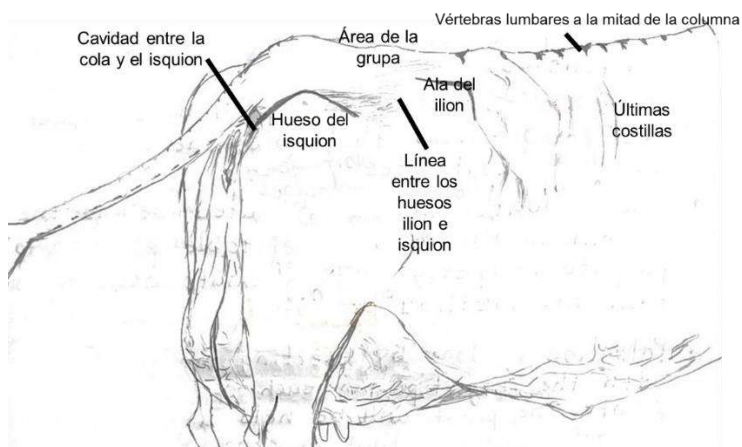


Figura 7. Regiones anatómicas en el animal que se palpan y observan para evaluar la condición corporal en vacas lecheras. Fuente: Elaboración propia.

¿Cómo se debe realizar una correcta evaluación de la condición corporal?

Antes de evaluar la condición corporal es necesario que el productor o técnico conozca la estructura ósea que se evaluará, por lo que la figura 8 representa dichas regiones óseas que se deben conocer.

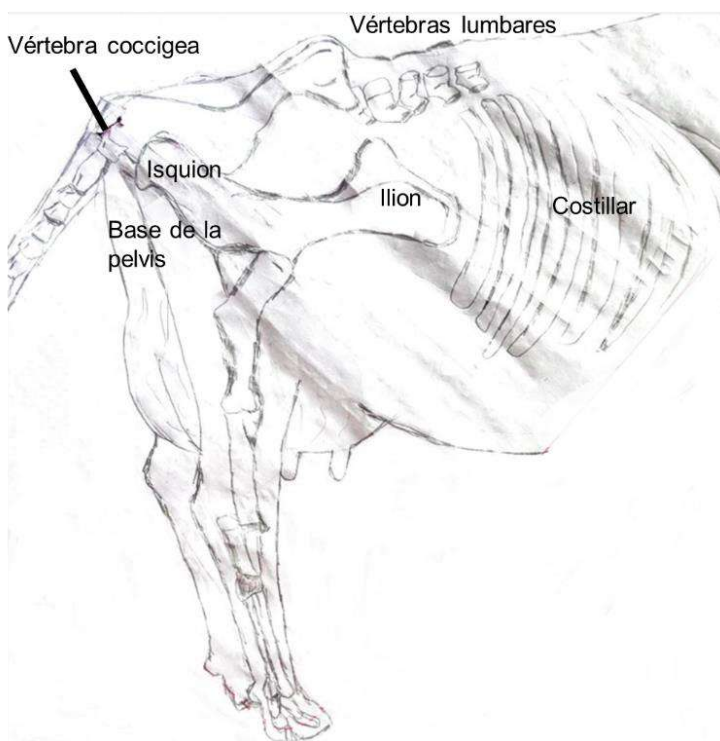


Figura 8. Regiones óseas en el animal que se palpan para evaluar la condición corporal en vacas lecheras. Fuente: Elaboración propia.



El procedimiento para realizar la evaluación es el siguiente: a) los animales deben estar de pie sobre una superficie plana y firme, evitando tensiones que obliguen al animal a adoptar una posición contraída. Se debe realizar la adecuada sujeción del bovino para evitar accidentes b) el evaluador debe ubicarse detrás del animal en la posición más cómoda para palpar adecuadamente todas las regiones anatómicas (figura 9). Mientras tanto, la palpación se realiza ejerciendo una presión moderada con las yemas de los dedos, en cada uno de los puntos que se indican a continuación. La primera se realizará a nivel de la región pélvica que va desde la base de la cola, incluyendo la grupa, los huesos de la pelvis (isquion e ilion) y las últimas costillas. C) se clasifica la región de la columna vertebral, lo que sirve para ajustar la puntuación del rango. d) se revisan las áreas con cavidades profundas, prominencias óseas marcadas, apófisis vertebrales, punta de la grupa o depósitos de grasa.

¿Cuántos bovinos deben evaluarse para determinar la condición corporal y cuándo? Se debe evaluar al menos al 20% de las vacas de cada grupo. Se calcula la puntuación media y se compara con la condición ideal (Cuadro 1).

¿Por qué se debe realizar una evaluación de la condición corporal? Esto es debido a que la desnutrición no es deseable y debe manejarse con cuidado en etapas como el posparto. Por ejemplo, una condición corporal de uno o dos puntos posparto indica un balance energético negativo profundo. De hecho, el objetivo es que el 80% de las vacas no pierdan más de 0.5 puntos entre el parto y los primeros 30 días de lactancia. Asimismo, una puntuación de la condición corporal de alrededor de tres puntos debería ser típica de una vaca que está recuperando reservas corporales durante la primera mitad de la curva de lactancia. De la misma manera, durante la última parte de la lactancia y el período seco, es deseable una condición corporal de 3.5 puntos. En este sentido, a medida que la producción de leche disminuye al final de la lactancia, las vacas ganan peso corporal de forma eficiente. Por lo tanto, la sobrealimentación con concentrado es un error común de manejo en esta etapa. Las vacas alimentadas con demasiado concentrado al final de la lactación tienden a presentar obesidad, hígado graso (puntuación de condición corporal superior a 4.5) y problemas de cetosis en la lactación posterior (1-2 semanas después del parto). Estas enfermedades suelen denominarse trastornos metabólicos. Por lo tanto, el hígado graso como la cetosis probablemente forme parte de un conjunto de afecciones relacionadas con la intensa movilización de ácidos grasos del tejido adiposo (reserva corporal) hacia el hígado y posteriormente a la glándula mamaria para la síntesis de componentes lácteos durante el período de parto (inicio de la lactación).

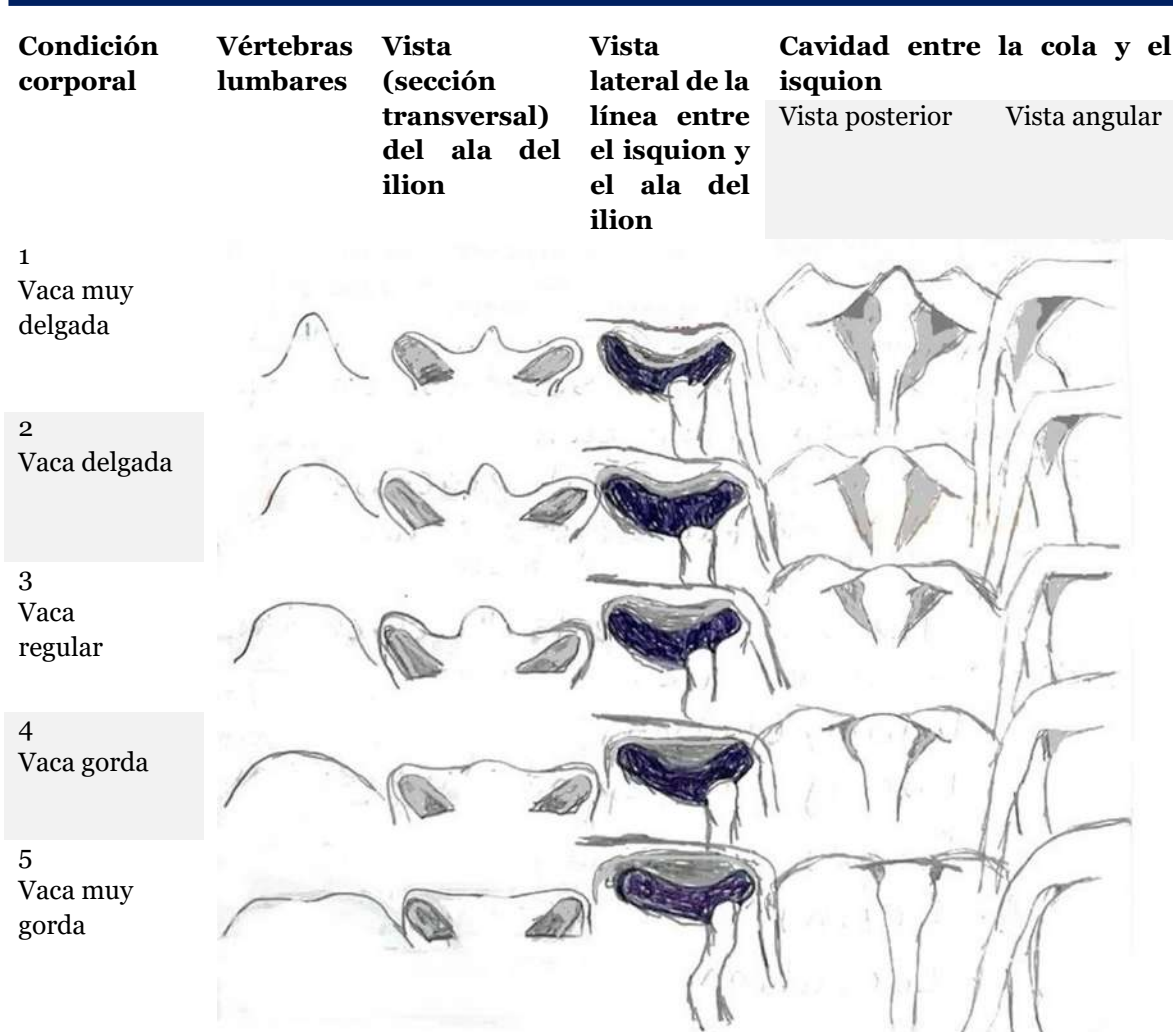


Figura 9. Diagrama de las regiones que se palpan para evaluar la condición corporal. Modificado de Edmonson *et al.*, 1989.

Conclusiones

El uso de parámetros reproductivos como indicadores de la eficiencia, tanto en lo reproductivo, productivo, económico, y como en el bienestar animal aun presentan limitaciones en los sistemas de producción de leche en pequeña escala en México. Sin embargo, se requiere continuar registrando los eventos productivos y reproductivos en estos hatos para lograr generar información robusta; así mismo, utilizar programas computacionales o de telefonía móvil (softwares) que faciliten dicha tarea al productor, todo esto con el fin de tener mejor eficiencia productiva y reproductiva.



Bibliografía

- Alamu, T. W., Schuermann, Y., Madogwe, E., Yves, A. S., Dicks, N., Bohrer, R., Higginson, V., Mondadori, R. G., de Macedo, M. P., Taibi, M., Baurhoo, B., Bordignon, V., & Duggavathi, R. (2024). Severe body condition loss lowers hepatic output of IGF1 with adverse effects on the dominant follicle in dairy cows. *Animal*. 18: 101063. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2023.101063>
- Avilés-Ruiz, R., Barrón-Bravo, O. G., Gutiérrez-Chávez, A. J., & Ruiz-Albarrán, M. (2024). Principales sistemas de producción de leche de bovinos en México: recopilación actual de parámetros productivos, reproductivos y de manejo. *Ciencias Veterinarias y Producción Animal*. 1(2):32-47. <https://doi.org/10.29059/cvpa.v1i2.16>
- Avilés-Ruiz, R., Barrón-Bravo, O. G., Alcalá-Rico, J. S. G. J., Salinas-Chavira, J., Flores-Nájera, M. J., & Ruiz-Albarrán, M. (2022). Deficiencias nutricionales que afectan al reinicio de la ciclicidad posparto en bovinos doble propósito. *Abanico Veterinario*. 12:1-21. <http://dx.doi.org/10.21929/abavet2022.251>
- Avilés-Ruiz, R., Barrón-Bravo, O. G., Ruiz-Albarrán, M., & Garza-Cedillo, R. D. (2023). Parity affects calving interval in dual-purpose cattle in the Mexican tropics. *The Pharma Innovation Journal*. 12:01-04. <https://www.thepharmajournal.com/archives/?year=2023&vol=12&issue=3&ArticleId=18792>
- Camacho-Vera, J. H., Cervantes-Escoto, F., Palacios-Rangel, M. I., Cesín-Vargas A., & Ocampo-Ledesma, J. (2017). Especialización de los sistemas productivos lecheros en México: la difusión del modelo tecnológico Holstein. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*. 8(3):259-268. <http://dx.doi.org/10.22319/rmcp.v8i3.4191>
- Cardoso-Consentini, C. E., Wilbank, M. Ch., & Santori, R. (2021). Factors that optimize reproductive efficiency in dairy herds with an emphasis on timed artificial insemination programs. *Animals*. 11:301. <http://dx.doi.org/10.3390/ani11020301>
- Edmonson, A. J., Lean, I. J., Weaver, L. D., Farver, T., & Webster, G. (1989). A body condition scoring chart for Holstein dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 72:68-78. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(89\)79081-0](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(89)79081-0)
- Espinosa-Martínez, M. A., Vera-Ávila, H. R., Estrada-Cortés, E., Ruiz-López, F. J., & Montiel-Olgún, L. J. (2025). Effects of assisted calving and retained fetal membranes on milk production in the smallholder farming system. *Veterinary and Animal Science*. 27: 100418. <https://doi.org/10.1016/j.vas.2024.100418>



- Fernández, I. G., Ulloa-Arvizu, R., & Fernández, J. (2018). Milk yield did not decrease in large herds of high-producing Holstein cows in semi-arid climate of Mexico. *Tropical Animal Health and Production*. <https://doi.org/10.1007/s11250-018-1669-5>
- Galina, C. (2021). Reproducción de los animales domésticos. Libro digital. ISBN: 978-607-02-9129-6 <https://reproduccionanimalesdomesticos.fmvz.unam.mx/>
- González-Orozco, T. A. (2022). Indicadores productivos y reproductivos de referencia en lechería familiar en Guanajuato. *XVI Seminario de Investigación y Transferencia de Tecnología Agropecuaria en el estado de Querétaro*. Disponible en: https://youtu.be/A1nIXg2Oi_M
- Kusaka, H., Yamazaki, T., & Sakaguchi, M. (2023). Association of age at first calving with longevity, milk yield, and fertility up to the third lactation in a herd of Holstein dairy cows in Japan. *Journal of Reproduction and Development*. <http://doi.org/10.1262/jrd.2023-012>
- Lucy, M. C. J., Savio, D., Badinga, L., De La Sota R. L., & Thatcher, W. W. (1992). Factors that affect ovarian follicular dynamics in cattle. *Journal of Animal Science*. 70:3615-3626.
- Mendoza-Carrillo J, Martínez-Yáñez R, Díaz-Plascencia D, Avila-Ramos, F. (2015). Effect of body condition of holstein cows on water holding capacity, insoluble collagen and shear force in *Longissimus dorsi*. *AbanicoVeterinario*. 5(2):19-27. <https://shorturl.at/uXIE3> 5.
- Montiel-Olguín L. J., Estrada-Cortés E., Espinosa-Martínez M. A., Mellado M., Hernández-Vélez J. O., Martínez-Trejo G., Ruiz-López F. J., & Vera-Avila H.R. (2018). Risk factors associated with reproductive performance in small-scale dairy farms in Mexico. *Tropical Animal Health and Production*. <https://doi.org/10.1007/s11250-018-1681-9>
- Ríos-Mohar, J. A., López-Díaz, C. A., Hernández-Cerón, J., & Trueta-Santiago, R. (2022). Economic analysis of different pregnancy rates in dairy herds under intensive management. *Veterinaria México* OA. <https://doi.org/10.22201/fmvz.24486760e.2022.631>
- Ruiz-Albarrán, M., Avilés-Ruiz, R., Barrón-Bravo, O. G., Gutiérrez-Chávez, J. A. (2025). Comparación de parámetros reproductivos en bovinos bajo dos sistemas de producción de leche familiar-traspatio del Bajío. *Ciencias Veterinarias y Producción Animal*. 3:32-39. <https://doi.org/10.29059/cvpa.v3i1.38>
- Senger, P.L. (2003). Pathways to pregnancy and parturition. 2sd revised. Chapter 7. pp145-160. Current Concepts, Inc. Pullman, WA.

El uso de suplementos alimenticios modifica la producción de cabritos y la composición de la leche en cabras bajo sistema de pastoreo.

Ricardo Avilés-Ruiz.
Mauricio Velázquez-Martínez.
Juan Samuel Guadalupe Jesús Alcalá Rico.
Oscar Guadalupe Barrón-Bravo.
Jorge Maldonado-Jaquez.
Leonardo Iván Vélez-Monroy.





Resumen

En las regiones áridas y semiáridas de México, la producción caprina enfrenta desafíos nutricionales que afectan la eficiencia reproductiva y productiva. El pastoreo extensivo sobre flora nativa no cubre los requerimientos energéticos de las cabras, especialmente durante etapas críticas como el empadre, la gestación y la lactancia. Por ello, se ha evaluado la suplementación estratégica con recursos accesibles como pasta de soya, nopal, maguey, concentrados comerciales y grasas de sobrepaso. La suplementación antes del empadre mejora la tasa ovulatoria, la condición corporal y la tasa de preñez, especialmente cuando se combina con el efecto macho. Estudios han demostrado que al menos 14 días de suplementación con alfalfa, maíz y pasta de soya incrementan significativamente la eficiencia reproductiva. La pasta de soya destaca por su alto contenido proteico y de aminoácidos esenciales, siendo una opción viable en épocas de estiaje. Durante la lactancia, la suplementación energética y proteica favorece la producción láctea, especialmente en la fase temprana. Las grasas de sobrepaso, como el ácido palmítico, aumentan la densidad energética de la dieta, mejoran el balance energético y estimulan la síntesis de componentes lácteos. La fotoestimulación con días largos también potencia la producción de leche al activar hormonas galactopoyéticas. El uso de suplementos vegetativos como el nopal y el maguey ha sido explorado como alternativa sustentable, aunque sus efectos reproductivos aún son limitados. La falta de registros productivos y reproductivos en los rebaños limita la eficacia de la suplementación. En conclusión, la suplementación estratégica con ingredientes accesibles y nutritivos mejora la productividad caprina, reduce desigualdades económicas y promueve sistemas sostenibles en zonas marginadas.

Palabras clave: suplementación estratégica, pasta de soya, empadre, lactancia, grasa de sobrepaso, condición corporal.



Introducción

En la vasta región árida y semiárida de México, Altiplano centro-norte, se alberga el mayor inventario ganadero caprino de este país. Sin embargo, existen diferencias en cuanto al manejo pecuario dentro de esta región. Resultado de ello, es el caso de la Región del Altiplano Tamaulipeco, donde los productos más comercializados son: el cabrito a través de intermediarios, cuyo destino final es principalmente la ciudad de Monterrey, México y el queso realizado de manera artesanal comercializado localmente y en las ciudades y localidades cercanas. Por otro lado, en la Región Lagunera la leche fluida de cabra es recolectada diariamente para ser procesada industrialmente. En ambos casos, pastoreo extensivo, los caprinocultores no han logrado producir eficientemente (ni leche, ni cabrito), por un lado, debido principalmente a la estacionalidad reproductiva de los caprinos en esta región subtropical de México y, por otro, al efecto de la subnutrición durante la época de empadre, así como a la falta de asesoría y seguimiento adecuados.

Con respecto a la dieta de los caprinos en pastoreo, ésta se basa únicamente en la flora nativa con variaciones en su contenido nutricional dependiente de la época del año, misma que no cubre los requerimientos nutricionales de las cabras tanto de mantenimiento como para la reproducción, como se mencionó anteriormente. Por tanto, al momento del empadre aumentar e incluso mantener la producción de leche y disminuir la pérdida de peso y condición corporal saludable de la cabra es el reto al que se enfrenta el productor de caprinos. Por lo que se requiere de incorporación de suplementos como apoyo a la dieta de los animales para satisfacer sus necesidades fisiológicas durante estas etapas, las cuales definen la eficiencia reproductiva y productiva, influyendo directamente en la rentabilidad del rebaño. De tal forma que es fundamental ofrecer un buen suplemento para complementar la dieta para lograr un mejor desempeño reproductivo y productivo, y poder obtener mayores ingresos. No obstante, aun cuando el abanico de suplementos alimenticios es amplio, los productores tienen muchas veces alguna limitante para conseguirlo, tanto por su disponibilidad o valor monetario, así como el desconocimiento de cómo utilizarlo. De tal forma que en las zonas semiáridas existe una amplia gama y distribución de los recursos que se pueden utilizar como complementos alimenticios, por ejemplo, en el Altiplano Potosino se han evaluado diferentes alimentos que sean accesibles para el pequeño productor y sostenibles, tal es el caso del maguey y nopal. Por otro lado, en la Región Lagunera la vaina de mezquite, la cual concentra nutrientes, ha sido evaluada. Así como se ha evaluado sobrantes de la dieta del ganado bovino lechero en esta misma región con el fin de obtener una tasa de retorno de inversión (economía circular). Dichos materiales vegetativos deben ser hacia un desarrollo sustentable y contrarrestando los efectos del cambio climático.



Importancia social y económica de la suplementación en el ganado caprino en pastoreo

De manera global, la mayoría de los sistemas de pastoreo extensivos de caprinos están situados en zonas áridas o semiáridas de países subdesarrollados. En México, existen tres regiones principalmente que practican la caprinocultura [noreste (doble propósito en los estados de Coahuila, Durango, Nuevo León, Zacatecas y San Luis Potosí), centro (producción de leche en los estados de Guanajuato y Querétaro) y sur (producción de carne en los estados de Guerrero y Oaxaca)] y esta actividad proporciona los ingresos a los productores en estas regiones, de las cuales en la mayoría existe marginación social. De tal forma que muchas de las unidades de producción se caracterizan por tener un bajo nivel socioeconómico, escasez de recursos naturales como el agua, y los animales son alimentados con la vegetación nativa que presenta variaciones en cantidad y calidad nutricional a lo largo del año.

En general, la baja producción de cabrito y de leche de cabra en las regiones de México provocan una menor ganancia en sus productos generados y por ende mayor desigualdad en la distribución de la riqueza, debido posiblemente a que en muchos de los casos los animales solamente se alimentan de flora disponible en la región. Por lo cual es necesario que, en las etapas fisiológicas de mayor demanda energética, estos animales sean suplementados con alimentos ricos en carbohidratos, aminoácidos esenciales y minerales para un mejor desempeño productivo y reproductivo.

Momentos específicos de suplementación durante el ciclo productivo de los caprinos

Definiciones de suplementación

1) Suplementación continua. Es el tipo de suplementación que consiste en brindar una porción de concentrado, ya sea comercial o simplemente cereales molidos al animal durante todo el año sin importar la etapa fisiológica en que éste se encuentre.

2) Suplementación en Flushing. ha sido utilizada porque representa menor costo y manejo para el productor, además de que ha demostrado aumentar la producción de leche y cabrito.

3) Suplementación estratégica. Consiste en periodos cortos y específicos de alimentación. La suplementación o complementación alimenticia debe enfocarse principalmente a las etapas fisiológicas de mayor demanda nutricional de los animales, las cuales son el desarrollo (Crecimiento post destete), el empadre (nutrición del ovocito-embrión) y la lactancia (síntesis de componentes lácteos).



Suplementación pre y post empadre

En el subtrópico mexicano, se ha demostrado que la suplementación nutricional previo al empadre de las cabras en combinación con el efecto macho mejora la eficiencia reproductiva durante el anestro estacional. Por ejemplo, en respuesta al efecto macho fue mayor en el grupo de hembras suplementadas [950 g de alfalfa seca (18% PC), 290 g de maíz roado (8.6% PC) y 140 g de pasta de soya (49% PC)/ animal] que las no suplementadas en cuanto a la tasa ovulatoria, la cual fue de 1.6 ± 0.2 vs 1.0 ± 0.2 , respectivamente y el porcentaje de preñez, obteniéndose un 8% vs 53%, respectivamente. Por otro lado, durante la sincronización con hormonas exógenas, un grupo de investigadores en el 2022, encontraron que la administración de reconstituyente metabólico a base de aminoácidos neuroestimuladores en cabras de la craza Saanen X Alpina redujo el tiempo a la aparición del estro; inclusive se aumentó la prolificidad de las hembras en comparación con las que no recibieron este reconstituyente metabólico. Además, se han estudiado ampliamente los factores fisiológicos y ambientales que pueden modificar la respuesta de las cabras al efecto macho, la cual es una tecnología de bioestimulación reproductiva que permite inducir y sincronizar la actividad sexual de las cabras cuando éstas se encuentran en el periodo de anestro estacional.

Con respecto a la subnutrición, el tejido adiposo en los caprinos actúa como un importante reservorio energético durante la época de empadre, dado que, mediante la gluconeogénesis, las células de las estructuras ováricas y el ovocito, el cual será fertilizado, son suministradas y provistas de energía disponible. Asimismo, durante la gestación temprana el embrión en formación es proveído energéticamente para su implantación.

Por lo tanto, entre los diversos factores, está bien claro que la nutrición y por ello la condición corporal de las cabras puede tener una influencia sobre la respuesta sexual al efecto macho. Así, el nivel nutricional de las cabras se ve favorecido cuando son suplementadas con diversos granos, materiales vegetativos e incluso desechos agrícolas y agroindustriales que aportan al complemento de su dieta.

Concentrados comerciales

Con respecto a los concentrados comerciales, estos se formulan principalmente de acuerdo a la disponibilidad de nutrientes, palatabilidad y a su costo. Además, dependiendo de la etapa fisiológica es aconsejable el tipo de concentrado. Por ejemplo, durante la lactancia temprana, etapa crítica de transición, los requerimientos de proteína son mayores que en lactancia tardía. Con respecto a esta última, es común que coincida con la época de empadre. De ahí que la demanda de nutrientes en la hembra, por un lado, debido a la lactancia y por otro lado por la actividad reproductiva, comprometen fisiológicamente el adecuado funcionamiento del sistema reproductivo del animal. Lo anterior se ve reflejado en un menor porcentaje de pariciones y menor prolificidad, lo cual conlleva a una menor producción de cabrito y, por tanto, a comprometer la rentabilidad



de la unidad de producción caprina en regiones áridas y semiáridas de México.

En un estudio en la región semiárida de México, donde se utilizó concentrado comercial (350 g / día / animal; 14% PC) como suplemento, consistió en lo siguiente: se suplementó previo al empadre durante 30 días un grupo numeroso de cabras criollas y otro grupo de cabras, mismas características genéticas que las anteriores, las cuales no recibieron dicho suplemento, considerado como grupo control. En dicho estudio, se llegó a la conclusión que la disponibilidad de nutrientes (disponibilidad de energía y aminoácidos), los cuales proporciona el concentrado comercial, propiciaron a un mayor desempeño reproductivo en animales que son suplementados. De tal manera que los parámetros reproductivos que se mejoraron fueron la tasa de preñez o gestación, la tasa de pariciones y el tamaño de camada. En cuanto a los parámetros productivos, el peso y la condición corporal de las madres fueron mayores. Finalmente, algunos parámetros del perfil metabólico también fueron mayores en aquellas cabras suplementadas como fue la concentración sanguínea de glucosa. Sin embargo, no se encontró diferencia en cuanto a la concentración sanguínea de hormonas tiroideas y glucocorticoides.

Pasta de soya

En un experimento, realizado en La Región Lagunera de México en el 2006 se determinó si la suplementación antes del empadre (con machos fotoestimulados) de cabras en anestro estacional aumenta la tasa de ovulación. El estudio consistió de un grupo de cabras criollas como control ($n = 25$) y otro grupo de cabras como grupo experimental que recibió una suplementación con 950 g de alfalfa henificada, 290 g de maíz rolado y 140 g pasta de soya por animal por 7 días antes de la exposición con los machos cabríos, los cuales estaban sexualmente activos. Así, en este estudio se encontró que el grupo de cabras suplementadas tuvieron una tasa ovulatoria mayor (1.6 ± 0.2) durante el ciclo corto, evaluado con ecografía al día 5 posterior a la introducción de los machos, en comparación con las que no fueron suplementadas (1.0 ± 0.2 ; $P < 0.05$). Sin embargo, no se encontró diferencia significativa entre ambos grupos ($P > 0.05$) cuando se realizó la ecografía que corresponde entre el día 6 al 15 post-introducción de los machos. De tal forma que, con este estudio surgieron las interrogantes: ¿La condición corporal de las cabras al ser suplementadas previo al empadre mejora la tasa ovulatoria de cabras en pastoreo? y ¿Cuánto tiempo tendrían que ser suplementadas?

Para lo cual estudios posteriores en esta misma región fueron llevados a cabo, el primero entre los meses de junio a abril, periodo de empadre de los caprinos en el subtrópico mexicano, del cual los siguientes hallazgos fueron encontrados: El comienzo de expresión de estro y ovulación ocurre primero en cabras con mayor condición corporal que en aquellas con menor condición corporal. Además, se encontró que las cabras con mayor condición corporal son las últimas en expresar estro y ovular. Así mismo, se



demostró que cabras con excelente condición corporal tienen mayor número de ciclos normales de estro que las cabras con deficiente condición corporal. Finalmente, se encontró que las cabras con mayor condición corporal tienen mayor tasa ovulatoria (1.9 ± 0.1) en comparación con las de menor condición corporal (1.6 ± 0.1). En general, se concluyó en dicho estudio que las cabras subnutridas tienen una temporada de empadre menor, mayor número de ciclos estrales anormales y menor tasa ovulatoria que las cabras bien nutridas, lo anterior en base a su condición corporal.

Por otro lado, en otro experimento donde se estratificaron los grupos experimentales de cabras criollas en cuanto a la duración de la suplementación con 60 g maíz roado, 110 g pasta de soya y 900 g de alfalfa por animal dos veces al día. El tiempo de suplementación quedó de la siguiente manera: 0, 7, 14 y 28 días de suplementación, cuyo inicio de ésta fue el día 9 post-introducción de los machos cabríos sexualmente activos. De lo anterior, se encontró que la proporción de cabras preñadas fue mayor en las que se suplementaron durante 28 días en comparación con las que no se suplementaron. No obstante, dicha proporción de gestación (28 días de suplementación) no fue diferente en comparación con las que se suplementaron durante 14 y 7 días. De igual manera, existió una diferencia significativa entre las cabras suplementadas durante 14 días en comparación con las suplementadas durante 7 días y con las que no se suplementaron (0 días de suplementación). Por lo tanto, para obtener mayor porcentaje de preñez, el tiempo mínimo de suplementación en cabras en pastoreo sugerido fue de 14 días, iniciando el día 9 post-introducción de los machos sexualmente activos.

Grasa sobrepaso

Las grasas de sobrepaso o jabones de calcio de ácidos grasos o triglicéridos son grasas modificadas químicamente, lo cual reduce los efectos deletéreos de los lípidos por la actividad microbiana en el rumen. También se les conoce como grasas inertes, by-pass, o protegidas y usualmente son sales de calcio carboxiladas, ácidos grasos saturados o grasas hidrogenadas. Estas grasas han sido utilizadas en la dieta para incrementar su densidad energética y minimizar los efectos del balance energético negativo, prevenir desórdenes metabólicos, favorecer la producción láctea, restaurar la pérdida de condición corporal y mejorar el desempeño productivo y reproductivo en la vaca, en la oveja y en la cabra. Las rutas metabólicas de la grasa de sobrepaso es la absorción en el abomaso e intestino delgado hacia el torrente sanguíneo y posteriormente el hígado, donde dependiendo del estado nutricional del animal, se utilizará como energía de consumo inmediato, almacén (tejido adiposo), lipólisis, entre otros.

En cuanto al efecto de la grasa sobre la reproducción, un grupo de investigadores en el 2010 encontraron que la adición de grasa en la dieta incrementa las concentraciones de colesterol en circulación, las cuales originan una mayor síntesis de progesterona en las células luteales que se asocian con aumento en la tasa de concepción. Por otro lado, en un



estudio se encontró que la inclusión de ácidos grasos protegidos (1% ó 4% del peso vivo de los animales) a la dieta de cabras durante su sincronización con esponjas de progesterona vaginales no promueven beneficios en la tasa de ovulación; sin embargo, al 4% si anticipó la ovulación en comparación con el grupo control (18.3 ± 11.0 h vs 45.2 ± 8.0 h, respectivamente).

Nopal como forraje

Otro material vegetativo que se ha utilizado como suplemento en producción pecuaria, son las cactáceas. Un ejemplo de ello es el nopal sin espinas (*Opuntia ficus-indica*), el cual en la actualidad resulta una opción factible debido a la poca disposición hídrica que requiere para su desarrollo en climas áridos y semiáridos, siendo utilizado como forraje en regiones donde se presentan sequías severas.

Con respecto al efecto del nopal como suplemento durante la temporada de empadre y posterior a ésta (un mes de suplementación), no se encontraron diferencias en cuanto eficiencia reproductiva en caprinos. Bajo el esquema, donde un grupo de cabras se suplementó únicamente con 160 g nopal / día / animal y otro grupo de cabras fue suplementado con nopal enriquecido con nitrógeno inorgánico al 1 % de peso vivo (urea y sulfato de amonio) sometido a fermentación en un biorreactor 24 horas antes de ser servido a los animales, siendo una cantidad de 160 g / día / animal de la mezcla fermentada. Dichos suplementos no mejoraron las variables reproductivas como, el porcentaje de animales en estro, porcentaje de animales que ovularon, porcentaje de animales preñados y porcentaje de animales que parieron, ni la duración y latencia al estro y tamaño de cuerpos lúteos y folículos. Asimismo, la suplementación no mejoró la condición y peso corporal de los animales en este estudio, todo lo anterior comparado con un grupo de cabras que sirvieron como grupo control, las cuales únicamente se alimentaron con la vegetación que colectan durante el pastoreo.

Suplementación durante la lactancia

La endocrinología de la lactancia fue y es un área de investigación compleja, ya que las hormonas metabólicas galactopoyéticas modulan la síntesis de leche. Estas hormonas son la prolactina, la somatotropina, la adrenocorticotropina, los corticoides, la insulina y la triyodotironina. Desde una perspectiva endocrinológica, un equipo de investigadores descubrió que el factor fotoperiodo artificial de días largos aumentan la producción de leche en vacas. Posteriormente, en cabras subtropicales de la región Lagunera, México, un grupo de investigadores en el 2011 encontraron que los días largos artificiales pueden aumentar la producción de leche durante los días cortos (cercaos al solsticio de invierno) al inicio de la lactancia.



De este modo, lograron que se sintetizara en las cabras mayores concentraciones de la hormona llamada, factor de crecimiento similar a la insulina I, mediante la modificación del fotoperiodo. Esta hormona está relacionada con la hormona del crecimiento (somatotropina) y, por lo tanto, con la producción de leche. Sin embargo, actualmente no se comprende completamente el mecanismo por el cual ocurre esto. Por otro lado, una alta concentración de la hormona triyodotironina en sangre, al igual que otras hormonas, desempeña un papel importante en la producción de leche previamente y posteriormente del parto. Otros factores como la ausencia de período seco y la lactancia prolongada sin monta previa a la lactancia o con monta previa a la lactancia afectan la producción endocrinológica, lo que aumenta o reduce la cantidad de contenido de leche, respectivamente. Por lo tanto, es necesario el periodo seco para que la glándula mamaria logre la regeneración de lactocitos previo al parto.

Entre los efectos del nivel de nutrición encontramos: Suplementación energética, que es principalmente referido al nivel de energía consumida que afecta positivamente la producción de leche en rumiantes. Durante la lactancia temprana, la disposición de nutrientes y metabolitos energéticos son cruciales para la síntesis de componentes de la leche. De hecho, se logra un pico mayor en la curva de producción, por lo que una forma común de incrementar la producción de leche es brindar dietas que son altas en energía a los animales en la lactancia temprana más que en la lactancia tardía. No obstante, esto puede traer consecuencias, dado que el animal durante el periodo seco recibe una dieta alta en fibra neutro detergente y este cambio de dieta propicia desórdenes metabólicos (hígado graso, acidosis ruminal, cetosis, etc.), provocando una disminución en la ingesta de materia seca y por consecuencia una disminución en la producción láctea.

Por otro lado, la suplementación proteica ha incrementado la producción de leche, pero el costo es elevado y posiblemente no es rentable. Sin embargo, en la actualidad se ha llegado a la conclusión que suplementar desde el último tercio de gestación y durante la lactancia resulta rentable en los sistemas de producción en pastoreo extensivo sobre la flora nativa en la región semiárida de México. Lo anterior, se ha logrado debido a que los nutrientes extras que se les brindaron a los animales provocaron una mayor síntesis láctea durante toda la curva de producción de las hembras caprinas.

De tal forma que la suplementación o complementación alimenticia en etapas estratégicas es necesaria en todos los rebaños lecheros caprinos mantenidos en extensivo de las regiones áridas y semiáridas de México, con el fin de eficientar la productividad. No obstante, estudios con suplementos o complementos alimenticios a bajo costo se están explorando con el objetivo de obtener el mismo efecto productivo. Tal es el caso del maguey o agave enriquecido con compuestos nitrogenados como la urea y el sulfato de amonio, entre muchos otros que se han utilizado como suplementos o complementos alimenticios en especial en periodos donde las plantas forrajeras son escasas por la sequía. Todos ellos comparados con los suplementos convencionales como son los concentrados



comerciales.

Concentrados comerciales

Empresas nacionales e internacionales han desarrollado concentrados, probados experimentalmente, específicos para cada etapa fisiológica de los pequeños rumiantes. Sin embargo, estos productos no se encuentran al alcance del bolsillo de la mayoría de los productores caprinos de las regiones áridas y semiáridas de México por su alto costo. Los distribuidores de dichos productos controlan el mercado y precio de los mismos, lo cual resulta en un precio elevado y no rentable si se proporcionan a los animales de las regiones mencionadas.

Por otro lado, los productores al no realizar registros productivos y reproductivos en el rebaño caprino, erróneamente suplementan los animales en etapas, donde estos rumiantes no tienen la capacidad metabólica para aprovechar los nutrientes disponibles para sintetizar compuestos lácteos en la glándula mamaria y, dichos nutrientes toman rutas anabólicas, terminando en depósitos lipídicos o musculares. Así, fue lo encontrado en un estudio realizado en la región lagunera, donde se comparó la complementación alimenticia de un concentrado comercial (500 g / día / animal) durante la lactancia temprana (parto a 100 días en leche) y tardía (más de 100 días en leche), encontrando que en ambos casos la complementación incrementó la síntesis de leche en un 45% y 30%, respectivamente en comparación con aquel grupo de cabras que no se complementó su dieta. Sin embargo, se llegó a la conclusión que es durante la lactancia temprana principalmente el periodo donde las cabras tienen la capacidad, mediante mecanismos fisiológicos, de aprovechar el exceso disponible de nutrientes para estimular la producción de leche.

Grasas de sobrepeso

Estas grasas han sido utilizadas en la dieta para incrementar su densidad energética y minimizar los efectos del balance energético negativo, prevenir desórdenes metabólicos, favorecer la producción láctea, restaurar la pérdida de condición corporal y mejorar el desempeño productivo y reproductivo en la vaca, la oveja y la cabra. Estas en cuanto al contenido de leche, la grasa protegida como sales de calcio de ácidos grasos se había utilizado durante la lactancia temprana para aumentar la producción de leche de cabra y la calidad de su contenido. Con respecto a esto, un grupo de investigadores en el 2020 mediante estudios metabólicos, señalaron que la suplementación con ácidos grasos (ácido linoleico conjugado microencapsulado) aumenta la producción de leche, aunque la grasa en la leche disminuyó. Las cabras redujeron su balance energético negativo porque los ácidos grasos adicionales se utilizaron para sintetizar leche y como tejido adiposo. Actualmente y de manera contraria, otro grupo de investigadores en el 2023 no



encontraron ningún incremento en la producción de leche cuando utilizaron sales de calcio de ácidos grasos o ácidos grasos libres en vacas lecheras. Sin embargo, demostraron que es más importante la saponificación, iones de hidrógeno sustituidos por iones de calcio en ácidos grasos, que el perfil lipídico del suplemento en la digestibilidad. Por ende, la falta de suplementación puede reducir drásticamente y endocrinológicamente la galactopoyesis y, por tanto, la producción de leche en cabras al inicio de la lactación.

En cuanto al porcentaje de grasa sobrepasante utilizada en la dieta de caprinos de la Región Lagunera, México, mantenidos en estabulación durante la lactancia, se encontró que la inclusión de 3 % de la dieta con ácido palmítico en cabras incrementa la producción de leche en un 9 % en comparación con el grupo que recibió solamente la dieta base, siendo ordeñadas una vez por día. Además, incluir 3 % o 6 % de la dieta con ácido palmítico incrementa la concentración de grasa en leche, sin cambios en la concentración de proteína y lactosa en leche.

La grasa de sobrepaso no tiene una degradación en el rumen por la flora ruminal. Una vez que la grasa de sobrepaso llega al abomaso, donde el pH es bajo, los ácidos grasos se disocian del catión para una posterior absorción en el intestino. En el torrente sanguíneo pueden seguir diferentes rutas metabólicas según el estado fisiológico de la cabra. En el caso de cabras en una lactación temprana se asocia principalmente a evitar el balance energético negativo del animal. Pero además de ayudar al animal en el balance energético negativo, una concentración alta de ácidos grasos en el torrente sanguíneo en la glándula mamaria estimula la producción de hormonas galactopoyéticas, que a su vez estimulan a las células epiteliales para que expresen las enzimas que catalizan la síntesis de componentes de la leche. Ya que los ácidos grasos son materia prima que pueden ser utilizados por el lactocito, siguiendo diferentes rutas metabólicas los ácidos grasos para la síntesis de componentes de la leche, aumentando así el contenido de grasa, proteína y lactosa en la leche.

De hecho, no se han realizado estudios metabólicos para determinar qué ocurriría si las cabras se alimentaran con grasa protegida en la dieta y se fotoestimularan con días largos durante los días decrecientes. Se esperaría que la combinación de estas dos estrategias aumentaría la producción de leche y su contenido. Sin embargo, un grupo de investigadores en el 2011 combinaron dos estrategias en cabras: la fotoestimulación y la frecuencia de ordeño. Demostraron que las cabras fotoestimuladas producían más leche si se ordeñaban dos veces al día en lugar de una.

Pasta de soya

La soya es un cultivo que se puede producir en el periodo de otoño a invierno cosechándose de abril a mayo, este periodo es de suma importancia porque coincide con la época de estiaje (sequía). Los estados de México que aportan soya subsanando esta adversa situación son Campeche y Tamaulipas, específicamente el Sur de Tamaulipas.



Además, el grano se puede almacenar y tener disponible en cualquier época del año. Ahora bien, considerando la parte agrícola del estado de Tamaulipas, se produjeron 78,915.62 toneladas de soya en el año 2018, lo que representa el 24.35 % del total de la producción nacional. Esta producción la cubrió prácticamente en su totalidad, la región del Sur de este mismo estado, los municipios de Aldama, Altamira, González, El Mante y Soto la Marina, aportando 73,699.8 toneladas de soya para el año 2018, lo que representó el 93.38 % de la producción estatal.

La temporada de estiaje es prolongada, por lo que es muy importante para la salud de los caprinos la suplementación para su adecuada nutrición y así evitar las pérdidas productivas, reproductivas y sanitarias causadas por la desnutrición que la soya puede subsanar. Por otro lado, es conocido el alto aporte proteico en la soya de 42 a 43.3% de proteína, la cual aporta el 90% de aminoácidos totales (alanina, arginina, asparagina, cisteína, glutamina, glicina, histidina, isoleucina, leucina, lisina, metionina, fenilalanina, prolina, serina, treonina, triptófano, tirosina y valina). Al respecto, se está creando variedades de soya con mayor contenido de lípidos o proteínas con el objetivo de tener un mayor aporte de estas biomoléculas. Así, se requerirá menor cantidad de soya como suplemento en animales, teniendo el mismo o mayor efecto nutritivo, lo cual reducirá los costos de producción del cultivo y se comercializará a un menor costo que probablemente esté al alcance del caprinocultor. Al respecto, en un experimento llevado a cabo (1993) reveló que en las cabras raza Alpina aumentar de 13% a un 17% de PC en una dieta isoenergética como suplemento de pasta de soya, no mejoró la producción de leche, la cual fue de 3.3 a 4.6 kg/d durante la lactancia temprana, por lo que no se encontró beneficio al utilizar un recurso proteico de mayor valor económico.

Uso de la soya mínimamente tratada en la dieta de rumiantes

Con respecto a bovinos, en algunas regiones los animales son alimentados en agostadero y praderas disponibles, lo cual provoca una baja eficiencia reproductiva y un estrés nutricional en los animales que deprime su sistema inmunológico, quedando susceptible a infecciones y parásitos. Por lo cual es necesario que por lo menos en etapas fisiológicas de mayor demanda energética como es durante el desarrollo, la gestación, la lactancia y el empadre, estos animales sean suplementados con alimentos energéticos y proteicos (aminoácidos esenciales) para un mejor desempeño productivo y reproductivo. Un estudio mencionó que la suplementación con grano entero de soya en vacas en edad adulta, representó una actividad ovárica mayor al inicio y al final de la época reproductiva en comparación con las que no fueron suplementadas.

Por otro lado, en caprinos donde la suplementación fue con aceite de soya y canola, se logró aumentar la concentración de ácidos grasos esenciales en la leche y mejorar la condición corporal de las cabras durante la lactancia. Por lo que continuar con la búsqueda



de opciones de suplementación disponible y a bajo costo para mejorar la productividad y la rentabilidad sustentablemente de la caprinocultura de sistemas extensivos de México es de suma importancia.

Conclusiones

La suplementación o alimentación complementaria es indispensable en el sistema de producción caprina extensivo (pastoreo), cuando el objetivo del productor es incrementar la producción de leche y cabrito. En este sentido, existen dos momentos del ciclo productivo de la cabra en el que la suplementación juega un rol crucial, los cuales son durante el empadre y durante la lactancia. Respecto al momento del empadre, proveer de energía a la estructura ovárica que dará lugar a un ovocito viable es de suma importancia. De igual manera, durante la gestación para evitar muerte embrionaria temprana y posteriormente abortos es también importante la suplementación. Durante la lactancia temprana, maximizar la producción de leche es primordial. De hecho, el periodo de transición no debe dejarse a un lado nutricionalmente, dicho término es común en bovinos lecheros. No obstante, es exactamente lo mismo en los caprinos lecheros y doble propósito, dado que también hay alta probabilidad de mostrar desórdenes metabólicos que comprometen al animal y su curva de lactancia si no existe una adecuada suplementación. Finalmente, es probable que durante la lactancia tardía se lleve a cabo un nuevo empadre, el cual es un momento donde se debe mantener una condición adecuada del animal para que mantenga la síntesis láctea y simultáneamente logre con éxito la preñez y el parto. Todo lo anterior, debe ser considerando los costos del suplemento a utilizar y teniendo en mente producir sostenidamente o sustentablemente.

Bibliografía

- Alcalá-Rico J.S.G.J., Avilés-Ruiz R., Ramos-Cruz C.M., López-Benítez A., García-Gordillo A. (2020). Forraje y suplementación en la alimentación de caprinos del municipio de Bustamante, Tamaulipas. *Ciencia e Innovación*. 3(1): 583-592.
- Álvarez-Torres J.N., Ramírez-Bribiesca E., Crosby-Galván M.M., Ramírez-Mella M., Ruiz-González A., Granados-Rivera L.D. (2023). Uso de ácido palmítico en la dieta de cabras lecheras para incrementar producción de leche y grasa láctea. *Memorias del V Congreso Internacional Abanico Veterinario, Agroforestal, Pesquero y Acuícola*, 2023. <https://abanicoacademico.mx/revistasabanico-version-nueva/index.php/ciavapa/article/view/117/188>
- Avilés-Ruiz R., Velázquez-Martínez M., Alcalá Rico J.S.G.J., Barrón-Bravo O.G., Maldonado-Jáquez J. A., Vélez-Monrroy L.I. (2025). El uso de la soya como suplemento modifica la producción de leche de cabras en pastoreo. *Memoria del VII Congreso Internacional*



- Abanico Veterinario, Agroforestal, Ambiental, Pesquero, Acuícola y del Mar*, 2025. Pp 48-52. <https://abanicoacademico.mx/revistasabanico-version-nueva/index.php/ciavapa/article/view/237>
- Avilés R., Delgadillo J.A., Flores J.A., Duarte G., Vielma J., Petrovski K., Flores M.J., Zarazaga L.A. Hernández H. (2019). Melatonin administration during the dry period stimulates subsequent milk yield and weight gain of offspring in subtropical does kidding in summer *Journal of Dairy Science*. 102:11536–11543. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-16836>
- Avilés R., Delgadillo J.A., Flores J.A., Flores M.J., Vargas A.A., Barrón O.G., Sánchez A., Horacio H. (2021). Efecto del periodo seco en cabras bajo condiciones de pastoreo, en el volumen y cantidad de compuestos lácteos subsecuente. *Biotecnia*. 23(1):86-91. https://www.researchgate.net/publication/369619219_Effect_of_dry-off_period_in_goats_under_grazing_conditions_on_milk_production_and_compounds_quantity
- Avilés-Ruiz R., Alcalá-Rico J.S.G.J., Barrón-Bravo O.G., Flores-Nájera M.J., Garay-Martínez J.R. (2020b). Comercialización de la leche y queso de cabra en pastoreo en el municipio de Bustamante, Tamaulipas. *Ciencia e Innovación*. 3(1): 221-230. <https://www.researchgate.net/profile/Ricardo-Aviles-Ruiz>
- Avilés-Ruiz R., Alcalá-Rico J.S.G.J., Barrón-Bravo O.G., Garay-Martínez J.R., Flores-Nájera M.J. (2020a). Caracterización de la comercialización pecuaria en el municipio de Bustamante, Tamaulipas. *Ciencia e Innovación*. 3(2): 319-329. <https://www.researchgate.net/profile/Ricardo-Aviles-Ruiz>
- Baldi A., Cheli F., Corino C., Dell' O., Polidori F. (1992). Effects of feeding calcium salts of long chain fatty acids on milk yield, milk composition and plasma parameters of lactating goats. *Small Ruminant Research*. 6:301-310. [https://doi.org/10.1016/0921-4488\(91\)90137-F](https://doi.org/10.1016/0921-4488(91)90137-F)
- Bocquier F., Caja G. (2004). Effects of nutrition on ewes' milk quality. <https://www.researchgate.net/publication/256343773>
- Cadena-Villegas S., Velasco-Villanueva D., Germán-Alarcón C., Salinas-Ríos T., Cortez-Romero C., Hernández-Marín A. (2022). Reproductive response of Saanen x Alpina goats to the application of a metabolic reconstituent during estrus synchronization. *Abanico Veterinario*. 12:1-21. <http://dx.doi.org/10.21929/abavet2022.13>
- Caja G., Salama A.A.K., Such X. (2006). Omitting the dry-off period negatively affects colostrum and milk yield in dairy goats. *Journal of Dairy Science*. 89:4220-4228.



- de Santiago-Miramontes M.A., B. Malpaux B., J.A. Delgadillo J.A. (2009). Body condition is associated with a shorter breeding season and reduced ovulation rate in subtropical goats. *Animal Reproduction Science* 114: 175–182. <http://dx.doi.org/10.1016/j.anireprosci.2008.09.001>
- de Santiago-Miramontes M.A., Rivas-Muñoz R., Muñoz-Gutiérrez M., Malpaux B., Scaramuzzi R.J., Delgadillo J.A. (2008). The ovulation rate in anoestrous female goats managed under grazing conditions and exposed to the male effect is increased by nutritional supplementation. *Animal Reproduction Science*. 105:409–416. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2007.11.008>
- de Souza J., Lock L. (2019). Effects of timing of palmitic acid supplementation on production responses of early-lactation dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 102:260–273. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-14976>
- Delgadillo J.A., Cortez M.E., Duarte G., Chemineau P., Malpaux B. (2004). Evidence that the photoperiod controls the annual changes in testosterone secretion, testicular and body weight in subtropical male goats. *Reproduction Nutrition Development*. 44:183-193. <https://doi.org/10.1051/rnd:2004024>
- Fitz-Rodríguez G., de Santiago-Miramontes M.A., Scaramuzzi R.J., Malpaux B., Delgadillo J.A., 2009. Nutritional supplementation improves ovulation and pregnancy rates in female goats managed under natural grazing conditions and exposed to the male effect. *Animal Reproduction Science*. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2009.01.004>
- Flores M.J., Flores J.A., Elizundia J.A., Mejía A., Delgadillo J.A., Hernández H. (2011). Artificial long-day photoperiod in the subtropics increases milk production in goats giving birth in late autumn. *Journal of Animal Science*. 89:856-862. <https://doi.org/10.2527/jas.2010-3232>
- Ghoreishi S.M., Zamiri M.J., Rowghani E., Hejazi H. (2007). Effect of a calcium soap of fatty acids on reproductive characteristics and lactation performance of fat-tailed sheep. *Pakistani Journal Biology Science*. 15:2389-2395. [10.3923/pjbs.2007.2389.2395](https://doi.org/10.3923/pjbs.2007.2389.2395)
- Granados-Rivera L.D., Hernández-Mendo O., Maldonado-Jáquez J.A. (2020). Energy balance in lactating goats: Response to mixture of conjugated linoleic acid. *Animal Science Journal*. 91:e13347. <https://doi.org/10.1111/asj.13347>
- Hernández R., Díaz T. 2011. Las grasas sobrepasantes y su efecto sobre la actividad productiva y reproductiva en rumiantes. *Nutribásicos de Venezuela*. 33:333-343. <https://nutribasicos.com.ve/documentos/LAS%20GRASAS%20SOBREPASANTES%20Y%20SU%20EFECTO%20SOBRE%20LA%20ACTIVIDAD%20PRODUCTIVA%20Y%20REPRODUCTIVA%20EN%20RUMIANTES.pdf>



- Lerma-Reyes I., Mendoza-Martínez G.D., Rojo-Rubio R., Mejía M., García-López J.C., Lee-Rangel H.A. (2018). Influence of supplemental canola or soybean oil on milk yield, fatty acid profile and postpartum weight changes in grazing dairy goats. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*. 31(2):225-229. <https://doi.org/10.5713/ajas.17.0058>
- Liotta L., Bionda A., Quartuccio M., De Nardo F., Visalli R., Fazio E. (2021). Profiles in Nicastrese goats (*Capra hircus*) during pregnancy and postpartum period. *Animals*. 11:2386. <https://doi.org/10.3390/ani11082386>
- Maldonado-Jáquez, J. A., Mora-Flores, J. S., Granados-Rivera, L. D., Hernández-Mendo, O., Gallegos-Sánchez, J., & Torres-Hernández, G. (2024). Economic evaluation of a long-term supplementation feeding scheme in grazing local goats. *Revista Mvz Córdoba*, 29(3), e3395. <https://doi.org/10.21897/rmvz.3395>
- Martin G.B., Rodger J., Blache D. (2004). Nutritional and environmental effects on reproduction in small ruminants. *Reproduction, Fertility and Development*. 16:491-501. <https://www.publish.csiro.au/rd/content/allissues>
- Mellado, M., Rodríguez, I. J., Alvarado-Espino, A., Véliz, F. G., Mellado, J., & García, J. E. (2020). Short communication: reproductive response to concentrate supplementation of mixed-breed goats on rangeland. *Tropical Animal Health and Production*, 52(5), 2737–2741. <https://doi.org/10.1007/s11250-020-02264-z>
- Meza-Herrera C.A., Cano-Villegas O., Flores-Hernandez A., Veliz-Deras F.G., Calderon-Leyva G., Guillen-Muñoz J.M., García de la Peña C., Rosales-Nieto C.A., Macias-Cruz U., Avendaño-Reyes L. (2017). Reproductive outcomes of anestrus goats supplemented with spineless *Opuntia megacantha* Salm-Dyck protein-enriched cladodes and exposed to the male effect. *Tropical Animal Health Production*. 49:1511–1516. <https://doi.org/10.1007/s11250-017-1356-y>
- Nieto R., Sánchez M.T., Mejía O., Olivares L., Peralta J.J., Cordero J.L., Molina P., Cárdenas M. (2010). Grasa de sobrepeso en ovejas con diferente espesor de grasa dorsal, respuesta hormonal y principales variables reproductivas. *Revista Científica*. 20:665-673. <https://www.redalyc.org/pdf/959/95916206014.pdf>
- Oliveira J. D., da Fonseca J., Souza-Fabjan J.M., Esteves L., Feres L. F., Rodrigues C.A., Torres Filho R., de Oliveira Brandão F. (2016). Protected fatty acid supplementation during estrus synchronization treatment on reproductive parameters of dairy goats. *Animal Science Journal*. <https://doi.org/10.1111/asj.12640>
- Pastor F.J., Requejo L.M.I., Maldonado J.A., Granados L.D., Trinidad E.M., Rodríguez J.G. (2017). Efecto de la complementación de grasa protegida en la producción y composición de leche



de cabras en pastoreo. *Avances en Investigación Agropecuaria*. 21(1): 77-85.

- Salvador A., Alvarado C., Contreras I., Betancourt R., Gallo J., Caigua A. (2009). Efecto de la alimentación con grasa sobrepasante sobre la producción y composición de leche de cabra en condiciones tropicales. *Zootecnia Tropical*. 27(3): 285-298.
- Shpirer J., Livshits L., Kamer H., Alon T., Portnik Y., Moallem U. (2023). The form more than the fatty acid profile of fat supplements influences digestibility but not necessarily the production performance of dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 106(4): <https://doi.org/10.3168/jds.2022-22190>
- Şonea C., Gheorghe-Irimia R.A., Hussein Al Dulaimi M.K., Lavinia Udrea L., Tăpăloagă D., Tăpăloagă P.R. (2024). Optimizing feed formulation strategies for attaining optimal nutritional balance in high-performing dairy goats in intensive farming production systems. *The annals of "Valahia" University of Targoviste*. 56-66. <https://doi.org/10.2478/agr-2024-0010>
- Velázquez-Martínez M., Avilés-Ruiz R., Barrón-Bravo O.G., Vélez-Monroy I.L., Maldonado-Jáquez J.A., Sánchez-Duarte J.I. (2025). Maguey con urea como suplemento en cabras doble propósito en pastoreo en San Luis Potosí. 5º Congreso internacional de ciencias agronómicas y veterinarias. https://cicav.unach.mx/images/cicav25/Memoria_CICAV_2025.pdf
- Vélez-Monroy L.I., Avilés-Ruiz R., Velázquez-Martínez M., Barrón-Bravo O.G., Maldonado Jáquez J.A. (2025). Vaina de mezquite molida como suplemento alimenticio durante el efecto macho en cabras en anestro estacional. 15º Congreso Internacional de Ciencias Agronómicas y Veterinarias. https://cicav.unach.mx/images/cicav25/Memoria_CICAV_2025.pdf
- Veliz-Deras F.G., Meza-Herrera C.A., De Santiago-Miramontes A., Santos-Alvarado A., Bustamante-Andrade J.A., Flores-Salas J.M., Arellano-Rodríguez F., Mellado M. (2023). An enhanced body condition improved sexual behavior, ovarian structure and function, and reproductive fitness in rangeland-crossbred dairy goats. *Agriculture*. 13:1337. <https://doi.org/10.3390/agriculture13071337>

**Composición bromatológica y
digestibilidad *in vitro* de vainas
de *Leucaena leucocephala* y
esculenta como alimento potencial
para rumiantes.**

Carlos Meza-López.
Lucía Delgadillo-Ruiz.
Francisco G. Echavarría-Chairez.
Rómulo Bañuelos-Valenzuela.





Resumen

El estudio analiza el valor nutricional y la digestibilidad *in vitro* de las vainas de *Leucaena leucocephala* y *Leucaena esculenta*, especies leguminosas originarias de México y Centroamérica, con alto potencial como forraje para rumiantes. Estas plantas destacan por su adaptabilidad a diversos ecosistemas, resistencia a la sequía y capacidad de fijar nitrógeno, lo que mejora la fertilidad del suelo y reduce el uso de fertilizantes químicos. *Leucocephala*, conocida como “alfalfa de los trópicos”, presenta un contenido proteico entre 22% y 30%, alta digestibilidad (60–70%) y propiedades antihelmínticas. Su uso mejora la ganancia de peso, producción de leche y rendimiento reproductivo en rumiantes. *L. esculenta*, aunque menos documentada, también ofrece beneficios nutricionales, con semillas ricas en proteínas (24–46%) y ácidos grasos insaturados, además de ser utilizada tradicionalmente por comunidades indígenas. Ambas especies se integran en sistemas silvopastoriles intensivos, combinadas con gramíneas, lo que permite mejorar la producción animal y ofrecer beneficios ambientales como captura de carbono y reducción de metano. Sin embargo, su uso presenta riesgos, como la presencia de mimosina, un metabolito tóxico para animales no rumiantes, y la necesidad de bacterias ruminales específicas para su digestión. La digestibilidad *in vitro* del aislado proteico de *Leucaena* alcanza hasta 76%, y su inclusión en dietas mixtas mejora la eficiencia alimentaria. El documento destaca la importancia de considerar la degradabilidad ruminal, la calidad proteica y los factores ambientales para optimizar su uso en sistemas ganaderos sostenibles.

Palabras clave: *Leucaena*, digestibilidad, forraje tropical, proteína vegetal, sistemas silvopastoriles.



Introducción

Las características edafológicas, climáticas y topográficas que componen a México en su conjunto logran formar un país rico en flora y fauna, dando como resultado una diversidad en especies vegetales, como lo es la especie *Leucaena*, sin embargo, se utiliza y aprovecha es limitado por la falta de estudios relacionados al uso de estos recursos naturales, por lo que se hace necesario realizar investigaciones científicas enfocadas para un mejor manejo y una utilización óptima, pues son una fuente valiosa para la alimentación del ganado.

Las variedades de leguminosas forrajeras ofrecen una calidad superior de alimento en comparación que los pastos gracias a su mejor digestibilidad; esto está asociado a un menor nivel de fibras. Ya que la mayor parte de la energía que se puede digerir en leguminosas se origina en los componentes solubles de la célula, más que de la fibra.

Leucaena es una especie arbórea perteneciente a la familia de las Leguminosas o Fabáceas que se ha utilizado en la producción animal en regiones marginadas de México como actividad de subsistencia con mínimo empleo de insumos externos. Ello ha motivado la búsqueda de alternativas alimenticias basadas en los medios naturales disponibles como varias leguminosas silvestres utilizadas como forraje succulento.

La utilización de plantas leñosas perennes nativas con potencial forrajero, base de los sistemas tradicionales de producción animal, representa una opción que proporciona forraje de alta calidad para el ganado. Así mismo, las especies de árboles pueden ser integrados en el desarrollo de soluciones y tecnologías que mitigan la erosión e incrementan la fertilidad del terreno; además, pueden aportar productos adicionales como leña, madera, frutos y semillas que generen ingresos al productor y brinden estabilidad económica a la unidad de producción familiar.

Las variedades del género *Leucaena* se encuentran entre las más de 200 clases de leguminosas de tipo arbóreo que se utilizan en los sistemas agroforestales como alimento animal; tienen un papel crucial en la producción agropecuaria, dado que ofrecen alimento de excelente calidad, son duraderas y se regeneran rápidamente tras el pastoreo, resisten la falta de agua, además es consumida rápidamente por el ganado.

L. leucocephala, es la especie más estudiada, debido a su contenido de proteína, tolerante a sequía y promueve alto rendimiento de biomasa en distintos ecosistemas. Su extensa dispersión y proliferación en clima tropical está determinado por factores como la temperatura, la composición del suelo, nivel de acidez, abarcando áreas que van desde el nivel del mar hasta 1500 m, precipitaciones de 400 a 1500 mm anuales. Esta especie se adapta a distintos tipos de suelos, incluyendo arenoso, arcilloso y pedregoso de diferente topografía, sin prosperar en terrenos anegados, bajo temporal o riego; ha sido calificado el “árbol milagro” de regiones tropicales. Así mismo tiene la capacidad de soportar diversas condiciones de terreno, desde superficies pedregosas y esqueléticas hasta arcillas densas. El desarrollo óptimo se da en suelos bien drenados que son de moderadamente alcalinos



hasta ligeramente ácidos, además la especie tolera la salinidad moderada.

El contenido de proteína es la razón que *L. leucocephala* sea la especie vegetal más utilizada como fuente de proteína pues se han reportados contenidos de 22.1% en Cuba hasta 26.6% en México, principalmente para rumiantes en la mayor parte de países tropicales y subtropicales pues el valor nutricional de *L. leucocephala* puede llegar a ser tan alto como el valor de una proteína concentrada.

Leucaena

El género *Leucaena* es una especie de leguminosa perteneciente a la familia Fabaceae. Es originaria de México y Centroamérica, en México existen 22 especies de este género, distribuidas en diferentes ecosistemas del país, desde el trópico hasta el semiárido. Es un árbol o arbusto caducifolio o perennifolio, de 3 a 6 m de altura con un diámetro a la altura del pecho de hasta 25 cm, su copa es redondeada, ligeramente abierta y rala con hojas alternas, bipinnadas, de 9 a 25 cm de largo, verde grisáceas y glabras; folíolos 11 a 24 pares, de 8 a 15 mm de largo, elípticos y oblicuos.

Sus flores forman cabezuelas, con 100 a 180 flores blancas, de 1.2 a 2.5 cm de diámetro; flor de 4.1 a 5.3 mm de largo; pétalos libres; cáliz de 2.3 a 3.1 mm. Los frutos son vainas oblongas, estipitadas, en capullos florales de 30 o más vainas, de 11 a 25 cm de largo por 1.2 a 2.3 cm de ancho, verdes cuando son tiernas y cafés cuando son maduras. Es reconocida por su alto valor nutricional, lo que la convierte en una importante fuente de alimento alternativo para rumiantes, especialmente en regiones donde se distribuye.

La *Leucaena* también conocida como "guaje" en algunas regiones, es valorada por sus múltiples beneficios, desde la alimentación del ganado hasta la mejora del suelo gracias a su capacidad de fijar nitrógeno, rica en proteínas, lo cual es esencial para el crecimiento y la salud del ganado. Su contenido proteico puede variar entre 20% y 30% en base seca, respecto a la digestibilidad las hojas de *Leucaena* son altamente digestibles, lo que permite que el ganado aproveche mejor los nutrientes.

Las especies de *Leucaena* más ampliamente cultivadas en México por los indígenas son *L. esculenta* subsp. *esculenta* y *L. leucocephala* subsp. *glabrata*. La primera se llama guaje rojo y la gente local, principalmente del grupo mixteco, recolecta vainas, semillas y hojas tiernas para consumo humano. Las semillas se comen crudas, tostadas, cocidas en guisos o molidas y se agregan a las salsas de chile tradicionales. El cultivo de *Leucaena* no es intensivo; las partes comestibles se recolectan de individuos plantados en huertos familiares, de poblaciones silvestres o de individuos seleccionados que se salvaron en tierras de cultivo.

Distintos autores realizaron estudios sobre *Leucaena* en países de América Central, América del Sur y el Caribe, y concluyeron que existe suficiente germoplasma e información experimental disponible en la región para diferentes ambientes. Con base en



datos edafológicos y ambientales el pH del suelo oscila en un 5.5, saturación de >40%, altitud <1500 m.s.n.m. y períodos secos de 3 a 6 meses para poder desarrollarse en macrorregiones y sistemas de producción agrícola que podrían beneficiarse de la *Leucaena*.

Gran parte de la investigación se ha realizado sobre *Leucaena leucocephala*, en particular las variedades 'K' de Hawái, los cvs de Perú y Cunningham, y el germoplasma proporcionado por RIEPT (red de pasturas con apoyo del CIAT). De 1986 a 1991 se realizaron estudio de la adaptación y el uso potencial de *L. leucocephala* y *L. diversifolia* como leña, carbón vegetal y forraje en varios sitios de Guatemala, Honduras, El Salvador, Nicaragua, Costa Rica y Panamá. Los sitios variaron de 0 a 1200 m.s.n.m., la temperatura media de 20 °C a 29.9 °C y la precipitación total de 1635 a 3433 mm; los suelos tenían un pH >5.0. *L. leucocephala* se adaptó bien a suelos bien drenados con poca compactación y en sitios con una estación lluviosa bien definida, mientras que *L. diversifolia* se adaptó mejor por encima de los 800 m.s.n.m.

L. leucocephala está ampliamente distribuida en la región; la subespecie *glabrata* se ha naturalizado en Honduras. Otras especies nativas de este país son *L. salvadorensis*, *L. diversifolia*, *L. shannonii subsp. shannonii* y *L. lempirana*. Los indígenas de Honduras también han manejado los árboles de *Leucaena* desde hace mucho tiempo y los utilizan como fuente de vainas comestibles, forraje para cerdos, conejos y ganado, leña, para construcción de cercas, sombreadores y de abono verde. Pequeños agricultores de Guatemala y otros países de la región practican un uso similar de la *Leucaena*.

L. leucocephala es uno de los árboles con múltiples propósitos, ya que ha demostrado ser eficaz al mejorar la utilización y la ingesta de nutrientes, digestibilidad de nutrientes y rendimiento animal y lactancia, al igual que también reduce el uso de concentrados de alto valor económico. Existen propiedades para considerar a *L. leucocephala* como un buen forraje, por su alto contenido de proteína cruda, contenido de elementos esenciales, bajo o nulo contenido en sodio, palatabilidad aceptable, alta digestibilidad, contribución de proteína de derivación, propiedades antihelmínticas, entre otras.

La adaptabilidad y resiliencia de la *Leucaena* ha propiciado su introducción generalizada en diversos climas, lo que resalta su importancia agrícola y sus potenciales beneficios económicos para los ganaderos de todo el mundo. A pesar de sus ventajas, el cultivo y el uso de la *Leucaena* no están exentos de controversias y riesgos. La raíz llega a medir de 2 a 3 m, lo que le permite aprovechar mejor la humedad para mantenerse verde todo el año, si no se registran heladas. La raíz principal se adentra en las secciones más bajas del terreno y extrae agua y nutrientes minerales.

Ofrece importantes beneficios ambientales a través de la mejora del suelo y el control de la erosión, además de los beneficios nutricionales de la *Leucaena* y sus limitaciones, la especie sigue siendo un foco de atención en estudios agrícolas destinados



a mejorar los sistemas de producción ganadera y abordar los desafíos de sostenibilidad en las prácticas agrícolas. Además de la nutrición del ganado, la *Leucaena* tiene aplicaciones en la agroforestería y la mejora del suelo, contribuyendo a la fijación de nitrógeno y el secuestro de carbono. Su rápido crecimiento y su capacidad para mejorar la calidad del suelo la convierten en un recurso valioso en sistemas agrícolas integrados.

Las leguminosas forrajeras presentan mayor calidad que los pastos debido a su digestibilidad superior, relacionada con un menor contenido de fibras. La mayor parte de la energía digestible en leguminosas proviene de los constituyentes solubles de la célula. La *Leucaena* es una leguminosa que tiene la capacidad de fijar nitrógeno atmosférico en el suelo a través de sus raíces. Esto mejora la fertilidad del suelo y reduce la necesidad de fertilizantes químicos. Además de ser utilizada como forraje, la *Leucaena* también puede ser empleada en sistemas agroforestales, como cobertura de suelo y en la producción de madera y biomasa.

Distribución de *L. leucocephala*

L. leucocephala es originaria de América tropical, aparentemente del sur de México (Yucatán). Se extiende desde México hasta Nicaragua, abarcando Guatemala, Honduras y el Salvador. Los españoles la llevaron a Filipinas y desde allí fue llevada a Indonesia, Malasia, Papua, Nueva Guinea y el sureste de asiático, adaptándose a zonas tropicales. *L. leucocephala* se divide en ambas vertientes de México, especialmente en la Península de Yucatán y en el Istmo de Tehuantepec. Su variación ha sido motivo de la distinción de tres subespecies, subsp. *Leucocephala*, subsp. *Ixtahuacana* y subsp. *glabrata*. La subsp. *glabrata* se diferencia de las otras dos por ser generalmente de hábito arbóreo y por presentar hojas, folíolos y legumbres de mayor tamaño. A pesar de la evidente importancia económica de estos árboles, actualmente como en la antigüedad, se desconoce su origen geográfico.

En Chapulco, Puebla, se conoce un posible híbrido de esta especie con *Leucaena esculenta* subsp. *paniculata*. Se ha documentado la presencia de *L. leucocephala* en los estados de Aguascalientes, Baja California Sur, Campeche, Chiapas, Coahuila, Guerrero, Jalisco, Michoacán, Morelos, Nayarit, Nuevo León, Oaxaca, Puebla, Querétaro, Quintana Roo, San Luis Potosí, Sinaloa, Sonora, Tabasco, Tamaulipas, Tlaxcala, Veracruz, Yucatán y Zacatecas.

Sus nombres comunes son: “liliaque”, “liliak” (significado desconocido en totonaca), en la región totonaca “guash” (guaje), en el norte de Puebla y zonas aledañas de Veracruz; “huaxi”, “xaxim” (guaje), en la península de Yucatán. Las subespecies: *leucocephala*, *ixtahuacana* y *glabrata*. La subsp. *leucocephala* tiene pilosidad (canescencia) en los renuevos foliares, folíolos y frutos y es típicamente un arbusto, su



presencias se extiende por la península de Yucatán, la llanura costera del Golfo y en el estado de Chiapas.

La investigación sobre *Leucaena esculenta* se ha ampliado significativamente desde la década de 1970, destacando sus múltiples funciones no sólo como forraje para el ganado sino también en sistemas agroforestales para la mejora y conservación del suelo. Los análisis cromosómicos han demostrado que ninguna de las especies analizadas presenta recuentos típicos de la mayoría de los mimosoides, como $2n = 26$ o $2n = 28$, lo que sugiere la importancia de la poliploidía en el alto número de bases característico del género.

Leucaena leucocephala y *L. esculenta* poseen características morfológicas y fisiológicas distintivas que influyen en su ventaja competitiva en los agroecosistemas. *L. leucocephala* destaca por su rápido crecimiento, su capacidad de fijación de nitrógeno y su alta calidad como forraje, lo que la convierte en un valioso componente en los sistemas agroforestales. Sin embargo, su naturaleza invasiva y su susceptibilidad a plagas como el psílido pueden limitar su utilidad. *L. esculenta*, aunque menos documentada, se utiliza tradicionalmente en sistemas agroforestales indígenas, lo que sugiere su adaptabilidad y utilidad en contextos culturales específicos. Estas características, en conjunto, influyen en sus funciones y eficacia en los agroecosistemas.

Características morfológicas

L. leucocephala presenta un sistema radicular profundo que le permite acceder a la humedad más allá del alcance de las gramíneas, lo que mejora su productividad durante las estaciones secas. *L. esculenta*: Menos documentada, pero sus características morfológicas pueden incluir la adaptabilidad a diversos tipos de suelo, lo que puede influir en su competitividad en entornos específicos.

Características fisiológicas en la fijación de nitrógeno: Ambas especies contribuyen a la fertilidad del suelo; sin embargo, *L. leucocephala* destaca por su eficiencia en la fijación de nitrógeno, favoreciendo los cultivos circundantes. La resistencia a la sequía se presenta en *L. leucocephala*, lo cual es crucial para mantener la productividad en climas variables.

Ventajas competitivas

L. leucocephala es muy palatable y nutritiva para el ganado, a menudo denominada la "alfalfa de los trópicos", lo que facilita su adopción en los sistemas agrícolas. Si bien la adaptabilidad de *L. leucocephala* puede ser ventajosa, también presenta riesgos ecológicos como especie invasora, pudiendo competir con la flora nativa. Por otro lado, las limitaciones de *L. leucocephala*, como la susceptibilidad a plagas y el bajo crecimiento en suelos ácidos, pueden dificultar su adopción generalizada a pesar de sus beneficios. Esto resalta la necesidad de un manejo cuidadoso de los agroecosistemas para equilibrar



la productividad y la integridad ecológica. Las inflorescencias de la *Leucaena* se encuentra predominantemente en brotes en crecimiento activo y se caracteriza por su color crema y forma globular o capitada, en la Figura 1 se observa el desarrollo de las vainas de *Leucaena leucocephala* y de *Leucaena Esculenta*, tras la floración, cada cabeza produce de 5 a 25 vainas planas, caracterizándose por tener de 15 a 30 semillas, que se desprenden de ambos márgenes, las semillas en sí son relativamente pequeñas, midiendo entre 6.7 y 9.6 mm de largo y entre 4 y 6.3 mm de ancho.



Figura 1. Vainas de *Leucaena leucocephala* y de *Leucaena Esculenta*.

Perfil nutricional

La *Leucaena leucocephala*, presenta un perfil nutricional diverso y valioso que la convierte en una alternativa destacada para la alimentación de rumiantes. Su composición nutricional incluye niveles significativos de proteínas, carbohidratos, vitaminas y minerales esenciales, lo que contribuye a sus beneficios dietéticos generales.

Leucaena esculenta, comúnmente conocida por su alto valor nutricional, ofrece una composición comparable a la alfalfa, particularmente conocida por su importante contenido de betacaroteno, que contribuye a su perfil nutricional. La semilla es rica en proteínas, con un contenido de entre el 24% y el 46% de proteína y un perfil de aminoácidos favorable. Tiene un contenido de aceite relativamente bajo (5-10%), pero es rica en ácidos grasos insaturados (aproximadamente el 73%) y aporta minerales esenciales como calcio y fósforo.

Contenido de proteínas y carbohidratos.

El forraje de *Leucaena* contiene un contenido de proteína que varía entre el 22% y el 28%. Sin embargo, si bien la fracción proteica cumple con los criterios de alta fuente proteica según la Puntuación de Aminoácidos Indispensables Digestibles (DIAAS), se clasifica como proteína de baja calidad considerando tanto la cantidad como la calidad. Esto indica



que la *Leucaena* debe integrarse en una matriz alimentaria mixta con cereales o proteínas animales para optimizar la ingesta nutricional.

La composición de carbohidratos en las semillas de *Leucaena* es notablemente alta, constituyendo aproximadamente el 50% de su peso seco. Específicamente, las concentraciones de carbohidratos oscilan entre el 35% y el 60% en las semillas de *Leucaena*, lo que proporciona una fuente sustancial de energía. Se ha observado que la tasa de conversión metabólica en modelos animales para estos carbohidratos oscila entre 10.7 y 12.4 kilojoules por gramo en base seca.

Vitaminas y minerales

La *Leucaena* también es rica en diversas vitaminas y minerales. La vitamina K está presente y desempeña un papel fundamental como cofactor de la enzima gamma-glutamil carboxilasa, necesaria para la activación de las proteínas dependientes de la vitamina K (VKDP), importantes para la salud ósea, vascular y reproductiva, así como para la progresión del cáncer.

Beneficios para los rumiantes

La *Leucaena leucocephala*, conocida comúnmente por su uso como forraje para rumiantes, ofrece diversos beneficios, especialmente en regiones tropicales. Una de las principales ventajas es su potencial para mejorar la ganancia de peso vivo del ganado al incluirla en sus dietas. Estudios han demostrado que los rumiantes alimentados con dietas suplementadas con *Leucaena* pueden experimentar mejoras significativas en la ganancia de peso en comparación con los que consumen pastos tradicionales, especialmente durante las temporadas secas, cuando la calidad del forraje es baja.

Digestibilidad

Se ha informado que la *Leucaena* ofrece niveles de digestibilidad entre el 50% y el 70%, y los estudios indican que la incorporación de *Leucaena* en las raciones puede mejorar el consumo de alimento y los productos finales de la fermentación ruminal. Además, la suplementación con *Leucaena* ha mostrado efectos positivos en la digestibilidad de la proteína dietética y la materia orgánica, contribuyendo a una mejor ganancia de peso vivo en rumiantes.

La digestibilidad in vitro del aislado proteico de *Leucaena* es de aproximadamente el 76%, y pueden ocurrir variaciones en la composición nutricional entre diferentes cultivares de *L. leucocephala*. Además, destaca la presencia de aminoácidos esenciales, como isoleucina, leucina, fenilalanina e histidina, mientras que la lisina y la metionina también se encuentran en cantidades moderadas.

La familiaridad, conciencia y comprensión entendimiento de la descomposición y la asimilación de los alimentos es esencial para determinar su valor nutricional; por tanto, es clave para la formulación de raciones para el ganado. La digestibilidad hace referencia



a la cantidad de alimento que desaparece en el tracto digestivo o en un procedimiento de laboratorio *in vitro* debido a su solubilización o degradación por los microorganismos anaerobios ruminales; mientras que, la degradabilidad hace referencia a la cantidad de alimento que se descompone en sus elementos integrantes, mediante procesos biológicos o químicos. A diferencia de la degradabilidad, la digestibilidad de los forrajes permite estimar la proporción de nutrientes presentes en el alimento.

La degradabilidad ruminal efectiva, grado de digestión ruminal, tiempo de retardo, tasa de digestión ruminal y digestibilidad potencial, son importantes características de digestión del forraje. Tales características pueden ser usadas para predecir el valor nutritivo más acertadamente y comparar la utilidad de los forrajes en las dietas para rumiantes. La principal restricción de la producción de rumiantes alimentados con forrajes es la fluctuación en su producción y calidad. Este aspecto influye considerablemente en su rendimiento para producción de leche y crecimiento, reflejándose en su consumo y digestibilidad. *L. leucocephala* es una leguminosa usada en los sistemas de producción animal, que ha mostrado en la estación de lluvias una digestibilidad de 66.2% a las 48 h y 68% las 72 h. Se analizaron tres variables de la degradabilidad de diecisiete accesiones del género *Leucaena* conformando tres grupos con características similares. Las variables analizadas fueron degradabilidad de la materia seca a las 48 h; degradabilidad de la proteína cruda a las 48 h y degradabilidad de la fibra detergente neutro a las 48 h.

Determinar la descomposición de las proteínas y materia orgánica por los microorganismos del rumen es complejo, difícil ya que existe una considerable variabilidad en la degradación de la proteína de los mismos alimentos. Existen varias fuentes de error analítico, una de las más importantes es el distinguir entre proteína bacteriana y la proteína que no es degradada. Debido a que la descomposición de la proteína influye en la fracción degradada como la no degradada de la proteína de la dieta, la exactitud para estimar la degradación de la proteína de la dieta es bastante importante en la implementación del nuevo sistema en la alimentación de rumiantes.

Riesgos y limitaciones de alimentación

Leucaena leucocephala, si bien es beneficiosa como alternativa alimentaria para los rumiantes, plantea ciertos riesgos y limitaciones que deben gestionarse con cuidado. Desventajas nutricionales, en ciertas regiones como, Papúa Nueva Guinea, Australia, varias islas del Pacífico y algunos países africanos, ahí los rumiantes carecen de las bacterias ruminales necesarias para digerir eficazmente la *Leucaena*. Esta deficiencia puede provocar carencias nutricionales cuando estos animales consumen grandes cantidades de la planta. Se están realizando esfuerzos para introducir las bacterias



adecuadas en estas zonas, lo que podría permitir un consumo más seguro de *Leucaena* por parte de los rumiantes a nivel mundial.

Producción animal

El uso de legumbres en la nutrición animal es un ejemplo típico de las técnicas alternativas que han sido resaltadas por varios autores, quienes apoyan su aplicación debido a su alto valor nutricional y su contenido rico en proteínas, minerales y otros principios nutritivos. No obstante, es crucial considerar un elemento que en cierta medida puede constituir una limitante en el uso de las leguminosas, y es la presencia de metabolitos secundarios tóxicos. Estos compuestos no solamente pueden afectar con los procesos de digestión y absorción de los nutrientes, sino que, antes de ingresar al sistema circulatorio, pueden provocar varios efectos sistémicos en los animales.

Durante la época de lluvias, los rumiantes prefieren el consumo de pastos en crecimiento activo y con valor forrajero destacado; sin embargo, conforme avanza la época seca, el ganado tiende a consumir a la *L. leucocephala* como fuente de forraje. La cría de rumiantes en sistemas extensivos en países tropicales tiene indicadores productivos bajos debido al déficit de nutrientes en la alimentación de los animales. Una de las opciones viables para aumentar producción es la añadir forrajes y frutos de leguminosas en la alimentación.

La suplementación con hojas de *L. leucocephala* juega un papel importante en aumentar el contenido de proteína de las raciones experimentales que afectan el consumo de materia seca. Suplementando con hoja de *L. leucocephala* aumenta la palatabilidad de la ración. Además, una prueba adicional mostró que la materia seca más alta y los consumos de materia orgánica se encontraron en la ración que contenía 30% de *L. leucocephala* y el nivel más bajo se encontró en la ración sin la suplementación de *L. leucocephala*.

El forraje de *L. leucocephala* en la nutrición de rumiantes es ampliamente usado, debido a sus cualidades tales como un alto contenido de proteína cruda, que varía entre 24 y 30%, dependiendo de la variedad y época del año. Se afirma que las hojas de *L. leucocephala* constituyen un excelente forraje con una composición de 5 a 30% de materia seca, 20 a 27% de proteína, rico en calcio, potasio y vitaminas. Poseen una tasa de digestibilidad de 60 a 70%. A pesar de que las hojas y semillas poseen mimosina la cual puede perjudicar a los mamíferos no rumiantes y aves de granja, los rumiantes contrarrestan el efecto venenoso gracias a las bacterias.

L. leucocephala en los diversos sistemas ganaderos es una opción viable y sostenible para producciones con bajos insumos externos; aunque en la actualidad su utilización y aprovechamiento es insuficiente por parte de las diferentes empresas ganaderas y productores particulares. Además, no solo favorece el aumento de peso, sino que también mejora la producción de leche en los animales lecheros. Las vacas lecheras



que reciben follaje de *Leucaena* de corte y acarreo han demostrado un aumento del 14% en la producción de leche, junto con un mayor contenido de grasa y proteína.

La inclusión de *Leucaena* en los sistemas de producción caprina se ha relacionado con una mayor ganancia de peso vivo, mayor producción de leche y mejor rendimiento reproductivo. Sin embargo, es importante señalar que los beneficios de la *Leucaena* suelen depender de la presencia de bacterias ruminales adecuadas, necesarias para digerir los componentes de la planta, especialmente en regiones donde estas bacterias son escasas. En zonas como Papúa Nueva Guinea y algunas partes de África, se están realizando esfuerzos para introducir estas bacterias beneficiosas y así mejorar el valor nutricional de la *Leucaena* para los rumiantes locales.

Los sistemas silvopastoriles intensivos, que se caracterizan por la presencia de altas densidades de arbustos forrajeros, como la leguminosa *L. leucocephala*, asociado con pastos mejorados; han demostrado que son una opción importante para mejorar la ganadería debido a su alto rendimiento y calidad de forraje, lo cual permite incrementar la producción de carne y leche. Además de lo mencionado, estos sistemas ofrecen diversas funciones ambientales como la captura de carbono, la disminución de la emisión de metano, la incorporación de nitrógeno atmosférico, entre otros.

Se ha puesto énfasis en incorporar árboles leguminosos en los prados, debido a su habilidad para ofrecer forrajes de alto valor nutritivo, especialmente durante la época de seca, *L. leucocephala* es ideal para este propósito, ya que se encuentra entre las especies más empleadas junto a gramíneas o pastos mejorados, esta estrategia agroforestal ha sido bien recibida por los productores.

Hay múltiples motivos por los que se ha utilizado ampliamente, resaltando su gran generación de biomasa, su buena aceptación entre distintas especies animales y su habilidad de regenerarse tras el corte y/o ramoneo. Es posible que la fusión de las características presentes en este árbol sea singular, además de tener un elevado valor nutricional, lo que ha llevado a un creciente interés en diversas regiones del mundo ha aumentado el interés por el estudio de su manejo agronómico y las formas de utilización en los sistemas de producción animal.

Usos más allá de la alimentación de rumiantes

La *Leucaena leucocephala*, conocida comúnmente por su función como alimento nutritivo para rumiantes, también tiene diversas aplicaciones más allá de la nutrición ganadera. Sus diversos usos abarcan la agroforestería, la mejora del suelo y los beneficios ambientales, lo que la convierte en una planta valiosa en diversos sistemas agrícolas.



Aplicaciones agroforestales

El rápido crecimiento de la *Leucaena* y su capacidad para fijar nitrógeno la convierten en un recurso valioso en los sistemas agroforestales. Puede integrarse en las prácticas agrícolas para proporcionar sombra, forraje y mejorar el suelo, lo que incrementa la productividad general de los paisajes agrícolas. La especie se utiliza a menudo en sistemas de cultivo intercalado, donde apoya la producción de alimentos y mantiene el equilibrio ecológico. Mejora del suelo y abonos verdes, la *Leucaena* se puede cortar e incorporar al suelo, aumentando el contenido de materia orgánica, la retención de agua y la disponibilidad de nutrientes.

Su capacidad para mejorar la fertilidad del suelo mediante la fijación de nitrógeno mejora el suministro de nutrientes a los horizontes superiores del suelo, favoreciendo así el crecimiento de las plantas y la sostenibilidad agrícola. Control de la erosión y secuestro de carbono El extenso sistema de raíces de *Leucaena* juega un papel crucial en la prevención de la erosión del suelo, particularmente en tierras inclinadas o degradadas. Esta característica es vital para mantener la integridad del suelo y prevenir la degradación de la tierra. Además, su rápido crecimiento contribuye al secuestro de carbono, lo que convierte a la *Leucaena* en una herramienta eficaz para mitigar el cambio climático mediante la captura de dióxido de carbono atmosférico.

Usos alternativos, más allá de sus beneficios agrícolas

La *Leucaena* también se utiliza para leña y aplicaciones de madera a pequeña escala debido a su rápido crecimiento y facilidad de propagación. En algunas culturas, su follaje se valora como fertilizante orgánico, mejorando la calidad y la fertilidad del suelo, a la vez que apoya prácticas agrícolas sostenibles. Además, los usos tradicionales de la *Leucaena* incluyen aplicaciones medicinales, donde se ha empleado para tratar diversas dolencias como enfermedades estomacales y diabetes, y se está investigando por su potencial en la prevención y el tratamiento del cáncer.

Factores antinutricionales

La *Leucaena* contiene factores antinutricionales, principalmente mimosina, que pueden afectar negativamente la salud animal. La mimosina, un aminoácido presente en la planta, puede bloquear las vías metabólicas relacionadas con los aminoácidos aromáticos y el triptófano. Esta acción puede inhibir la biosíntesis de proteínas, lo que provoca síntomas tóxicos como retraso del crecimiento en animales que consumen grandes cantidades de *Leucaena*. Para mitigar estos riesgos, es fundamental realizar pretratamientos térmicos, químicos o físicos, como la germinación, la cocción o el remojo, para reducir la concentración de estos compuestos antinutricionales.

A pesar de sus beneficios, la presencia de mimosina, un aminoácido no proteico tóxico presente en la *Leucaena*, puede suponer riesgos para la salud y limitar la



productividad de los animales alimentados con este forraje. Se ha demostrado que la mimosina afecta la absorción de minerales al quelar iones metálicos esenciales, lo que puede provocar deficiencias. Por lo tanto, si bien la *Leucaena esculenta* es una excelente fuente de nutrientes, su uso debe gestionarse con cuidado para mitigar los posibles efectos tóxicos en el ganado. La presencia de mimosina, un factor antinutricional en la *Leucaena*, representa riesgos para la salud de los rumiantes, especialmente en zonas donde faltan las bacterias ruminales necesarias para una digestión eficaz.

Beneficios económicos y ambientales

Las implicaciones económicas del uso de *Leucaena* en los sistemas de alimentación de rumiantes son significativas. Los ganaderos que utilizan estrategias de alimentación basadas en *Leucaena* pueden mantener una mayor densidad de ganado, como lo demuestra una comparación con los sistemas de alimentación tradicionales, donde los ganaderos podían mantener solo 6,1 cabezas de ganado por hectárea, en comparación con las 9,1 con la suplementación de *Leucaena*. Además, la inclusión de *Leucaena* puede contribuir a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, un beneficio atribuido a su contenido de taninos.

Mejoras de la salud y la productividad.

Además de sus beneficios nutricionales y económicos, se ha descubierto que la *Leucaena* mejora la salud de los rumiantes. Estudios de alimentación indican que la *Leucaena* puede ayudar a controlar los parásitos internos, mejorando así la salud general y la productividad de los animales. Por ejemplo, las cabras que consumen *Leucaena* han mostrado mejoras significativas en el control de parásitos, lo cual es esencial para mantener la salud del ganado en las regiones tropicales.

Riesgos y desafíos

La *Leucaena esculenta*, si bien presenta diversos beneficios como alternativa alimenticia para rumiantes, también presenta ciertos riesgos y desafíos asociados con su uso. Una de las principales preocupaciones es la presencia de compuestos tóxicos como la mimosina y la DHP (3,4-dihidroxipiridina), que pueden afectar negativamente la salud del ganado. Se ha demostrado que la mimosina, un aminoácido libre presente en la *Leucaena*, bloquea las vías metabólicas de los aminoácidos esenciales, lo que provoca síntomas como retraso del crecimiento en el ganado debido a la reducción de los niveles séricos de tirosina. Además, si bien la *Leucaena* ofrece importantes beneficios ambientales a través de la mejora del suelo y el control de la erosión, las preocupaciones con respecto a su capacidad invasiva en ecosistemas no nativos han provocado debates en curso sobre las implicaciones ecológicas de su plantación generalizada.



Beneficios y desafíos potenciales

Si bien los beneficios del cultivo de *Leucaena* se destacan con frecuencia, es crucial reconocer que muchas ventajas son percibidas en lugar de verificadas empíricamente. Los estudios indican que las ventajas de especies exóticas como la *Leucaena* a menudo se exageran en comparación con los beneficios ecológicos que ofrecen las especies nativas. Reducir las brechas de conocimiento existentes mediante una investigación exhaustiva sobre los aspectos beneficiosos y perjudiciales de la *Leucaena* facilitará una mejor toma de decisiones y prácticas sostenibles en los sistemas agrícolas.

Conclusiones

La especie *Leucaena* presenta diversas características nutricionales que pueden apoyar la alimentación de ovinos en temporada de estiaje. *L. esculenta* es una especie presente en la región sur del estado de Zacatecas y presenta las mejores características para la alimentación de rumiantes en comparación con la especie *L. leucocephala*, debido a que la época de fructificación es la época seca y produce menos vainas en comparación de la otra especie, lo que favorece que la especie *L. esculenta* tenga una mayor concentración de nutrientes y una mejor digestibilidad.

Bibliografía

- Alam, M., Alandis, N. M., Sharmin, E., Ahmad, N., Alrayes, B. F., & Ali, D. (2017). Characterization of *Leucaena* (*Leucaena leucocephala*) oil by direct analysis in real time (DART) ion source and gas chromatography. *Grasas y Aceites*, 68 (2), e190. <https://doi.org/10.3989/gya.0939162>
- Alemán-Ramírez, JL, Okoye, PU, Torres-Arellano, S., Mejía-López, M., y Sebastian, PJ (2022). Una revisión sobre las aplicaciones bioenergéticas de *Leucaena leucocephala*. *Cultivos y Productos Industriales*, 182, 114847.
- Bacab, H. M., Madera, N. B., Solorio, F. J., Vera, F. y Marrufo, D. F. (2013). Los sistemas silvopastoriles intensivos con *L. leucocephala*: una opción para la ganadería tropical. *Avances en Investigación Agropecuaria*. 17(3): 67-81.
- Bomfim, NCP, Aguilar, JV, Ferreira, TC, Dos Santos, BS, De Paiva, WDS, De Souza, LA, & Camargos, LS (2023). El desarrollo de las raíces en *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit mejora la acumulación de cobre. *Investigación sobre ciencias ambientales y contaminación*, 30 (33), 80245-80260.
- Cino D.M., Castillo, E., y Hernández, J. (2006). Alternatives of cattle fattening in silvopastoral systems with *L. leucocephala*: economic and financial indicators. *Cuban Journal of*



- García, D. E., Wencomo, H. B., Medina, M. G., Cova, L. J., González, M. E., Pisan, P., Domínguez, C. E. y Baldizán, A. (2008). Variación interespecífica de la calidad nutricional de diecisiete accesiones de *Leucaena*. *Avances en investigación agropecuaria*. 12(1): 57-67
- García-Ferrer, L., Bolaños-Aguilar, E.D., Ramos-Juárez, J., Osorio, M. y Lagunes- Espinoza, L.C. (2015). Rendimiento y valor nutritivo de leguminosas forrajeras en dos épocas del año y cuatro edades de rebrote. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, vol. 6, núm. 4, pp. 453-468
- Liu, C., Liu, J., Mei, X., Zheng, J., Zheng, K., Li, O., ... & Zhuang, J. (2024). Effects of nitrogen regulation on heavy metal phytoextraction efficiency (*Leucaena leucocephala*): Application of a nitrogen fertilizer and a fungal agent. *Environmental Pollution*, 355, 124102.
- López-Vigoa, O., Olivera, Y., Lamela, L., Sánchez, T., Montejó, I.L., González, M. y Rojo, R. (2016). Influence of the complementation with sugarcane and/or citrus fruit pulp on the *in vitro* fermentation of diets based on *Megathyrus maximus* and *Leucaena leucocephala*. *Pastos y Forrajes*, Vol. 39, No.4, October-December, 253-262
- Naranjo, J. F., Cuartas, C. A., Murgueitio, E., Chará, J., & Barahona, R. (2012). Balance de gases de efecto invernadero en sistemas silvopastoriles intensivos con *Leucaena leucocephala* en Colombia. *Livestock Research for Rural Development*, 24(8).
- Ojeda, L.J., Herrea, R., Furrázola, E. y Hernández C. (2014). Efecto de inoculaciones conjuntas de *Rhizobium*-Micorrizas Arbusculares en *Leucaena leucocephala* CV: Perú. Centro Agrícola, 41(3): 17-21.
- Ozaraga, M.S. y Ozaraga B.P. (2017). Efficacy of ipil-ipil (*Leucaena Leucocephala*), betel nut (*Areca catechu*) and papaya (*Carica papaya*) seeds against roundworms of a darag native chicken. *Philipp Journal Veterinary Animal Science*, 43 (1): 33-37
- Peralta-Juárez, I., Gómez-Campos, A., Romero-Castillo, P.A. y Reyes-Dorantes, A. (2017). Uso antropocéntrico del guaje *Leucaena esculenta* (Moc. & Sessé EX. DC.) Benth, en dos comunidades de la mixteca baja oaxaqueña, México. *Polibotánica*. Núm. 43, pp. 1-16, ISSN 1405-2768.
- Román-Cortés, N., García-Mateos, M.R., Castillo-González, A.M., Sahagún- Castellanos, J. y Jiménez-Arellanes, A. (2014). Componentes nutricionales y antioxidantes de dos especies de guaje (*Leucaena spp*): un recurso ancestral subutilizado. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 20(2): 157-170.

AGRICULTURA



Abanico Académico

Desarrollo de nuevas variedades de frijol y tecnologías de producción para el altiplano semiárido de México

Odilón Gayosso-Barragán.
Griselda Chávez-Aguilar.
Jorge Alberto Acosta-Gallegos.
Juan Samuel Guadalupe Jesús Alcalá-Rico.
Deli Nazmín Tirado-González.
Ulises Aranda-Lara.





Resumen

El frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) es un cultivo de gran relevancia en México, especialmente en el Altiplano Semiárido del Centro-Norte, donde se produce más del 70 % del volumen nacional. Esta región enfrenta condiciones climáticas adversas como sequías recurrentes, heladas y procesos de degradación ambiental, factores que limitan significativamente el rendimiento del cultivo. El cambio climático ha agravado estos retos, intensificando el estrés hídrico en etapas críticas como la floración y el llenado de grano, lo que repercute directamente en la productividad. Para enfrentar este escenario, el INIFAP ha desarrollado variedades mejoradas mediante métodos convencionales y técnicas de selección asistida por marcadores moleculares. Ejemplos destacados incluyen Pinto Centauro, Pinto Rarámuri, Pinto Tepehuán RS y Negro San Luis 22, las cuales presentan tolerancia a enfermedades, buena adaptación a condiciones de temporal y características de calidad acordes con las demandas del mercado. Además, el manejo agronómico es fundamental para la sostenibilidad del cultivo; prácticas como la labranza vertical y el uso de implementos biomiméticos contribuyen a mejorar la estructura del suelo y conservar la humedad. Asimismo, el empleo de sembradoras de precisión permite establecer cultivos en camas con alta densidad de plantas, optimizando el uso del espacio y los recursos. La fertilización, basada en análisis de suelo, es clave para alcanzar rendimientos óptimos, aunque su aplicación debe ajustarse al riesgo climático. El capítulo también aborda el uso de reguladores de crecimiento, como el ácido giberélico (GA₃), cuya aplicación foliar ha demostrado efectos positivos en el rendimiento de grano, la biomasa y el número de vainas por planta. En conjunto, se propone un enfoque integral para fortalecer la producción de frijol en el Altiplano Semiárido, articulando mejoramiento genético, tecnologías agronómicas y prácticas sustentables que respondan a los desafíos del cambio climático y promuevan la resiliencia del sistema agrícola.

Palabras clave: *cambio climático, mejoramiento genético, tecnologías agronómicas sustentables.*



Introducción

El frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) es la leguminosa más consumida a nivel mundial y, desde tiempos prehispánicos, ha desempeñado un papel esencial en la alimentación, la cultura y la economía de México. Junto con el maíz, conforma la base de la dieta tradicional mexicana y representa una fuente primordial —y en muchos casos única— de proteína vegetal para los sectores más vulnerables, que comprenden aproximadamente el 49.3 % de la población nacional. Además de su relevancia nutricional, el cultivo de frijol genera empleo e ingresos para el sector primario, donde las mujeres desempeñan un papel destacado: se estima que el 10 % de los productores son mujeres, y que más del 50 % reciben apoyo directo de sus esposas en las labores agrícolas.

El Altiplano semiárido del Centro-Norte de México constituye una de las principales regiones productoras de frijol a nivel nacional, al aportar el 72.1 % del volumen total. Su relevancia socioeconómica radica tanto en la extensión de la superficie sembrada como en su contribución directa a la dieta de la población. Esta región abarca zonas de los estados de Chihuahua, Durango, Coahuila, Zacatecas, Aguascalientes, San Luis Potosí, Jalisco, Guanajuato y Querétaro.

En este territorio, el cultivo de frijol de temporal prevalece como práctica dominante, favorecido por la adaptación del frijol Pinto, perteneciente a la raza Durango. Esta variedad se distingue por su ciclo vegetativo corto y su capacidad para desarrollarse bajo condiciones de precipitación limitada y errática. El frijol se siembra durante el ciclo primavera-verano, en condiciones de temporal que registran entre 250 y 400 mm de lluvia acumulada. Sin embargo, es común la ocurrencia de sequías intermitentes que afectan tanto la fase vegetativa como la reproductiva del cultivo. A estos desafíos se suman la presencia de heladas, la escasa disponibilidad de agua para riego, el predominio de agricultura de subsistencia, la degradación ambiental, procesos avanzados de desertificación y elevados índices de erosión actual y potencial. Estos factores productivos, tecnológicos, económicos y sociales configuran un entorno complejo que incide directamente en la forma de producir, generando una marcada heterogeneidad en los sistemas de producción de frijol en la región.

En este contexto, comprender la dinámica del cultivo de frijol en el Altiplano semiárido resulta fundamental para identificar oportunidades de mejora, fortalecer la resiliencia de los sistemas productivos y promover estrategias sostenibles que respondan a los desafíos agroclimáticos y socioeconómicos de la región. La caracterización integral de estos sistemas, considerando sus particularidades técnicas, ambientales y culturales, permite orientar acciones de investigación, innovación y política pública que contribuyan a garantizar la seguridad alimentaria, la equidad de género y el desarrollo rural en México.

Efecto del cambio climático la producción de frijol

En las últimas décadas, el clima global ha experimentado transformaciones significativas,



impulsadas tanto por las variaciones naturales del medio ambiente como por las actividades humanas. Este fenómeno, conocido como calentamiento global, se debe principalmente a la emisión de gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono, el metano y el óxido nitroso, entre otros. Entre los sectores más afectados y vulnerables se encuentra la agricultura, que no solo depende directamente de las condiciones climáticas, sino que también es fundamental para garantizar los medios básicos de subsistencia. El desarrollo sostenible de la agricultura es, por lo tanto, esencial para la supervivencia y el progreso de la sociedad humana. Los cambios en los patrones de lluvia y el aumento de la temperatura tienen un marcado impacto en la producción de alimentos. Según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) (2012), la producción de cultivos es sensible al cambio climático asociado con aumentos de temperatura, cambios en los patrones de lluvia y fenómenos meteorológicos extremos. Además de los cambios de clima, el dióxido de carbono también afecta la producción de alimentos, y tiene un mayor impacto en las especies C3 (incluido el frijol).

En México, según el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo e Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, se espera que el cambio climático impacte negativamente la productividad del sector agrícola, lo cual pondrá en riesgo la seguridad alimentaria del país. En algunas áreas de producción de frijol ya se observan los efectos de las altas temperaturas, que causan daño directo a las plantas como el aborto de flores y vainas, lo que disminuye el rendimiento y la calidad de la semilla, o indirecto, al favorecer el aumento de insectos y patógenos.

Con el objetivo de evaluar el efecto del cambio climático sobre la producción de frijol, Uresti *et al.* (2021) cuantificaron el rendimiento de grano de esta leguminosa en todo México utilizando el modelo 'Soil and Water Assessment Tool (SWAT)'. Los resultados muestran que el cambio climático impactará en forma negativa el rendimiento de grano de frijol, éste será diferenciado y paulatino ya que mientras en algunas áreas el rendimiento se mantendrá o incrementará, en la mayoría se reducirá. Se observaron reducciones en el rendimiento unitario de grano de frijol hasta por más del 50%, comparado con el rendimiento obtenido durante el periodo de referencia (2016-2020). Del total de la superficie susceptible para producir frijol en México, las áreas con muy bajo rendimiento se duplicarán a costa de las áreas con rendimientos medios. Las áreas con alto y muy alto potencial de rendimiento se reducirán a la mitad. Las zonas actuales con mayor superficie cosechada de frijol comprenden los estados de Chihuahua, Durango, Zacatecas, Guanajuato y Chiapas, y serán las más afectadas, ya que el potencial de rendimiento de grano se reducirá al mínimo.

Varios estudios han resaltado los efectos severos del estrés hídrico en el crecimiento del frijol común, su rendimiento, calidad y procesos fisiológicos y bioquímicos. La sequía limita la productividad de las leguminosas en todas sus etapas de



crecimiento, siendo especialmente crítica durante las etapas reproductivas y de desarrollo del grano, lo que generalmente resulta en pérdidas significativas de rendimiento. Durante la floración, los frijoles son particularmente susceptibles, y la sequía puede causar un alto porcentaje de abortos de flores y vainas, reduciendo el rendimiento en más del 60%. La exposición a la sequía afecta el índice de área foliar, la producción de materia seca, el número de vainas por planta, el número de semillas por planta, el peso de cien semillas y el rendimiento total de las semillas. El estrés por sequía también influye en las respuestas fisiológicas de las plantas, reduciendo la tasa de fotosíntesis y transpiración, así como la concentración de dióxido de carbono intercelular. Este estrés activa el cierre estomático debido a la acumulación de ácido abscísico (ABA), lo que provoca la inhibición del crecimiento y la disminución de la productividad de la planta. Asimismo, el contenido de clorofila disminuye porque su degradación se acelera bajo condiciones de sequía, afectando directamente la acumulación de biomasa. Las respuestas del cultivo varían en función de la frecuencia, duración e intensidad del estrés, así como del genotipo de la planta y de la etapa fenológica en la que dicho estrés se manifiesta.

Variedades de frijol

Para enfrentar los retos que impone el cambio climático se requiere de variedades mejoradas resistentes o tolerantes a los factores bióticos y abióticos emergentes, que posean los atributos de calidad que requiere el consumidor, como el oscurecimiento lento del grano y menor tiempo de cocción, y adaptación a la región de producción. El INIFAP ha desarrollado aproximadamente el 80 % de las variedades de frijol registradas en México. Durante décadas, estas variedades —de distintos tipos y adaptaciones— han sido generadas principalmente mediante esquemas de mejoramiento genético convencional. Sin embargo, actualmente la mayoría de los programas de mejoramiento genético de frijol en el mundo utilizan el proceso de selección asistida por marcadores moleculares, principalmente aquellos asociados a la resistencia a enfermedades. El uso de esta tecnología incrementa la eficiencia y precisión del mejoramiento genético, y permite identificar fuentes de resistencia para introgresar y piramidar genes de interés agronómico en menor tiempo que por métodos tradicionales.

Las variedades mejoradas actuales de frijol, desarrolladas por el INIFAP, representan un insumo fundamental para los productores y consumidores de este grano básico. Para lograr el potencial de rendimiento de las nuevas variedades, se requiere la aplicación de otras tecnologías que permitan el uso eficiente de los recursos naturales y adaptarse al cambio climático. Entre las variedades desarrolladas se incluyen diversos tipos de grano, de acuerdo con la demanda regional, y para condiciones de riego y temporal. Se han logrado avances en el desarrollo de nuevas variedades con mayor resistencia a enfermedades (Cuadro 1); sin embargo, la adaptación a la sequía impredecible y la adaptación a altas temperaturas, son problemas de producción que



requieren de investigación básica y aplicada sistematizada. En los últimos diez años, se han incorporado al catálogo nacional nuevas variedades de frijol, representativas de los tipos Flor de Junio (León), Flor de Mayo (Dolores y Eugenia), Pinto (San Rafael, Rarámuri, Salinas, Centauro, Centenario, Tepehuán RS) y Negro Opaco (San Blas, NOD-1, Verdín), entre otras con potencial agronómico y comercial.

Prácticas agronómicas para la producción de frijol de temporal

El manejo agronómico tiene un impacto significativo en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, como el contenido de materia orgánica, la disponibilidad de nutrientes, la biomasa y diversidad microbiana, las actividades enzimáticas y el pH del suelo. Comprender los efectos complejos de las prácticas agronómicas sobre la fertilidad del suelo, la disponibilidad de nutrientes, el interés microbiano y la aptitud general del suelo es esencial para una agricultura sustentable. En el cultivo de frijol de temporal, estas prácticas incluyen la selección adecuada de variedades adaptadas a condiciones de estrés hídrico, la rotación de cultivos para mejorar la estructura del suelo y reducir la incidencia de plagas, el uso de abonos orgánicos y biofertilizantes que favorecen la actividad microbiana, y la implementación de labranza mínima o conservación para reducir la erosión y preservar la humedad edáfica. Además, el manejo eficiente de la densidad de siembra, el control oportuno de malezas y la aplicación racional de insumos permiten optimizar el rendimiento del cultivo sin comprometer la salud del ecosistema agrícola.

Preparación del suelo

La labranza vertical es una técnica que consiste en romper el suelo en sentido vertical sin invertir sus horizontes, lo que permite preservar su estructura natural. Esta práctica, al igual que otras formas de labranza reducida, se asocia con ahorros significativos en el consumo de energía. Su principal objetivo es eliminar la capa compactada generada por el tránsito de maquinaria agrícola y el uso intensivo de la mecanización, favoreciendo así la infiltración del agua y el desarrollo radicular. En cultivos de frijol, se han reportado rendimientos superiores respecto a la labranza convencional, atribuibles a mejoras en la conductividad hidráulica saturada y al incremento de la materia orgánica en el suelo. Además de sus beneficios productivos, la labranza vertical contribuye a la conservación del recurso suelo, al reducir la erosión, mejorar la retención de humedad y promover prácticas agrícolas más sostenibles.

El INIFAP, a través del Programa de Mecanización, ha desarrollado tecnologías innovadoras para la producción de frijol en condiciones de temporal, aprovechamiento de agua de lluvia y conservación de suelos. Entre estas tecnologías destaca el implemento subsolador integral biomimético, un prototipo que rompe el suelo de manera vertical, al mismo tiempo que agrega materia orgánica en la superficie (Figura 1A).



Cuadro 1. Características agronómicas de variedades mejoradas de frijol para el Altiplano semiárido de Centro-Norte de México

Variedades	Rendimiento promedio (kg ha ⁻¹)	Madurez (DDS)	Habito de crecimiento	Tolerancia a enfermedades
Pinto Saltillo	1139	87-100	Indeterminado postrado, tipo III, con guías medianas a largas.	A la mayoría de las razas de roya, antracnosis y tizón común.
Pinto Centauro	1220	81-90	Indeterminado postrado, con guías intermedias de 84 cm.	Tolerancia a antracnosis y roya, susceptible al tizón común
Pinto Coloso	1320	83-100	Indeterminado postrado, con guías intermedias de 75 cm.	Tolerante a antracnosis y roya, susceptible al tizón común.
Rarámuri	700-1500	90-95	Indeterminado semi erecto	Virus del mosaico común, roya, antracnosis, tizón común y de halo.
Salinas	800-1200	85-95	Indeterminado postrado	Virus del mosaico común, roya, antracnosis, tizón común y de halo.
Junio León	1400	95-100	Indeterminado postrado	A pudriciones de raíz, virus del mosaico común, roya, antracnosis y a tizones comunes y de halo.
Flor de Mayo Eugenia	1200	95-100	Indeterminado postrado	A pudriciones de raíz, virus del mosaico común, roya, antracnosis y a tizones comunes y de halo.
Verdín	1100	70	Indeterminado, tipo II (guía mediana)	Resistente a antracnosis, al virus del mosaico común y al virus del mosaico amarillo dorado (gen <i>bgm-1</i>).
NOD-1	3013	110	Indeterminado postrado (Tipo III)	Resistencia a antracnosis y roya, con tolerancia intermedia a bacteriosis.

DDS: Días después de la siembra



Este implemento cuenta con un aditamento de cuchillas rotativas que remueve el suelo hasta una profundidad de 15 cm, permitiendo así la preparación de la cama de siembra, la eliminación de malezas y la ruptura de la capa arable. Además, se han diseñado sembradoras de precisión para la siembra a hileras múltiples en camas. Estas sembradoras tienen la capacidad de formar camas y sembrar en cuatro hileras con una densidad de hasta 200 mil plantas por hectárea. También están equipadas con componentes de pileteo y aqueel, integrados en las mismas sembradoras.

El subsolador integral biomimético (INIFAP) cuenta con las especificaciones técnicas para uso con tractores de 57 kW en adelante, el chasis principal tiene una dimensión de 1.80 metros de ancho y 0.70 metros de largo, enganche de tercer punto, tiene tres cuerpos subsoladores separados a 0.80 metros cada uno y un depósito de estiércol orgánico con descarga a cada uno de los cuerpos del subsolado por medio de transportadores (sinfín). En la parte trasera tiene un rotocultivador para preparar la cama de siembra. Además, la sembradora neumática para siembra en camas (Figura 1B) está compuesta por cuatro carros sembradores independientes enganchados a un chasis principal por cuatro barras. Para abrir el surco se utilizan discos encontrados. Para la dosificación de semilla se utiliza un sistema neumático de plato vertical de precisión monograno que deposita semillas a la distancia deseada. La formación de la cama de siembra es mediante rejas acopladas al chasis, además dosifica abono químico u orgánico en forma de pelets. También tiene la capacidad de formar microcuencas (piletas) para contener agua de lluvia.



Figura 1. A) Labranza vertical para siembra de frijol de temporal con Subsolador Integral Biomimético. B) Siembra de frijol con sembradora neumática para siembra en camas.

Fertilización

Para alcanzar el rendimiento potencial de las variedades de frijol de temporal, es



indispensable implementar una estrategia de fertilización adecuada que responda a las necesidades nutricionales del cultivo. La omisión o deficiencia en el suministro de nutrientes esenciales puede traducirse en una disminución significativa del rendimiento, proporcional a la magnitud del déficit. No obstante, en regiones con baja precipitación, como el Altiplano semiárido, muchos productores optan por no fertilizar debido al alto riesgo de pérdida de cosecha, lo que limita el aprovechamiento genético de las variedades mejoradas.

La cantidad de nutrientes extraídos por el cultivo varía según las condiciones edafoclimáticas, el genotipo utilizado y las prácticas de manejo. En promedio, por cada tonelada de grano producido, el frijol requiere aproximadamente 53.5 kg de nitrógeno (N), 7.8 kg de fósforo (P), 55.5 kg de potasio (K), 39.4 kg de calcio (Ca) y 8.4 kg de magnesio (Mg). Estos valores sirven como referencia para estimar la demanda nutricional del cultivo en función del rendimiento esperado. Para ello, es fundamental realizar un análisis de suelo al menos cada dos años, con el fin de determinar la disponibilidad de nutrientes y diseñar un plan de fertilización racional que evite tanto deficiencias como excesos.

En condiciones de temporal, como las que prevalecen en los Llanos de Ojuelos, Jalisco, se recomienda aplicar al momento de la siembra 100 kg por hectárea de fosfato diamónico (18-46-00), lo cual aporta nitrógeno y fósforo de forma inicial para favorecer el establecimiento del cultivo. Posteriormente, durante la etapa de floración, se sugiere una aplicación foliar compuesta por 4 kg de urea y 2 litros de ácido fosfórico disueltos en 200 litros de agua, con el objetivo de estimular el desarrollo reproductivo y mejorar la eficiencia en la formación de vainas y llenado de grano. Esta práctica permite compensar parcialmente las limitaciones edáficas y climáticas, especialmente en suelos con baja capacidad de retención de nutrientes o en ciclos agrícolas con lluvias erráticas.

Control de malezas

Las malas hierbas son plantas indeseables, también conocidas como malezas o arvenses, que crecen de manera natural en los terrenos de cultivo; estas pueden ser especies silvestres o plantas de otros cultivos. Las malezas causan problemas debido a su fuerte competencia con el cultivo por los nutrientes, agua, luz y espacio, por lo que, si no son controladas oportuna y eficientemente, reducen significativamente su rendimiento. Existen diversas alternativas para el control de maleza en cultivos de frijol. Los métodos físicos, como escardas y labores durante el ciclo del cultivo, son opciones viables. Adicionalmente, algunas técnicas de producción pueden minimizar la competencia de la maleza, a este enfoque se le denomina control cultural. En los últimos años, se han desarrollado múltiples herbicidas que, al aplicarse, controlan efectivamente las malas hierbas en los cultivos de frijol sin ocasionar daños a las plantas cultivadas. La combinación de una sola aplicación de herbicida preemergente sobre la hilera de cultivo y, posteriormente, la realización de deshierbes mecánicos, es un método eficiente y



relativamente económico para el control de malezas. En el caso de variedades de guía, éstas cubrirán el terreno de manera relativamente rápida y en sus primeras etapas de desarrollo, si el cultivo está libre de malezas, es probable que no se requiera un control posterior.

Algunos herbicidas pueden ser utilizados selectivamente en frijol. La factibilidad de su uso dependerá de la superficie sembrada y de las condiciones económicas del agricultor. En siembras de grandes superficies, es prácticamente imposible controlar las malas hierbas de manera eficiente y económica solo por medios mecánicos, es necesario aplicar herbicidas como Basagran 480 (Bentazón) a dosis de 1.5-2 litros por hectárea, en etapa postemergente cuando la maleza tiene de 2-4 hojas verdaderas y altura de 5-7cm; Flex (Fomesafen) para el control postemergente de la maleza con un máximo de 4 hojas, dosis de 1-1.5 litros por hectárea; Fusiflex (Fomesafen, Fluazifop-P-Butil), con efecto sistémico y de contacto para el control postemergente de malezas de hoja ancha y hoja angosta anuales y perennes.

Manejo integrado de plagas y enfermedades

Las plagas y enfermedades que afectan al cultivo de frijol, se deben combatir con una estrategia de control efectiva que permita minimizar las pérdidas en rendimiento con el menor costo posible. Una herramienta que trata de mantener las plagas y enfermedades bajo control sin que causen daño económico y minimizar el impacto ambiental, es el manejo integrado, que promueve el uso de técnicas biológicas, físicas y de cultivo para el manejo sustentable de plagas y utiliza los métodos químicos solamente cuando son esenciales.

En la región semiárida del Centro-Norte de México, un número importante de especies de insectos alcanzan el nivel de plaga de importancia económica en el cultivo de frijol, insectos que pueden dañar hojas, flores, raíces, vainas, granos tiernos o granos secos y son causa de mermas significativas en la producción de grano. Plagas como Chicharrita (*Empoasca kraemeri*, Ross & Moore), Minador del frijol (*Xenochalepus signaticollis* Baly), Conchuela (*Epilachna varivestis* Mulsant), Mosquita Blanca (*Trialeurodes* sp), Gallina ciega (*Phyllophaga* spp) y enfermedades de importancia económica como Antracnosis [*Colletotrichum lindemuthianum* (Sacc. Et Magn.) Scrip], Roya [*Uromyces appendiculatus* (pers.) Unger var. *appendiculatus* (sin. *U. phaseoli* (Reven) Wint)], Tizón de halo [*Pseudomonas syringae* pv. *phaseolicola* (Burk.)], Bacteriosis común o tizón común [*Xanthomonas campestris* pv. *phaseoli* (Smith) Dye], Pudrición de raíz (*Fusarium* spp. y *Rhizoctonia solani*).

En el Bajío Guanajuatense, se ha observado un aumento en plagas como la chicharrita, la mosca blanca, los trips, los ácaros y los áfidos, que son vectores del Virus del Mosaico Común del frijol (BCMV) y del Virus Necrótico del Mosaico Común del frijol



(BCMNV), los cuales están presentes en todas las regiones productoras de México. Aunque la reducción y el comportamiento errático de la precipitación pluvial son efectos importantes y evidentes del cambio climático, el aumento de la temperatura y los niveles de CO₂ pueden desencadenar cambios en las dinámicas de patógenos y plagas. Esto facilita la aparición de plagas y enfermedades emergentes, cuyo control se ve dificultado por la falta de conocimiento sobre las prácticas adecuadas para manejar estas nuevas patologías.

Métodos de control de plagas

a) Prácticas agronómicas. Las prácticas agronómicas adecuadas, que abarcan la selección del sitio, la rotación de cultivos, la selección de semillas, la fecha de siembra y los cultivos intercalados, pueden reducir la infestación de ciertas plagas de insectos. Por ejemplo, Acreman y Dixon (1985) informaron que la siembra temprana no solo mejora la producción, sino que también es desfavorable para los pulgones. Aheer *et al.* (1993) observaron el efecto de la fecha de siembra en la población de gusanos del tallo del frijol, pulgones y otros artrópodos que atacan al frijol común.

b) Control biológico. El control biológico es la forma de manejar plagas de insectos y enfermedades dañinas con la ayuda de otros organismos. Los organismos de control biológico utilizan varias técnicas como depredación, parasitismo, herbívoros u otros mecanismos naturales. El objetivo del control biológico no es la destrucción total de la especie, sino minimizar la población de la plaga y mantener el umbral económico. Por ejemplo, todas las especies de la subfamilia de braconidos Aphidiinae se desarrollan como endoparasitoides de los pulgones con una larva que completa el desarrollo en cada huésped. Algunas especies de hongos entomopatógenos infestan a los pulgones a través de la cutícula y finalmente matan al huésped. Las mariquitas son más fuertes, más grandes y generalmente más inteligentes que la presa y pueden atacar a varios huéspedes en un período corto. *Saccharopolyspora spinosa* afecta el estómago y envenena los nervios de las plagas, se recomienda para el control de una amplia gama de orugas, minadores de hojas y escarabajos que se alimentan de follaje. El uso de *Bacillus thuringiensis* controla larvas de lepidópteros, incluyendo *Helicoverpa spp.* y *Spodoptera spp.*, la polilla dorso de diamante (*Plutella xylostella*) y el gusano falso medidor (*Chrysodeixis includens*).

El control biológico es seguro y ecológico; se necesita más investigación para desarrollar paquetes de biocontrol para controlar las plagas de insectos del frijol común. El cambio climático afectará negativamente a ciertos enemigos naturales de las plagas de insectos, aumentando aún más la susceptibilidad de los cultivos al daño de las plagas de insectos. Por ejemplo, el cambio climático podría hacer que las plagas de insectos migren a nuevas áreas donde sus enemigos naturales no puedan seguirlos, o que se interrumpa la sincronización entre los ciclos de vida de las plagas y sus enemigos naturales. Se sabe que las aplicaciones de pesticidas son perjudiciales para los organismos benéficos que



controlan las poblaciones de plagas, y los aumentos previstos en las aplicaciones de pesticidas reducirían aún más estas poblaciones benéficas.

c) Extractos vegetales. Comprenden una mezcla de compuestos bioactivos con muchas ventajas en términos de eficacia a corto plazo y prevención del desarrollo de resistencia. La nicotina aislada de varias especies de *Nicotiana*, el extracto de tabaco, el aceite y el extracto de neem son prometedores y útiles para el control de plagas del frijol común. Debido a la necesidad de una alternativa a los insecticidas sintéticos, es esencial evaluar el potencial de las prácticas locales, como las que involucran prácticas agronómicas, biológicas y botánicas para controlar las plagas de insectos en el cultivo de frijol.

d) Control químico. Los insectos causan pérdidas de más de una quinta parte de la producción total de cultivos del mundo anualmente, pérdidas que se prevé aumentarán debido al calentamiento global. La rápida evolución de la resistencia a los insecticidas hace que el control de plagas sea cada vez más difícil, ya que requiere el uso de dosis cada vez mayores de pesticidas por área tratada para lograr la supresión de las plagas. La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación informó el uso global de pesticidas en el año 2020 en aproximadamente 2.7 millones de toneladas de ingredientes activos de pesticidas, con un uso de herbicidas de aproximadamente 1.4 millones de toneladas, fungicidas y bactericidas en 0.6 millones de toneladas, e insecticidas en 0.5 millones de toneladas.

Los impactos en la salud por la exposición a pesticidas peligrosos incluyen enfermedades agudas como las erupciones en la piel, las enfermedades gastrointestinales y respiratorias, así como los problemas del sistema nervioso central. Además, la exposición a pesticidas está relacionada con muchas enfermedades crónicas, incluidos el cáncer, los trastornos reproductivos y del desarrollo y la disfunción neurológica a largo plazo. Una revisión reciente de los casos de intoxicación aguda por pesticidas en 141 países estimó que alrededor de 385 millones de casos de intoxicación aguda por pesticidas no intencional ocurren anualmente en todo el mundo, incluidas alrededor de 11 000 muertes. Además de los agricultores, los más directamente afectados por el uso de pesticidas peligrosos en la agricultura incluyen los trabajadores agrícolas, los residentes de comunidades rurales y los residentes de comunidades donde se producen pesticidas y donde se vierten desechos de pesticidas.

En el ámbito de la gestión de plagas, la sostenibilidad ha cobrado creciente relevancia debido a las múltiples consecuencias negativas asociadas al uso intensivo de pesticidas. Este enfoque ha generado impactos socioeconómicos adversos para agricultores, consumidores y la sociedad en general, además de contribuir a la contaminación del agua, el suelo y la atmósfera. Asimismo, se observa una pérdida progresiva de biodiversidad, especialmente entre insectos benéficos y aves.

Las condiciones de sequía —cada vez más frecuentes y severas en diversas



regiones— pueden debilitar las defensas naturales de las plantas frente a las plagas. Además, los cambios fisiológicos inducidos por el estrés hídrico pueden hacer que las plantas sean más susceptibles o atractivas para ciertos insectos fitófagos. Considerando que aproximadamente el 80 % de las tierras agrícolas del mundo son de temporal, los rendimientos globales de los cultivos son altamente vulnerables a las variaciones en los patrones de precipitación y al incremento de la presión de plagas que puede acompañar dichos cambios climáticos.

Aplicación foliar de ácido giberélico

Las giberelinas son numerosos grupos de hormonas vegetales que, junto con las auxinas, constituyen uno de los principales grupos de reguladores vegetales. Todas difieren en su actividad fisiológica y estructura, y la primera giberelina identificada fue el ácido giberélico (GA₃). Las giberelinas están ampliamente involucradas en todas las fases del crecimiento y desarrollo de las plantas, desde la germinación de las semillas hasta la senescencia. Promueven la germinación de las semillas, estimulan la elongación de los tallos, la expansión de las hojas, la floración, el polen y el desarrollo de las semillas, retrasan la maduración e inhiben la senescencia. Varios estudios han demostrado que las giberelinas son moléculas biológicas prometedoras que desempeñan un papel fundamental en el alivio de diferentes tipos de estrés abiótico y biótico. Además de actuar como moléculas de señalización, las giberelinas mejoran los procesos de desarrollo al contrarrestar las condiciones estresantes, elevar el crecimiento y mejorar la inmunidad de las plantas. Por lo tanto, la aplicación exógena de reguladores de crecimiento como GA₃ puede convertirse en una herramienta viable para aumentar la productividad de los cultivos de una manera biológicamente viable. Sin embargo, la eficiencia de GA₃ depende de la concentración y la frecuencia de aplicación en relación con la etapa de crecimiento del cultivo, y hay muy poca información disponible sobre la aplicación exógena de GA₃ para frijol común.

Resultados preliminares de parcelas experimentales en condiciones de riego en Ojuelos, Jalisco, muestran que la aplicación de Biogib (ácido giberélico, 10%) a una dosis de 10 g por hectárea en variedades de frijol pinto, aplicado en la etapa de prefloración mejoró significativamente el rendimiento de grano. Este pasó de 2,400 kilogramos por hectárea en el tratamiento control a 2,600 kilogramos por hectárea con la aplicación de ácido giberélico. Asimismo, se observaron efectos positivos significativos en la biomasa aérea, la biomasa total y el número de vainas por planta. Estos resultados coinciden con lo reportado por Islam *et al.* (2023) quienes mencionan que el GA₃ estimuló varios parámetros morfofisiológicos del frijol mungo, incluidas las relaciones hídricas (contenido relativo de agua, el déficit de saturación de agua, la capacidad de retención de agua y la capacidad de absorción de agua); además, la aplicación foliar de ácido giberélico (GA₃) ha demostrado incrementar significativamente el rendimiento de grano, la



productividad de biomasa y el índice de cosecha en el cultivo de frijol. Estos efectos positivos se atribuyen a la capacidad del GA₃ para estimular procesos fisiológicos clave, como la elongación celular, la floración y el desarrollo de órganos reproductivos. En condiciones de temporal, su uso representa una herramienta agronómica prometedora para mejorar tanto el rendimiento como la calidad del cultivo, especialmente en ambientes con limitaciones hídricas. La incorporación de reguladores de crecimiento como el GA₃, en combinación con prácticas de manejo integrado, puede contribuir a optimizar la eficiencia productiva y fortalecer la resiliencia del frijol frente a condiciones adversas.

Conclusiones

A pesar de las condiciones ambientales limitantes que caracterizan al Altiplano Semiárido del Centro-Norte de México, esta región se consolida como una zona estratégica para la producción de frijol bajo condiciones de temporal. No obstante, los efectos adversos del cambio climático —como la disminución de la precipitación y el incremento de las temperaturas— proyectan una reducción significativa en la productividad del cultivo. Ante este escenario, resulta prioritario implementar estrategias agronómicas que no solo permitan conservar los niveles actuales de producción, sino también mejorar la rentabilidad y sostenibilidad del cultivo. Entre las acciones recomendadas destacan: la preparación adecuada del suelo, el uso de variedades mejor adaptadas a temporales erráticos, la fertilización oportuna y el manejo integrado de plagas, enfermedades y malezas. La adopción de estas tecnologías por parte de los productores contribuiría, en el mediano y largo plazo, a incrementar la producción, reducir los costos económicos y energéticos por ciclo agrícola, y promover la conservación de los recursos naturales. Estas prácticas fortalecen la viabilidad del cultivo de frijol frente a los desafíos climáticos actuales. En este contexto, diversas variedades mejoradas han sido evaluadas con resultados sobresalientes en rendimiento de grano bajo condiciones de temporal, entre ellas: Pinto Centauro, Rarámuri, Tepehuán RS y Negro San Luis 22.

Bibliografía

- Acosta-Díaz, E., Trejo-López, C., Ruiz-Posadas, L.M, Padilla- Ramírez, J.S., Acosta-Gallegos, J.A. (2004). Adaptación del frijol a sequía en la etapa reproductiva. *Terra Latinoamericana*, 22(1):49-58.
- Amador, R.M., Acosta, D., Escobedo R., Gutiérrez L. (2004). Control de malezas con escarda y herbicidas preemergentes en frijol en Zacatecas. Folleto Científico. No. 6. CIRNOC-CEZACINIFAP. 14 p.



- Aparicio, V., Costa, J.L., Echeverría, H., Cavligia, O. (2002). Evaluación de propiedades edáficas y crecimiento del maíz bajo diferentes sistemas de labranza en cuatro sitios del sudeste bonaerense. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 31 (3): 55-71.
- Ávila, M.R., Arellano, E.J., Ramírez, G.H., Serna, R., Ravelero, P., Hernández, P. (2011). Caracterización de los productores, adopción e impacto económico del uso de la variedad de frijol "Pinto Saltillo" en el norte centro de México. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 29: 682-692.
- Bethke, P.C., Jones, R.L. (1998). Gibberellin signaling. *Curr. Opin. Plant Biol.* 1, 440–446
- Boedeker, W., Watts, M., Clausing, P., Marquez, E. (2020). The global distribution of acute unintentional pesticide poisoning: estimations based on a systematic review. *BMC Public Health*, 20(1), 1875. <https://doi.org/10.1186/s12889-020-09939-0>
- Cadena, Z. M., Campos, M. S., Demuner, M.G., Zermeño, G.A., López, S.A., Gaytán, M. T. (2013). Uso de energía integrando sistemas de labranza y mejoradores de suelo en zonas semiáridas de México. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 22: 54-57.
- Cruz-Cruz, E., Acosta-Gallegos, J.A., Reyes-Muro, L., Cueto-Wong, J.A. (2021). Variedades de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) del INIFAP. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Oficinas Centrales. Ciudad de México. México. Libro Técnico No. 2, 98 p.
- Díaz, L. M., Arredondo, V., Ariza-Suarez, D., Aparicio, J., Buendía, H. F., Cajiao, C., Mosquera, G., Beebe, S. E., Mukankusi, C. M., & Raatz, B. (2021). Genetic analyses and genomic predictions of root rot resistance in common bean across trials and populations. *Frontiers in Plant Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.629221>
- Galindo, G.G., Pérez, T. (2003). Situación socioeconómica de los productores de frijol de temporal en Zacatecas. *Terra Latinoamericana*, 21 (1):137-147.
- Garibaldi, M.F., García, H. R., Osuna, C. (2016). Subsolador Integral biomimético. Folleto Técnico. Núm. 67. SAGARPA INIFAP-CIRNOC. Aguascalientes, Ags., México. 40 p
- Gayosso, B. O., Marroquín, M. J.J., Chávez, A.G., Hidalgo, R. D.M., Alcalá, R. S. (2023). Importancia de la fijación biológica de nitrógeno en la nutrición del frijol. *Universo Agroalimentario*, 3 (12): 110-117.
- Hallmann, C.A., Foppen, R.P.B., van Turnhout, C.A.M., de Kroon, H., Jongejans, E. (2014) Declines in insectivorous birds are associated with high neonicotinoid concentrations. *Nature*, 511:341–343. <https://doi.org/10.1038/nature13531>



- Hasan, S., Sehar, Z., & Khan, N. A. (2020). Gibberellic Acid and Sulfur-Mediated Reversal of Cadmium-Inhibited Photosynthetic Performance in Mungbean (*Vigna radiata* L.) Involves Nitric Oxide. *Journal of Plant Growth Regulation*, 39(4), 1605–1615. <https://doi.org/10.1007/s00344-020-10175-4>
- Islam, M. S., Hasan, M. K., Islam, M. R., Chowdhury, M. K., Pramanik, M. H., Iqbal, M. A., Rajendran, K., Iqbal, R., Soufan, W., Kamran, M., Liyun, L., & Sabagh, A. E. (2023). Water relations and yield characteristics of mungbean as influenced by foliar application of gibberellic acid (GA₃). *Frontiers in Ecology and Evolution*, 11. <https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1048768>
- Khan, A., Bilal, S., Khan, A.L., Imran, M., Shahzad, R., Al-Harrasi, A., Al-Rawahi, A., Al-Azhri, M., Mohanta, T.K., Lee, J. (2020). Silicon and gibberellins: Synergistic function in harnessing ABA signaling and heat stress tolerance in date palm (*Phoenix dactylifera* L). *Plants*, 9:620. <https://doi.org/10.3390/plants9050620>
- Lawlor, D. W., & Tezara, W. (2009). Causes of decreased photosynthetic rate and metabolic capacity in water-deficient leaf cells: a critical evaluation of mechanisms and integration of processes. *Annals of Botany*, 103(4), 561–579. <https://doi.org/10.1093/aob/mcn244>
- Lovejoy, E.T., Hannah, L. (2005). *Climate Change and Biodiversity*; Yale University Press: New Heaven, CT, USA; London, UK; Sheridan Books: Ann Arbor, MI, USA.
- Mena, C.J., Velásquez, V. (2010). Manejo integrado de plagas y enfermedades de frijol en Zacatecas. Folleto Técnico. No.24. ISBN: 978-607-425-353-5. INIFAP-CIRNOC Campo Experimental Zacatecas. 78 p.
- Mora, G.M. (2021). La nutrición del cultivo de frijol. Libro técnico, INIFAP, P. 47-55.
- Murguido, C.A., Vázquez, M., Elizondo, M., Neira, Y., Velázquez, E., Pupo, S., Reyes, I., Rodríguez, Toledo, C. (2002). Manejo integrado de plagas de insectos en el cultivo de frijol. *Fitosanidad*, 6 (3): 29-39.
- Navarro-Bravo A., Figueroa-Sandoval, B., Martínez-Menes, M., González-Cossio, F. V., Osuna-Ceja, E.S. (2008). Indicadores físicos del suelo bajo labranza de conservación y su relación con el rendimiento de tres cultivos. *Agricultura Técnica en México*, 34(2):151-158.
- Nchanji, E. B., & Ageyo, O. C. (2021). Do Common Beans (*Phaseolus vulgaris* L.) Promote Good Health in Humans? A Systematic Review and Meta-Analysis of Clinical and Randomized Controlled Trials. *Nutrients*, 13(11), 3701. <https://doi.org/10.3390/nu13113701>
- Osuna-Ceja, E.S., Arias-Chávez, L. E., Núñez-Hernández, G., González-Castañeda, F. (2015). Producción de forrajes de temporal con estiércol bovino y captación de agua en siembra a



-
- triple hilera. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(8):1743-1756.
- Sallam, M.N. (2000). In Insect Damage: Post-Harvest Operations (ed Mejia, D.) 1–38 (AGSI/FAO).
- Soureshjani, H. K., Nezami, A., Kafi, M., & Tadayon, M. (2018). Responses of two common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes to deficit irrigation. *Agricultural Water Management*, 213, 270–279. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.09.038>
- Uebersax, M.A., Cichy, K.A., Gomez, F.E., Porch, T.G., Heitholt, J., Osorno, J.M., Kamfa, K., Snapp, S.S., Bales, S. (2023). Dry beans (*Phaseolus vulgaris* L.) as a vital component of sustainable agriculture and food security—A review. *Legume Science*, 5(1), e155. <https://doi.org/10.1002/leg3.155>
- Uresti G.J., Acosta Gallegos, J.A., Uresti Durán, D., Espinosa García, J.A., Anaya López, J.L. (2021). Impacto del cambio climático en el rendimiento de grano y áreas de producción de frijol en México. El cultivo del frijol presente y futuro para México. INIFAP. Centro de Investigación Regional Centro. Campo Experimental Bajío. Celaya Gto. México, Libro Técnico No. 1. 232 p.

Mejora del rendimiento de cultivos agrícolas utilizando acolchados

Eladio Delgadillo-Ruiz.
Luz Adriana Arias-Hernández.
Rómulo Bañuelos-Valenzuela.
Lucia Delgadillo-Ruiz.
Arturo Berumen-Cervantes.
María Maldonado-Santoyo.





Resumen

El documento presenta una revisión exhaustiva sobre el uso de acolchados agrícolas como técnica para mejorar el rendimiento, calidad y eficiencia hídrica en diversos sistemas de cultivo. Se analizan tres tipos principales de acolchados: orgánicos, inorgánicos y bioplásticos, destacando sus propiedades físico-mecánicas, beneficios agronómicos y adaptabilidad según el tipo de agricultura (riego, temporal e invernadero). Se demuestra que los acolchados contribuyen significativamente a la retención de humedad, reducción de la erosión, control de malezas y optimización de nutrientes, lo que se traduce en aumentos de hasta 50% en la productividad de cultivos como tomate, chile, maíz y frijol. Además, se documentan mejoras en indicadores de calidad de frutos (firmeza, grados Brix, contenido de antioxidantes) y en la producción de forraje para alimentación animal. El texto también aborda el impacto de los acolchados en el balance hídrico, la eficiencia del uso del agua, y la estructura del suelo, así como su papel en la agricultura protegida y en condiciones climáticas adversas. Se incluyen comparaciones de rendimiento con distintos sistemas de riego y tipos de acolchado, respaldadas por estudios experimentales.

Palabras clave: Acolchado agrícola, rendimiento de cultivos, agricultura de riego y temporal, agricultura protegida, conservación de humedad, calidad de frutos.



Introducción

El uso de acolchados en la agricultura presenta considerables beneficios por su alcance, tanto en la preservación de la seguridad alimentaria como en los aspectos que aportan en cuanto a favorecer un equilibrio adecuado en el balance de la relación suelo-agua-planta que permite obtener resultados eficientes en la producción de alimentos. Desde el inicio de la utilización de los acolchados, han surgido una gran variedad de materiales que al ser clasificados de forma general consisten en acolchados biodegradables, inorgánicos y orgánicos. Con base en la naturaleza del cultivo los acolchados complementan la práctica agrícola convencional con resultados óptimos en su rendimiento.

Entonces, la utilización de acolchados en sistemas agrícolas bajo riego como pueden ser los de inundación o por gravedad, aunque los mayormente usados son la aspersión, por cintilla y por goteo y en algunas ocasiones se incluyen los más recientes como son la microaspersión y los sistemas de goteo automatizados, todos ellos requieren la identificación y selección del acolchado con base al cultivo que se pretende producir.

El uso de acolchados, sin importar su origen, propicia en los cultivos un aumento significativo en la cantidad del producto y en la calidad de los frutos, logrando en conjunto un adecuado manejo del requerimiento de agua y nutrientes del suelo; respecto a este último punto se han publicado resultados de experimentos que reportan mejoras en la calidad y cantidad de los cultivos.

En la producción de forraje, que es una fuente importante para cubrir las necesidades de alimentación principalmente de ganado, cuando se presentan condiciones climáticas adversas que interfieren en la obtención de la cantidad de forraje adecuada y suficiente, la utilización de acolchados contribuye al crecimiento de cultivos cuyo follaje es utilizado como alimento para el ganado. De igual manera, el uso de acolchados se ha implementado en la mejora de la producción de forraje, donde se ha reportado en diversos estudios el incremento en altura, diámetro, materia seca, entre otros, en comparación con los cultivos que no utilizan la técnica de acolchar.

Aspectos generales de los acolchados

De forma general, el término de acolchado hace referencia a la práctica de colocación de un elemento de cobertura sobre la superficie del suelo aplicada en forma específica a los cultivos. Cuando se menciona como mantillo (derivado de la palabra alemana molch cuyo significado es, fácil de descomponer), se hace referencia a una cobertura de tipo orgánica. Si bien se ha usado desde los inicios de las prácticas agrícolas (500 a. C.) con el uso de diversos materiales vegetales, de forma particular abordando el tema de los acolchados inorgánicos, se remonta a la aparición del término de agroplástico, el cual fue introducido en Estados Unidos por primera vez en 1948, sustituyendo con ello al vidrio y al papel usados como acolchados y cuya finalidad al ser aplicado es la mejora en calidad, cantidad, rendimiento y sustentabilidad de los cultivos, con tal grado de demanda por su



versatilidad y beneficios, de tal manera que se estima un crecimiento de su uso en cobertura de un 60% para el 2030.

La variedad en su tipo, composición, formas y colores es atribuida a la diversa gama de aplicaciones en las que se benefician los cultivos, comprendiendo desde conservación de humedad, prevención de la evaporación, hasta la protección en cultivos de plagas y malezas, además de lo anterior, su aplicación tiene beneficios en el rendimiento y desarrollo de semillas y frutos. A lo anterior se suman beneficios en el suelo como son la reducción de erosión, mejora de la materia orgánica y aumento de la capacidad del suelo para retener la humedad, ya que los acolchados pueden ayudar a mantener la humedad en la zona de las raíces de los cultivos, permitiendo que las plantas reciban agua durante períodos prolongados de estiaje. También, durante el periodo de producción del cultivo se reduce el uso de herbicidas y fertilizantes, resultando en un beneficio por la disminución de la contaminación de los mantos acuíferos, ya que se reduce la percolación de elementos nocivos en el subsuelo.

Existen materiales que son amigables con el medio ambiente y que pueden utilizarse para la creación de láminas bioplásticas o como reforzamiento para productos biodegradables utilizados en las parcelas agrícolas y que con el paso del tiempo reducen el volumen de plástico no biodegradable. Este tipo de materiales utilizados, como los biocompostables o fotodegradables deben cumplir con el requisito primordial de ser adaptables al entorno y que sean fáciles de colocación en la superficie del cultivo.

La técnica de acolchar con elementos inorgánicos resulta costosa en comparación de la utilización de materiales orgánicos o biodegradables, sin embargo, los rendimientos en general de los cultivos resulta mayor para los primeros, tomando en cuenta su capacidad para evitar la evaporación del agua y retenerla en la superficie del suelo, lo anterior en comparación de los acolchados de origen orgánico cuya porosidad es mayor y permite la transferencia del vapor de agua del suelo a la atmósfera, pero resultan menos costosos y pueden ser en muchos de los casos, agregados al suelo como materia orgánica o en el caso de los biodegradables pueden reducir la cantidad de elementos contaminantes en la superficie.

Clasificación de los acolchados utilizados en la agricultura

El crecimiento poblacional, así como la necesidad de garantizar la seguridad alimentaria, ha propiciado que se enfatice en propuestas relacionadas con el uso y desarrollo de métodos o técnicas que permitan satisfacer las necesidades de mantener los cultivos con altos rendimientos y buena calidad, generando con ello, el incremento de la demanda de los acolchados, dando paso a que exista una gran variedad en cuanto a su clasificación.

Aunque los primeros materiales usados para el acolchado fueron sólo los de tipo orgánico, actualmente la clasificación comprende además de estos los de tipo inorgánicos



o sintéticos y los acolchados bioplásticos elaborados con ecomateriales o materia prima con la característica particular de ser biodegradables y en algunos casos biocompostables.

Los acolchados orgánicos comprenden residuos animales, vegetales, así como pajas, corteza seca, papel, aserrín, astillas de madera, composta, entre otros. Entre los acolchados plásticos sintéticos se presentan características específicas dependiendo de su color, espesor y tipo de polímero sintético empleado. En el caso de los acolchados bioplásticos se han desarrollado a partir de diversos componentes que consideran elementos completamente de origen animal o vegetal o bien combinados con ciertas proporciones con polímeros sintéticos biodegradables.

A continuación, se describirán de manera general las clasificaciones de acolchados con base en sus propiedades físico-mecánicas, las características particulares y los componentes principales para cada tipo de acolchados mencionados anteriormente.

Acolchados Orgánicos: Comprenden los acolchados cuyos componentes son de origen natural, ya sea de origen animal o vegetal, en algunas de las ocasiones de uso local, siendo por lo general residuos agroindustriales. Están constituidos principalmente por pajas entre las que se pueden mencionar como más comunes el trigo, arroz, avena y cebada. Como ventaja de la aplicación de estos acolchados orgánicos es que además de conservar la humedad de suelo al ser aplicado y evitar fluctuaciones extremas de temperatura, se beneficia por su naturaleza, las características del suelo, disminuyendo los requerimientos de agua en el cultivo. Para este tipo de material la capa de acolchado se coloca de acuerdo a la factibilidad del material, así como al tipo de cultivo. A lo anterior se puede agregar también que los acolchados orgánicos además de reducir la erosión reducen la lixiviación de nitratos, mejorando la disponibilidad de nutrientes para los cultivos y con ello, se vuelve más eficiente el uso de la materia orgánica, la actividad biológica y favorecen el equilibrio del ciclo del nitrógeno.

Acolchados Inorgánicos: Respecto a los acolchados sintéticos cuyo origen es de derivados del petróleo, se pueden mencionar los polímeros constituidos por polivinilo, poliéster y polietileno, estos últimos predominan en mayoría de los usos como acolchados en agricultura teniendo como características la variedad de colores encontrando desde negro, rojo, verde, blanco-plata, amarillo y naranja e incluso cristalino, existiendo también variedades bicolores como negro-blanco, negro-gris y negro-plata. Cada uno de ellos es aprovechado para diversos cultivos con resultados positivos en cuanto al rendimiento, variando en cuanto a su mecanismo de intercambio calórico, dependiendo de la reflexión o radiación solar absorbida que afectará en los intervalos de temperatura con efecto en la cantidad de luz reflejada, el cual tiene un efecto en el rendimiento o en otros aspectos en el desarrollo del cultivo como se puede observar en la tabla 1, en donde se presentan las ventajas y desventajas de los plásticos color transparente, negro y gris



registrados como los más comerciales. Las variaciones en su tamaño y dimensiones se presentan en formas diversas, siendo tamaños comunes que varían según el tamaño del rollo en un rango de 120 a 150 cm de ancho en promedio y en cuanto a su espesor de 30 a 100 micras, dependiendo del tipo de cultivo o de la región.

Otros materiales: en este tipo de materiales están incluidos las piedras volcánicas, gravas, concreto, arenas y materiales geotextiles, virutas de madera, papel, caucho, así como hormigón, aunque de menos frecuencia por su costosa y difícil aplicación para ser usados, tienen el mismo efecto en general de conservación de humedad y en los beneficios particulares de su aplicación en los cultivos en comparación de cultivos sin acolchar.

Tabla 1. Ventajas y desventajas de algunos de los acolchados más usados

Color de acolchado plástico	Ventajas para buen rendimiento	Desventajas	Ejemplos de Cultivo común al que se aplica
Transparente	-Principal característica es aumentar la temperatura del suelo. -Permite se facilite la precocidad de cosecha	Crecimiento de maleza	Melón, Chile
Negro	-Garantiza altos rendimientos -Impide el crecimiento de maleza	Por efecto de su absorción calórica los cultivos reciben poco calor por la noche	Tomate, Chile Anaeim, Sandía, Lechuga, Fresa
Gris	-Calienta el suelo durante el día -No produce quemaduras	Menor precocidad de cosecha con respecto al plástico transparente	Brócoli, Melón

Acolchados Bioplásticos: por otro lado, los acolchados bioplásticos están constituidos por componentes de origen vegetal o animal que por efecto de diversos plastificantes y aditivos adquieren propiedades para ser usados como acolchados con los mismos beneficios que los anteriormente mencionados, pero con la particularidad de que dependiendo del material puedan ser biocompatibles o biodegradables. Los bioplásticos más comunes empleados como acolchados en agricultura, están constituidos de mezclas cuyas proporciones están conformadas de polímeros derivados del petróleo y que son biodegradables o por mezclas de estos con polímeros derivados de almidones de maíz, papa o arroz integrados con la finalidad de mejorar la biodegradabilidad, favoreciéndose dicha mezcla para mejorar además las propiedades mecánicas, así como una mayor resistencia.



Acolchados en la agricultura de riego

Las formas, mecanismos o medios de distribución y dotación adecuada del agua hacia el cultivo, son elementos primordiales para la obtención de los mejores resultados en los cultivos, por lo que es importante analizar sus características con aportaciones mediante la implementación de acolchados, en donde dependiendo del tipo de riego ya sea por franja, canaleta o talud, tendrán un comportamiento diferente en la aplicación del acolchado en comparación con los cultivos de temporal o en lo que se refiere a la agricultura de invernaderos o protegida.

Respecto a la agricultura de riego el uso de acolchados reduce las láminas de agua y mejora los rendimientos, así como incremento en la eficiencia del uso de agua. Independientemente del tipo de cultivo, la reducción de láminas se ve reflejada con la aplicación de acolchado por el hecho de ser un factor mediante el cual se disminuye la evaporación y se mantiene una mejor interacción de agua-suelo-planta al disminuir en conjunto la evapotranspiración.

En cualquiera de los tipos de riego ya sea cintilla, aspersión, gravedad o por goteo, cuando de forma alternativa se aplica el acolchado se observan además de los beneficios en la eficiencia y ahorro de agua un aumento en las características físicas de las plantas, así como en los rendimientos de cultivos.

Si bien el riego controlado puede conservar de forma adecuada y eficiente la humedad de suelo para el buen rendimiento del cultivo, el beneficio del acolchado permitirá que se mantenga un buen equilibrio hídrico dependiendo si se trata de una zona árida o semiárida y con ello, mejorar la eficiencia de la extracción de agua del acuífero presente en la zona de riego.

Comparando rendimientos de tomate, se han registrado valores equivalentes a 36.7 toneladas por hectárea empleando acolchados y complementados con riego por goteo en comparación de 25.0 toneladas por hectárea de tomate en el que no se aplicó acolchado, pero si el mismo sistema de riego. En otros estudios para cultivo de tomate es evidente el porcentaje de ahorro de agua empleando 53.4 cm con el uso de acolchado más riego por goteo con 60.9 toneladas por hectárea, en comparación con 59.7 cm de agua en suelo sin acolchado más riego por goteo con cinta presentando un rendimiento de 43.9 toneladas por hectárea.

Otro ejemplo es el caso de cultivos de chile, en donde, además del beneficio del rendimiento, se presenta un ahorro de agua empleando 53.4 cm de agua usando acolchado más riego por goteo con 60.9 toneladas por hectárea, en comparación con 59.7 cm de agua en suelo sin acolchado más riego por goteo con 43.9 toneladas por hectárea, para el mismo cultivo de chile se registró un ahorro de agua empleando 65.26 cm de agua utilizando acolchado más riego por gravedad con 42.8 toneladas por hectárea de rendimiento, en comparación con 119.08 cm de agua en suelo con acolchado más riego por gravedad con 14.3 toneladas por hectárea de rendimiento, observando con estos resultados los



beneficios que se obtienen con el uso de acolchados. En el caso del cultivo de chile jalapeño, el acolchado plástico incrementó en 50% el rendimiento del fruto y en 48% la eficiencia de uso del agua en dicho cultivo en comparación con el tratamiento sin acolchar. La máxima producción de chile verde fue de 48.8 toneladas por hectárea con un adelanto en la fecha de cosecha de 10 días. Así como los ejemplos anteriores, existen más reportados con cultivos de todo tipo presentándose en la mayoría de ellos, un aumento en porcentajes de los rendimientos.

Si bien la aplicación de la cinta favorece el rendimiento, esta se recomienda para algunos casos, no colocarse enterrada ya que en condiciones apropiadas de acolchado se han observado 52% de aumento en el fruto en comparación de los tratamientos de irrigación sin acolchar debido a las condiciones favorables de humedad que aporta la cobertura plástica del acolchado. De igual manera, se menciona un ejemplo de la producción de frutas, en donde se han reportado estudios en los que aumenta el rendimiento de productividad para sandía de 68.6 toneladas por hectárea empleando cintilla en combinación con un acolchado plástico y un control en la fertilización, además se redujo al 60% la evaporación del agua en el suelo. Un factor importante en la aplicación de los acolchados es la facilidad que requiera el acolchado para su aplicación, ya sea que el mecanismo para implementarlo sea manual o mecánico, habrá cultivos en los que el espacio entre surcos o hileras de plantación sea reducido y el trasplante resulte más complicado que en otras condiciones en la cuales sea necesario ampliar la separación entre plantas.

Acolchados en la agricultura de temporal

En lo que respecta a la agricultura de temporal, el uso de algún tipo de acolchado plástico resulta ser en la mayoría de las ocasiones incosteable para el agricultor debido a su alto costo de adquisición, sin embargo, ya que en este tipo de agricultura al ser completa y exclusivamente dependiente de la cantidad de la precipitación media, resulta recomendable el uso de acolchados orgánicos por su alta disponibilidad y bajo costo de colocación para obtener un impacto positivo en el proceso de la retención y extensión del periodo de contenido de humedad en el suelo.

Además se ha registrado que por evento de lluvia se pierde aproximadamente el 40% de agua en la escorrentía superficial influenciada por factores topográficos, provocando con ello, bajos rendimientos por falta de una adecuada humedad en la zona radicular, por lo que en la mayoría de los casos deberían emplearse los acolchados bioplásticos o acolchados de residuos vegetales como material para reducir la pérdida de agua del suelo debida a la escorrentía superficial, además se ha reportado que, entre el 30 y 50% del agua precipitada se pierde por evapotranspiración.



Se pueden mejorar los componentes del balance hídrico superficial con el uso de los acolchados, por ejemplo, se genera una mayor infiltración de agua en la zona subterránea aumentando la humedad del suelo y a largo tiempo la recarga de acuíferos, también se observan efectos positivos en el balance energético, en el cual se mejoran significativamente los flujos de energía en las interfases atmósfera-acolchado, planta-acolchado y acolchado-suelo, disminuyendo procesos de evapotranspiración incluyendo la radiación neta, flujos de calor y con ello aumento en los índices foliares.

La agricultura de temporal podría considerarse como el mecanismo más práctico en el que la labor agrícola se lleve a cabo de forma simple, ya que no requiere de la planeación de la distribución de agua a través de un diseño hidráulico a diferencia de la agricultura de riego ya sea por goteo o aspersión. Sin embargo, tiene el inconveniente de la ausencia de los eventos de precipitación, ya sea por causas de sequías o situaciones meteorológicas incontrolables provocadas por el cambio climático. En este sentido la aplicación de acolchados a cultivos de temporal complementaría el proceso para un mejor aprovechamiento, eficiencia y rendimiento en los resultados del cultivo de interés. Se han reportado aumentos del 50 al 60% en rendimientos de cultivos de temporal al complementarlos con técnicas de acolchado.

Otro aspecto importante a considerar en el cultivo de temporal son los periodos de lluvia aprovechables para la siembra programados para los tiempos de cosecha eficientes. En este sentido el uso de acolchados permite prevenir los periodos de sequía crítica. Se han reportado investigaciones en cultivo de maíz obteniendo aumento en rendimientos de 2.1 a 93.3% y de 7.6 a 34.6% para bioplásticos y plásticos sintéticos respectivamente llevándose a cabo en periodos con menor precipitación.

Además de tener una mayor eficiencia en el uso de agua de lluvia con los acolchados en los cultivos de temporal, los que se reflejan en mayores porcentajes de rendimiento, se aprecian también la disminución de malezas y la mejora en calidad de suelo, conservación de humedad y aumento de temperatura.

En lo que respecta a los acolchados se puede mencionar que son reguladores de la temperatura en el suelo debido a que controlan las variaciones extremas de calor y de frío. Estas prácticas ayudan de manera positiva a las parcelas agrícolas de varias formas, desde la reducción en la pérdida de agua, la erosión y la influencia de las gotas de agua generadas en la precipitación y que desgastan la superficie del suelo, disminuyen el crecimiento de malezas y con ello se reduce la competencia con los cultivos por la adquisición de nutrientes y en sentido estricto, benefician a las parcelas cercanas a incrementar la humedad presente en la zona.

Acolchados en la agricultura de invernadero o protegida

Por otro lado, la utilización de acolchados en agricultura protegida o bajo invernadero, es una práctica común para lograr un aumento considerable en la producción en donde los



materiales comúnmente utilizados, son productos plásticos que potencializan el rendimiento de la planta en conjunto con los nutrientes necesarios para aumentar la cantidad de frutos y la calidad de los cultivos ya que se hace uso de técnicas y tecnología en la que se mantiene controlado variables biológicas, ambientales y climáticas.

En el 2018 se reportó la utilización de cerca de un millón de toneladas de acolchados sintéticos con fines agrícolas con proyecciones de incremento en los años futuros, lo cual representa un aumento significativo en la producción de alimento y del requerimiento del recurso hídrico. Países como España, China, Estados Unidos, India, Japón y Corea del Sur representan a los principales consumidores de acolchados inorgánicos en cultivos bajo invernadero o agricultura protegida.

Las formas y tamaños de los plásticos en la agricultura protegida pueden variar presentándose como invernaderos, túnel o micro túnel, los cuales son aplicables de acuerdo con las condiciones o necesidades para obtener una productividad eficiente. Lo anterior ha impulsado su aplicación sobre todo en la obtención elevada y constante en el rendimiento en sitios en donde la vulnerabilidad, por las condiciones climáticas en la región en la cual se aplique la agricultura convencional, afecte a los cultivos y no sea posible una productividad eficiente por ser zona árida o en casos de sequías meteorológicas. Por otro lado, la gran variedad de formas de agricultura protegida en combinación de acolchados permite programar la obtención de frutos fuera de periodos normales de producción, protegiendo además de fríos y heladas.

Respecto a la producción intensiva de hortalizas bajo un sistema de agricultura de invernadero, se menciona que el uso de acolchados, en particular los inorgánicos tipo plástico, resulta ser una solución óptima para producir en cantidad y calidad mayor cantidad de frutos, el principal objetivo en la colocación del acolchado se torna en base al aumento de la temperatura del suelo, mejorar el uso eficiente del recurso hídrico necesario para el desarrollo de la planta y en amplio grado, disminuir la presencia de las malezas y particularmente lograr una reducción en la lixiviación de nutrientes.

La utilización de acolchados inorgánicos en agricultura protegida ha tenido resultados positivos en el incremento de hortalizas frescas, con color, sabor y tamaño atractivas para el consumidor, en el caso particular del entorno del cultivo, se incrementó el contenido de humedad en el suelo, reduciendo las láminas de requerimiento de agua programada diaria, así como se transforma la comunidad microbiana en el entorno suelo-planta incrementando el movimiento de nutrientes necesarios para el desarrollo del producto final.

Se ha reportado beneficios en el caso de cultivo de pepino en invernadero con acolchado negro, presentado valores mayores de biomasa respecto al cultivo aéreo (752 y 71 g/m² respectivamente, aumentado además el número de frutos y el peso medio del fruto y llevándose a cabo en temporada invernal. Otro beneficio reportado de acolchado



en invernadero fue el aplicado a cultivo de tomate en donde se reporta que el suelo con acolchado plástico propició rendimientos mayores que el suelo sin acolchar (22.3 kg/m² y 19.4 respectivamente), además de lo anterior los autores reportan mayor coeficiente de uso de agua (63.6 L/Kg) comparativamente menor al gasto realizado también para el cultivo de tomate con fibra de coco y tezontle.

Análisis de los nutrientes del suelo con la aplicación de acolchados

Las aportaciones de diversos fertilizantes y abonos hacia la mejora en la composición de suelo favorecen el rendimiento en los cultivos de forma eficiente, sin embargo, si además se implementan elementos como el acolchado, éste último tiene un efecto de incremento en dichos rendimiento, aunado a lo anterior se observan beneficios que se derivan del uso de acolchados como son la generación de temperaturas óptimas para el crecimiento bacteriano favoreciendo la fijación de nitrógeno, además del aumento de carbono orgánico y de otros minerales.

Por otro lado, como otro beneficio del uso de acolchado se observa la disminución de la erosión hídrica de suelo por efecto de los eventos de lluvia resultando una mejor asimilación de los nutrientes del suelo para una diversidad de cultivos. Es importante considerar que la asimilación de los minerales depende de las variaciones de pH en el suelo y con ello la conductividad eléctrica, estos indicadores son influenciados por el uso de acolchados, ya que al mantener o conservar agua en el suelo durante su aplicación la cual se evita por evaporación, pérdidas de humedad significativas y por lo tanto se evita fluctuaciones de estos valores y de esta manera una mejor movilidad de los nutrientes aprovechados por el cultivo.

Se han reportado rendimientos comparables para suelos con altos niveles de fertilización comprendiendo tanto micro como macronutrientes, constituidos de elementos como nitrógeno, fósforo y potasio con aquellos con menor grado de fertilización, pero con uso de acolchado, lo cual se traduce en una menor afectación al suelo, en referencia del aumento de su salinidad por la presencia de mayor concentración de iones, así como menor impacto a mantos freáticos que pudieran ser causadas por infiltración de los excedentes de fertilizantes. Se ha registrado que los beneficios en macronutrientes en general se ven favorecidos con el control de temperatura que se mantiene con los acolchados, aumentando gramos de contenido de macronutriente por planta.

El uso de los acolchados tiene un beneficio respecto a la buena asimilación de los nutrientes al proteger al suelo de la interacción por impacto de la lluvia o por el viento manteniendo buena estructura del suelo favoreciendo con ello un buen aprovechamiento radicular al reducir la pérdida de nutrientes como nitrógeno, fósforo potasio, magnesio y calcio.



La colocación de acolchados especialmente en las estaciones de primavera y verano previenen significativamente la pérdida de humedad del suelo debida al proceso de evaporación directa, y con ello, aumentan la capacidad de conducción de agua del subsuelo a través de las raíces modificando particularmente el proceso de evapotranspiración, además de mejorar particularmente la estructura de las capas superiores del suelo, al mejorar la circulación de nutrientes, favoreciendo la presencia de lombrices y generando poros en la estructura del suelo, provocando una libre circulación de agua y elementos nutritivos para las plantas.

Rendimiento de los cultivos comparando la cantidad de semillas

Para realizar una selección adecuada de un acolchado es necesario entre otras cosas, la definición del tipo de material a utilizar, la zona ecológica en la cual se encuentra situado el cultivo, también es muy importante la identificación del color y del grosor del acolchado, la ubicación y forma de las perforaciones que contenga la lámina del material, la disponibilidad en la zona del acolchado, así como identificar la viabilidad del cultivo seleccionado comparadas con las características particulares del acolchado, es decir, no todos los acolchados son adecuados para todos los cultivos. Cuando se analiza la elección del material de acolchado en función de la calidad en las semillas o en los frutos del cultivo, particularmente se debe evitar la utilización de residuos agrícolas o vegetales que contengan en su composición la presencia de semillas de maleza, debido a que se contaminará la zona y se encontrará en competencia continua por los nutrientes del suelo y por la lámina de agua administrada.

Los efectos en aumento de porcentaje de rendimiento de cultivos respecto a cantidad y calidad de frutos, va de la mano con el incremento en la cantidad de semillas, siendo muy evidente el aumento en peso en las semillas en comparación con los procedimientos en los cuales no se aplica el acolchado. Se ha reportado las aportaciones de los acolchados en variedades de cultivo de frijol con diversos acolchados plásticos de diferentes colores, evidenciando en cada uno mayor peso de semillas que con el tratamiento testigo, beneficiando además incrementos en el rendimiento del grano. Los beneficios pueden reportarse también en peso de semilla por parcela en donde es importante mencionar que pueden variar dependiendo del color o tipo de acolchado aplicado, pero en cualquiera de los casos, se integran factores que favorecen la inducción en los microambientes con efectos eficientes en nivel estomático y vascular.

Colocar acolchados en un cultivo, independientemente de su naturaleza, tiene como principal meta el aumento en la producción total, se han reportado estudios en los cuales específicamente los cultivos de maíz son los que mayor rendimiento presentan llegando a obtener hasta un 47% de incremento por hectárea, otros ejemplos que se pueden relatar son el garbanzo, algodón, mostaza, arroz, lenteja, frijol, cebada, entre otros



llegando a obtener incrementos en el rendimiento de 19, 25, 33, 21, 10, 25, 12% respectivamente.

Rendimiento de los cultivos comparando la cantidad y calidad en los frutos

De manera convencional algunos cultivos pueden tener buenos resultados en lo referente al rendimiento del cultivo con la combinación de prácticas adecuadas y con aplicación de abono para mejorar las condiciones del suelo, considerando además un tipo de riego adecuado para mantener dosis suficiente de agua, sin embargo, aunado a lo anterior se han reportado mejoras en dichos rendimientos, cuya evidencia se ve reflejada por la cantidad de masa, altura o diámetro de los productos según el cultivo, que en la mayoría de las ocasiones son beneficiadas con porcentajes de rendimiento y calidad óptimas a diferencia de las que no se usan acolchados.

Al usar acolchados los resultados en la calidad de los frutos protegen en situaciones de climas extremos o diversos factores ambientales desfavorables, que pueden afectar significativamente procesos en el desarrollo del metabolismo afectando tanto la fotosíntesis como el proceso de respiración o transpiración de la planta con impacto en elementos internos como carbohidratos, pero también se puede ver afectado su color, textura y contenido de antioxidantes. La característica mencionada se valora de manera importante ya que proporciona firmeza, cierto grado de dulzor y color intenso lo que favorece prácticas adecuadas de manipulación en el empaque y manejo.

Otros elementos que se ven favorecidos respecto al uso de acolchados y que representan indicadores de calidad son la medición de sólidos solubles totales, evaluación sensorial, así como acidez. De forma general el beneficio en rendimientos en cantidad en la mayoría de los cultivos se reporta en porcentajes que llegan a superar más del 50% que en aquellos en donde no se utiliza el acolchado, lo cual puede variar dependiendo del tipo de cultivo, pero siempre la tendencia es a la mejora en mayor producción por efecto del acolchado.

En estudios realizados en regiones áridas o semiáridas demuestran que los rendimientos de cultivo fueron de más del 52% más del fruto respecto al cultivo sin acolchar favoreciendo el rendimiento del tomate.

Otro ejemplo, es la colocación de acolchados producto de residuos vegetales como las diferentes pajas en cultivos de tomate y berenjena, los que han demostrado una mejora significativa en las características físicas y de sabor en los frutos producidos, debido a que mantienen la temperatura del suelo con menor variación durante el día, provocando un requerimiento gradual de agua y nutrientes.



Tabla 2. Ejemplos de indicadores de calidad en frutos por efecto de acolchados

Tipo de cultivo	Indicador de calidad	Características relevantes
Fresa	Buena Acidez, Mejor color, Mayor firmeza del fruto, Niveles altos de compuestos aromáticos y saborizantes	Buena aceptación sensorial.
Melón	Solidos solubles totales	Aceptación por parte de los consumidores.
Jitomate	(Grados Brix)	
Ciruelas		
Zanahorias	Mejor Color, Mayor contenido de Betacaroteno	
Uvas	Mayor contenido de Flavonoides	

Rendimiento de los cultivos comparando la cantidad producida de forraje

De igual forma como se ha mencionado en los beneficios de rendimientos en cantidad y calidad de cultivos por el uso de acolchados, este se puede ver reflejado al ser aplicados para obtener una mayor producción de forraje, el cual tendrá valor agregado por ser fuente de alimentación para ganado, beneficiando además el uso de acolchado en aquellas situaciones desfavorables, en las que las condiciones climáticas puedan interferir en la obtención de una productividad de forraje óptima cuya evidencia se observa con resultados como el incremento en altura, diámetro, materia seca mediante la implementación de acolchados en comparación con el tratamiento sin acolchar.

Además de lo anterior la aplicación de acolchado beneficia la calidad del forraje en cuanto a contenido de agua, así como los requerimientos nutricionales con contenido de suplementos alimenticios, principalmente de proteína, que benefician los procesos digestivos del ganado que lo consume.

Cuando se presenta aireación del suelo debido a la presencia de poros en el suelo y utilizando acolchados orgánicos que propicien el aumento de la infiltración cercano a la planta de cultivo, las partículas del suelo en conjunto con el correcto drenaje del agua, pueden aumentar de manera considerable la productividad del cultivo, principalmente la masa seca del cultivo.

Si se toma en cuenta las regiones con climas áridos y semiáridos, la utilización de acolchados disminuye significativamente la tasa de evaporación, por lo cual, la técnica de acolchar se vuelve un método primordial para poder preservar el contenido de humedad en el suelo, hablando específicamente de esto, existen estudios experimentales reportados en la literatura que abordan el análisis del rendimiento de frijol en cuanto al aumento de masa a partir del índice foliar que se convertirá en forraje para alimento de ganado.



Específicamente en la comparación de cultivos con acolchados plásticos, acolchados vegetales y sin acolchar, los resultados muestran que bajo las mismas condiciones de nutrientes, riego y variedad de cultivo, los acolchados plásticos generan condensación del agua evaporada, es decir, bloquea la liberación del flujo de agua a la atmósfera, lo que ayuda a prolongar la aplicación y en gran medida poder reducir el requerimiento de riego durante la etapa de desarrollo del cultivo, aumentando significativamente el peso total de forraje, en este caso la paja de frijol en comparación con las parcelas cubiertas con acolchados orgánicos y muy por encima de las parcelas sin acolchar.

Las investigaciones actuales que incluyen el uso de acolchados se centran en determinar la afectación que estos tienen sobre la productividad y el rendimiento en los cultivos, hablando específicamente de los cultivos de maíz que utilizan acolchados, modifican estas variables mencionadas en las primeras etapas del crecimiento de la planta, lo que ocasiona un aumento en la masa y estructura de la planta.

Conclusión

Mediante la revisión presentada se pudo apreciar una valoración completa de los aspectos que hacen importante el uso de los acolchados, en donde si bien, existen variaciones en cuanto a su composición, así como formas y aspectos diversos de su aplicación, en todos los aspectos se ve reflejado su beneficio impactando en un óptimo y eficiente rendimiento, así como en la calidad y cantidad de la productividad en los cultivos reflejado en las cosechas. Además de lo anterior cabe resaltar los beneficios en cuanto a impactos menores en el uso del recurso hídrico, que comprenden consumos eficientes en el uso de agua destinada al cultivo ya que prevalece la conservación de humedad en el suelo.

Aunado a los beneficios mencionados en los rendimientos, podemos resaltar que el uso de acolchados indudablemente ayuda en la conservación del agua, específicamente en regiones de clima árido y semiárido aumentan la retención de humedad en el suelo, estabilizan las variaciones de temperatura y particularmente se reducen las tasas de evaporación. El uso de acolchados en la agricultura sin importar el tipo de esta ha ido aumentando en las últimas décadas, en particular los de tipo inorgánico, minimizando las pérdidas de agua, controlando la erosión, evitando el crecimiento de malezas y con ello, reduciendo la competencia por nutrientes, de igual forma ayuda en el aumento de la humedad en las parcelas cercanas, reflejándose en valores positivos en la producción de cultivos.

Bibliografía

Amador-Ramírez, Mario Domingo, Velásquez-Valle, Rodolfo, Sánchez-Toledano, Blanca Isabel, & Acosta-Díaz, Efraín. (2013). Respuesta del chile mirasol a la labranza reducida, enmiendas



- al suelo y acolchado plástico. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 4(4), 543-555. Recuperado en 19 de mayo de 2025, de <https://r.fibr.ai/issqjir>
- Arias-Hernández, L. A., Juaristi-Videgaray, E., Mares-Martínez, H. E., Solís-Silván, R., Maldonado-Santoyo, M., Calderón-Vega, F., Valdés-Vázquez, J. F. & Delgadillo-Ruiz, E. (2024). Valoración de acolchados ecoplásticos utilizados para reducir la evaporación en suelos agrícolas. *Ciencia Nicolaita*, 91, 1 – 9. <https://doi.org/10.35830/cn.vi91>.
- Arias Hernández, L. A., Maldonado Santoyo, M., Delgadillo Ruiz, L., Solís Silván, R., Calderón Vega, F., Aguilera, G. C., Reducindo Ruiz, S. M., González Trinidad, J., Berumen Cervantes, A., Hernández, A. A. O., & Delgadillo Ruiz, E. (2025). The Effect of the Addition of Maguey Bagasse in the Production of Bioplastics Based on Corn and Potato Starch. *Journal of Composites Science*, 9(5), 213. <https://doi.org/10.3390/jcs9050213>
- Dada, O. I., Habarakda-Liyanage, T. U., Chi, T. Yu, L., Devetter, L. W. & Chen, S. (2025). Towards sustainable agroecosystems: A life cycle assessment review of soil-Biodegradable and traditional plastic mulch films. *Environmental science and Ecotechnology*, 24, 1 – 19. <https://doi.org/10.1016/j.es.2025.100541>
- Delgadillo Ruiz, E., Castorena Padilla, C., Peña Vázquez, F., Exiga Soria, Álvaro R., Ramírez Siorda, G. Y., Arias Hernández, L. A. & Delgadillo Ruiz, L. (2022). Clasificación de acolchados y su implementación en la retención de humedad del suelo. *Jóvenes en la Ciencia*, 16, 1–9. Recuperado a partir de <https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/3838>
- Delgadillo-Ruiz, E., Tirado-Torres, D., Ramírez-García, R. A., Delgado-Escobedo, M. N., Arias-Hernández, L. A., Luna-Gutiérrez, J. F., Gonzalez-Evaristo, A., Contreras-Cisneros, J. & Barrientos-Hernández, Y. (2023). Variación de la temperatura del suelo utilizando residuos vegetales. *Jóvenes en la Ciencia*, 21, 1–8. Recuperado a partir de <https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/4092>
- Iqbal, R., Raza, M. A. S., Valipour, M., Saleem, M. F., Zaheer, M. S., Ahmad, S., & Nazar, M. A. (2020). Potential agricultural and environmental benefits of mulches—a review. *Bulletin of the National Research Centre*, 44, 1-16. <https://doi.org/10.1186/s42269-020-00290-3>
- Li, M., Zhang, K., M. Eldoma, I., Fang, Y., & Zhang, F. (2020). Plastic Film Mulching Sustains High Maize (*Zea mays* L.) Grain Yield and Maintains Soil Water Balance in Semiarid Environment. *Agronomy*, 10(4), 600. <https://doi.org/10.3390/agronomy10040600>
- Linares, P. B. Castillo, L. A., Barbosa, S. E. (2025). Micronutrients release from active polyethylene films under mulched condition. *Results in Surfaces and Interfaces*, 18, 1 – 13.



<https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2025.100419>

- Ma. D., Chein, L., Qu, H., Wang, Y., Misselbrook, Jiang, R. (2018). Impacts of plastic film mulching on crops yield, soil water, nitrate, and organic carbon in Northwestern China: A meta-analysis. *Agricultural Water Management*, 202, 166 – 173. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.02.001>
- Mansoor, Z.; Tchuenbou Magaia, F.; Kowalczyk, M.; Adamus, G.; Manning, G.; Parati, M.; Radecka, I.; Khan, H. Polymers (2022). Use as Mulch Films in Agriculture A Review of History, *Problems and Current Trends. Polymers*. 14, 5062. <https://doi.org/10.3390/polym14235062>
- Montemayor-Trejo, José Alfredo, Suárez-González, Edith, Munguía-López, Juan Plutarco, Segura-Castruita, Miguel Ángel, Mendoza Villarreal, Rosalinda, & Woo-Reza, José Luis. (2018). Acolchados plásticos para la producción de maíz (*Zea mays* L.) forrajero en la Comarca Lagunera. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(spe20), 4107-4115. <https://doi.org/10.29312/remexca.voi20.982>
- Marín-Guirao, J. I., Martín-Expósito, E., García-García, M. d. C., & de Cara-García, M. (2022). Alternative Mulches for Sustainable Greenhouse Tomato Production. *Agronomy*, 12(6), 1333. <https://doi.org/10.3390/agronomy12061333>
- Prosdocimi, M. Tarollo, P., Cerda, A. (2016). Mulching practices for reducing soil water erosion: A review. *Earth-Science Reviews*, 161, 191 - 203. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.08.006>.
- Rao, Z.-X., Huang, D.-Y., Zhu, H.-H., Zhu, Q.-H., Wang, J.-Y., Luo, Z.-C., Xu, C., Shen, X., & He, Y.-B. (2016). Effect of rice straw mulching on migration and transportation of Cd, Cu, Zn, and Ni in surface runoff under simulated rainfall. *Journal of Soils and Sediments*, 16(8), 2021-2029. <https://doi.org/10.3390/w14162471>.
- Reid, E.V., Samuelson, M. B., Blanco-Canqui, H., Drijber, R. Kadoma, I., Wortman, S. E. (2022). Biodegradable and biobased mulch residues had limited impacts on soil properties but reused yield of the following crop in a low fertility soil. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 37, 490-503. <https://doi.org/10.1017/S1742170522000217>
- Schettini, E., Sartore, L., Barbaglio, M., & Vox, G. (2012). Hydrolyzed protein based materials for biodegradable spray mulching coatings. *Acta Horticulturae*, 952, 359-366. doi:10.17660/actahortic.2012.952.45.
- Sirivechphongkul, K.; Chiarasumran, N.; Saisriyoot, M.; Thanapimmetha, A.; Srinophakun, P.; Iamsaard, K.; Lin, Y.-T. (2022). Agri-Biodegradable Mulch Films Derived from Lignin in Empty Fruit Bunches. *Catalysts*, 12, 1150. <https://doi.org/10.3390/>



- Steinmetz, Z., Wollmann, C., Schaefer, M., Buchmann, C., Troger, J. J., Muñoz, K., Fror, O., Schaumann, G. E., (2016). Plastic mulching in agriculture. Trading short-term agronomic benefits for long-term soil degradation?. *Science of the total environment*, 550, 690-705. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.153>
- Sun, H., Shao, L., Liu, X., Miao, W., Chen, S., & Zhang, X. (2012). Determination of water consumption and the water-saving potential of three mulching methods in a jujube orchard. *European Journal of Agronomy*, 43, 87-95. doi:10.1016/j.eja.2012.05.007
- Zhang, F., Zhang, W., Qui, J. I., Li, F. M. (2018). A regional evaluation of plastic film mulching for improving crop yield on the Loess Plateau of China. *Agricultural and forest meteorology*, 248, 458 – 468. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.10.030>

Uso potencial de *acacia* (huizache), en fitorremediación de suelos contaminados de zonas áridas y semiáridas

Citlalli Selene Ruíz-García.
Josefina Huerta-García.
Lucia Delgadillo-Ruíz.
Cruz Daniel Mandujano-García.
Felipe de Jesús Escalona-Alcázar.
Perla Ivonne Gallegos-Flores.





Resumen

La contaminación por metales pesados (MPs), derivada principalmente de la actividad minera, representa una amenaza crítica para los ecosistemas y la salud humana. En México, estados como Zacatecas enfrentan graves problemas por residuos mineros (“jales”) que liberan elementos tóxicos como arsénico, plomo y cadmio. Ante este panorama, la fitorremediación surge como una alternativa ecológica y sostenible para recuperar suelos contaminados, utilizando plantas capaces de absorber y estabilizar dichos contaminantes. El género *Acacia*, particularmente *Acacia schaffneri* (huizache), destaca por su adaptabilidad a zonas áridas y su tolerancia a metales pesados. Esta especie nativa posee características morfológicas y genéticas que la convierten en candidata ideal para programas de rehabilitación ambiental. Además, su capacidad simbiótica con bacterias fijadoras de nitrógeno mejora la calidad del suelo. El documento también aborda el uso de marcadores moleculares RAPDs para evaluar la variabilidad genética de las plantas, facilitando la selección de árboles semilleros con alto potencial fitorremediador. Se concluye que *Acacia schaffneri* representa una opción prometedora para restaurar suelos degradados, especialmente en regiones mineras áridas, combinando eficiencia ecológica con viabilidad genética.

Palabras clave: Fitorremediación, metales pesados, variabilidad genética.



Introducción

La contaminación por metales pesados (MPs) es un problema que ha ido en aumento, principalmente por actividades antropogénicas, y una de las más trascendentales ha sido la minería. Los elementos potencialmente tóxicos (EPT) en el suelo incluyen algunos metales pesados de gran toxicidad biológica, entre los que se encuentran el mercurio (Hg), cadmio (Cd), plomo (Pb), cromo (Cr) y arsénico (As), así como también otros metales considerados esenciales o micronutrientes, que son requeridos por los sistemas biológicos como componentes estructurales, enzimas y que funcionan como cofactores en reacciones químicas para crecimiento y el desarrollo normal de animales y plantas, sin embargo, en concentraciones altas, pueden considerarse tóxicos como el zinc (Zn), cobre (Cu), níquel (Ni), manganeso (Mn), magnesio (Mg), hierro (Fe), estaño (Sn) y vanadio (V).

La minería es una de las actividades económicas más importantes del país. Esta actividad es realizada desde la época prehispánica; desde entonces ha coadyuvado al desarrollo económico del país. Sin embargo, también ha generado, por cientos de años, una elevada cantidad de EPT, esto se debe principalmente al manejo inadecuado de sus residuos denominados “jales mineros”, lo que ha ocasionado graves problemas de contaminación. Entre los principales estados mineros en nuestro país se encuentran Zacatecas, Sonora, Durango, Guerrero, Chihuahua y San Luis Potosí.

Si bien las actividades mineras han sido componentes esenciales de desarrollo industrial que han jugado un papel importante en la economía mundial, también han desempeñado un papel fundamental en la liberación EPT, los cuales provocan serios problemas ambientales y de salud. La innegable dependencia de los minerales extraídos de la tierra es una característica del mundo moderno, por todos los productos de uso común que elaboramos con ellos; empero, la huella que han dejado estos elementos tóxicos en la existencia humana no ha sido del todo favorable, por el gran costo de contaminación ambiental que se ha generado.

No obstante, como ya se mencionó anteriormente, la industria minera ha sido esencial para el desarrollo económico, sin embargo, en la actualidad presenta serios desafíos para el futuro del planeta y de sus habitantes. Confiar en métodos tradicionales de la minería, como procesos a cielo abierto, especialmente cuando se emplean químicos como cianuro, mercurio y ácido sulfúrico, genera efectos severos sobre el medio ambiente y la salud pública. Ignorar las consecuencias de estas prácticas, tendrá un alto costo para las generaciones presentes y futuras. Durante el proceso minero los metales pesados como el As, Cd, Pb y el Hg son algunos de los contaminantes más persistentes y peligrosos que se liberan al suelo, agua y aire. Actualmente los estudios demuestran que estos metales pesados representan graves amenazas para la salud humana y los ecosistemas en general.

La emisión de metales pesados puede ocurrir debido a partículas en suspensión generadas durante los procesos de la minería que, al liberarse al aire, caen y se asientan en el medio ambiente circundante. Asimismo, las operaciones mineras a menudo



provocan contaminación del agua, con drenajes ácidos de minas y relaves mineros que contienen metales pesados y reactivos químicos que, si no se tratan adecuadamente, pueden filtrarse al subsuelo o ser arrastrados por lluvias intensas que transportan estos contaminantes hacia ríos, lagos y acuíferos, afectando tanto el agua superficial como la subterránea.

Contaminación del suelo

Los residuos sólidos, como escorias y lodos con metales pesados, pueden lixiviar metales pesados como el As, Pb y Zn y otros compuestos tóxicos, al medio ambiente, afectando tanto al suelo, a la flora y fauna como a los recursos hídricos. La lixiviación de metales pesados de residuos mineros es un problema crucial que debe ser atendido. La eliminación inadecuada de residuos industriales también contamina suelos, aguas superficiales y subterráneas, alterando así las cadenas alimenticias, por lo que existe la necesidad de una gestión adecuada y prácticas sostenibles para mitigar sus efectos. El legado tóxico del As, Pb y Zn se extiende más allá, abarcando también el Cd y el Hg, cada uno de ellos representando riesgos para la salud del suelo y por lo tanto la salud de los ecosistemas.

Las consecuencias de la contaminación del suelo por metales pesados son diversas ya que no solo daña las capas superficiales, sino que además genera impactos ecológicos y agronómicos severos: provoca alteraciones en las comunidades microbianas, afectando la diversidad y funcionalidad de los microorganismos del suelo, se inhiben los procesos de la fijación del nitrógeno y la formación de micorrizas. También disminuye la fertilidad del suelo, debido a que las toxicidades de los metales pesados interfieren con el ciclo de nutrientes esenciales, reduciendo su disponibilidad en las plantas. Además, reducen la resistencia de las plantas a factores de estrés como sequía, frío, plagas y enfermedades, conjuntamente deteriorando su crecimiento, comprometiendo así la productividad agrícola. Al mismo tiempo de los efectos directos sobre las plantas, la contaminación del suelo también genera consecuencias indirectas, por la acumulación de metales en tejidos vegetales (raíces, tallos, hojas y frutos) afectando su valor nutricional y la seguridad para el consumo humano.

Por lo tanto, podemos afirmar que la contaminación del suelo por MPs, se encuentra entre los problemas más graves del mundo actual, el cual debe atenderse de manera prioritaria. La creciente conciencia ambiental y preocupación por la salud pública, ha puesto especial cuidado en la recuperación de suelos del área productiva. La remediación de suelos es fundamental en áreas afectadas por la minería debido a las graves consecuencias que la contaminación puede provocar para la salud humana y el medio ambiente.



Métodos de remediación de suelos contaminados

La remediación o rehabilitación del suelo es uno de los principales retos de la actualidad para la preservación del medio ambiente y la salud, la cual consiste en acciones que permitan extraer, controlar, contener o reducir los contaminantes del suelo, considerando su uso actual y futuro. La remediación de suelos contaminados por metales pesados ofrece beneficios significativos como la reducción de riesgos de exposición para la salud humana, preservación del ambiente, mejora de la calidad del suelo para los cultivos y el aumento del valor de la tierra.

Existen diferentes métodos de remediación. Entre los más comunes se incluyen métodos físicos, químicos y biológicos. Los métodos físicos implican procesos como la excavación, el cribado y el tratamiento térmico. Los métodos químicos incluyen la neutralización, la oxido-reducción, la adsorción superficial y la extracción química del contaminante. Los métodos biológicos, como la fitorremediación utilizan plantas para absorber y estabilizar los contaminantes del suelo. Estos últimos métodos ofrecen soluciones más amigables y respetuosas para el medio ambiente, pero requieren tiempo y experiencia para su implementación.

Fitorremediación

La fitorremediación es una técnica respetuosa con el medio ambiente para la remediación de suelos contaminados principalmente por metales pesados como Pb, Zn, Cd, Hg y As. Este método aprovecha la capacidad natural que tienen las plantas para absorber, acumular, metabolizar, estabilizar y extraer contaminantes presentes en el suelo, aire, agua o sedimentos. La fitorremediación brinda varias ventajas de protección al medio ambiente en comparación con otros métodos convencionales, lo que la convierte en una técnica sostenible y rentable. Otra de sus ventajas es que se puede utilizar en grandes áreas contaminadas y no solo limpia el suelo, sino que también mejora su calidad y fertilidad.

La fitorremediación utiliza plantas que actúan como sistema de bombeo y filtrado impulsados por energía solar al absorber los contaminantes (principalmente solubles en el agua) a través de sus raíces, para removerlos, reducir, transformar, degradar o estabilizar los contaminantes a través de sus tejidos vegetales donde pueden ser metabolizados, secuestrados o volatizados. Se han identificado una amplia diversidad de especies que se emplean para este fin. Algunas de ellas, debido a su gran capacidad de acumular metales pesados, reciben el nombre de hiperacumuladoras.

Entre las plantas se encuentra la *Brassica juncea*, tiene gran relevancia en el proceso de fitoextracción de Cd, Pb y Zn del suelo. Otras especies como *Brassica oleracea* L., *Lactuca sativa* L., *Nicotiana tabacum* L., acumulan altos niveles de Cd en las hojas, en lugar de en las raíces. De igual manera se ha reportado una alta capacidad de acumulación de metales pesados en cultivos de cereales como *Zea mays* L., *Sorghum bicolor* y *Medicago sativa* L. Estas plantas pueden ser utilizadas con éxito para limpiar suelos



contaminados por metales pesados.

Los mecanismos y la eficiencia de la fitorremediación dependen del tipo de contaminante, la biodisponibilidad y las propiedades del suelo. La absorción de los contaminantes en las plantas ocurre principalmente a través del sistema radicular, en el cual se encuentran los principales mecanismos para prevenir la toxicidad. El sistema radicular proporciona una enorme superficie que absorbe, acumula agua y nutrientes esenciales para el crecimiento, así como también contaminantes no esenciales. Los procesos mediante los cuales las plantas promueven la eliminación de contaminantes son variados, incluyendo la absorción, estabilización, transformación y la degradación. La fitorremediación es adecuada para una variedad de compuestos orgánicos e inorgánicos y puede aplicarse ya sea *in situ* o *ex situ*. Sin embargo, existen ciertas limitaciones en el uso de plantas para fitorremediación para metales pesados.

Se han identificado aproximadamente 400 especies de plantas de al menos 45 familias botánicas con capacidad para acumular metales pesados en sus tejidos. De este grupo, once especies se consideran particularmente relevantes (Tabla 1). Estas especies han sido objeto de estudio por su potencial en fitorremediación de suelos contaminados con elementos como Ni, Co, Pb, Cd, Zn, Mn, cobre (Cu) y selenio (Se).

Tabla 1. Principales familias de plantas para fitorremediación de metales pesados.

Asteraceae	Cunouniaceae	Poaceae
Brassicaceae	Fabaceae	Violaceae
Caryophyllaceae	Flacourtiaceae	Euphobiaceae
Cyperaceae	Lamiaceae	

Las técnicas de fitorremediación se han utilizado con éxito para tratar una amplia variedad de contaminantes como metales pesados, compuestos orgánicos, compuestos inorgánicos e incluso compuestos radiactivos en suelo y agua, gracias a la capacidad de transporte y acumulación que presentan este tipo de plantas fitorremediadoras. Se ha documentado también de cierta tecnología de fitorremediación “impulsada por energía solar” con capacidad de eliminar metales pesados (As, Cd, Cu, Hg, Ni y Pb), metales radioactivos como el cesio (Cs), estroncio (Sr) y uranio (U) y compuestos orgánicos como pesticidas de benzopireno (HAP), tricloroetileno (TCE) y trinitrotolueno (TNT).

La fitorremediación es una tecnología sustentable que utiliza el potencial de las plantas para remover contaminantes inorgánicos y orgánicos del suelo a través de procesos fisiológicos que permiten la eliminación o estabilización de los contaminantes. Los principales mecanismos incluyen: fitoextracción o fitoacumulación, fitoinmovilización o fitoestabilización, fitovolatilización y por último la fitodegradación o



fitotransformación. Las cuales se explican y muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Principales Mecanismos de Fitorremediación.

Fitorremediación	Fitoextracción / Fitoacumulación	Consiste en la absorción de contaminantes por la raíz y los acumulan en raíces, tallo o follaje, este mecanismo lo presentan las plantas con capacidad para acumular contaminantes y producir gran cantidad de biomasa.
	Fitoimmobilización / Fitoestabilización	Mecanismo que utiliza la planta para desarrollar un sistema denso de raíces, que le permite reducir la biodisponibilidad y la movilización de los contaminantes, evitando así el transporte hacia aguas subterráneas, reduciendo la biodisponibilidad de metales a la cadena alimentaria, este mecanismo ha sido utilizado principalmente para la eliminación de Pb, As, Cd, Cr, Cu y Zn.
	Fitovolatilización	Las plantas absorben los contaminantes del suelo y del agua a través de la raíz y los convierten en formas menos tóxicas, como resultado de procesos metabólicos, liberándolos posteriormente a la atmósfera desde las partes aéreas de la planta. Por lo que este mecanismo solo reubica los contaminantes del suelo al aire.
	Fitodegradación / Fitotransformación	Este mecanismo lo llevan a cabo algunas plantas que tienen la capacidad de degradar los contaminantes que han absorbido, a través de ciertas enzimas, las cuales provocan la ruptura de las moléculas de los contaminantes, transformándolas en moléculas más simples y menos tóxicas. Entre las enzimas involucradas en este mecanismo se encuentra la deshalogenasa (degrada compuestos clorados), peroxidasa (compuestos fenólicos), nitroreductasa (compuestos de nitrato), nitrilasa (compuestos aromáticos), fosfatasa (transformación de pesticidas organofosforados).

La fitorremediación emplea tres tipos principales de plantas para limpiar sitios contaminados: plantas acumuladoras (absorben y almacenan, especialmente metales pesados en sus tejidos), plantas tolerantes (pueden crecer en suelos contaminados sin sufrir daños significativos) y plantas transformadoras (modifican la forma química de los contaminantes, volviéndolos menos tóxicos o más volátiles para su liberación a la



atmosfera). Sin embargo, la fitorremediación enfrenta ciertos desafíos, como la larga duración de sus procesos, el tipo de suelo, las condiciones ambientales y la toxicidad de ciertos metales para las plantas, lo que puede disminuir su eficacia.

Fitorremediación con plantas nativas

En la fitorremediación se pueden utilizar plantas nativas o endémicas, ya que se encuentran mejor adaptadas a las condiciones locales de la región, aumentando así las probabilidades de éxito en la recuperación de suelos contaminados, además de evitar riesgos ecológicos de introducir especies de plantas exóticas, que pueden desplazar a las especies nativas al competir por los recursos como el agua y el espacio.

No obstante, existen pocos estudios dirigidos al uso de especies nativas de plantas que estén adaptadas a zonas áridas o semiáridas, en las que además de tener la capacidad de absorber los contaminantes tienen que enfrentar la escasez de agua. En las regiones áridas y semiáridas, el establecimiento de especies de plantas en los jales mineros se ve limitado aún más por una serie de factores ambientales como: temperaturas extremas (en la superficie de los jales), baja precipitación pluvial y fuertes vientos, lo anterior contribuye a desarrollar salinidad en el suelo, debido a la alta evaporación y la baja infiltración del agua. Ciertas investigaciones han identificado algunas especies vegetales nativas, que crecen y se desarrollan en sitios contaminados con jales mineros. Las especies vegetales que se han encontrado en dichos sitios degradados pertenecen a varias familias de plantas: Fabaceae, Poaceae, Asteraceae, Chenopodiaceae, Brassicaceae y Rosaceae.

***Acacia schaffneri* (Huizache) planta fitorremediadora**

Una de las familias de especies vegetales que crecen en sitios contaminados por metales pesados y que además son endémicas de climas áridos y semiáridos característicos del estado de Zacatecas, México es la familia Fabaceae. Dentro de esta familia, los géneros *Acacia* spp. y *Prosopis* spp., han demostrado una notable capacidad como colonizadores en suelos impactados por jales mineros, tanto en México como en el oeste de los Estados Unidos. Una especie representativa de este grupo es *Acacia schaffneri* (nombre común: Huizache), la cual ha sido observada en la localidad de *Francisco I. Madero*, Zacatecas, una zona reconocida por su alta contaminación derivada de actividades mineras. La presencia de *A. schaffneri* en estos ambientes sugiere una posible tolerancia fisiológica y genética a la toxicidad de metales pesados, lo que la convierte en una candidata como planta fitorremediadora.

Género *Acacia* (Leguminosae, Mimosoideae)

El género *Acacia* es muy extenso, con aproximadamente 1200 especies ampliamente distribuidas en los trópicos del mundo y es el segundo más grande de su familia después



de *Astragalus*. Se trata del único género dentro de la tribu Acacieae, posee unas 890 especies en Australia y alrededor de 200 en América. En México se encuentran cerca de 85 especies de *Acacia*, conocidas comúnmente como huizache de las cuales, 46 son endémicas, encontrándose la mayoría en regiones áridas y semiáridas del país lo que demuestra la gran tolerancia ecológica del género.

El huizache ha demostrado ser un éxito en la reforestación de bosques secos y áreas de pastizales degradados, al mismo tiempo proporciona estabilización de arenas movedizas en regiones semiáridas y degradadas, también se ha implementa como elemento ornamental urbano, todas sus partes tienen cualidades medicinales (hoja, raíz, tallo y corteza). El huizache se considera un elemento importante de la vegetación secundaria que sucede al bosque tropical caducifolio, el cual forma asociaciones densas llamadas “huizachales”. Los huizaches suelen crecer en zonas perturbadas con cierto grado de recuperación, florecen durante todo el año, especialmente de noviembre a mayo y su fruto se da de enero a abril. Tienen la capacidad de retener el suelo erosionado y seco. Por otro lado, las leguminosas de las especies de *Acacia*, tienen una importante asociación de carácter simbiótico para la formación de nódulos en sus raíces por bacterias fijadoras del nitrógeno atmosférico, dichas bacterias lo transforman para que las plantas puedan utilizarlo.

Aspectos morfológicos y taxonómicos de *Acacia schaffneri*

Dentro del género *Acacia*, en México se encuentra una de las especies endémicas la *Acacia schaffneri*, planta que se puede localizar en colinas rocosas y pastizales en diferentes estados de México como: Chihuahua, Durango, San Luis Potosí y Zacatecas. *Acacia schaffneri* (S. Watson) F.J. Herm. pertenece a la familia Fabaceae (sinónimo de Leguminosae) y subfamilia Mimosaceae. Se le conoce comúnmente como acacia retorcida o huizache chino en México. Los sinónimos incluyen *Pithecellobium schaffneri* S. Watson, *Samanea schaffneri* (S. Watson), *Popanax schaffneri* (S. Watson) y *Vachellia schaffneri* (S. Watson), este último cambio propuesto en 2005 se basa en estudios filogenéticos que reestructuraron el género *Acacia schaffneri* a nivel mundial, no obstante, en México se toma la decisión de seguirla llamando *Acacia schaffneri* por su arraigo en la literatura científica y el uso popular de nombrarla.

Acacia schaffneri ha sido identificada como una especie endémica que puede crecer en sitios perturbados y que además es resistente a climas áridos y semiáridos, lo que la hace una buena candidata a árbol semillero o fuente semillera. Una fuente semillera se define como un grupo de árboles de la misma especie o de diferentes especies con características fenotípicas deseables, que pueden ser manipulados técnicamente y de esa manera aumentar y mejorar la producción de semillas en calidad y cantidad. La importancia de las fuentes semilleras radica en que, a corto plazo, mejoran la calidad de las plantaciones y a largo plazo pueden constituirse en una base genética para iniciar



programas de mejoramiento genético como especies potenciales.

Dichas características fenotípicas están dadas por cambios en su ADN, que son resultado de la variabilidad genética, que surge como respuesta a la adaptación de factores abióticos de estrés, en este caso a la presencia de metales pesados, salinidad del suelo y climas extremos, por mencionar algunos.

Tabla 3. Tipos y características principales de marcadores moleculares.

	RFLP	RAPD	AFLP	SSR	SNP
Cobertura Genómica	Baja	Genoma completo	Genoma completo	Genoma completo	Genoma completo
Cantidad de ADN requerida	10-50 µg	100-1 ng	100-1 ng	120 ng-50	≥ 50 ng
Calidad de ADN requerida	Alto	Bajo	Alto	De medio a alto	Alto
Tipo de Polimorfismo	Cambio de única base	Cambio de única base	Cambio de única base	Cambios en la longitud por repeticiones	Cambio de única base
Herencia	Co-dominante	Dominante	Co-dominante/ dominante	Co-dominante	Co-dominante
Tipo de primers	Copia de ADN o cADN	Usualmente primers de 10 nucleótidos al azar	Secuencia específica	Secuencia específica	Primers para PCR para alelos específicos
Técnicamente demandante	Alto	Bajo	Medio	Bajo	Alto
Reproducibilidad	Alto	Bajo a medio	Alto	Alto	Alto
Demanda de tiempo	Alto	Bajo	Medio	Bajo	Bajo
Automatización	Bajo	Medio	Alto	Alto	Alto
Costo	Alto	Bajo	Medio	Alto	Alto
Utilidad en diversidad, genética o crianza	Genética	Diversidad	Diversidad y genética	Todas	Todas
Uso de radioisótopos	Casi siempre	No	Casi siempre	Casi nunca	No

RFLP: Polimorfismos de Longitud de Fragmentos de Restricción, **RAPD:** ADN polimórfico amplificado al azar, **AFLP:** Polimorfismos de Longitud de Fragmentos Amplificados, **SSR:** Repetición de Secuencia Simple y **SNP:** Polimorfismo de un Solo Nucleótido.



La variabilidad genética y los marcadores RAPDs

La variabilidad genética es la variación que ocurre de manera puntual en el genoma de una población, esta puede surgir por diferentes causas, entre ellas mutaciones, recombinación genética, migración, deriva genética o bien vivir en un entorno que genera estrés ambiental, por lo que las poblaciones deben adaptarse a los cambios de su entorno, para lograr sobrevivir. Esta variabilidad genética genera polimorfismos los cuales se caracterizan por presentar cambios en posiciones concretas de un solo nucleótido o abarcar segmentos más largos del ADN. Los polimorfismos ya mencionados se definen como fragmentos o secuencias de ADN dentro del genoma de las poblaciones, las cuales se pueden detectar mediante técnicas moleculares, denominadas “marcadores moleculares”. Los marcadores moleculares son particularmente útiles para la medición de la variabilidad genética y la estructura genética de una población.

Con los avances recientes en técnicas moleculares, es posible utilizar diferentes “marcadores genéticos”. Existen al día de hoy una diversidad de marcadores, los cuales cuentan con diferentes características (Tabla 3). Los marcadores genéticos y/o marcadores moleculares pueden ser utilizados para aumentar la eficiencia de la selección de árboles semilleros.

El marcador de ADN dominante más comúnmente utilizado para medir la diversidad genética en plantas es la técnica de RAPD, son fragmentos de ADN polimórficos amplificados al azar, utilizados para la identificación de diferentes individuos de una misma especie. Estos marcadores son productos de amplificación de secuencias de ADN anónimas que utilizan cebadores simples, cortos y arbitrarios, por lo tanto, no requieren un conocimiento previo de una secuencia de ADN. Dentro de las ventajas de estos marcadores destacan su bajo costo, la eficiencia en el desarrollo de un gran número de marcadores de ADN en poco tiempo y el requerimiento de equipos menos sofisticados, lo que han hecho que la técnica de RAPD sea valiosa, aunque la reproducibilidad del perfil de RAPD sigue siendo el centro de debate. Por todo lo anterior, los marcadores RAPDs representan una de las técnicas más confiables y rentables en la evaluación de la diversidad o variabilidad genética, que resultan útiles a nivel poblacional para medir la respuesta a factores de estrés ambiental.

Adaptabilidad de las *Acacias* a factores ambientales

Existe una base de estudios científicos, que relacionan la variabilidad genética de las plantas con su capacidad para desarrollar tolerancia a factores ambientales de estrés como salinidad, metales pesados, suelos ácidos, sequía, temperaturas extremas y fuertes vientos. Dichos estudios demuestran como dicha adaptabilidad parece estar relacionada con su potencial y capacidad de fitorremediación y/o rehabilitación de suelos. Algunos investigadores han identificado a través de marcadores RAPDs, polimorfismos genéticos asociados a la tolerancia de ambientes salinos en el género de *Acacias* (*Acacia*



auriculiformis y *Acacia magnium*); otros también han detectado con estos marcadores, polimorfismos relacionados con la contaminación del suelo por cobre (Cu) en la especie *Silene paradoxa* L. (Caryophyllaceae).

Otros reportes señalan que *Acacia auriculiformis* ha demostrado una notable capacidad de tolerancia para sobrevivir y establecer simbiosis nodulares en ambientes ácidos ($\text{pH} \geq 2.0$); y en el caso de *Acacia confusa* y *Malaleuca armillaris* pueden sobrevivir a un pH más alto ($\text{pH} \geq 2.5$) en donde *Acacia confusa* puede nodular hasta con un $\text{pH} \geq 3.5$. Por lo que confirman que *Acacia auriculiformis* es una opción ecológicamente viable para la remediación de suelos mineros ácidos.

Otros investigadores concuerdan que el género de *Acacia*, presenta capacidad de adaptabilidad a suelos contaminados con metales pesados. Particularmente en el caso de *Acacia schaffneri* la cual demostró ser una planta que puede desarrollarse en suelos con presencia de Pb. Otros autores demostraron que *Acacia retinoides*, se desarrolla en suelos con otros metales pesados como As, Cd, Zn y Pb, mostrando ser una candidata prometedora para fitorremediación.

Conclusión

La presente revisión destaca la relevancia de las tecnologías de fitorremediación en la recuperación y limpieza de suelos contaminados, así como también el potencial que presentan las plantas del género de *Acacia*. Estas especies presentan alta capacidad de tolerancia y adaptación frente a factores de estrés tales como: suelos salinos, suelos contaminados con metales pesados, suelos ácidos o con pH bajo. Gracias a dicha adaptabilidad las *Acacias* demuestran ser excelentes candidatas para programas de fitorremediación. Al mismo tiempo, se ve la necesidad de continuar con la selección de árboles semilleros que presenten características genéticas favorables, con el fin de potenciar la rehabilitación de suelos contaminados. Asimismo, se resalta la utilidad de las técnicas de marcadores moleculares RAPDs que nos permiten evaluar la diversidad genética y de esta manera poder seleccionar especies de plantas con mayor capacidad de adaptación y eficacia fitorremediadora.

Bibliografía

- Basem, A., Jasim, D. J., Majdi, H. S., Mohammed, R. M., Ahmed, M., Al-Rubaye, A. H., & Kianfar, E. (2024). Adsorption of heavy metals from wastewater by chitosan: A review. *Results In Engineering*, 23, 102404. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102404>.
- Cherian, S., & Oliveira, M. M. (2005). Transgenic plants in phytoremediation: recent advances and new possibilities. *Environmental science & technology*, 39(24), 9377-9390.



- Cortés-Cabrera, H. E. (2013). Efecto de la temperatura en la germinación de *Acacia farnesiana* y *A. schaffneri* de diversas procedencias, y variación en vainas y semillas. Tesis (Maestría en Ciencias Forestales) Facultad de Ciencias Forestales Subdirección de Posgrado, UANL. <http://eprints.uanl.mx/3799/1/1080246061.pdf>.
- Covarrubias, S.A., and Cabriales, J.J. (2017). Contaminación ambiental por metales pesados en México: Problemática y estrategias de fitorremediación. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 33(esp01), 7-21. <https://doi.org/10.20937/rica.2017.33.esp01.01>
- Cui, E., Cui, B., Fan, X., Li, S., & Gao, F. (2021). Ryegrass (*Lolium multiflorum* L.) and Indian mustard (*Brassica juncea* L.) intercropping can improve the phytoremediation of antibiotics and antibiotic resistance genes but not heavy metals. *Science of the Total Environment*, 784, 147093. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147093>.
- Dehkordi, M. M., Nodeh, Z. P., Dehkordi, K. S., Khorjestan, R. R., & Ghaffarzadeh, M. (2024). Soil, air, and water pollution from mining and industrial activities: Sources of pollution, environmental impacts, and prevention and control methods. *Results in Engineering*, 102729. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102729>.
- Dikšaitytė, A., Kniūpytė, I., & Žaltauskaitė, J. (2023). Drought-free future climate conditions enhance cadmium phytoremediation capacity by *Brassica napus* through improved physiological status. *Journal of hazardous materials*, 452, 131181. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131181>.
- Doty, S. L., Shang, T. Q., Wilson, A. M., Tangen, J., Westergreen, A. D., Newman, L. A., & Gordon, M. P. (2000). Enhanced metabolism of halogenated hydrocarbons in transgenic plants containing mammalian cytochrome P450 2E1. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97(12), 6287-6291.
- Gajic, G., Djurdjevic, L., Kostic, O., Jaric, S., Mitrovic, M., and Pavlovic, P. (2018). Ecological Potential of Plants for Phytoremediation and Ecorestoration of Fly Ash Deposits and Mine Wastes. *Frontiers in Environmental Science*, 6: 124. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00124>.
- García-Quintero, A., & Palencia, M. (2021). A critical analysis of environmental sustainability metrics applied to green synthesis of nanomaterials and the assessment of environmental risks associated with the nanotechnology. *Science of the Total Environment*, 793, 148524. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148524>.
- Gomez-Ros, J., Garcia, G., & Peñas, J. (2013). Assessment of restoration success of former metal mining areas after 30 years in a highly polluted Mediterranean mining area: Cartagena-La Unión. *Ecological Engineering*, 57, 393-402.



<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.04.044>

- Greenberg, B. M., Huang, X. D., Gurska, Y., Gerhardt, K. E., Wang, W., Lampi, M. A., & Glick, B. R. (2006). Successful field tests of a multi-process phytoremediation system for decontamination of persistent petroleum and organic contaminants. In: *Proceedings of the 29. Arctic and Marine Oilspill Program (AMOP) Technical Seminar* (pp. 389-400).
- Haghighizadeh, A., Rajabi, O., Nezarat, A., Hajyani, Z., Haghmohammadi, M., Hedayatikhah, S., & Beni, A. A. (2024). Comprehensive analysis of heavy metal soil contamination in mining Environments: Impacts, monitoring Techniques, and remediation strategies. *Arabian Journal of Chemistry*, 105777. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2024.105777>.
- Li, H., Yao, J., Sunahara, G., Min, N., Li, C., & Duran, R. (2023). Quantifying ecological and human health risks of metal (loid) s pollution from non-ferrous metal mining and smelting activities in Southwest China. *Science of the Total Environment*, 873, 162364. [https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440\(22\)01669-3](https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(22)01669-3).
- Ma, L., Rao, X., Lu, P., Huang, S., Chen, X., Xu, Z., & Xie, J. (2015). Acid-tolerant plant species screened for rehabilitating acid mine drainage sites. *Journal Of Soils And Sediments*, 15(5), 1104-1112. <https://doi.org/10.1007/s11368-015-1128-0>
- Mackay, A. K., Taylor, M. P., Munksgaard, N. C., Hudson-Edwards, K. A., & Burn-Nunes, L. (2013). Identification of environmental lead sources and pathways in a mining and smelting town: Mount Isa, Australia. *Environmental Pollution*, 180, 304-311. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.05.007>
- Mengoni, A., Gonnelli, C., Galardi, F., Gabbrielli, R., & Bazzicalupo, M. (2000). Genetic diversity and heavy metal tolerance in populations of *Silene paradoxa* L. (Caryophyllaceae): a random amplified polymorphic DNA analysis. *Molecular Ecology*, 9(9), 1319-1324. <https://doi.org/10.1046/j.1365-294x.2000.01011.x>
- Nguyen, T., Moghaieb E.A., Saneoka, H., and Fujita, K. (2004). RAPD markers associated with salt tolerance in *Acacia auriculiformis* and *Acacia mangium*. *Plant Science*. 167: 797–805. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2004.05.016>
- Richardson, D. M., Carruthers, J., Hui, C., Impson, F. A. C., Miller, J. T., Robertson, M. P., Rouget, M., Roux, J. J. L., & Wilson, J. R. U. (2011). Human-mediated introductions of Australian acacias – a global experiment in biogeography. *Diversity And Distributions*, 17(5), 771-787. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2011.00824.x>
- Soltani, N., Keshavarzi, B., Moore, F., Sorooshian, A., & Ahmadi, M. R. (2017). Distribution of potentially toxic elements (PTEs) in tailings, soils, and plants around Gol-E-Gohar iron



mine, a case study in Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 18798-18816. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9342-5>.

Tang, C., Chen, Y., Zhang, Q., Li, J., Zhang, F., & Liu, Z. (2019). Effects of peat on plant growth and lead and zinc phytostabilization from lead-zinc mine tailing in southern China: Screening plant species resisting and accumulating metals. *Ecotoxicology and environmental safety*, 176, 42-49. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.03.078>.

Winters, G., Otieno, D., Cohen, S., Bogner, C., Ragowloski, G., Paudel, I., and Klein, T. (2018). Tree growth and water-use in hyper-arid *Acacia* occurs during the hottest and driest season. *Oecologia*, 188, 695-705. <https://doi.org/10.1007/s00442-018-4250-z>.

Cruzas dialélicas para el mejoramiento genético de caracteres fisiológicos de semilla de soya

Juan Samuel Guadalupe Jesús Alcalá-Rico.
Neymar Camposeco-Montejo.
Ricardo Avilés-Ruiz.
Odilón Gayosso-Barragan.
José Ángel Marroquín-Morales.
Oscar Guadalupe Barrón-Bravo.





Resumen

La soya es un cultivo de gran relevancia debido a su alto contenido de aceite y proteína. En México, su producción representa apenas el 3% del consumo nacional, lo que obliga al país a depender de importaciones para satisfacer la demanda, ocupando el cuarto lugar entre los principales países importadores de grano de soya. En este contexto, la calidad fisiológica de la semilla se ha convertido en un desafío tanto global como nacional, especialmente en sistemas de producción intensiva y bajo condiciones climáticas cambiantes, lo que genera costos adicionales y afecta negativamente los rendimientos. Esta revisión aborda la importancia de garantizar una buena calidad fisiológica de la semilla, destacando el papel fundamental del fitomejoramiento en el desarrollo de características que influyen directamente en dicha calidad. Se menciona la identificación de genes relacionados con la calidad fisiológica de semilla, describiéndose la metodología para su incorporación mediante selección asistida por marcadores. Asimismo, se mencionan los cruzamientos dialélicos como herramienta clave en el mejoramiento genético de plantas, detallando los principales métodos empleados y los modelos estadísticos fijos y aleatorios aplicables en su análisis. Se discuten los beneficios y limitaciones del uso de cruzamientos dialélicos en soya para mejorar la calidad fisiológica de la semilla, incluyendo valores de heredabilidad de los caracteres evaluados. Se describe la aptitud combinatoria y efectos genéticos relacionados, así como el uso de la esperanza de cuadrados medios en la estimación de estos efectos. Se presentan resultados de investigaciones recientes que evalúan caracteres fisiológicos de semillas de soya mediante cruas dialélicas, aportando evidencia sobre su potencial en programas de mejoramiento genético.

Palabras clave: *Glycine max*, vigor, genes, aptitud combinatoria.



Introducción

La soya es uno de los cultivos oleaginosos más importantes en el mundo, debido a la cantidad de aceite y proteína que contiene su grano, componentes que se consideran esenciales para la nutrición y salud humana. Por tal motivo, es necesario que esta especie atienda el crecimiento poblacional con una mayor producción por unidad de superficie, además de superar los efectos del cambio climático. En México a pesar de que se producen 199,162 t, se tienen que importar 6,456,000 t, lo que indica que se requieren 6,655,162 t para satisfacer las necesidades del país. Uno de los factores que limita la producción de soya es la calidad fisiológica de la semilla. Cabe destacar que la calidad de la semilla es el punto de partida para una producción optima; por ello, es indispensable contar con plántulas vigorosas que respondan correctamente a las condiciones de siembra para obtener un rendimiento adecuado. En este contexto, el fitomejoramiento desempeña un papel clave para el mantenimiento de suministro de alimentos, enfocándose en producir plantas agrícolas con mayor rendimiento de grano, calidad nutricional y mayor capacidad de adaptación a los cambios ambientales. En el caso del mejoramiento genético de soya, es necesario tener conocimiento de los genes relacionados con caracteres de calidad fisiológica de semilla, su heredabilidad, así como los parámetros genéticos de los genotipos disponibles para desarrollar poblaciones segregantes con fines productivos. Con respecto a lo anterior, los experimentos de dialélicos se basan en realizar todos los cruzamientos posibles de un conjunto de genotipos, lo que permite cuantificar los parámetros genéticos, como la aptitud combinatoria general, la aptitud combinatoria específica, efectos recíprocos, efectos maternos y heterosis. Estos parámetros genéticos permiten dirigir los cruzamientos de manera estratégica y maximizar la variabilidad genética de las poblaciones segregantes. Así mismo, los efectos genéticos en la calidad fisiológica de la semilla contemplan la integridad de las estructuras y procesos fisiológicos que permiten altos índices de viabilidad, donde la germinación y el vigor son los principales indicadores de esta calidad y de la resistencia de la semilla.

El origen y distribución de la soya: su llegada a México

El nombre de la soya (*Glycine max*) proviene de la palabra japonesa "Shoy", que significa alimento. Su origen y distribución se situó en China, donde los habitantes la consideraron como uno de los granos más sagrados. Esto se debe a que su ancestro emparentado la soya silvestre (*Glycine soja*), se encuentra en todo el territorio chino. Además, el país tiene los registros más antiguos del cultivo de soya. Así mismo, se habla sobre la soya durante el mandato de la dinastía Chou plasmando las primeras descripciones a detalle de la planta de soya escrito por el Emperador Chino Shen Nung en el año de 2838 A.C.

Se estima que la domesticación de la soya ocurrió entre 1700 y 1100 A.C., en el contexto histórico de la dinastía Shang, una de las más antiguas de la civilización china. Más tarde, en el siglo III A.C. la soya se distribuyó a distintos países del continente asiático



como Corea y Japón. A finales de las últimas décadas del siglo XIX, botánicos colectaron muestras de semillas en China y Manchuria, las cuales fueron llevadas al oeste de Europa y Estados Unidos, lo que marcó el inicio de su introducción en Occidente.

En el año 1712, en Europa se enteraron del alto potencial de esta especie gracias a los escritos de Engelbert kaemfer, quien estuvo en Japón de 1691 a 1692. Años después se intentó promover la producción de soya en la región, pero no tuvo éxito hasta inicios del siglo XX. Las primeras muestras de soya cultivadas en Europa fueron sembradas en París en 1740 y en Inglaterra en 1790. Sin embargo, su producción nunca tuvo una relevancia comercial, debido posiblemente a los factores climáticos de estas regiones.

En 1804, se mencionó por primera vez el cultivo de soya en Estados Unidos. Posteriormente, en 1829 se sembró en el Jardín Botánico de Cambridge en Massachussets dándole la utilidad de forraje para alimento de ganado por su peculiaridad trepadora. Aunque su aceptación en el país fue lenta, el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos promovió el desarrollo y la producción de las primeras variedades en Norteamérica. Esto condujo, durante el siglo XX, a un creciente interés por el aceite y la pasta derivados del grano de soya, lo que incentivó su producción comercial en la región.

En América Latina, la soya se introdujo de Estados Unidos con la finalidad de combatir la desnutrición en familias de escasos recursos que no podían adquirir alimentos proteicos. En 1950, México ya contaba con soya, sin embargo, los agricultores dejaron de sembrarla debido a la incertidumbre sobre las ventas de las cosechas. Por otra parte, en el año 1958 se retomó el cultivo de soya en el estado de Sonora. En 1970, la Asociación Americana de la Soya (ASA) fomentó la creación de un mercado para el consumo de esta especie, promoviendo su incorporación en la alimentación. Desde entonces, se han llevado a cabo estudios e investigaciones destacando la importancia de la proteína de soya en distintos programas nutricionales para mejorar el estado alimenticio de la población. Así mismo, gracias a su gran valor nutricional y precio accesible que tenía en ese tiempo, se desarrollaron productos a base de proteína de soya con el propósito de sustituir la proteína de origen animal (Figura 1).

Descripción taxonómica y botánica de la soya

Clasificación taxonómica

Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida
Subclase	Rosidae
Orden	Fabales
Familia	Fabaceae
Sub Familia	Faboideae
Tribu	Phaseoleae
Subtribu	Glycininae
Género	Glycine
Especie	<i>Glycine max</i> (L.) Merrill

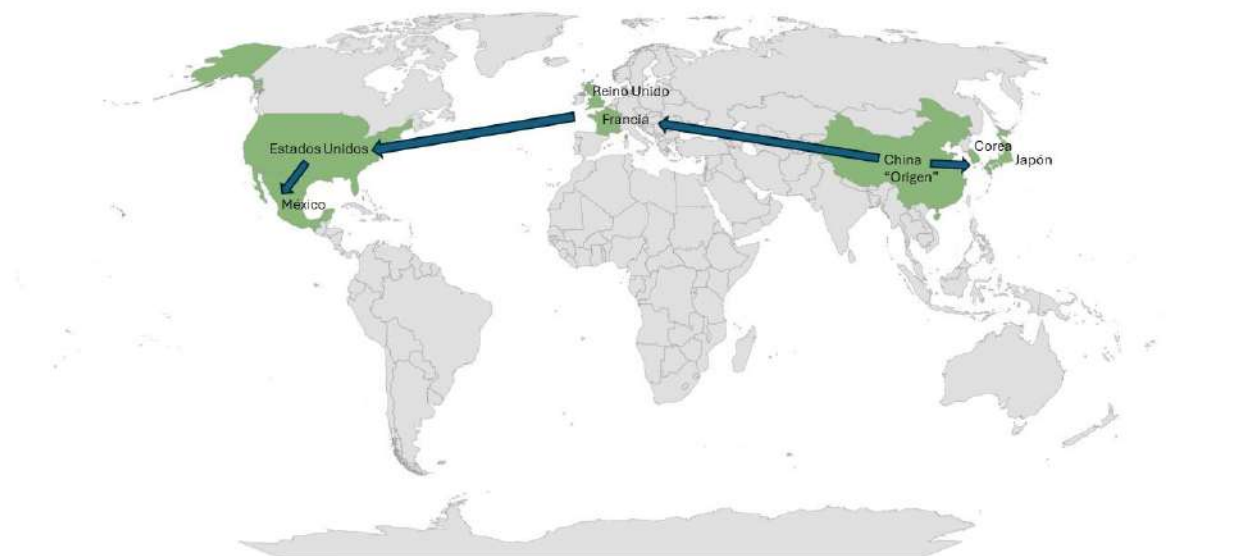


Figura 1. El origen y distribución de la soya hasta su llegada a México

Tallo

El desarrollo del tallo de la soya inicia con la emergencia del hipocótilo y concluye en la formación de la semilla. La soya presenta un tallo rígido y erecto ramificado de color verde con vellosidades muy finas y espesas que pueden variar entre tonos gris y café. Alcanza una altura de 40 a 150 cm en promedio, estos valores dependen de su hábito de crecimiento (determinado o indeterminado), número de nudos que lleguen a formarse en la planta, sensibilidad al fotoperiodo, de la variedad y las condiciones ambientales (Figura 2a).

Raíz

Durante la germinación, la radícula se desarrolla al interior del suelo, formando la raíz principal de la cual se desarrollan raíces secundarias y laterales. La raíz principal puede tener una longitud de hasta 2 m. Sin embargo, la mayoría de las raíces tienen una longitud de 15 a 20 cm. Por esta razón la raíz se considera como pivotante. Los pelos radiculares comienzan a aparecer a los cuatro días después de la germinación. Por otro lado, las raíces laterales presentan nódulos debido a la presencia de la bacteria *Bradyrhizobium japonicum* que favorece la fijación de nitrógeno atmosférico (Figura 2b).

Hojas

Las primeras hojas de la soya se desarrollan en el nudo inmediatamente superior a los cotiledones, siendo unifoliadas y opuestas. A medida que la planta crece, aparecen hojas



secundarias tanto en el tallo como en las ramificaciones, las cuales son trifoliadas, aunque ocasionalmente pueden tener hasta cinco foliolos. Estas hojas se disponen de manera alterna y se presentan encima del segundo nudo unifoliado. Los foliolos pueden ser de forma ovalada o lanceolada presentando bordes enteros. El tamaño de los foliolos es de 4 a 20 cm de largo y de 3 a 10 cm de ancho. El color de los foliolos en etapas vegetativas hasta R6 es verde, aunque la tonalidad del color depende de la variedad, edad del cultivo y condiciones climáticas. En la etapa fenológica R7, los foliolos empiezan a tornarse amarillos (Figura 2c).

Flor

La floración inicia en la etapa fenológica R1, las flores aparecen en las axilas de las ramificaciones y en los raquis de las hojas. Estas se agrupan en racimos compactos o alargados de 5 a 10 flores, cada una con una longitud de 6 a 7 mm de longitud. Se considera como autógama por lo que la polinización cruzada no supera el 1%. La flor es perfecta o completa, ya que posee los órganos sexuales masculinos y femeninos en la misma estructura. Está compuesta por un cáliz tubular, una corola de cinco pétalos que pueden ser de color blanco o violeta, además de un ovario, 10 estambres y un pistilo. El periodo de floración dura alrededor de 15 días y por lo general las variedades determinadas presentan mayor número de flores en cada racimo en comparación a las indeterminadas (Figura 2d).

Vainas

Las vainas se desarrollan entre las etapas fenológicas R3 y R6, son de color verde con vellosidades café o gris. Al alcanzar la madurez, se tornan de color amarillo o marrón. Su forma puede ser recta o ligeramente curvada, teniendo una longitud de 2 a 7 cm y un diámetro de 1 a 2.5 cm, dependiendo de la etapa fenológica en la que se encuentren. Cada vaina contiene de 1 hasta 5 semillas de soya, siendo más común encontrar de 2 a 3 semillas por vaina (Figura 2e).

Semillas

La semilla de soya puede presentar una forma esférica, aplanada o elongada; su color varía de amarillo, verde, marrón o negro. La testa tiene un hilio cuya forma y color pueden diferir según la variedad. La estructura de la semilla está conformada de cutícula y embrión, donde el embrión se forma por los dos cotiledones. Posee un peso de 2 hasta 30 g por cada 100 semillas, dependiendo del genotipo o variedad utilizada (Figura 2f).



Figura 2. Partes que conforman la planta de soja. a) Tallo, b) Raíz, c) Hojas, d) Flor, e) Vainas, f) Semillas.

Importancia de la soja

La soja es el cultivo oleaginoso más relevante a nivel mundial, su grano es una fuente importante de aceite para usos industriales (95% aceite comestible y el resto para biocombustibles, jabones y otros); además, también contiene proteína de alta calidad nutricional para la alimentación ganadera y acuícola. En cuanto a su contenido de aceite, el grano de soja presenta entre un 15 y 20 %, distribuido en ácidos grasos como el palmítico, esteárico, oleico, linoleico y linolénico. Por otra parte, su concentración de proteína oscila entre el 42 y 43.3 %, que aporta el 90% de aminoácidos totales (alanina, arginina, asparagina, cisteína, glutamina, glicina, histidina, isoleucina, leucina, lisina, metionina, fenilalanina, prolina, serina, treonina, triptófano, tirosina y valina). Debido a su alto valor nutricional, la soja es considerada como una materia prima clave para las personas que consumen productos veganos sin lactosa, como la leche de soja y el tofu entre otros. Se estima que para el año 2025 se duplique la demanda de proteína animal, lo que genera preocupaciones ambientales y de salud de acuerdo con su entorno y consumo, por lo que la harina de soja es una alternativa prometedora. Además de su impacto en la alimentación, el cultivo de soja proporciona beneficios al ecosistema del suelo al asociarse con rizobios y hongos micorrícicos arbusculares, los cuales ayudan a la sostenibilidad de los cultivos. La interacción de la soja con la bacteria *Bradyrhizobium*



japonicum y los hongos micorrícicos arbusculares es crucial para sistemas de producción agrícola de bajos insumos, ya que mejora la calidad, sostenibilidad y productividad del suelo a través de la fijación de nitrógeno atmosférico y de proliferación de hongos solubilizadores de fosfato.

Importación, exportación y producción de soya a nivel mundial

Principales países importadores de soya

En el año 2023, China encabezó la lista de países importadores de soya con un volumen de 112 millones de toneladas que representó el 63%; seguido de la Unión Europea que importó 13.5 millones de toneladas (8%); mientras que Argentina se posicionó en tercer lugar, con 7.8 millones de toneladas (4%) y el cuarto lugar lo ocupó México con 6.5 millones de toneladas que fue el 4% del total de importaciones mundiales.

Principales países exportadores de soya

Los cuatro países que exportaron mayor cantidad de soya fueron en primer lugar Brasil representando el 59% de las exportaciones con 104.2 millones de toneladas; en segundo lugar, estuvo Estados Unidos con 26% lo que equivale a 46.1 millones de toneladas; así mismo el tercer lugar lo ocupó Paraguay con 4%, exportando 8 millones de toneladas, mientras que Argentina se posicionó en cuarto lugar con 5.1 millones de toneladas equivalente a 3% de exportaciones a nivel mundial.

Principales países productores de soya

En 2023, Brasil encabezó la producción mundial de soya con 154.5 millones de toneladas que representaron el 39% del total. Por otro lado, Estados Unidos ocupó el segundo lugar con 113.3 millones de toneladas equivalente al 29%. Argentina se posicionó en tercer lugar con 48.2 millones de toneladas (12%) y China ocupó el cuarto lugar con 20.8 millones de toneladas (5%).

Situación de la producción en México

En el año 2023, se produjo soya en 11 estados de la República Mexicana. De acuerdo con la superficie sembrada, en primer lugar, se encuentra el estado de Campeche con 45 mil hectáreas sembradas, alcanzando una producción de 111.5 mil toneladas a través de un rendimiento promedio de 2.48 t/ha. En segundo lugar, se posicionó Yucatán con 13.5 mil hectáreas sembradas, de las cuales 864.5 fueron siniestradas, obteniendo una producción de 28.7 mil toneladas, con un rendimiento promedio de 2.27 t/ha. En tercer lugar, se ubicó Chiapas con un área sembrada de 12.9 mil hectáreas produciendo 24.8 mil toneladas cuyo rendimiento fue de 1.91 t/ha. En cuarto lugar, se posicionó Veracruz con una siembra de



11 mil hectáreas que generaron 16 mil toneladas con un rendimiento de 1.52 t/ha. En quinta posición estuvo el estado de Tamaulipas que sembró 6.4 mil hectáreas, sin embargo, fue el estado con mayor número de hectáreas siniestradas (3 mil hectáreas), resultando en una producción de 4.9 mil toneladas con rendimientos de 1.47 t/ha. En la sexta posición se ubicó Quintana Roo con 2.7 mil hectáreas sembradas que produjeron 4.3 mil toneladas, lo que equivalió a un rendimiento de 1.62 t/ha. La séptima posición la ocupó el estado de San Luis Potosí con una siembra de 2.1 mil toneladas, de las cuales se siniestraron 500 hectáreas, por lo que produjo 2.7 mil toneladas con un rendimiento de 1.69 t/ha. El estado de Sinaloa se posicionó en octavo lugar al haber sembrado 1.8 mil hectáreas de soya, las cuales produjeron 4.8 mil toneladas y el mayor rendimiento registrado, con 2.7 t/ha. Sonora quedó en novena posición con 540 hectáreas sembradas, generando 1.4 mil toneladas de soya con un rendimiento de 2.57 t/ha. Chihuahua, en el décimo lugar, sembró 120 hectáreas las cuales produjeron 266 toneladas con un rendimiento de 2.22 t/ha. Finalmente, Nuevo León ocupó la última posición con solo 6 hectáreas sembradas, produciendo 4.8 toneladas, con un rendimiento de 0.8 t/ha. A nivel nacional se sembraron 95.5 mil hectáreas en los estados productores de soya, de las cuales se siniestraron 4.4 mil hectáreas sembradas, produciendo 199.2 mil toneladas, con un rendimiento promedio de 1.9 t/ha (Figura 3).



Figura 3. Producción de soya en miles de toneladas de estados de la República Mexicana

Factores que limitan la productividad de la soya

El cambio climático altera la productividad de los cultivos debido a que las plantas están expuestas a factores bióticos y abióticos que ocasionan estrés. La palabra estrés indica una



desviación de las condiciones naturales. Los factores abióticos están relacionados con la salinidad, sequía, inundaciones, altas o bajas temperaturas, metales pesados, etc., los cuales provocan alteraciones a nivel celular y tensiones secundarias como daño en la membrana celular, estrés osmótico y desnaturalización de proteínas. Así mismo, estos cambios climáticos favorecen la proliferación de factores bióticos, como hongos, bacterias, virus, nematodos y otros organismos, que pueden causar afectaciones reversibles e irreversibles en las estructuras y funcionamiento de la planta. Ambos factores bióticos y abióticos impactan negativamente el desarrollo y la productividad de la soya. Además, en cuestión de los factores bióticos, el uso de agroquímicos para controlar estos organismos conlleva una significativa contaminación ambiental, riesgos para la salud y mayores costos de producción.

Por lo anterior, es necesario buscar alternativas que garanticen la productividad de los cultivos y la seguridad alimentaria considerando que la respuesta de las plántulas a factores bióticos y abióticos está relacionada con aspectos fisiológicos y morfológicos en las células. En este capítulo nos centraremos únicamente a los aspectos fisiológicos que influyen en la calidad de la semilla.

La calidad fisiológica de la semilla de soya se ha convertido en un problema de escala mundial, especialmente en contextos de producción intensiva y condiciones climáticas cambiantes. Las lluvias prolongadas y alta humedad durante la cosecha deterioran la semilla. Las altas temperaturas durante el llenado de grano generan semillas verdes, arrugadas o inmaduras. Por otro lado, el eje embrionario expuesto de la semilla de soya la hace vulnerable al daño físico. A esto se le adiciona que una semilla con bajo vigor es susceptible al ataque de patógenos como *Phomopsis*, *Fusarium* y *Sclerotinia*, los cuales reducen el poder germinativo.

En México, la calidad fisiológica de la semilla de soya también representa un desafío significativo, particularmente en regiones productoras como Tamaulipas y San Luis Potosí. Diversos estudios han demostrado que las condiciones ambientales influyen de manera determinante en atributos fisiológicos clave como la viabilidad, la germinación y el vigor de la semilla. El alto vigor de la semilla es indispensable para un rendimiento alto y estable. Las semillas con alto vigor germinan y emergen de manera uniforme y rápida bajo diferentes condiciones de campo mostrando resistencia a condiciones ambientales adversas.

Calidad fisiológica de la semilla: clave para una producción eficiente

En la actualidad, la demanda de cultivos sigue en aumento debido al crecimiento constante de la población humana. La soya, uno de los 16 principales cultivos sembrados a nivel mundial, es esencial para la alimentación, ya que figura entre los productos más requeridos por la humanidad; su semilla representa el insumo clave para garantizar un



desarrollo agrícola sostenible a largo plazo, permitiendo incrementar la producción y productividad de este cultivo, lo que contribuye a una adecuada nutrición humana y a la seguridad alimentaria. En este contexto, la producción y utilización de semillas de alta calidad son indispensables para el éxito de la producción agrícola de la soya. La calidad de la semilla influye directamente en el establecimiento del cultivo, así como en la salud y en el incremento del rendimiento (Figura 4). Además, desempeña un papel clave en la resistencia a estreses bióticos y abióticos, favoreciendo la adaptación de las plantas a diversas condiciones adversas que representan un alto costo fisiológico. La calidad fisiológica se refiere a la germinación, la emergencia y el potencial de desarrollo de las plántulas, consideradas como las fases más críticas y vulnerables del ciclo de cultivo. Una calidad fisiológica deficiente puede provocar la necesidad de resembrar, lo que implica costos adicionales y en muchos casos, una emergencia tardía que reduce los rendimientos esperados. Por lo anterior, el agricultor debe tomar decisiones considerando la accesibilidad al campo, los factores económicos, capacidad del cultivo para compensar la baja densidad a través de la resiembra, así como disponibilidad de tiempo y recursos.



Figura 4. Establecimiento del cultivo de soya a campo abierto mostrando su vigor



En condiciones óptimas, las semillas de diferentes genotipos suelen presentar alto porcentaje de germinación. Sin embargo, bajo condiciones de estrés, estos porcentajes pueden variar significativamente debido al vigor de cada semilla. Una buena calidad fisiológica en la semilla permite que la plántula tenga la fuerza suficiente para emerger con éxito y establecerse en campo como una plántula normal. En relación con lo anterior, la calidad fisiológica implica que el vigor de las semillas se relacione con la capacidad de las mismas para el establecimiento de una densidad adecuada de plantas, con el propósito de obtener rendimientos óptimos con una eficiencia en el uso de recursos. Esta calidad abarca diversas propiedades de la semilla que determinan el potencial para la emergencia y desarrollo rápido y uniforme de plántulas normales en diversas condiciones de campo, lo que favorece las condiciones agronómicas comunes. Además, la información de la calidad fisiológica de la semilla es importante para la planificación y predicción de la próxima siembra, así como para la producción, control de calidad y comercialización de semillas. El incremento de esta calidad fisiológica de semilla es posible a través del mejoramiento genético, ya que está relacionada con parámetros genotípicos y fenotípicos.

Metodologías para estimar el vigor de la semilla

- ☐ **Prueba de germinación estándar:** se evalúa el porcentaje de semillas que producen plántulas normales bajo condiciones óptimas. Esta prueba puede ser de utilidad para determinar la viabilidad. Sin embargo, en ocasiones sobreestima el comportamiento en campo.
- ☐ **Envejecimiento acelerado:** las semillas se exponen a alta temperatura y humedad por varios días. Posteriormente se mide la germinación donde las semillas más vigorosas resisten mejor el estrés. Esta prueba es de utilidad para discriminar lotes de semilla con germinación similar, pero con diferente vigor.
- ☐ **Prueba de tetrazolio:** es una técnica bioquímica ampliamente utilizada para evaluar la viabilidad y el vigor de semillas de soya, proporcionando información rápida y detallada sobre el estado fisiológico del embrión, donde al formarse una tinción intensa y homogénea en la semilla se interpreta como de alto vigor.
- ☐ **Prueba de conductividad eléctrica:** mide la cantidad de electrolitos liberados por las semillas en agua. Las semillas con membranas dañadas liberan más electrolitos, lo que indica que tienen menor vigor. Esta prueba se considera rápida y efectiva para especies como la soya.
- ☐ **Prueba de frío o estrés hídrico:** se simulan condiciones adversas del campo, evaluándose la capacidad de emergencia bajo estrés ambiental.
- ☐ **Índice de velocidad de germinación:** se calcula el tiempo que tarda una semilla en germinar. En esta evaluación se consideran semillas más vigorosas, aquellas que germinaron más rápido y de forma uniforme.



Diversidad genética de la calidad fisiológica de semilla de soya

En los programas de mejoramiento genético de plantas es indispensable contar con una amplia diversidad genética con la finalidad de desarrollar estrategias que permitan la generación de variedades con características deseables adaptadas a una región específica. En cuestión de la soya, se ha identificado variación genética debida a la evolución de las plantas en distintos ambientes ecológicos. Además, se ha observado que las poblaciones silvestres presentan una mayor variabilidad genética en comparación con las variedades cultivadas. Con respecto a la calidad de la semilla, se ha determinado que sus componentes poseen variabilidad genética, lo que influye directamente en su desempeño. Asimismo, se ha comprobado la existencia de variabilidad genética en la calidad fisiológica de la semilla de genotipos de soya, confirmando que esta especie presenta una diversidad genética considerable.

La diversidad genética se refiere a la variabilidad de características hereditarias presentes entre diferentes genotipos con relación a la composición genética total de genotipos de una sola especie. A su vez, la variabilidad genética es un elemento fundamental para la diversidad genética que indica las diferencias entre una o varias características del cultivo. Esta variabilidad puede expresarse de manera anatómica, fisiológica, bioquímica o fenotípica, de características cuantitativas que están controladas por muchos genes o características cualitativas que están gobernadas por uno o pocos genes principales.

La diversidad genética varía tanto entre especies como dentro de ellas, y desempeña un papel fundamental en la evolución y conservación de las especies frente a entornos cambiantes. Por lo tanto, la diversidad contribuye a la capacidad de un cultivo para adaptarse a los cambios en los futuros entornos bióticos y abióticos, fortaleciendo su resiliencia ante condiciones adversas. La diversidad genética se encuentra en diversas fuentes fitogenéticas como criollos, parientes silvestres, mutantes, plantas elites de colecciones de germoplasma y variedades que actualmente se siembran. A partir de estas fuentes, se pueden formar líneas y variedades de mayor estabilidad para productores con pocos recursos en ambientes marginales que garanticen la producción de alimentos. Sin embargo, las especies que presentan poca variabilidad genética y mayor uniformidad fenotípica son más vulnerables a los cambios bióticos y abióticos, lo que dificulta su supervivencia y reproducción.

En este sentido, los recursos fitogenéticos desempeñan un papel esencial en la diversidad genética, ya que proporcionan genes adaptativos y productivos que contribuyen al incremento del rendimiento a largo plazo de manera sustentable. La diversidad genética es crucial para la supervivencia de las plantas en la naturaleza y para el mejoramiento genético de los cultivos. A partir de la diversidad genética de una especie es posible mejorar los cultivos, haciendo frente a los actuales y futuros desafíos a nivel mundial, garantizando el suministro de alimentos y la seguridad nutricional. Esto brinda



a los fitomejoradores la oportunidad de seleccionar genotipos superiores con el propósito de desarrollar nuevas variedades con calidad fisiológica de semilla superior.

Así mismo, frente a los efectos del cambio ambiental que provocan estrés biótico y abiótico en los cultivos, el desarrollo de variedades más resilientes cobra mayor importancia. A lo largo de la historia, la agricultura ha aprovechado la diversidad genética para satisfacer los requerimientos alimenticios para la subsistencia de la humanidad. No obstante, para cumplir con los objetivos del mejoramiento, es imprescindible preservar la mayor cantidad de recursos genéticos de la especie a mejorar.

Mejoramiento genético de caracteres fisiológicos de la semilla de soya

De 1965 a 1985 se desarrolló la revolución verde, donde el mejoramiento genético de plantas asociado con las tecnologías y estrategias de manejo de cultivos aumentó el rendimiento de los cultivos en un 56%. En lo que se refiere al fitomejoramiento, se definió como la aplicación de técnicas y procesos altamente complejos y no lineales por los factores genéticos y ambientales involucrados para expresar el potencial genético de las plantas y ha sido clave para mejorar las características deseables de los cultivos, el cual consta de tres fases principalmente: generación de variabilidad genética, selección y pruebas para identificar progenitores superiores y liberación de nuevas variedades. Para el desarrollo de nuevas variedades mejoradas que toleren los desafíos mundiales del cambio climático, los fitomejoradores hacen uso de la diversidad de recursos genéticos disponibles. La velocidad con la que se pueden lograr los objetivos del fitomejorador dependerán si la variación requerida existe o es necesario crearla. Por lo anterior, el mejoramiento genético de plantas ha tenido un impacto en la producción de alimentos y seguridad alimentaria mundial dado su enfoque para incrementar la producción, adaptación y tolerancia a factores bióticos y abióticos.

Por otro lado, una agricultura sostenible inicia con un correcto establecimiento de plántulas que permitan mayores rendimientos por unidad de superficie. Esto debido a que la superficie que se destina para la siembra de cultivos no se espera que aumente, inclusive se tiene la preocupación de la degradación de suelos por la agricultura. A pesar de que la domesticación de los cultivos ha mejorado sus características, es necesario producir semillas que les permitan tener adaptación en el futuro. En la actualidad se demanda variedades de soya con buen rendimiento asociado a su alta calidad fisiológica. Por lo tanto, uno de los desafíos a los cuales se enfrentan los fitomejoradores es el desarrollo de variedades con buena calidad fisiológica, las cuales presenten buena resiliencia al cambio climático. Para esto, se hace uso de herramientas de mejoramiento y métodos que incorporen la diversidad genética para desarrollar nuevas variedades que cumplan con estas demandas y requerimientos. Puesto que, las plantas de soya con buena calidad fisiológica aseguran la productividad de poblaciones mejoradas. En este sentido, mejorar



la calidad fisiológica de la semilla es uno de los principales objetivos de la industria agrícola y de las empresas semilleras, ya que es el punto de partida para un buen establecimiento del cultivo y garantiza el desarrollo de plantas vigorosas que tienen mayor capacidad de tolerar los estreses bióticos y abióticos. Así mismo, a través del fitomejoramiento se busca mejorar la tecnología para la selección de líneas de soya con semillas de alta calidad fisiológica. Esta calidad está controlada tanto por el genotipo como por las condiciones ambientales y su interacción. En la parte genética, los rasgos que contemplan la calidad fisiológica están controlados por diferente número de genes que pueden influir en el rendimiento y su estabilidad. Por lo anterior, se ha reportado avance genético en las características relacionadas con calidad fisiológica de la semilla soya, donde se han identificado los genes Glyma.03G256700, glima.06G027200, Glyma.06G143400, Glyma.06G147100, Glyma.06G217400, Glyma.16G104400, Glyma.06G216300, Glyma.16G114600, Glyma.16G114600, Glyma.06G145300, glima.06G215100, glima.06G215100, Glyma.06G215200, Glyma.15G243200, Glyma.16G110700, glima.16G111300, Glyma.16G113000 y glima.16G113100, los cuales mejoran esta calidad expresando el vigor de la semilla ante al cambio climático. De igual forma se han identificado QTL relacionados con la calidad fisiológica de la semilla qIR-02, qIR-03, qIR-08, qIR-12, qIR-14, qGI-03, qGI-05, qGI-6, qGI-10, qGI-12, qGI-15, qGI-15.1, qGP-03, qGP-06, qGP-07, qGP-13, qGR-03, qGR-06, qGR-09, qGR-12, qGR-16, qGR-18, qNSR-06, qSVI-16 y qVI-16. Además, se han detectado tres marcadores SSR (Satt371, Satt453 y Satt618) asociados con el vigor y color de la semilla.

En un programa de mejoramiento genético, la incorporación de genes identificados es posible realizarse a través de la selección asistida por marcadores donde se desarrollan marcadores moleculares (SSR, SNP, AFLP) ligados a estos genes. Se analizan los parentales (resistentes y susceptibles) para confirmar la presencia o ausencia de los marcadores deseados. Se cruzan los parentales para generar poblaciones segregantes (F₁, F₂, etc.). Se analiza el ADN de las plantas en etapas tempranas, seleccionando las plantas que portan los marcadores ligados a genes de vigor. Así mismo, es indispensable realizar una validación fenotípica de las plantas seleccionadas genotípicamente para verificar que efectivamente expresan vigor. Por otro lado, si se busca mantener el fondo genético de una variedad comercial se hacen retrocruzamiento y se sigue usando la selección asistida por marcadores para conservar los genes de vigor.

La selección asistida por marcadores permite incorporar genes que son difíciles mediante selección fenotípica convencional ya sea por su alto costo, baja penetrancia o heredabilidad compleja; caracteres cuya expresión depende de entornos específicos o etapas de desarrollo; mantenimiento de alelos recesivos durante el retrocruzamiento y piramidar múltiples caracteres monogénicos o varios QTL para un carácter específico con herencia compleja.



Heredabilidad en caracteres de calidad fisiológica de semilla de soya

La heredabilidad es utilizada por los fitomejoradores para guiar sus programas de mejoramiento genético, ya que reflejan el potencial de selección para mejorar la calidad fisiológica de semillas de soya.

La heredabilidad para el porcentaje de germinación varía según el tipo de población, las condiciones ambientales y el método de evaluación, pero en general es moderadamente alta bajo condiciones controladas con valores entre 0.6 a 0.8, lo que indica que se puede mejorar el carácter mediante hibridación y selección temprana y directa. Por otro lado, la heredabilidad del porcentaje de germinación y emergencia en campo tiende a disminuir, sobre todo bajo condiciones de estrés hídrico o térmico. La heredabilidad del vigor de semilla y velocidad de germinación de soya puede alcanzar valores superiores al 0.6 bajo condiciones controladas. Por lo tanto, las magnitudes de la heredabilidad y la ganancia de selección esperada sugieren que la calidad fisiológica se puede mejorar con éxito.

Cruzas dialélicas

En el mejoramiento clásico, los fitomejoradores incorporan genes deseables a través de cruzamientos (Figura 5). Entre los métodos empleados, el diseño de cruzas dialélicas constituye una herramienta fundamental para evaluar el comportamiento genético de los progenitores, aplicándose en diversas características agronómicas, incluida la calidad fisiológica de la semilla.



Figura 5. Técnicos de campo realizando cruzamientos en genotipos de soya.

Así mismo, el diseño dialélico consiste en la realización de todas las cruzas simples posibles de p progenitores, lo que permite estimar parámetros genéticos relevantes como la acción génica aditiva y no aditiva. Si bien su implementación ofrece ventajas



significativas, también presenta ciertas limitaciones, las cuales se detallan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Aspectos positivos y negativos de los cruzamientos dialélicos

Positivo	Negativo o limitaciones
• Permite una evaluación de todas las posibles cruzas de un conjunto de genotipos. • Se pueden estimar efectos genéticos aditivos y no aditivos • Ayuda a identificar progenitores superiores. • Identifica combinaciones de genotipos que expresan vigor híbrido.	• Al aumentar el número de genotipos, el número de cruzas crece exponencialmente, implicando más tiempo, espacio y dinero. • Los resultados pueden variar de acuerdo con el ambiente. • Los análisis son complejos, especialmente si se incluyen efectos maternos, reciprocidad e interacción genotipo por ambiente • En la soya los cruzamientos controlados pueden ser difíciles o poco eficientes. • No es útil para caracteres cualitativos.

Por otra parte, los métodos de Griffing, Hayman, y Gardner y Eberhart son pilares en el análisis de cruzas dialélicas en genética cuantitativa.

Griffing (1956): Ideal para seleccionar progenitores con buena aptitud combinatoria, proporciona estimaciones de componentes de varianza, así como efectos maternos y recíprocos. Usa cuatro métodos según si se incluyen padres y cruzas recíprocas. En el método I se incluyen los p genotipos parentales, cruzas directas F_1 y recíprocas F_1 , generando p^2 combinaciones posibles. El método II contempla cruzas directas F_1 y genotipos parentales, obteniendo $p(p + 1)/2$ combinaciones. El método III considera cruzas directas F_1 y recíprocas F_1 , produciendo $p(p - 1)$ combinaciones. En método IV solamente están consideradas las cruzas directas F_1 , obteniendo $p(p - 1)/2$ combinaciones. El último método implica menos esfuerzo en comparación al resto, debido a que se deben realizar la mitad de los cruzamientos.

Hayman (1954): Utiliza gráficos Vr-Wr para detectar tipo de dominancia y estimar componentes genéticos. Requiere ciertos supuestos como ausencia de epistasis.

Gardner y Eberhart (1966): Se enfoca en heterosis, depresión endogámica y en separar efectos genéticos aditivos y no aditivos en cruzas híbridas. Muy útil en programas de mejoramiento comercial.



Modelo de efectos fijos o aleatorios

En el análisis genético de los diseños dialélicos, la elección entre modelos fijo y aleatorio depende del enfoque inferencial respecto a los progenitores. El modelo fijo se aplica cuando los padres se consideran como una población específica sobre la cual se desea realizar inferencias directas. Este modelo permite evaluar la aptitud combinatoria de los progenitores y facilita la identificación de combinaciones específicas superiores.

En contraste, el modelo aleatorio asume que los padres constituyen una muestra aleatoria extraída de una población más amplia. Bajo este enfoque, las inferencias se dirigen hacia la población general de la que provienen los padres, y se fundamentan en la estimación de componentes de varianza.

Según Griffing (1956), la selección del modelo adecuado debe basarse en la naturaleza del material parental y en los objetivos del estudio genético.

Aptitud combinatoria y efectos genéticos en la calidad fisiológica de la semilla de soya

En el ámbito vegetal la aplicación de diseños dialélicos en plantas proporciona información detallada sobre la aptitud combinatoria general (ACG), la aptitud combinatoria específica (ACE), así como los efectos recíprocos, maternos y sus respectivos componentes de varianza en las características evaluadas de un conjunto de progenitores. Esta información resulta esencial para orientar la selección de genotipos superiores y el direccionamiento estratégico de las poblaciones segregantes dentro de los esquemas de mejoramiento genético.

La aptitud combinatoria se refiere a la capacidad que tienen los progenitores de combinarse y transferir genes deseables a sus progenies. La ACG expresa el comportamiento medio de un genotipo en sus combinaciones híbridas. En contraste la ACE designa los cruzamientos que resulten mejor o peor, de acuerdo con el comportamiento de los genotipos involucrados. Los efectos recíprocos reflejan las diferencias de la contribución del híbrido de acuerdo a la función como progenitor paterno y materno que realiza cada genotipo para formarlo; por ejemplo, cruza directa $A \times B$ y su recíproco $B \times A$. El efecto materno está relacionado con la contribución del progenitor materno a su descendencia, este efecto es debido al ADN citoplasmático del progenitor femenino, el cual se encuentra en las mitocondrias y cloroplastos.

En este contexto, la esperanza de los cuadrados medios derivada de los análisis dialélicos constituye un elemento clave para descomponer la variación fenotípica en sus componentes genéticos. Esta herramienta estadística permite estimar la ACG, asociada a efectos genéticos aditivos, y la ACE, vinculada a interacciones no aditivas. La interpretación adecuada de estos parámetros facilita la comprensión de los mecanismos de herencia que subyacen en caracteres cuantitativos, contribuyendo significativamente



al diseño racional y eficiente de estrategias de mejoramiento genético.

De acuerdo con la información obtenida, cuando la ACG es más importante que la ACE se recomienda mejorar la población recurrente. Sin embargo, si ocurre lo contrario, la población debe mejorarse a través de hibridación. Así mismo, efectos de alta ACG se relacionan con mayor heredabilidad de caracteres deseables, bajos efectos ambientales y una mejor adaptabilidad, donde se puede obtener mayor respuesta a la selección de progenitores. Por otra parte, en los efectos de alta ACE pueden estar involucrados progenitores con diferentes niveles de ACG: valores positivos, negativos o incluso ambos. Esto hace fundamental la aptitud combinatoria en la genética aplicada incluyendo para fines de fitomejoramiento.

La aptitud combinatoria aplicada a la calidad fisiológica de semilla de soya es una estrategia poderosa en programas de mejoramiento genético, especialmente cuando se busca optimizar atributos como el vigor, la germinación y la tolerancia al envejecimiento. Sin embargo, la estimación de los parámetros genéticos relacionados con la calidad fisiológica de las semillas ha sido poco explorada. Se ha reportado que en el vigor de semilla de soya los efectos de ACG son mayores que los de ACE, sugiriendo que los efectos genéticos aditivos son más importantes que los no aditivos para el vigor. Por lo que los niveles de vigor se pueden mejorar mediante mejoramiento genético manteniendo altos rendimientos. En estudios sobre la germinación, emergencia de plántulas, índice de velocidad de emergencia de soya la participación de efectos aditivos ha sido más significativa que la de efectos no aditivos.

Conclusiones

El mejoramiento genético de soya mediante cruas dialélicas permite obtener información sobre la aptitud combinatoria general y aptitud combinatoria específica. Estos datos son fundamentales para tomar decisiones en la mejora de características fisiológicas de semilla, favoreciendo un establecimiento óptimo del cultivo con capacidad para tolerar estreses bióticos y abióticos, factores que influyen en el rendimiento y la estabilidad del cultivo.

Bibliografía

- Anderson, E. J., Ali, M. L., Beavis, W. D., Chen, P., Clemente, T. E., Diers, B. W., Graef, G. L., Grassini, P., Hyten, D. L., McHale, L. K., Nelson, R. L., Parrott, W. A., Patil, G. B., Stupar, R. M., & Tilmon, K. J. (2019). Soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] Breeding: History, Improvement, Production and Future Opportunities. En *Springer eBooks* (pp. 431-516). https://doi.org/10.1007/978-3-030-23400-3_12
- Anwar, F., Kamal, G. M., Nadeem, F., & Shabir, G. (2015). Variations of quality characteristics among oils of different soybean varieties. *Journal Of King Saud University - Science*,



28(4), 332-338. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2015.10.001>

- Arrutia, F., Binner, E., Williams, P., & Waldron, K. W. (2020). Oilseeds beyond oil: Press cakes and meals supplying global protein requirements. *Trends in Food Science & Technology*, 100, 88-102. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.03.044>
- Baker, R. J. (1978). Issues in diallel analysis. *Crop science*, 18(4), 533-536. <https://doi.org/10.2135/cropsci1978.0011183X001800040001x>
- Bhanu, A. N. (2017). Assessment of Genetic Diversity in Crop Plants - An Overview. *Advances In Plants & Agriculture Research*, 7(3). <https://doi.org/10.15406/apar.2017.07.00255>
- Castellanos, C. I. S., Lemes, E. S., Da Silva Almeida, A., Meneghello, G. E., & De Tunes, L. M. (2018b). Metodologías para el ensayo de envejecimiento acelerado en semillas de triticale. *Agrociencia*, 22(2). <https://doi.org/10.31285/agro.22.2.1>
- De Melo Castro, E., De Resende Von Pinho, É. V., De Oliveira Nunes, P. S., Santos, H. o. D., Leite, M. E., & De Lima, A. E. (2022). Genetic control of soybean seed quality using partial diallel. *Journal Of Seed Science*, 44. <https://doi.org/10.1590/2317-1545v44253577>
- Ceccarelli, S. (2015). Efficiency of plant breeding. *Crop science*, 55(1), 87-97. <https://doi.org/10.2135/cropsci2014.02.0158>
- Chauhan, J. S., Prasad, S. R., Pal, S., Choudhury, P. R., & Bhaskar, K. U. (2016). Seed production of field crops in India: Quality assurance, status, impact and way forward. *The Indian Journal of Agricultural Sciences*, 86(5), 563-79. <https://doi.org/10.56093/ijas.v86i5.58233>
- Cho, Y., & Scott, R. A. (2000). Combining ability of seed vigor and seed yield in soybean. *Euphytica*, 112(2), 145-150. <https://doi.org/10.1023/A:1003827930786>
- Ellegren, H., & Galtier, N. (2016). Determinants of genetic diversity. *Nature Reviews Genetics*, 17(7), 422-433. <https://doi.org/10.1038/nrg.2016.58>
- Fasahat, P., Rajabi, A., Rad, J. M., & Derera, J. J. B. B. I. J. (2016). Principles and utilization of combining ability in plant breeding. *Biometrics & Biostatistics International Journal*, 4(1), 1-24. <https://doi.org/10.15406/bbij.2016.04.00085>
- Fernández, F. G., Jardines, A. L. D., Vera, A. G., & Muñoz, N. S. (2018). La gobernanza de la cadena de valor de la soya en el sur de Tamaulipas (México): Mapeando los procesos. *Agroalimentaria*, 24(47):113-131.



- Ferreira, S. B., Gomes, B. H., Hamawaki, O. T., Dias, P. A. S., Hamawaki, C. D. L., Hamawaki, R. L., & Nogueira, A. P. O. (2024). Diallel and generation analysis in F2 soybean populations. *Agronomy Research*, 22(Special Issue 3), 1421–1433. <https://doi.org/10.15159/AR.24.100>
- Finch-Savage, W. E., & Bassel, G. W. (2016). Seed vigour and crop establishment: extending performance beyond adaptation. *Journal of Experimental Botany*, 67(3), 567-591. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv490>
- França-Neto, J. D. B., & Krzyzanowski, F. C. (2019). Tetrazolium: an important test for physiological seed quality evaluation. *Journal of Seed Science*, 41(3), 359-366. <https://doi.org/10.1590/2317-1545v41n3223104>
- Fu, Y. B. (2015). Understanding crop genetic diversity under modern plant breeding. *Theoretical and Applied Genetics*, 128, 2131-2142. <https://doi.org/10.1007/s00122-015-2585-y>
- Govindaraj, M., Vetriventhan, M., & Srinivasan, M. (2015). Importance of genetic diversity assessment in crop plants and its recent advances: an overview of its analytical perspectives. *Genetics research international*, 2015(1), 431487. <https://doi.org/10.1155/2015/431487>
- Green, D. E., & Pinnell, E. L. (1968). Inheritance of Soybean Seed Quality I. Heritability of Laboratory Germination and Field Emergence 1. *Crop Science*, 8(1), 5-11. <https://doi.org/10.2135/cropsci1968.0011183X000800010003x>
- Green, D. E., Luedders, V. D., & Moraghan, B. J. (1971). Heritability and Advance from Selection for Six Soybean Seed-quality Characters 1. *Crop Science*, 11(4), 531-533. <https://doi.org/10.2135/cropsci1971.0011183X001100040020x>
- Griffing, B. (1956). Concept of general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems. *Australian journal of biological sciences*, 9(4), 463-493.
- Hayman, B. I. (1954). The theory and analysis of diallel crosses. *Genetics*, 39(6), 789. <https://doi.org/10.1093/genetics/39.6.789>
- Kulembeka, H. P., Ferguson, M., Herselman, L., Kanju, E., Mkamilo, G., Masumba, E., Fregene, M., & Labuschagne, M. T. (2012). Diallel analysis of field resistance to brown streak disease in cassava (*Manihot esculenta* Crantz) landraces from Tanzania. *Euphytica*, 187(2), 277-288. <https://doi.org/10.1007/s10681-012-0730-0>
- Lamichhane, J. R., Debaeke, P., Steinberg, C., You, M. P., Barbetti, M. J., & Aubertot, J. N. (2018). Abiotic and biotic factors affecting crop seed germination and seedling emergence: a conceptual framework. *Plant and soil*, 432, 1-28. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3780-9>



- López, J., Torres, N., Saldivar, R., Reyes, I., & Argüello, B. (2016). Técnicas para evaluar germinación, vigor y calidad fisiológica de semillas sometidas a dosis de nanopartículas. In 2º Mini Simposio-Taller de Agronanotecnología. Centro de Investigación en química Aplicada (CIBQ) (pp. 129-140).
- Makumbi, D., Alvarado, G., Crossa, J., & Burgueño, J. (2018). SASHAYDIAL: A SAS program for Hayman's diallel analysis. *Crop Science*, 58(4), 1605-1615. <https://doi.org/10.2135/cropsci2018.01.0047>
- Meena, R. S., Vijayakumar, V., Yadav, G. S., & Mitran, T. (2018). Response and interaction of *Bradyrhizobium japonicum* and arbuscular mycorrhizal fungi in the soybean rhizosphere. *Plant Growth Regulation*, 84, 207-223. <https://doi.org/10.1007/s10725-017-0334-8>
- Monteiro, F. F., Bruzi, A. T., Silva, K. B., Pulcinelli, C. E., Soares, I. O., & Carvalho, M. L. M. (2021). Breeding for yield and seed quality in soybean. *Euphytica*, 217(12), 212. <https://doi.org/10.1007/s10681-021-02943-4>
- Onofri, A., Terzaroli, N., & Russi, L. (2021). Linear models for diallel crosses: a review with R functions. *Theoretical and Applied Genetics*, 134, 585-601. <https://doi.org/10.1007/s00122-020-03716-8>
- Paes de Melo, B., Carpinetti, P. D. A., Fraga, O. T., Rodrigues-Silva, P. L., Fiorese, V. S., de Camargos, L. F., & Ferreira, M. F. D. S. (2022). Abiotic stresses in plants and their markers: a practice view of plant stress responses and programmed cell death mechanisms. *Plants*, 11(9), 1100. <https://doi.org/10.3390/plants11091100>
- Pagano, M. C., & Miransari, M. (2016). The importance of soybean production worldwide. In Abiotic and biotic stresses in soybean production. (pp. 1-26). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801536-0.00001-3>
- Prado, J. P. D., Krzyzanowski, F. C., Martins, C. C., & Vieira, R. D. (2019). Physiological potential of soybean seeds and its relationship to electrical conductivity. *Journal of Seed Science*, 41(4), 407-415. <https://doi.org/10.1590/2317-1545v41n4214988>
- Preece, K. E., Hooshyar, N., & Zuidam, N. J. (2017). Whole soybean protein extraction processes: A review. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 43, 163-172. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.07.024>
- Qin, P., Wang, T., & Luo, Y. (2022). A review on plant-based proteins from soybean: Health benefits and soy product development. *Journal of Agriculture and Food Research*, 7, 100265. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2021.100265>



- Rodrigues, J. I. D. S., Arruda, K. M. A., Cruz, C. D., Barros, E. G. D., Piovesan, N. D., & Moreira, M. A. (2016). Genetic divergence of soybean genotypes in relation to grain components. *Ciência Rural*, 47, 20151258. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20151258>
- Rodríguez, J. C. G., Jiménez, A. G., Luciano, G. A., Loera, M. A. V., & Livera, A. H. (2014). Calidad fisiológica de la semilla de soya [*Glycine max*.(L.) Merr.], producida en dos regiones de México. *Revista Biológico Agropecuaria Tuxpan*, 2(1), 34-42.
- Sánchez-Ramírez, F. J., Mendoza-Castillo, M., Castillo-González, F., Cruz-Izquierdo, S., & Castro-Nava, S. (2017). Aptitud combinatoria de líneas endogámicas para la producción de híbridos de maíz (*Zea mays* L.) de cruza simple en condiciones de riego. *Agrociencia*, 51(4), 393-407.
- Singh, C. B., Dalal, M. A., & Singh, S. P. (1978). Genetic analysis of field germination in soybean (*Glycine max*.(L) merill.). *Theoretical and Applied Genetics*, 52(4), 165-169. <https://doi.org/10.1007/BF00282573>
- Solis, J. M., Vargas, J. V., Ortega, M. G. P., & Romero, A. S. (2010). Índice de velocidad de emergencia en líneas de maíz. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 1(3), 288-303.
- Swarup, S., Cargill, E. J., Crosby, K., Flagel, L., Kniskern, J., & Glenn, K. C. (2021). Genetic diversity is indispensable for plant breeding to improve crops. *Crop Science*, 61(2), 839-852. <https://doi.org/10.1002/csc2.20377>
- Staniak, M., Szpunar-Krok, E., & Kocira, A. (2023). Responses of soybean to selected abiotic stresses—Photoperiod, temperature and water. *Agriculture*, 13(1), 146. <https://doi.org/10.3390/agriculture13010146>
- Taylor, A. G. (2020). Seed storage, germination, quality, and enhancements. In *The physiology of vegetable crops*. (pp. 1-30). Wallingford UK: CABI.
- Toda, T. A., Sawada, M. M., & Rodrigues, C. E. (2016). Kinetics of soybean oil extraction using ethanol as solvent: Experimental data and modeling. *Food and Bioproducts Processing*, 98, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2015.12.003>
- Valliyodan, B., Qiu, D., Patil, G., Zeng, P., Huang, J., Dai, L., Chen, C., Li, Y., Joshi, T., Song, L., Vuong, T. D., Musket, T. A., Xu, D., Shannon, J. G., Shifeng, C., Liu, X., & Nguyen, H. T. (2016). Landscape of genomic diversity and trait discovery in soybean. *Scientific reports*, 6(1), 23598. <https://doi.org/10.1038/srep23598>
- Villalobos, F. J., Orgaz, F., & Fereres, E. (2017). Sowing and planting. In *Principles of agronomy for sustainable agriculture*. (pp. 217-227). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46116-8_16



Xu, Y., & Crouch, J. H. (2008). Marker-assisted selection in plant breeding: From publications to practice. *Crop Science*, 48(2), 391-407. <https://doi.org/10.2135/cropsci2007.04.0191>

El género *Bacillus* en la agricultura: diversidad de mecanismos para el crecimiento y protección de las plantas

Esmeralda Plascencia-Ulloa.
Lily X. Zelaya-Molina.
Ismael F. Chávez-Díaz.
Edgardo Bautista-Ramírez.
Zoe Reséndiz-Venado.
Nelly E. Cortés-Martínez.





Resumen

El género bacteriano *Bacillus* es fundamental para la agricultura sostenible, destacando por su capacidad de formar endosporas, estructuras que le confieren una ubicuidad y resistencia excepcionales a condiciones ambientales extremas como el calor y la desecación. Su diversidad genética y su capacidad metabólica son aprovechadas en la rizosfera para impactar positivamente el crecimiento y la salud vegetal. La función de *Bacillus* como bacteria Promotora del Crecimiento Vegetal (PGPR) se manifiesta principalmente en dos vías. Primero, en la nutrición, mediante la fijación biológica de nitrógeno a través de la enzima nitrogenasa y la crucial solubilización de fósforo, donde enzimas como las fitasas liberan el nutriente de formas insolubles, poniéndolo a disposición de la planta. Segundo, en la regulación hormonal, donde sintetiza y modula fitohormonas clave, incluyendo auxinas (como el AIA) que estimulan el desarrollo radicular, y otras como citoquininas y giberelinas que regulan el desarrollo. Además, mitiga el estrés al modular los niveles de etileno mediante la enzima ACC-desaminasa. Como agente de control biológico, *Bacillus* establece una defensa integral. Especies como *B. subtilis* son antagonistas eficaces, produciendo metabolitos y enzimas que atacan directamente a los patógenos. Además, utilizan la competencia por recursos y espacio, formando biopelículas que colonizan las raíces y liberando sideróforos para secuestrar el hierro. Particularmente, cepas como *Bacillus thuringiensis* extienden el biocontrol a las plagas, produciendo δ -endotoxinas con actividad insecticida altamente específica. La aplicación de *Bacillus* en forma de bioinoculantes y biofertilizantes para el tratamiento de semillas o aplicación al suelo es una estrategia probada, lo que lo consolida como un pilar en la reducción de agroquímicos y la transición hacia prácticas agrícolas más resilientes y sustentables.

Palabras clave: *Bacillus*, endospora, rizosfera, promotora de crecimiento vegetal, biocontrol.



Introducción

El género *Bacillus* fue inicialmente reconocido por Christian Gottfried Ehrenberg en 1835, quien lo utilizó para clasificar bacterias con forma de bastón. Posteriormente, Ferdinand Cohn, en 1872, aportó una característica fundamental al describirlas como bacterias productoras de endosporas resistentes al calor, lo cual se consolidó como su principal rasgo distintivo. Estas endosporas son estructuras de resistencia notables, capaces de sobrevivir a condiciones extremadamente adversas como altas temperaturas, desecación, la acción de desinfectantes e incluso la radiación.

Más allá de su capacidad para formar endosporas, las bacterias del género *Bacillus* presentan otras características generales relevantes. Son Gram-positivas, con una morfología bacilar y un tamaño que varía entre 0.5 y 10 μm . Su metabolismo puede ser aerobio o anaerobio facultativo, y su crecimiento óptimo generalmente ocurre a un pH neutro. Aunque la mayoría de las especies son mesófilas (con temperaturas de crecimiento óptimas entre 30 y 45 °C), exhiben un amplio intervalo de temperaturas en las que pueden prosperar. Su pared celular está conformada por varias capas de peptidoglicanos fuertemente entrecruzadas, formando un robusto andamiaje que mantiene la forma celular e incorpora ácidos teicoicos y lipoteicoicos. Esta riqueza fisiológica y estructural subraya amplia diversidad metabólica, la cual se asocia a funciones importantes como la promoción del crecimiento vegetal y el control de patógenos. La habilidad para producir endosporas (ovales o cilíndricas) es, sin duda, un mecanismo clave de resistencia frente a diversos tipos de estrés.

Clasificación Taxonómica de *Bacillus*

Las especies del género *Bacillus* se clasifican dentro de la taxonomía biológica de la siguiente manera: Reino Bacteria, Filo Firmicutes, Clase Bacilli, Orden Bacillales y Familia Bacillaceae.

Diversidad genética y clasificación de *Bacillus*

El género *Bacillus* abarca una **amplia diversidad genética**, que se manifiesta en sus más de 336 especies identificadas hasta la fecha, las cuales se agrupan según sus similitudes. Tradicionalmente, las **secuencias del gen ARNr 16S** han sido consideradas el estándar de oro para determinar la posición taxonómica de las especies bacterianas. Sin embargo, esta metodología presenta algunas limitaciones importantes. La presencia de múltiples copias del gen ARNr 16S dentro de un mismo organismo y el alto grado de similitud entre ellas a menudo dificultan la clara demarcación entre especies. Por esta razón, para lograr una clasificación más precisa, los enfoques modernos se inclinan cada vez más hacia el uso de las **secuencias completas del genoma** del microorganismo. Esta estrategia permite un análisis mucho más exhaustivo al considerar todo el contenido genético, incluyendo tanto los genes esenciales (ortólogos) como los



accesorios, lo que ofrece una visión más fiel de las relaciones filogenéticas. Debido a esta constante y profunda exploración genómica, *Bacillus* se ha consolidado como uno de los géneros bacterianos **más estudiados y explorados**. Históricamente, antes de la era de la secuenciación masiva, los intentos de clasificar a las especies de *Bacillus* se basaron en una variedad de criterios que incluían su modo de nutrición, hábitat, ecofisiología, propiedades bioquímicas, especificidad de nicho, patogenicidad e importancia industrial y médica.

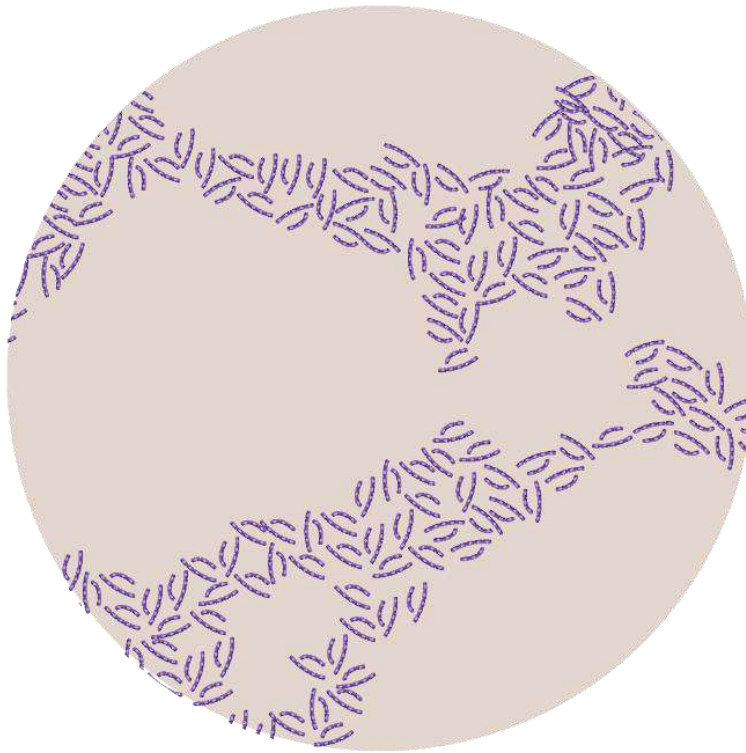


Figura 1. Imagen del género de *Bacillus* con Tinción Gram.

La Endospora: Estructura y funciones

La resistencia de la endospora se explica por su estructura interna, compleja y muy particular. En el centro, el núcleo contiene el ADN y los ribosomas en un estado de deshidratación extrema, lo cual es fundamental para que la endospora se mantenga inactiva. Esta deshidratación se debe en parte al ácido dipicolínico, que solo se encuentra en las endosporas. Alrededor del núcleo, una membrana interna actúa como una barrera que no deja pasar fácilmente sustancias dañinas. Después, una pared celular germinal (hecha de peptidoglicano) es el molde de la futura pared de la bacteria, cuando esta vuelva



a activarse. Más hacia el exterior, la corteza es una capa muy gruesa de un tipo especial de peptidoglicano, cuya formación es vital para deshidratar el núcleo, dándole a la endospora gran parte de su resistencia al calor. Finalmente, la endospora está cubierta por una capa exterior de proteínas. Esta capa es la que brinda mayor protección contra químicos y enzimas, funcionando como un escudo muy eficaz. Además, existen unas pequeñas proteínas llamadas SASP (Small Acid-Soluble Spore Proteins), las cuales se pegan fuertemente al ADN para protegerlo de la luz ultravioleta y de otros químicos que podrían dañarlo. Algunas especies de *Bacillus* también pueden tener otras estructuras o sustancias específicas, como el exosporio (una capa extra de glucoproteínas en la parte más externa) que se suma a las características únicas de cada endospora.

Reproducción y resiliencia de *Bacillus*

Las bacterias del género *Bacillus* se reproducen asexualmente mediante dos mecanismos principales: fisión binaria y esporulación. La fisión binaria es un proceso de división mitótica que ocurre cuando las condiciones ambientales son favorables, permitiendo un rápido crecimiento exponencial y dando como resultado dos células hijas genéticamente idénticas. En contraste, la esporulación es un proceso de formación de esporas que se activa bajo condiciones de estrés ambiental. Durante este proceso, ocurre una división celular asimétrica, generando una célula mayor (célula madre) y una de menor tamaño (preespora).

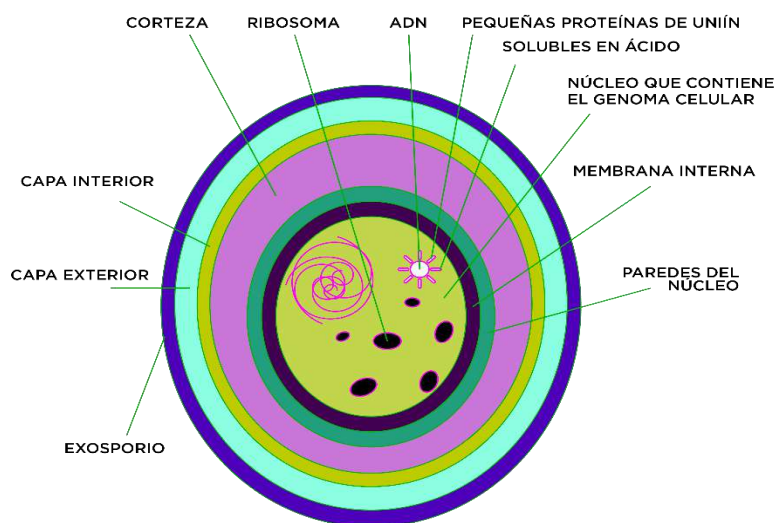


Figura 2. Esquema de la estructura de una endospora de *Bacillus*. Se muestran las principales capas y componentes internos que confieren su alta resistencia: Exosporio, Cubierta de la Espora, Corteza, Pared del Núcleo (Pared celular germinal), Membrana Interna y Núcleo (que contiene ADN, ribosomas, ácido dipicolínico y SASP).



La preespora es entonces englobada por la célula madre y recubierta progresivamente por varias capas protectoras, lo que conduce a una significativa pérdida de agua y su maduración. Tras la maduración, la célula madre se lisis (se rompe), liberando la endospora. Esta puede permanecer en un estado de dormancia hasta que las condiciones ambientales vuelvan a ser favorables. Como se mencionó, esta endospora confiere una resistencia excepcional a temperaturas extremas, desecación, desinfectantes y radiación, lo que explica la notable capacidad de estas bacterias para sobrevivir y colonizar prácticamente cualquier ambiente.

Bacillus: un género ubicuo en diversos hábitats

La **ubicua** presencia del género *Bacillus* a nivel global es una de sus características más notables. Su capacidad para colonizar una amplia gama de **nichos ecológicos** se debe, en gran medida, a la resistencia de sus endosporas. Estas les permiten sobrevivir en condiciones que serían letales para otras bacterias, extendiendo su distribución desde ecosistemas acuáticos y terrestres hasta ambientes con condiciones extremas.

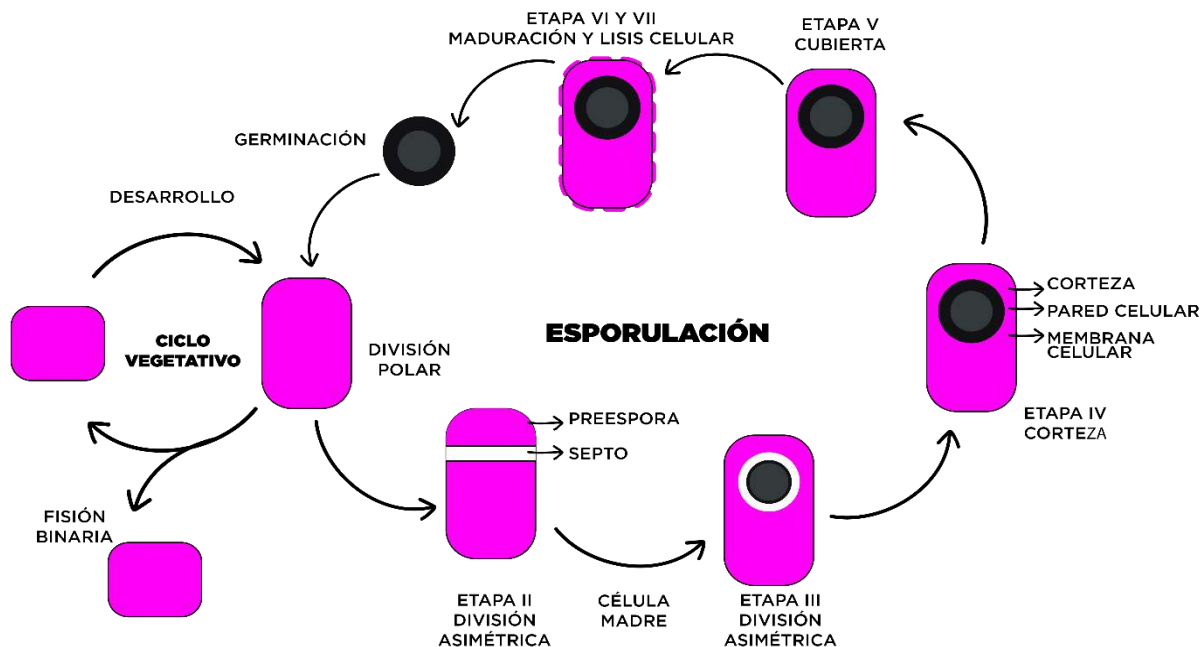


Figura 3. Ciclo de vida y esporulación de *Bacillus*. La imagen ilustra las dos fases principales del ciclo vital de *Bacillus*: el crecimiento vegetativo, caracterizado por la fisión binaria en condiciones favorables, y la esporulación, un proceso de diferenciación que se activa bajo condiciones de estrés. La esporulación se divide en varias etapas (I a VII) que culminan con la formación de una endospora madura y su liberación por lisis celular, confiriéndole una notable resistencia. Al regresar las condiciones favorables, la endospora puede germinar y regresar al ciclo vegetativo.



Sin embargo, el suelo se considera el principal reservorio natural de *Bacillus*. La mayoría de las especies son saprófitas, lo que significa que obtienen su energía y nutrientes de la descomposición de materia orgánica. Esta capacidad les permite prosperar en la rica diversidad de sustratos orgánicos presentes en el suelo. El suelo, como una matriz compleja, no solo proporciona alimento, sino que también facilita el establecimiento de una amplia diversidad genética y funcional de especies microbianas, incluyendo *Bacillus*.

En un contexto más aplicado a la agricultura sostenible, las investigaciones se centran en la dinámica poblacional de *Bacillus* en la rizosfera, la zona del suelo que rodea las raíces de las plantas. En este microambiente, las comunidades bacterianas, incluyendo *Bacillus*, responden activamente a la fertilidad del suelo y, crucialmente, a los exudados de las raíces. La composición y cantidad de estos exudados varían según la etapa de desarrollo de la planta (fenología) y su variedad genética (genotipo). Esta interacción selectiva permite que ciertas especies de *Bacillus*, con capacidades asociativas (se adhieren a las raíces), endofíticas (viven dentro de los tejidos vegetales) o simbióticas (establecen relaciones beneficiosas con la planta), prosperen y actúen como inoculantes microbianos beneficiosos.

Mecanismos de crecimiento vegetal por *Bacillus*

Fijación de nitrógeno en *Bacillus*

El nitrógeno es uno de los elementos más abundantes en la naturaleza y esencial para la vida. Aunque en su forma molecular (N_2) constituye la mayor parte de la atmósfera, esta forma no es directamente utilizable por la mayoría de los organismos, incluyendo las plantas. Para ser asimilable, el nitrógeno atmosférico debe convertirse en amoníaco (NH_3). Este proceso, conocido como fijación biológica del nitrógeno, es llevado a cabo por ciertas bacterias y algas. Una vez en el suelo, el amoníaco puede ser oxidado a nitritos (NO_2^{-1}) y luego a nitratos (NO_3^{-1}) por bacterias nitrificantes, en un proceso llamado nitrificación. En este contexto, las bacterias del género *Bacillus* juegan un papel importante. Algunas especies de *Bacillus* participan activamente en los procesos de fijación de nitrógeno. A través de sus rutas metabólicas, estas bacterias son capaces de producir la enzima nitrogenasa, que catalizan la ruptura de los fuertes enlaces del nitrógeno atmosférico (N_2), transformándolos en precursores que pueden ser utilizados en diversas reacciones químicas esenciales para el crecimiento de las plantas.

Nitrogenasas de *Bacillus*: Mecanismo enzimático clave

Las nitrogenasas son enzimas que reducen la molécula de N_2 a amoníaco NH_3 , el cual es fácilmente asimilable por las plantas. Estas enzimas están compuestas por dos componentes principales:



- Componente I o dinitrogenasa: Es una heterotetrámero ($\alpha_2\beta_2$) que posee un cofactor de hierro y molibdeno (FeMo-cofactor), también conocido como proteína Fe-M, que forma parte del centro activo de la enzima. Este cofactor, que puede contener molibdeno, vanadio o hierro en el centro activo, está constituido por aproximadamente 30 átomos de hierro y dos del metal correspondiente, distribuidos en dos tipos de cúmulos: los empaques cúbicos o tipo "P" (8 Fe, 7 S) y el cofactor Fe-M. Es importante destacar que esta proteína es sensible e inactivada por la presencia de oxígeno.
- Componente II o dinitrogenasa reductasa: Este componente es el encargado de transferir los electrones al Componente I, un proceso que consume moléculas de ATP. Posteriormente, el Componente I cede estos electrones al sustrato (N_2) donde se lleva a cabo la reacción de reducción. Para formar la enzima activa completa de la nitrogenasa, se requiere una molécula del Componente I y dos moléculas del Componente II.
- De acuerdo con el metal predominante en el centro activo del cofactor Fe-M, se distinguen principalmente tres tipos de nitrogenasas:
- Nitrogenasa de Molibdeno (Mo-nitrogenasa): Es la más común y se encuentra en todas las especies que poseen esta enzima.
- Nitrogenasa de Vanadio (V-nitrogenasa): Es la segunda en abundancia y fue descubierta en microorganismos como *Azotobacter vinelandii*.
- Nitrogenasa de Hierro (Fe-nitrogenasa): Se encuentra en una proporción mucho menor que las anteriores, habiendo sido aislada de *Rhodobacter capsulatus*.

Estas enzimas son fundamentales, ya que simultáneamente a la reducción del nitrógeno molecular, efectúan procesos de fijación que lo convierten en amoníaco.

La solubilización de fósforo: nutriente esencial para las plantas

El fósforo (P) es un macronutriente indispensable para el crecimiento y desarrollo de todos los seres vivos, formando parte esencial de moléculas orgánicas vitales. Las mayores reservas de fósforo en el suelo se encuentran en rocas y depósitos minerales como las apatitas primarias, cuya característica principal es su insolubilidad, lo que limita severamente su disponibilidad para las plantas. Para hacer frente a la escasez de fósforo disponible, las plantas pueden aumentar el crecimiento o la densidad de sus raíces y pelos radicales, buscando explorar un mayor volumen de suelo. Tanto las plantas como los microorganismos del suelo tienen la capacidad de incrementar la solubilidad del fósforo inorgánico (P_i) liberando protones, iones hidroxilo (OH^-), dióxido de carbono (CO_2) y aniones de ácidos orgánicos como citrato, malato y oxalato. Además, pueden mineralizar el fósforo orgánico (P_o) mediante la liberación de diversas enzimas fosfatasa.



Numerosos microorganismos del suelo son capaces de transformar el fósforo insoluble en formas asimilables para las plantas, contribuyendo así a su disponibilidad. Entre estos, destacan las bacterias solubilizadoras de fosfatos (BSF), que representan una excelente alternativa para reducir la cantidad de fertilizantes químicos aplicados a los cultivos. Entre esos microorganismos las bacterias *Bacillus* tienen la capacidad de solubilizar tanto el fósforo orgánico como el inorgánico.

Fitasas de *Bacillus*: clave en la disponibilidad de fósforo

En el contexto de la solubilización de fósforo, las fitasas desempeñan un papel crucial. Estas enzimas pertenecen a la subfamilia de las fosfatasas y se encuentran comúnmente en la naturaleza, con origen microbiano, vegetal o animal. Su función principal es la hidrólisis del ácido fítico (hexafosfato de inositol) o fitatos, una de las principales formas de fósforo orgánico que no está disponible para las plantas. Al romper los enlaces, las fitasas liberan ortofosfato inorgánico, una forma de fósforo que las plantas pueden asimilar. La acción de estas enzimas puede aumentar significativamente la utilización y disponibilidad de fósforo derivado del ácido fítico, contribuyendo también a una reducción en la excreción de este elemento.

El género *Bacillus* es reconocido por producir fitasas alcalinas, las cuales son activas en un rango de pH que va de neutro a básico y demuestran una notable termorresistencia, funcionando eficientemente incluso a temperaturas de 70°C. La capacidad hidrolítica de especies como *Bacillus subtilis* es particularmente valiosa, ya que la reducción del ácido fítico por su acción impide la formación de complejos (quelación) con minerales. Esto evita que el fósforo y otros oligoelementos se vuelvan insolubles y se precipiten, facilitando su disponibilidad para la flora del suelo y subrayando la importancia de estas bacterias en el ciclo del fósforo y en la promoción de la biodiversidad y salud de los suelos.

Fitohormonas y la promoción del crecimiento vegetal por *Bacillus*

Las fitohormonas son moléculas orgánicas que, incluso en muy bajas concentraciones, juegan un papel crucial en la regulación de la expresión génica, impactando directamente en el crecimiento, desarrollo y productividad de las plantas. Aunque las plantas las sintetizan en diversos lugares, su acción se modula según los cambios ambientales. Algunas rizobacterias, incluyendo especies de *Bacillus*, tienen la capacidad de producir estas fitohormonas, lo que representa uno de los mecanismos más estudiados para la promoción del crecimiento vegetal. A continuación, se describen las fitohormonas más relevantes y su impacto en las plantas, resaltando la capacidad de *Bacillus* para su producción:

Auxinas



Las auxinas son fitohormonas esenciales que influyen en numerosos aspectos del desarrollo vegetal, como la división y elongación celular, la dominancia apical, la formación de raíces adventicias y el fototropismo. El ácido indol-3-acético (AIA) es una de las auxinas más conocidas y ampliamente producidas por las rizobacterias, incluido el género *Bacillus*.

El AIA liberado por estas bacterias afecta principalmente al sistema radicular de la planta, aumentando su tamaño, peso, número de ramificaciones y la superficie de contacto con el suelo. Estos cambios mejoran significativamente la capacidad de la raíz para explorar el suelo y absorber nutrientes, lo que resulta en una mejor nutrición y un mayor crecimiento de la planta. Además, el AIA actúa como una molécula clave en la señalización y la interacción entre la planta y los microorganismos, y se ha demostrado su rol en la modulación de la tolerancia al estrés abiótico. Las rizobacterias sintetizan el AIA principalmente a partir de L-triptófano, que es secretado por la rizosfera, siguiendo la vía del ácido indol-3-pirúvico (IPyA).

Citoquininas

Las citoquininas son fitohormonas derivadas de la adenina, descubiertas por su capacidad de estimular la proliferación y división celular en tejidos vegetales. Se sabe que activan la iniciación y elongación de las raíces, pueden influir en la senescencia de las hojas, y son importantes en la producción de brotes y el desarrollo fotomorfogénico. Aunque se producen abundantemente en la punta de la raíz y se transportan por la xilema, su efecto en el sistema vegetal a menudo se complementa con la presencia de auxinas. La relación entre las concentraciones de auxinas y citoquininas es clave: proporciones similares pueden inducir la proliferación de células no diferenciadas, mientras que un exceso de auxinas favorece el crecimiento de raíces, y un exceso de citoquininas estimula la producción de brotes. El género *Bacillus* tiene la capacidad de sintetizar citoquininas.

Giberelinas

Las giberelinas comprenden un grupo diverso de más de 130 moléculas que regulan diversos procesos de crecimiento vegetal. Estos incluyen la germinación de semillas, la elongación del tallo, la floración, la formación del fruto y la determinación de la altura de la planta. Las giberelinas interactúan con otras fitohormonas, lo que resulta en respuestas importantes que median la tolerancia al estrés abiótico. Se ha reportado que pueden estimular el crecimiento y desarrollo de plantas bajo condiciones de estrés y que inducen una absorción eficiente de iones, mejorando el metabolismo vegetal.

Las giberelinas producidas por las Rizobacterias Promotoras del Crecimiento Vegetal (PGPR), incluyendo especies del género *Bacillus* como especies de *Bacillus*



pumilus y *B. licheniformis*, promueven el crecimiento de la planta, aumentan los rendimientos e inducir la germinación en semillas.

Ácido abscísico (ABA)

El ácido abscísico (ABA) es una fitohormona con estructura sesquiterpenoide que desempeña un rol crucial en la fisiología de las plantas, especialmente en las respuestas adaptativas frente a estrés biótico y abiótico. Participa en procesos como la dormancia de la semilla y la abscisión de órganos. Bajo condiciones de estrés, el ABA regula la expresión de genes sensibles al estrés, lo que contribuye a una mejor tolerancia. Durante la sequía, por ejemplo, el ABA actúa como un antitranspirante al inducir el cierre de las estomas, minimizando la pérdida de agua. También controla el crecimiento de las raíces y el contenido de agua en condiciones de sequía. Aunque a menudo se considera un inhibidor del crecimiento por detener la germinación, su aplicación exógena puede mejorar la tolerancia a tensiones como salinidad, sequía, frío y heridas. Algunas especies de *Bacillus* también son capaces de influir en los niveles de ABA en las plantas, contribuyendo a la tolerancia al estrés.

Ácido salicílico

El ácido salicílico (SA) es una fitohormona que potencia el crecimiento y la floración vegetal, y puede incrementar la longevidad floral. Tiene la capacidad de inhibir la biosíntesis de etileno y, como ácido orgánico, puede activar enzimas como la amilasa y el nitrato reductasa. Naturalmente, puede tener un efecto sinérgico cuando se combina con otras fitohormonas como las auxinas y las giberelinas. Diversos estudios han comprobado su rol en el control y la protección frente al estrés, induciendo una mejor tolerancia a la germinación en ambientes fríos, así como mejorando la resistencia a la salinidad o la sequía. Además, el ácido salicílico es importante en la regulación de la actividad fotosintética y la conductividad de las estomas en presencia de estrés biótico, como la sequía.

Modulación de etileno

Otro mecanismo de las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) como *Bacillus* es la modulación de los niveles de etileno en la planta a través de la enzima ACC-desaminasa (ACCD). Cuando la producción de etileno supera un umbral debido a condiciones de estrés, este se convierte en "etileno de estrés", afectando negativamente la proliferación de raíces, brotes y el rendimiento general de la planta. La ACCD actúa descomponiendo el 1-aminociclopropano-1-carboxílico (ACC), precursor directo del etileno en las plantas, en α -cetobutirato y amoníaco, reduciendo así las concentraciones dañinas de etileno. Esta acción permite que las raíces, brotes y la planta en su totalidad crezcan normalmente, incluso en entornos desafiantes como los afectados por salinidad,



sequía o metales pesados. Así, la actividad de la ACCD contribuye a la "tolerancia sistémica inducida", una característica que permite a las plantas sobrellevar estresores abióticos y optimizar su desarrollo.

Mecanismos de control biológico de *Bacillus subtilis*

Competencia y colonización: Biopelículas y la quimiotaxis

Además de la producción de metabolitos antimicrobianos, cepas de *Bacillus* emplean la competencia y la colonización como mecanismos de control biológico. Un aspecto fundamental de esto es la capacidad de formar biopelículas, que son capas compactas y organizadas de microorganismos que se adhieren a una superficie.

La formación de biopelículas proporciona una ventaja adaptativa crucial a *Bacillus* como agente de control biológico. Estas estructuras protegen a las poblaciones bacterianas en condiciones ambientales adversas y factores mecánicos, lo que les permite establecerse eficazmente en la rizosfera de las plantas. Esta colonización robusta puede llevar a la exclusión de nicho para los patógenos, al ocupar el espacio físico y competir por los recursos disponibles.

La colonización inicia con un proceso de quimiotaxis, donde las bacterias son atraídas hacia la rizosfera por señales químicas. Las plantas crean un ambiente específico en la rizosfera al secretar exudados radiculares, los cuales actúan como atrayentes nutricionales y fisicoquímicos para los microorganismos benéficos como *Bacillus*. Esta interacción es específica, con los exudados mediando la relación entre la planta y las comunidades microbianas, e incluso la presencia de patógenos puede alterar el perfil de estos exudados para favorecer el reclutamiento de microorganismos benéficos.

La formación de biopelículas en *Bacillus* es esencial para una colonización exitosa y su actividad de biocontrol. Por ejemplo, la síntesis de lipopéptidos como la surfactina ha demostrado ser crucial para la formación de biopelículas y la motilidad de *Bacillus*, aspectos directamente vinculados a su capacidad de colonizar las raíces y, en consecuencia, de controlar enfermedades. Los exopolisacáridos (EPS) secretados por *Bacillus* también juegan un papel vital en la formación de estas biopelículas. Los EPS son una matriz polimérica extracelular que no solo facilita la adherencia de las células microbianas a la superficie de la raíz, sino que también mejora la agregación del suelo, lo que aumenta la disponibilidad de agua y nutrientes para la planta. Además, los EPS pueden funcionar como moléculas señal que activan las respuestas de defensa de la planta y mitigan el estrés abiótico, como el estrés por salinidad.

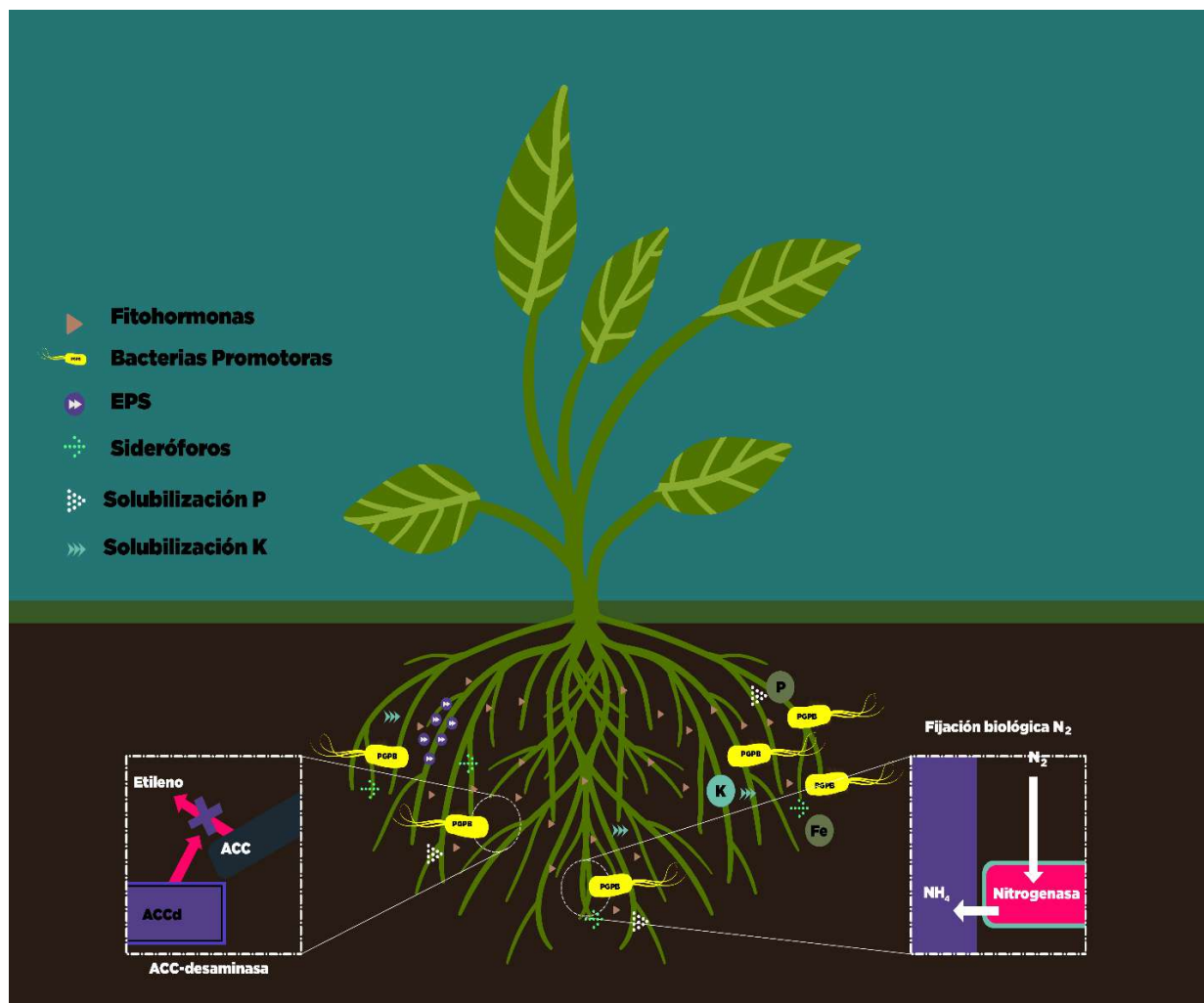


Figura 4. Mecanismos de promoción del crecimiento vegetal por bacterias rizosféricas, incluyendo especies de *Bacillus*. El diagrama ilustra las diversas estrategias mediante las cuales las Bacterias Promotoras del Crecimiento Vegetal (PGPB) benefician a la planta en la rizosfera. Esto incluye la producción de fitohormonas, la solubilización de nutrientes esenciales como el fósforo (P) y el potasio (K), la liberación de sideróforos para la captación de hierro (Fe), la fijación biológica de nitrógeno (N_2) a través de la enzima nitrogenasa (con producción de NH_4^+), y la modulación de los niveles de etileno mediante la enzima ACC-desaminasa (ACCD) para mitigar el estrés.

Otro aspecto importante de la competencia por colonización es la competencia por nutrientes, especialmente por hierro. El hierro es un elemento fundamental para la vida, pero a menudo es un factor limitante en el suelo rizosférico. Las bacterias productoras de



sideróforos, como *Bacillus*, tienen una ventaja competitiva frente a los fitopatógenos que no producen estas moléculas, al secuestrar el hierro disponible en el ambiente y asegurar su propio crecimiento y el de la planta.

El proceso de las δ -Endotoxinas de *Bacillus* para el control de plagas en las plantas

Ciertas especies de *Bacillus*, como *Bacillus thuringiensis* (Bt), son reconocidas por su capacidad de control biológico de plagas agrícolas, la cual es mediada por la producción de δ -endotoxinas. Estas son proteínas cristalinas, también conocidas como proteínas Cry y Cyt, que se forman en cuerpos parasporales durante la esporulación. Las δ -endotoxinas presentan una alta especificidad insecticida, siendo activas contra larvas de diversos órdenes de insectos, incluyendo lepidópteros, coleópteros y dípteros, así como contra ácaros y nemátodos. El mecanismo de acción de las proteínas Cry implica varios pasos: tras la ingestión por el insecto, los cristales se solubilizan en el intestino alcalino de la larva, liberando protoxinas. Estas protoxinas son entonces procesadas por las proteasas intestinales del insecto, liberando el fragmento tóxico activo. La toxina activa se une a receptores específicos localizados en las células del intestino medio, insertándose en la membrana y formando poros. Esta acción altera la permeabilidad de la membrana, colapsando gradientes iónicos y llevando a la citólisis de las células intestinales. La destrucción del epitelio intestinal permite que las esporas de Bt accedan a la hemolinfa, causando la muerte del insecto por inanición y septicemia.

***Bacillus*: Microorganismo para la agricultura sostenible**

En las prácticas agrícolas sostenibles, ha impulsado el interés en microorganismos beneficiosos. Entre ellos, el género *Bacillus*, con su diversidad de especies, es ampliamente utilizado en la agricultura moderna gracias a su capacidad para ofrecer soluciones biológicas que reducen la dependencia de agroquímicos sintéticos. Estos microorganismos desempeñan funciones que impactan directamente en la salud y productividad de los cultivos. Por ejemplo, algunas especies de *Bacillus* actúan como promotores del crecimiento vegetal, mejorando la disponibilidad de nutrientes para las plantas y estimulando su desarrollo. Otras son reconocidas por su capacidad de control biológico, actuando como antagonistas naturales contra hongos y bacterias fitopatógenas, e incluso contra ciertas plagas de insectos. Especies como *Bacillus amyloliquefaciens*, *Bacillus subtilis* y *Bacillus thuringiensis* son referentes cruciales, cada una con capacidades distintivas que contribuyen significativamente a la agricultura sostenible. El valor de *Bacillus* para el desarrollo de bioproductos agrícolas radica tanto en su fase vegetativa, que puede ser producida eficientemente para aumentar la biomasa, como en su capacidad de formar endosporas. Estas últimas son una ventaja significativa por su



resistencia, la cual asegura una mayor vida útil de los productos y una persistencia prolongada del microorganismo en el ambiente agrícola. La elección entre la fase vegetativa o la de esporulación para su aplicación en campo dependerá de las características específicas de cada agroecosistema, lo que subraya la necesidad de comprender la interacción de ambas fases con la planta.

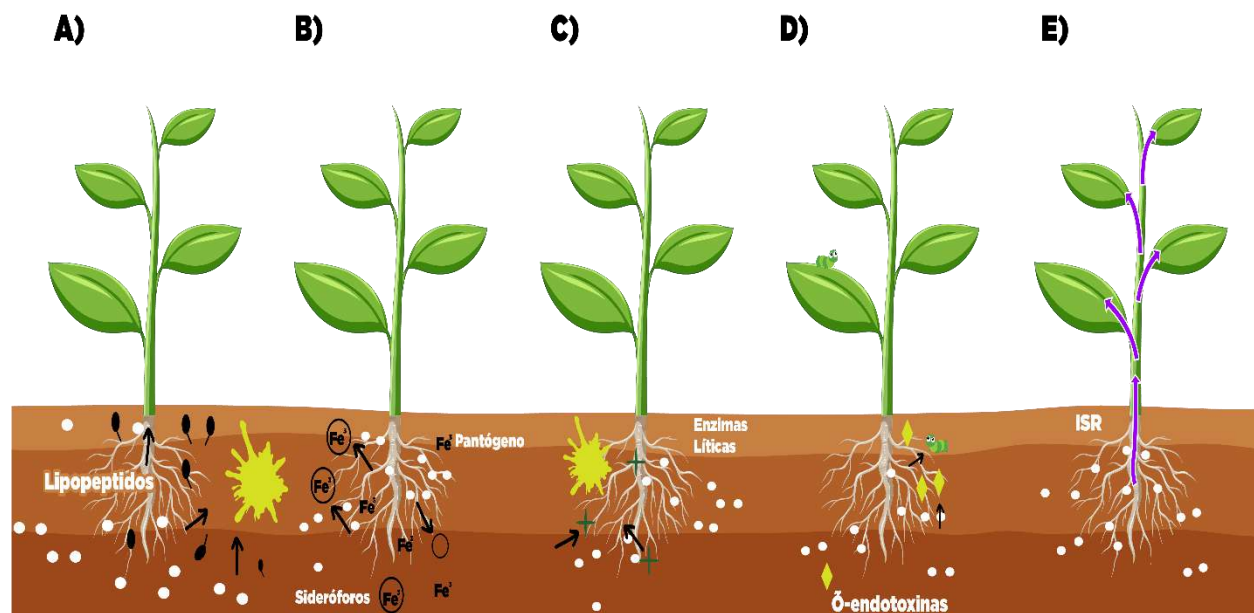


Figura 5. Mecanismos control biológico de *Bacillus subtilis* en la rizosfera. El diagrama ilustra las diversas estrategias mediante las cuales *Bacillus subtilis* beneficia a la planta y combate patógenos: A) Producción de lipopéptidos con actividad antimicrobiana. B) Liberación de sideróforos que quelan el hierro (Fe^{3+}) haciéndolo disponible para la planta y limitando su acceso a patógenos. C) Producción de enzimas líticas que degradan la pared celular de fitopatógenos. D) Síntesis de δ -endotoxinas, con actividad insecticida. E) Inducción de Resistencia Sistémica (ISR) en la planta, activando sus defensas naturales.

Bioinoculantes para el tratamiento de semillas

El tratamiento de semillas y otras formas de inoculación temprana con bioinoculantes a base de *Bacillus* es una estrategia ampliamente reconocida para promover el crecimiento inicial y la protección de las plántulas desde las etapas más tempranas de su desarrollo. La aplicación directa de las bacterias a la superficie de la semilla o en etapas iniciales de enraizamiento permite una colonización temprana de la rizosfera de la plántula emergente. Un estudio evaluó el efecto de la inoculación de *Bacillus subtilis* EA-CB0575 en la promoción del crecimiento de diversos cultivos. En banano, la inoculación a nivel de



raíz en etapas tempranas mostró aumentos significativos en longitud aérea (16%-31%), diámetro del pseudotallo (17%), número de hojas (19%-38%), y peso seco total (59%). Para el cultivo de crisantemo, la aplicación del bioformulado a esquejes resultó en un aumento del peso fresco radicular (27%-64%) e incluso una disminución en los tiempos de floración. Aunque en semillas de café no se observó un efecto positivo general en el crecimiento, sí se produjo un cambio en la estructura radicular, aumentando el diámetro de la raíz principal en un 53%. Estos resultados, aunque variables según el cultivo y la etapa fenológica, demuestran la versatilidad de *Bacillus* como bioinoculante para mejorar el establecimiento y desarrollo temprano de las plantas, aprovechando su capacidad para producir fitohormonas que estimulan el crecimiento radicular y compuestos antimicrobianos que protegen contra enfermedades.

Biofertilizantes para la aplicación al suelo

En México, la agricultura intensiva ha llevado a la degradación de suelos por el uso excesivo de fertilizantes químicos. En respuesta a esta problemática, un estudio evaluó un complejo microbiano compuesto por cepas de *Bacillus licheniformis*, *B. pumilus*, *B. safensis* y *B. velezensis* como una alternativa para la nutrición del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). Aunque no se observaron diferencias significativas en el rendimiento total de biomasa seca y grano, la aplicación del complejo microbiano sí mejoró significativamente el peso de 1000 granos, un indicador clave de la calidad y rendimiento del cultivo. Este hallazgo sugiere que la implementación de complejos de *Bacillus* puede contribuir a una agricultura más sustentable al reducir la dependencia de fertilizantes químicos y mitigar la degradación del suelo.

Agentes de control biológico en el manejo de enfermedades

La enfermedad conocida como 'damping off' es una problemática común en la producción de plántulas de chile (*Capsicum annuum* L.), que tradicionalmente se maneja con fungicidas. Sin embargo, en respuesta a la búsqueda de alternativas más sostenibles, se ha explorado el control biológico. Un estudio evaluó el efecto de rizobacterias, incluyendo cepas del género *Bacillus* y *Pseudomonas*, junto con micorrizas arbusculares, como agentes de control biológico contra hongos causantes del 'damping off' como *Fusarium* sp. y *Rhizoctonia* sp. La investigación, realizada en plántulas de chile 'guajillo', demostró que estas rizobacterias no solo poseen capacidades de promoción del crecimiento vegetal (producción de AIA y solubilización de fosfato), sino que también son eficaces en el manejo de la enfermedad, sugiriendo que su uso representa una alternativa biotecnológica viable. Además, se observó que la eficiencia de estas herramientas biológicas puede optimizarse mediante re-inoculaciones.



Factores que influyen en la eficacia ambiental (tipo de suelo, pH, temperatura)

La eficacia de los bioinoculantes basados en *Bacillus* en el ambiente agrícola están directamente influenciadas por diversos factores ambientales como el tipo de suelo, el pH y la temperatura. Un estudio realizado en Perú, que caracterizó 43 aislamientos de *Bacillus* spp. provenientes de la rizósfera de papa en dos zonas altoandinas, reveló la robustez de estas cepas frente a condiciones de frío y acidez. La investigación encontró que la mayoría de los aislamientos pertenecían al grupo de *Bacillus subtilis*. En cuanto a las pruebas fisiológicas de crecimiento a bajas temperaturas, el 98% de las cepas probadas creció a 10°C, y el 100% lo hizo a 15°C y 20°C, a pesar de que solo una creció a 4°C. Respecto al pH, se observó que el 100% de las cepas mostró un buen crecimiento en pHs ácidos (4 y 5.5), indicando una notable adaptación del género a estas condiciones. Las evaluaciones revelaron además un patrón bifásico de crecimiento bajo estrés, lo que sugiere pequeños periodos de retraso. Las diferencias de adaptación fisiológica entre cepas, incluso de la misma especie, indican una gran diversidad intraespecífica de los *Bacillus* aislados. Además, se encontraron correlaciones entre las zonas de aislamiento con temperaturas de suelo más frías y las cepas con mejores niveles de crecimiento a 20°C, lo cual subraya la importancia de la adaptación local para la selección de bioinoculantes óptimos.

Conclusión

El género *Bacillus* se posiciona como un género bacteriano de gran relevancia en el ámbito de las bacterias promotoras de crecimientos vegetal, aportando múltiples beneficios para una agricultura más sostenible. Su eficacia se debe a su capacidad para solubilizar nutrientes esenciales como el fósforo (mediante fitasas alcalinas y ácidos orgánicos) y el nitrógeno (a través de la fijación atmosférica por nitrogenasas), facilitando su asimilación por las plantas. Además, las cepas de *Bacillus* son conocidas por producir fitohormonas clave como auxinas (principalmente AIA), citocininas y giberelinas, que estimulan el desarrollo de la raíz y el crecimiento general de la planta, y también pueden modular el etileno y el ácido abscísico para potenciar su tolerancia al estrés. La formación de endosporas altamente resistentes garantiza la supervivencia y persistencia de estos bioinoculantes en el campo, mientras que su habilidad para formar biopelículas y competir por recursos les permite colonizar eficazmente la rizosfera, protegiendo a las plantas de patógenos y mejorando su rendimiento en diversas condiciones ambientales.

Bibliografía

Atrih, A., & Foster, S. J. (2002). Bacterial endospores the ultimate survivors. *International Dairy Journal*, 12(2-3), 217-223.

Anguiano Cabello, J. C. Flores Olivas A., Olalde Portugal, V. (2019). Arredondo Valdés, R. y Laredo



- Alcalá, E.I. Evaluación de cepas de *Bacillus subtilis* como promotoras de crecimiento vegetal. *Revista Biociencias*, 6. <https://doi.org/10.15741/revbio.06.e418>.
- Corrales Ramírez MSc, L.C., Caycedo Lozano, L., Gómez Méndez, M.A., Ramos Rojas, S.J. y Rodríguez Torres, J.N. (2017). *Bacillus* spp: una alternativa para la promoción vegetal por dos caminos enzimáticos. *Nova*, 15, 45-65.
- Croptology. ¿Qué es el Bacillus y qué beneficios aporta a los cultivos?, los usos de la Agricultura. (30 de enero de 2025). <https://manvert.com/medios/bacillus-agricultura>
- Cuéllar Gaviria, T.Z. (2014). Evaluación de la promoción de crecimiento de *Bacillus subtilis* ea-cb0575 en cultivos de banano, crisantemo y café. [Tesis de Magister en Ingeniería, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia].
- Martínez Vidales, A., Cervantes-Enríquez, E., Ruiz Castrejón, A., Romero Silva, J.H., Ortega Urquieta, M.E., Parra Cota, F.I. y Santos Villalobos, S. (2025). Diversidad filogenómica y minería genómica de especies tipo del género *Bacillus*: Buscando genes asociados al control biológico. *Mexican Journal of Phytopathology*, 42, 2. <https://doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.2402-9>.
- Miljković, D., Marinković, J., y Balešević-Tubić, S. (2020). The Significance of *Bacillus* spp. in Disease Suppression and Growth Promotion of Field and Vegetable Crops. *Microorganisms*, 8, 1037. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8071037>.
- Mora Antonio, R. (2023). *Bacillus* spp. en la protección de plantas contra el estrés ambiental. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Esmos, 62, <http://doi.org/10.5281/zenodo.10202226>.
- Morales Avila, P. (2024). Uso de complejo microbiano de *Bacillus licheniformis*, *B. pumilus*, *B. safensis*, *B. velezensis* como una alternativa en la nutrición del frijol flor de junio (*Phaseolus vulgaris* L.) variedad dalia [Tesis para licenciatura, Tecnológico Nacional de México].
- Pedraza, L.A., López, C.E. y Uribe Velez, D. (2020). Mecanismos de acción de *Bacillus* spp. (Bacillaceae) contra microorganismos fitopatógenos durante su interacción con plantas. *Acta Biológica Colombiana*, 25, 112-125. <http://dx.doi.org/10.15446/abc.v25n1.75045>.
- Reinoso Pozo, Y., Vaillant Flores, D., Casadesús Romero, L., García Pérez, E. y Pazos Álvarez Rivera, V. (2007). Selección de cepas de *Bacillus* y otros géneros relacionados para el control biológico de hongos fitopatógenos. *Fitosanidad*, 11, 35-40.
- Rojas Solís, D., Contreras Pérez M. y Santoyo G. (2013). Mecanismos de estimulación del crecimiento vegetal en bacterias del género *Bacillus*. *Revista de la DES Ciencias Biológico Agropecuarias*, 15, 36-41.



- Shahid M., Singh U.B., Khan M.S., Singh P., Kumar R., Singh RN., Kumar A. y Singh H.V. (2023). Desaminasa ACC bacteriana: Perspectivas sobre enzimología, bioquímica, genética y su posible papel en la mejora del estrés ambiental en cultivos. *Frontier Microbiology*, 14, <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1132770>.
- Tejera Hernández, B., Rojas Badía, M. M. y Heydrich Pérez, M. (2011). Potencialidades del género *Bacillus* en la promoción del crecimiento vegetal y el control biológico de hongos fitopatógenos. *Revista CENIC. Ciencias Biológicas*, 42, 131-138.
- Tejera Hernández, B., Rojas Badía, M. M. y Heydrich Pérez, M. (2013). Aislamiento de *Bacillus* solubilizadores de fosfatos asociados al cultivo del arroz. *Agronomía Mesoamericana*, 24, 357-364.
- Valenzuela Ruiz, V., Gálvez Gamboa, G.T., Villa Rodríguez, E.D., Parra Cota, F.I., Santoyo, G. y Santos Villalobos, S. (2020). Lipopéptidos producidos por agentes de control biológico del género *Bacillus*: revisión de herramientas analíticas utilizadas para su estudio. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11, 419-432.
- Velasco-Jiménez, A., O. Castellanos-Hernández, G. Acevedo-Hernández, R. C. Aarland y A. Rodríguez-Sahagún. (2020). Bacterias rizosféricas con beneficios potenciales en la agricultura. *Terra Latinoamericana*, 38, 333-345. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i2.470>.
- Villarreal Delgado, M.F., Villa Rodríguez, E.D., Cira Chávez, L.A., Estrada Alvarado, M.I., Parra Cota, F.I., Santos Villalobos, S. (2017). El género *Bacillus* como agente de control biológico y sus implicaciones en la bioseguridad agrícola, *Revista mexicana de fitopatología*, 36, 95-130. <https://doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.1706-5>.

Fibras de origen natural.

Dolores Vargas-Álvarez.
Jesús Tadeo Hernández-Moreno.
Hugo Mauricio Montes de Oca.





Resumen

A través del tiempo el conocimiento y uso de las fibras naturales o biofibras ha sido de gran importancia para el avance de la civilización humana, se cree que incluso el más importante después del uso de las plantas como alimento. Las necesidades humanas básicas de vestimenta y cobijo para protegerse se han cubierto en gran medida con fibras de plantas y animales (piel y pelo) en todas las culturas humanas. Además, las fibras naturales han ocupado un lugar privilegiado en la cultura de múltiples sociedades en el mundo a lo largo del tiempo, inclusive desde la prehistoria hasta los tiempos modernos), ya que han sido la materia prima básica para construir diversos utensilios de uso común como cuerdas, redes, cobijas, así como herramientas de caza y pesca, para elaborar papel, etc. Inicialmente, el ser humano obtuvo fibras vegetales por simple eliminación de la corteza o por el raspado de tallos y hojas; sin embargo, estos materiales sólo permitían la producción de artículos poco acabados, ásperos y rígidos, lo cual disminuía su calidad y tiempo de vida útil. Sin embargo, hubo un cambio significativo e innovador que marcó la importancia en el uso de las fibras, este suceso se produjo a partir del descubrimiento de que estas fibras podían separarse de los demás tejidos y utilizarse en la elaboración de textiles con mejor calidad, textura y durabilidad haciendo una diferencia notable en el desarrollo de nuevos artículos domésticos y de caza.

Palabras clave: Biofibras, fibras vegetales, textiles, sostenibilidad



Introducción

En México, existen evidencias arqueobotánicas que datan del año 10,000 a. C encontradas en el estado de Oaxaca, que indican que los pobladores utilizaban fibras de maguey (*Agave* sp.) entrelazadas, constituyendo uno de los primeros indicios de su extracción en el país, sin embargo, las fibras naturales más antiguas que se conocen en la actualidad son fibras de lino silvestre encontradas en estratos del Paleolítico superior, de unos 30 000 años a.C. dentro de una cueva en las montañas de Georgia.

Las biofibras son fibras de origen biológico, ya sea que se produzcan de forma natural o por un proceso regenerativo, estas fibras son extraídas de la naturaleza como hebras, pelos u otros materiales obtenidos de la naturaleza ya sea por fuentes vegetales, animales o minerales.

Las fibras naturales, así como los materiales fabricados a partir de ellas, han adquirido relevancia en el área industrial debido a su ciclo de vida preferente desde una perspectiva ambiental y de sostenibilidad en comparación con las fibras poliméricas (este ciclo incluye el abastecimiento, la fabricación, el uso y el fin de su vida útil).

Fibras naturales o biofibras

Las biofibras se clasifican de acuerdo con su origen: animal, mineral o vegetal. Las fibras de origen animal han sido utilizadas por el ser humano desde tiempos prehistóricos, por ejemplo los pelos de diversas especies, secreciones y cueros. Entre las principales fibras de origen animal se encuentran:

- ☐ **Seda:** Es el único filamento continuo producido por la naturaleza, gracias a la larva del gusano de seda que produce una fibra proteica compuesta de fibroína, sericina, ceras y carbohidratos, usada para crear tejidos brillantes y resistentes, puede medir entre 500 y 1500 m de longitud. La seda es resistente y elástica; se distingue por el inimitable crujido que es un sonido característico de los tejidos de seda.
- ☐ **Lana:** Se suele reservar este vocablo para nombrar el pelo que recubre el cuerpo de las ovejas. Es la principal fibra textil natural, entre sus características más valoradas se encuentra su elasticidad y su capacidad para absorber la humedad ya que suele usarse en la agricultura como abono, y por otra parte en la industria de la construcción es utilizada como aislante térmico, aislante del ruido, filtro de olores y es un compuesto ignífugo (para quemarse necesita temperaturas elevadas). La lana está compuesta por proteínas (principalmente por queratina), aminoácidos, lípidos, carbohidratos y sales minerales.
- ☐ **Algodón:** Es una planta cuyas semillas están recubiertas de una sustancia fibrosa, blanca y suave, que recibe este mismo nombre y se encuentra constituida en su mayor parte por celulosa. Una vez recogido el algodón se somete a una serie de operaciones (OPERACIONES) dando como resultado la obtención del



hilo de algodón puro y de distintos grosores. Los tejidos de algodón son muy confortables, poseen buena absorción, son frescos y tienen excelente flexibilidad, sin embargo, presenta tendencia a encoger y a desteñirse con los lavados, es ampliamente utilizado en prendas de vestir, ropa de cama, cocina, artículos sanitarios, usos médicos, entre otros.

- **Esparto:** Es una planta herbácea de la familia de las gramíneas, típicas de terrenos pobres, y de cuyas hojas se obtiene la fibra textil que lleva su mismo nombre. El proceso de obtención de las fibras se logra mediante macerado de las hojas en agua, seguido de un golpeo. En la actualidad, la mayor aplicación de la fibra de esparto recide en cordelería, trenzados, artículos de artesanía y decoración, calzado y pastas para la fabricación de papel.
- **Coco:** La fibra de coco es una masa fibrosa de color pardo rojizo, que está contenida en la cascara exterior de la fruta del coco. Las fibras de mayor calidad se utilizan para la confección de cuerdas y esteras, mientras que las más cortas y bastas se emplean para el relleno de colchones. Por otra parte, en la industria de la construcción la fibra de coco se ha empleado en la elaboración de ladrillos.
- **Cuero y piel:** Son materiales que provienen de animales (cabra, vaca, oveja, camello, reptiles, etc.) una vez curtida. El tratamiento consta de dos fases previas al curtido, y el curtido en sí, que consiste en introducir la piel en una disolución acuosa de tanino o sales de cromo, a través de este proceso la piel adquiere propiedades que la hacen imputrescible, ligera y plástica en seco. Es idónea para la industria textil, la confección y la alta costura. El cuero de un animal curtido es utilizado para fabricar distintas piezas de indumentaria o complementos. Las pieles de animales pilíferos son utilizadas en la confección de prendas.

Por otra parte, las fibras minerales, son partículas constituidas por elementos químicos naturales como el oro, plata, cobre, estaño entre otros, sin embargo, también pueden ser obtenidas por el hombre a partir de materias inorgánicas como sales minerales o mediante la mezcla de elementos químicos o compuestos químicos. Este tipo de fibras minerales a menudo son empleadas en la industria por sus excelentes capacidades de aislamiento térmico y acústico. Su uso va dirigido casi exclusivamente a tejidos técnicos para actividades profesionales debido a sus especiales características, como: propiedades ignífugas, elevada resistencia mecánica y resistencia a la mayoría de los productos químicos. Entre los minerales encontramos algunos de estructura fibrosa y otros que son susceptibles, después de tratamientos adecuados, de ser convertidos en fibras o filamentos continuos.

La principal fibra mineral es el amianto, que se obtiene de minerales de estructura cristalina fibrosa y es el único mineral además del oro y la planta que merece el calificativo



de textil. Procede de la descomposición, por acción atmosférica, de las rocas silíceas. El amianto, también conocido como asbesto, se extrae de bancos de cantera, donde se encuentra en forma de delgados filones. Las fibras más largas se emplean para obtener hilos cardados, y en la mayoría de los casos se mezcla con otras fibras como algodón para aumentar la resistencia, que una vez acabados los tejidos se eliminan por combustión, este compuesto es resistente a la acción de ácidos o bases.

Sin embargo, este tipo de fibras minerales tiene poca afinidad por los colorantes. Su inhalación continúa y su manipulación puede producir graves enfermedades pulmonares, ya que las partículas que forman son tan finas que pueden penetrar en los pulmones.

Finalmente, se encuentran las fibras de origen vegetal, las cuales están constituidas básicamente por tres componentes principales: celulosa, hemicelulosa y lignina, sin embargo, también se encuentran otros compuestos importantes como son las pectinas, ceras y grasas.

La celulosa es el material orgánico más importante y abundante de las fibras, por lo cual también son conocidas como fibras celulósicas debido a su alto contenido, en comparación con otros compuestos químicos que conforman a las fibras (hemicelulosa y lignina). La celulosa es responsable de las propiedades mecánicas de las fibras vegetales (resistencia y flexibilidad), en cambio la lignina es un material polimérico esencial que proporciona la rigidez, soporte estructural (es el segundo biopolímero más abundante después de la celulosa) y contribuye al transporte eficiente de agua y nutrientes a través de los tejidos vasculares.

Las biofibras vegetales pueden encontrarse prácticamente en todo el mundo, presentes en arbustos, hortalizas, tallos, semillas, cultivos leñosos y flora, su clasificación está relacionada con la parte de la planta: Tallo, corteza, semillas, frutos y hojas.

Fibra procedente del tallo y corteza. Entre las que se encuentran: el lino, el cáñamo, el ramio y el yute. El tallo del lino produce una fibra suave y flexible; aunque es más fina y larga que la del algodón, resulta menos flexible porque las paredes de la fibra son más gruesas. La fibra de cáñamo es brillante, fuerte y duradera; su uso decayó con la prohibición de la marihuana en los años 30's, pues las dos plantas se confundieron. La corteza del tallo de ramio produce una fibra fina y débil que se ha utilizado para papel y tejidos en China desde tiempos prehistóricos. De la corteza del yute se extrae una fibra basta, débil y brillante.

Fibras procedentes de frutos y semillas. Entre las que se encuentran el algodón, el cocotero y la ceiba. Estas fibras de celulosa se utilizan para fabricar hilos, textiles de todo tipo y como materia prima de las fibras artificiales.

La fibra de coco se obtiene de la cáscara del coco (concretamente del episperma). Las fibras bastas y largas se utilizan para cepillos, mientras que las finas y rizadas sirven para fabricar guata, cordelería y material de relleno para cojines, sofás, etc. La ceiba o kapok, como el algodón, protege sus semillas con una masa de fibras celulósicas (43% de



celulosa) transparentes que se utilizan como material de relleno y, en el pasado, para chalecos salvavidas, ya que se trata de una fibra ligera, muy flotante y resistente al agua.

Fibra procedente de las hojas. Entre otras están: el esparto, el abacá, el formio, el henequén o sisal.

Las hojas de esparto son muy duras y tenaces; la fibra que se obtiene de ellas se destina a fabricar alpargatas, artículos de decoración y artesanía. La fibra de abacá se conoce también como cáñamo de Manila; es flexible, resistente al agua de mar y duradera. Se destina principalmente a la fabricación de papel, arpillera, cordelería y como sustituto de fibra de vidrio en la industria automovilística.

La fibra de formio o lino de Nueva Zelanda se ha utilizado para diversos textiles tradicionales de los maoríes, cordelería y aparejos de pesca. El henequén y el sisal son dos plantas del género agave; de sus hojas se obtiene una fibra fuerte, duradera, relativamente flexible y resistente al agua salada.

Además de ser recursos naturales renovables, el utilizar este tipo de fibras en la industria conlleva ventajas importantes como la biocompatibilidad, baja densidad, consumo de energía reducido durante la producción, bajos costos, biodegradabilidad, abundante disponibilidad y buena mecánica. Sin embargo, las biofibras también presentan algunas desventajas puntuales como su mala adherencia con matrices hidrofóbicas, baja resistencia ante productos químicos y una alta absorción de agua, lo que ha limitado considerablemente su uso. A pesar de esto, estudios actuales demuestran que existen fibras naturales capaces de sustituir a las fibras sintéticas y abarcar mayor porcentaje en las industrias textiles.

Fibras no naturales

Las fibras que no son de origen natural se denominan fibras químicas, las cuales pueden ser fibras sintéticas o artificiales. Las fibras sintéticas son elaboradas en laboratorios o fábricas mediante procesos químicos y mecánicos. Estas fibras, como el poliéster, nylon y acrílico, son conocidas por su resistencia, durabilidad y ligereza. Generalmente, están compuestas de polímeros, que son sustancias químicas que forman largas cadenas de moléculas de poliamidas, acrilatos, etilenglicol, estireno, esteres, entre otros, lo que les otorga propiedades como la tenacidad y la fuerza. Por otra parte, las fibras artificiales se fabrican a partir de la transformación química de productos naturales. Las fibras textiles artificiales poseen propiedades semejantes a las de las fibras naturales, aunque pueden obtenerse a partir de proteínas vegetales presentes en determinadas plantas, como el cacahuete, maíz o soja, generalmente las fibras textiles artificiales utilizan como materia prima la celulosa y de la caseína de las plantas. Sin embargo, sus aplicaciones industriales no se reducen al campo textil, sino que se emplean, en la fabricación de papel, plásticos o explosivos.



La Asociación Nacional de la Industria Química (ANIQ) estimó la producción de fibras sintéticas en 2021 fue de 141,249 toneladas, mientras que la producción de fibras artificiales fue de 1,221 toneladas. La DNFI (Discover Natural Fibres Initiative) estima que el valor de producción mundial de fibra artificial ascendió a 80,000 millones de dólares en 2022. Por otro lado, se calcula que los ingresos medios derivados de la producción de fibras naturales ascienden a 1,600 dólares anuales.

Sin embargo, a pesar de que las fibras no naturales representan el mayor porcentaje en el sector industrial y de consumo, no se puede dejar de lado los daños colaterales que ocasionan su elaboración, y sus desechos. En este sentido, las fibras naturales representan un recurso valioso por sus propiedades únicas y su contribución a la sostenibilidad. Aunque enfrentan desafíos en términos de producción y durabilidad, su uso consciente puede ayudar a reducir el impacto ambiental y promover prácticas más ecológicas en diversas industrias, ya medida que las tecnologías avanzan, estas fibras tienen el potencial de desempeñar un papel aún más importante en el futuro, como por ejemplo la fibra de vidrio que es indispensable para la conexión a internet de alta velocidad.

Beneficios ambientales de las biofibras

Las biofibras han adquirido gran importancia en los últimos años, debido a que múltiples estudios se han centrado en la búsqueda de soluciones al grave problema que representa la contaminación ambiental, siendo las biofibras el camino hacia la sustentabilidad ambiental. Si bien es cierto que aún existen desventajas que no permiten verlas como un sustituto de las fibras sintéticas al 100%, cabe resaltar que las fibras naturales como el algodón, la lana o el lino, son beneficiosas para el medio ambiente debido a su biodegradabilidad y que se encuentran libres de químicos nocivos para la salud. Al ser biodegradables, estas fibras se descomponen de manera natural, sin causar impactos negativos en el entorno. Por lo tanto, el uso de fibras naturales ayuda a reducir la contaminación y promueve la sostenibilidad ambiental.

Además, las fibras naturales son respetuosas con el medio ambiente, y poseen características hipoalergénicas, lo cual las convierte en una opción segura para personas con sensibilidades cutáneas. Al no contener químicos agresivos, las fibras naturales como el algodón, la lana y el lino son suaves y amigables con la piel, proporcionando confort y bienestar, en este sentido, el uso de fibras naturales no solo beneficia al medio ambiente, sino también a la salud de las personas, creando un equilibrio entre la moda y la sostenibilidad.

Actualmente la contaminación del ambiente se encuentra en constante crecimiento, por lo cual, es importante abordar alternativas sustentables. Las fibras naturales son recursos naturales que pueden ser extraídos de animales, plantas y minerales, por lo cual son 100% reciclables y biodegradables. Estos materiales son menos dañinos para el medio ambiente, por esta razón la producción de fibras naturales se ha



vuelto importante y ha incrementado exponencialmente en los últimos años. Con respecto a las plantas, al ser sembradas estas al igual que los árboles absorben dióxido de carbono y liberan oxígeno. Incluso el empleo de biofibras representa una ventaja táctica y de costos para las industrias, además de un incremento de ganancias.

Las fibras naturales no sólo se utilizan a nivel local o de forma tradicional, recientemente las investigaciones sobre este tipo de fibras están demostrando cada vez más los beneficios técnicos y económicos que representa la inclusión de componentes naturales en los productos industriales. Por tanto, ya se elaboran productos competitivos a base de fibras naturales que arrojan resultados técnicos excelentes, sin daños colaterales al ambiente que los actuales productos basados en materiales petroquímicos ocasionan. De tal manera que, además de su presencia en los productos tradicionales, los compuestos de fibras naturales pueden encontrarse en materiales de embalaje, construcción y mobiliario, entre otros más.

Es importante fomentar el conocimiento, la mejora en el uso y, por tanto, la conservación de las especies, tanto de plantas como de animales, que constituyen la fuente de fibras para la elaboración de múltiples productos y accesorios que permiten satisfacer una gran variedad de necesidades del ser humano, en especial, de los pueblos indígenas y comunidades locales de nuestro país. En el sector público, se pueden reconocer diversos proyectos aunados al sistema de información de los usos y manejo de la biodiversidad Mexicana, en donde se están compilando y sistematizando la información publicada sobre este tipo de usos en México, lo cual genera el conocimiento necesario para la toma de decisiones en cuanto al uso sustentable y conservación de estos recursos biológicos.

En la actualidad algunos de los consumidores antes de adquirir bienes y servicios razonan sobre el impacto y beneficios tanto ecológicos, económicos y socioculturales que representan, es entonces que los productos naturales, biodegradables y reciclables aumentaron en gran medida su demanda y venta. Es así, que las empresas invierten cada vez más en productos orgánicos, para fomentar practicas sustentables.

Composición de las biofibras

A diferencia de las fibras sintéticas, los compuestos de las biofibras son completamente ecológicos y con el potencial de obtener los mismos resultados en los distintos campos de aplicación. Las fibras naturales están compuestas por celulosa, lignina y hemicelulosa principalmente, compuestos que son aprovechados mayormente en el área industrial. El ejemplo más abordado es el de la celulosa, la cual además de ser el constituyente principal de las fibras, genera microfibrillas las cuales son unidades fundamentales de todas las plantas, también es el polímero más abundante, sostenible y biodegradable del mundo.

La celulosa es un polímero natural (polisacárido formado por unidades de glucosa unidas por enlaces β -1,4-glucosídicos), la formula química para la unidad de celulosa se



representa como $(C_6H_{10}O_5)_n$ donde n representa el número de unidades de glucosa. Las cadenas de glucosa se ensamblan en fibrillas, que a su vez forman la estructura de la celulosa en materiales como madera y algodón.

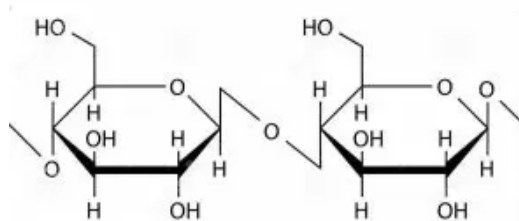


Figura 1. Estructura química de la celulosa.

Mientras que la lignina es un polímero tridimensional, amorfa y compleja, en las plantas actúa como material cementante que proporciona fuerza, rigidez y ayuda al transporte de agua a través a la pared celular, además de participar como puente de unión entre las células, creando de esta manera un material resistente a los impactos, compresiones y flexiones.

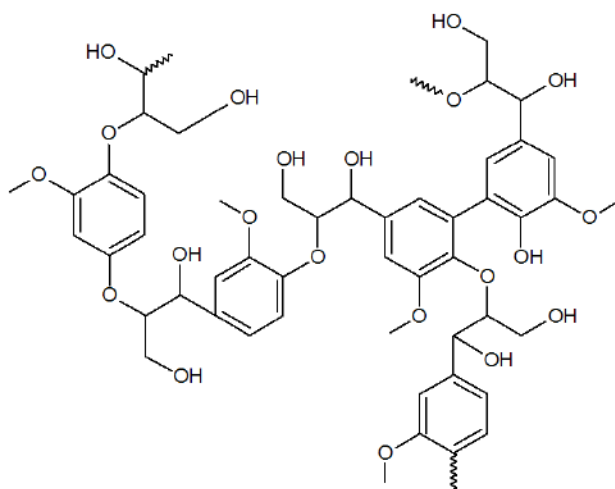


Figura 2. Estructura química de la lignina.

Las hemicelulosas son polisacáridos a menudo asociados con la celulosa, pero con composiciones y estructuras distintas. Mientras que la celulosa se deriva exclusivamente de la glucosa, las hemicelulosas se componen de diversos azúcares y pueden incluir los azúcares de cinco carbonos (xilosa y arabinosa), azúcares de seis carbonos (glucosa, manosa y galactosa). Las hemicelulosas contienen la mayoría de los azúcares D-pentosa y, ocasionalmente, también pequeñas cantidades de azúcares L-pentosa. La xilosa es en la



mayoría de los casos el monómero de azúcar presente en mayor cantidad, aunque en las maderas blandas la manosa puede ser el azúcar más abundante. No solo se pueden encontrar azúcares regulares en la hemicelulosa, sino que también pueden estar presentes sus formas acidificadas, por ejemplo, ácido glucurónico y ácido galacturónico. Las hemicelulosas se pueden clasificar en cuatro grupos de la siguiente manera: 1) xilanos, 2) mananos; 3) β -glucanos de enlace mixto; 4) xiloglucanos.

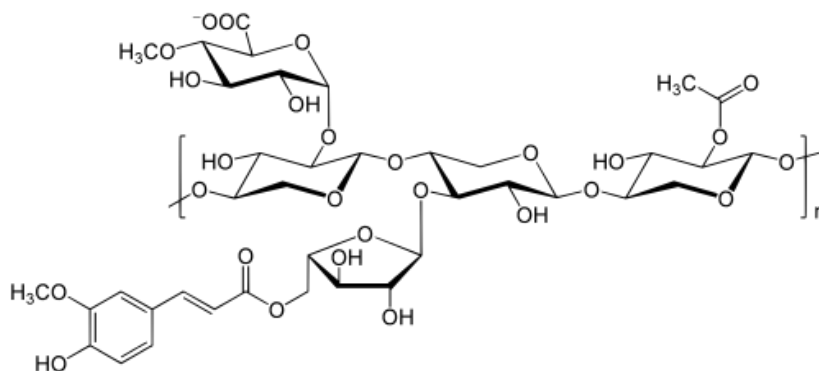


Figura 3. Estructura química de la hemicelulosa.

Por otra parte, las pectinas son el grupo de polisacáridos de origen vegetal estructuralmente más complejo de la naturaleza, cuya estructura principal está compuesta por residuos de ácido D-galacturónico unidas por enlaces glucosídicos de tipo α -D-1,4. Son moléculas especialmente abundantes en las paredes de las células en crecimiento y división, así como en las partes “blandas” de los tejidos vegetales, como resultado la pectina determina la porosidad de la pared celular, y como consecuencia, el grado de disponibilidad de los sustratos.

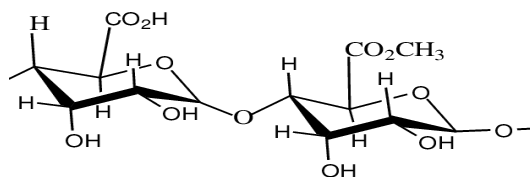


Figura 4. Estructura química de la pectina.

Las grasas y ceras se encargan de recubrir la fibra, pueden ser removidas con soluciones orgánicas. Este material ceroso está compuesto por diferentes tipos de alcoholes, los cuales son insolubles en agua y en ácidos (palmíticos, oleaginosos y esteáricos).

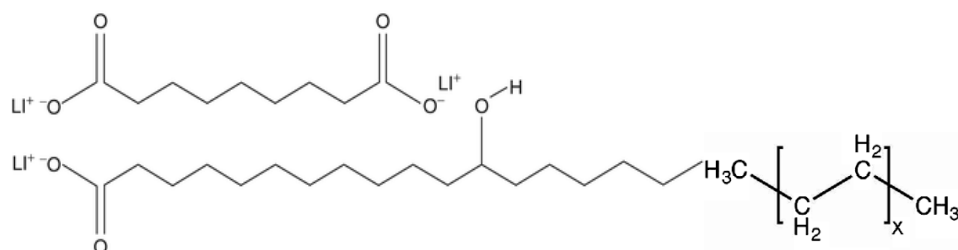


Figura 5. Estructura química general de grasas (izquierda) y ceras (derecha).

Biofibras a partir de *Hibiscus sabdariffa*

Investigaciones recientes, se han centrado en la obtención de otras materias primas para acceder a nuevas biofibras, en este sentido la planta de jamaica (*Hibiscus sabdariffa*, *Malvaceae*), específicamente sus tallos ha tomado gran relevancia como materia de partida para la obtención de fibras naturales. La jamaica es originaria de Malasia y de la India, se caracteriza por ser un arbusto leñoso perenne que oscila los 2 – 2.5 m de altura, las hojas presentan de 3 – 5 lóbulos con una longitud de 8 – 15 cm. Las flores alcanzan los 8 – 10 cm de diámetro, cuentan con un característico color blanco a amarillo claro con una mancha roja en la base del pétalo, presentan un cáliz de 1 – 2 cm de ancho que alcanza los 3 – 3.5 cm una vez que el fruto alcanza la madures.

Esta planta es nativa de regiones tropicales y subtropicales. Contiene compuestos bioactivos como flavonoides, fenoles, taninos, saponinas, esteroides, resinas, aminoácidos, alcaloides, cumarinas y antocianinas. Las antocianinas son el grupo característico en cuanto a metabolitos secundarios se refiere presentes en *Hibiscus s.*, son responsables de la pigmentación del cáliz y se tienen registros de la presencia de pelargonidinas, cianidinas, delfinidinas, peonidinas, petunidinas y malvidinas.

Debido a su relativa facilidad para producirse, su alta resistencia y su poca exigencia de nutrientes ya que puede crecer en suelos con una fertilidad y retención de humedad bastante bajas, el cultivo de esta planta se ha extendido por diversos países del mundo, mayormente países en desarrollo. Los países más destacados que cultivan *H. sabdariffa* son: China y Tailandia que son los principales proveedores del mundo, además de Egipto, Indonesia, México, entre otros. Al ser una especie transnacional *H. sabdariffa* recibe diferentes nombres, donde destaca Roselle.

En México, *Hibiscus sabdariffa* conocida popularmente como “jamaica”, es cultivada principalmente en los estados de Guerrero y Oaxaca, donde la demanda del producto es mayor, aproximadamente el 85% de la producción nacional se da en estos estados. A nivel nacional se cosechan cerca de 18 mil hectáreas, con un rendimiento de 265kg en promedio, la época de siembra se da en el periodo primavera – verano mientras que la cosecha se da en los meses de octubre y noviembre. Las fibras extraídas de la jamaica son de las menos trabajadas, pero con un gran potencial de explotación por sus compuestos bioactivos, sustentabilidad, entre otros aspectos. Las fibras del tallo o líber se



caracterizan por formar haces fibrosos en la corteza interna de la planta, nombradas fibras suaves.

En este sentido, se han iniciado algunas investigaciones para hacer uso del árbol de la jamaica para generar fibras sostenibles y ecológicamente amigables. Además, debido a la alta disponibilidad de la planta en México, los costos son relativamente bajos y la producción puede ser escalada. Los productores de jamaica pueden obtener otros productos a partir de los desechos de las podas del árbol y de esta forma generar fibras naturales con valor agregado que sumen a la economía circular de los agricultores de jamaica.

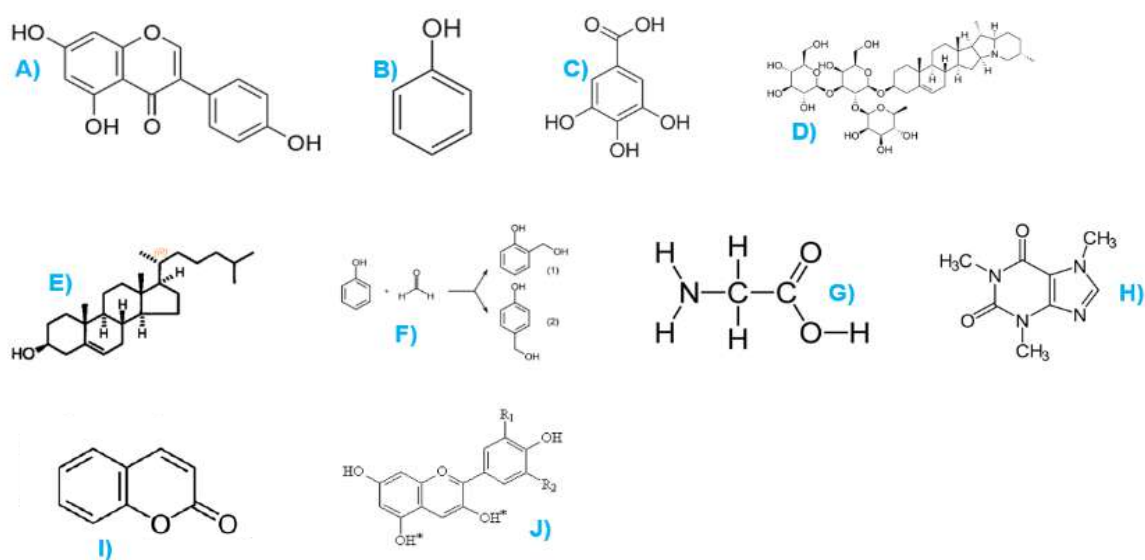


Figura 6. Principales metabolitos secundarios de *Hibiscus sabdarifa*, flavonoides (A), fenoles (B), taninos (C), saponinas (D), esteroides (E), resinas (F), aminoácidos (G), alcaloides (H), cumarinas (I) y antocianinas (J).

Conclusiones

El impacto ambiental causado por el uso de fibras artificiales y sintéticas nos invita a reflexionar sobre la importancia de adoptar un enfoque panorámico hacia la sostenibilidad en la industria textil. Al elegir fibras naturales, no solo estamos optando por materiales más respetuosos con el medio ambiente, sino también apoyando prácticas agrícolas que promueven la salud del planeta. Es crucial que tanto los consumidores como las empresas se comprometan a impulsar un cambio positivo hacia una producción más sostenible y consciente. Por otra parte, también es importante hacer un uso adecuado



sobre de la obtención de las fibras naturales, ya que los beneficios van más allá de su producción, debido a que malas prácticas pueden afectar la biodiversidad y la calidad del suelo. Es fundamental implementar prácticas agrícolas sostenibles para reducir este impacto y fomentar la regeneración de los ecosistemas. Además, es importante promover la transparencia en toda la cadena de suministro para garantizar que las fibras naturales se cultiven y procesen de manera responsable.

Bibliografía

- Abou-Sreea, A. I. B., Roby, M. H. H., Mahdy, H. A. A., Abdou, N. M., El-Tahan, A. M., El-Saadony, M. T., El-Tarabily, K. A., & El-Saadony, F. M. A. (2022). Improvement of Selected Morphological, Physiological, and Biochemical Parameters of Roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) Grown under Different Salinity Levels Using Potassium Silicate and *Aloe saponaria* Extract. *Plants (Basel, Switzerland)*, 11(4), 497. <https://doi.org/10.3390/plants11040497>.
- Amoasah, B., Appiah, F. & Patrick, K. (2018). Effects of Different Drying Methods on Proximate Composition of Three Accessions of Roselle (*Hibiscus sabdariffa*) Calyces. Amoasah et al.; *IJPSS*, 21(1), 1-8. <https://doi.org/10.9734/IJPSS/2018/38550>.
- Achebe, U., Ilodiva, C., Arubalueze, C. & Ibeh E. (2019). A comparative study on morphology, mineral and vitamin compositions of two variants of *Hibiscus sabdariffa* (L.). *Archives of Agriculture and Environmental Science*, 4(1), 50-56. <https://doi.org/10.26832/24566632.2019.040108>.
- Abdelghany, A., Menazea, A. & Ismail, A. (2019). Synthesis, characterization and antimicrobial activity of chitosan/polyvinyl alcohol blend doped with *Hibiscus Sabdariffa* L. extract. *Journal of molecular structure*, 1197(3), 603-609. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2019.07.089>.
- Akubueze, E. U., Ezeanyanoso, C. S., Muniru, O. S., & Nwaeche, F. C. (2019). Extraction and Characterization of Bast Fibres from Roselle (*Hibiscus sabdariffa*) Stem for Industrial Application. *JMSRR*, 2(4): 1-7. <https://doi.org/10.9734/JMSRR/2019/45087>.
- Ali, N. & Hoque, E. (2022). Bionanocomposites in the Automotive and Aerospace Applications. *Polymer Based Bio-nanocomposites*, (1), 237-253. https://doi.org/10.1007/978-981-16-8578-1_13.
- Ayeni, A. (2021). Nutrient Content of Micro/Baby-Green and Field-Grown Mature Foliage of Tropical Spinach (*Amaranthus* sp.) and Roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.). *Foods*, 10(11), 2546. <https://doi.org/10.3390/foods10112546>.



- Bulea, M., Albelbeisi, A. H., Nikfar, S., Aminia, M. & Abdollahi, M. (2020). The antidiabetic and antilipidemic effects of *Hibiscus sabdariffa*: A systematic review and meta-analysis of randomized clinical trials. *Food research international*, 130, 108980. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.108980>.
- Amaya-Cruz, D.M., Perez-Ramirez, I.F., Ortega-Diaz, D. Rodriguez-García, M. E., Reynoso-Camacho, R. (2018). Roselle (*Hibiscus sabdariffa*) by-product as functional ingredient: effect of thermal processing and particle size reduction on bioactive constituents and functional, morphological, and structural properties. *Food Measure*, 12, 135–144. <https://doi.org/10.1007/s11694-017-9624-0>.
- El-Ramady, H., Abdalla, N., Fawzy, Z., Badgar, K., Llanaj, X., Tör, G., Hajdú, P., Eid, Y. & Prokisch, J. (2022). Green Biotechnology of Oyster Mushroom (*Pleurotus ostreatus* L.): A Sustainable Strategy for Myco-Remediation and Bio-Fermentation. *Sustainability*, 14, 3667. <https://doi.org/10.3390/su14063667>.
- Jabeur, I., Pereira, E., Barros, L., Calhella, R., Soković, M., Oliveira, B. & Ferreira, I. (2017). *Hibiscus sabdariffa* L. as a source of nutrients, bioactive compounds and colouring agents. *National Library of Medicine*, (1), 717-723. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.07.073>.
- Karakoti, A., Biswas, S., Aseer, J., Sindhu, N. & Sanjay, M. (2018). Characterization of microfiber isolated from *Hibiscus sabdariffa* var. altissima fiber by steam explosion. *Journal of natural fibers*. 17(2), 189-198. <https://doi.org/10.1080/15440478.2018.1477085>.
- Kaddami, H., Arrakhiz, F., Hafs, O., EL-Assimi, T., Boulafrouh, L., Ablouh, E. H., Mansori, M., Banouni, H., Bouzit, S., Erchiqui, F. & Benmoussa, K. (2021). Implementation and Characterization of a Laminate Hybrid Composite Based on Palm Tree and Glass Fibers. *Polymers*, 13(19), 3444. <https://doi.org/10.3390/polym13193444>.
- Khodayari, A., Thielemans, W., Hirn, U., Van-Vuure, A. & Seveno, D. (2021). Cellulose-hemicellulose interactions - A nanoscale view. *Carbohydrate Polymers*, 270, 118364. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118364>.
- Lewandowska, M., Keyl, A., & Feussner, I. (2020). Wax biosynthesis in response to danger: its regulation upon abiotic and biotic stress. *The New phytologist*, 227(3), 698-713. <https://doi.org/10.1111/nph.16571>.
- Li, T. S. & Sulaiman, R. (2019). Color and Rehydration Characteristics of Natural Red Colorant of Foam Mat Dried *Hibiscus sabdariffa* L. Powder. *International journal of fruit science*, 20(6), 1-17. <https://doi.org/10.1080/15538362.2019.16055577>.



-
- Mansour, R. & Ali, H. B. (2019). Investigating the Use of Chitosan: Toward Improving the Dyeability of Cotton Fabrics Dyed with Roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.). *Journal of natural fibers*. 18(2), 1-10. <https://doi.10.1080/15440478.2019.1675217>.
- Meftahizadeh, H., Ebadi, M., Baath, G. & Ghorbanpour, M. (2021). Variation of morphological and phytochemical traits in Roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) genotypes under different planting dates. *Acta Ecologica Sinica*, 42(6), 616-623. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2021.04.011>.
- Muralidharan, J., Galiè, S., Alonso, P., Bulló, M. & Salvadó, J. 2019. Plant-Based Fat, Dietary Patterns Rich in Vegetable Fat and Gut Microbiota Modulation. *Front. Nutr.*, 11 October 2019 Sec. *Nutrition and Microbes*, 6(157), 1-11. <https://doi.org/10.3389/fnut.2019.00157>.
- Qaseem, M. F., Shaheen, H. & Wu A. (2021). Cell wall hemicellulose for sustainable industrial utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 144, 110996. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110996>.

Normatividad, calidad y certificación de la semilla de maíz en México

Adriana Natividad Avendaño-López.
Martín Quintana-Camargo.
María Leonor Román Miranda.
Gilberto Rodríguez-Pérez.





Resumen

México, como centro de origen del maíz, posee una diversidad genética excepcional con 64 razas identificadas, de las cuales 59 son nativas. Ante la creciente demanda y dependencia de importaciones, la semilla de calidad se posiciona como tecnología clave para mejorar la productividad agrícola. Este capítulo analiza el sistema nacional de producción y certificación de semilla de maíz, destacando su importancia para la seguridad alimentaria y el desarrollo rural. La calidad de la semilla se evalúa en cuatro dimensiones: física, genética, sanitaria y fisiológica. La calidad física se refiere a la pureza, integridad y humedad del grano; la genética garantiza que la planta que se desarrolle mantendrá las características propias de la variedad a la que pertenece; la sanitaria asegura ausencia de patógenos transmitidos por semilla; y la fisiológica mide germinación, vigor y resistencia al estrés. Estos parámetros son esenciales para lograr cultivos uniformes, adaptados y rentables. El Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas (SNICS) regula la producción y certificación, aplicando normas internacionales (ISTA) y nacionales (Ley Federal de Producción, Certificación y Comercio de Semillas). El proceso incluye inspección de campo, análisis de laboratorio y emisión de etiquetas oficiales que avalan la calidad del lote. Se reconocen cinco categorías de semilla: básica, registrada, certificada, habilitada y declarada, cada una con distintos niveles de control y trazabilidad. La semilla certificada es la más confiable para producción comercial, mientras que la declarada es más accesible, pero con mayor riesgo agronómico. El capítulo concluye que la certificación de semilla es estratégica para fortalecer la productividad, y reducir la dependencia alimentaria. Además, se destaca el papel del programa MASAGRO en la modernización sustentable del campo mexicano mediante el uso de semillas híbridas validadas regionalmente.

Palabras clave: Semilla certificada, calidad genética, SNICS, maíz nativo, trazabilidad, MASAGRO.



Introducción

México es el centro de origen del maíz, su cultivo surgió de una única domesticación ocurrida en el suroeste del país, hace unos 9,000 años a partir del pariente silvestre más cercano del maíz: el Teocintle; específicamente de la raza Balsas (*Zea mays* ssp. *parviglumis*). El cultivo fue dispersado por los nativos hacia el norte y sur del continente. En México, se han identificado cerca de 64 razas de maíz bien definidas, de las cuales 59 son nativas del país; el territorio nacional concentra muy probablemente la mayor diversidad del maíz en el mundo. A nivel internacional, México tiene el mayor consumo per cápita de maíz en el mundo con 133.6 kg anual, por persona. Para compensar la demanda interna, desde los años 70's, se ha recurrido a la importación del grano hoy en día, se estima que las importaciones para el ciclo 24/25 alcanzarán 22 millones de toneladas, una situación bastante compleja, puesto que el consumo de maíz blanco se cubre con la producción nacional, no así para el grano amarillo.

El aumento de la producción se puede lograr con la innovación y la tecnología, dentro de las cuales la semilla ocupa un lugar trascendental al ser considerada la primera y más importante tecnología del campo. Una semilla de calidad garantiza el potencial genético, la uniformidad de las plantas y la base sobre la cual se articulan otras prácticas agrícolas, por lo que constituye el punto de partida para el éxito productivo y la seguridad alimentaria.

Un sistema de semillas es la combinación de componentes, procesos y su organización para la producción y comercialización de este insumo para la siembra de una o más especies. En este sentido, la semilla constituye el insumo más importante en la producción agrícola, el uso de semilla de alta calidad es fundamental para garantizar el adecuado establecimiento, la uniformidad del cultivo, su adaptación a diferentes condiciones agroclimáticas y el logro de altos rendimientos. El aseguramiento de la calidad en la producción de semilla es el proceso que permite verificar que el material mejorado cumpla con los estándares requeridos un óptimo desempeño en campo.

El lograr una semilla de calidad se puede identificar desde dos puntos de vista, mediante el control interno propio de cada empresa de semillas donde se establecen estándares de calidad propios, o bien, a través de un programa oficial de certificación de semillas.

Normatividad de la semilla de maíz en México

El Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas (SNICS), es la entidad del sector oficial, quien coordina las actividades, con lo que se busca asegurar que el germoplasma sembrado cumpla con estándares a través de reglas de campo y laboratorio, estas últimas basadas en las Reglas Internacionales de la International Seed Testing Association, ISTA por sus siglas en inglés. Los cuales incluyen cuatro parámetros de calidad: genética, fisiológica, física y sanitaria. Por lo tanto, la producción y



comercialización de semilla tiene un papel estratégico, ya que de ella depende la disponibilidad de nuevas variedades. Calidad de semilla no tiene una definición simple, el concepto cubre diversas características o condiciones deseables. Desde el 2003, México, a través del SNICS, participa como miembro de la ISTA. En este contexto, La Ley Federal de Producción, Certificación y Comercio de Semillas es la base jurídica nacional que regula producción, calificación, comercialización y circulación de semillas certificadas.

Parámetros de calidad de semilla

Calidad física

La calidad física de una semilla de maíz se refiere a las características visibles y estructurales que garantizan su integridad y estado físico y un alto porcentaje de semilla pura (libre de impurezas, malezas, semillas de otras especies, estructuras seminales separadas, partículas de otras hojas u otros materiales). En el Cuadro 1 se presentan los parámetros.

Calidad genética

La calidad genética de la semilla de maíz constituye su genotipo, y se evalúa por su identidad varietal, así como a la estabilidad y homogeneidad. La pureza genética que garantiza la expresión de características heredables deseadas. A diferencia de la calidad fisiológica, la calidad genética no se relaciona con la germinación o el vigor, sino con la fidelidad del material al perfil genético esperado.

Este concepto implica que las semillas deben presentar un alto nivel de homocigosis en los loci de interés, especialmente en programas de mejoramiento. La pérdida de calidad genética, en cambio, puede ocurrir por contaminación genética, mezcla de variedades o cruzamientos no controlados en campo (Cuadro 2).

Calidad Sanitaria

Atributo que garantiza que la semilla no es un vector de enfermedades, es decir a través de la semilla, no se están introduciendo hongos, bacterias o virus, nematodos. La evaluación de la calidad sanitaria implica la detección y cuantificación de inóculos de organismos patógenos presentes tanto en la superficie como en el interior de las semillas, mediante pruebas específicas para cada especie.



Cuadro 1. Parámetros de calidad física, evaluados en semilla de maíz.

Parámetro	Descripción	Importancia
Pureza física	Porcentaje de semilla pura libre de impurezas (material inerte, otras semillas)	Garantiza uniformidad del cultivo y cumplimiento de normas de certificación
Daño mecánico	Grietas, fracturas o golpes visibles en el grano	Afecta la germinación y la viabilidad; reduce la vida útil de la semilla
Tamaño y forma uniformes	Homogeneidad en dimensiones y morfología del grano	Favorece una siembra uniforme y eficiente, especialmente con sembradoras
Contenido de humedad	Porcentaje de agua presente en la semilla (óptimo: 11–13%)	Clave para evitar deterioro por hongos y pérdidas de viabilidad en almacenamiento

Cuadro 2. Parámetros de calidad genética, evaluados en semilla de maíz.

Parámetro	Descripción	Importancia
Identidad genética	Implica que la semilla pertenezca a la variedad, línea o híbrido registrado	Asegura que el fenotipo exprese las características esperadas (rendimiento, ciclo, tolerancia)
Pureza varietal	La semilla es genéticamente uniforme y libre de mezclas con otras variedades o nativa	Evita variación indeseada en el cultivo.
Control de mezcla genética	Garantía de que los parentales fueron manejados adecuadamente (aislamiento, emasculación, polinización controlada)	Asegura la fidelidad genética en la producción de híbridos o líneas puras
Origen y trazabilidad	Información documentada sobre el ciclo de producción, parentales y manejo	Permite verificar la procedencia y garantizar la autenticidad del material genético



Figura 1. Semilla sin tratamiento químico (izquierda); Semilla con tratamiento químico (insecticida, fungicida y colorante que indica que no debe ser consumida)

Calidad fisiológica

Condición que garantiza un alto porcentaje de viabilidad, germinación y vigor de las plántulas emergidas, bajo condiciones tanto óptimas como adversas. Una semilla con alta calidad fisiológica mantiene un comportamiento consistente en campo, incluso bajo estrés por sequía, temperaturas extremas o suelos de baja fertilidad. Las reservas energéticas de la semilla están constituidas por: lípidos, carbohidratos y/o proteínas en diferentes proporciones según el tipo de semilla; con la función de nutrir a la futura planta durante sus primeras etapas de vida (Cuadro 3). Estas reservas, pueden encontrarse principalmente en el endospermo o los cotiledones según sea el caso, mismas que son metabolizadas durante la germinación del nuevo individuo.

Semillas fisiológicamente sanas permiten obtener plántulas con raíces y tallos fuertes, lo que reduce la competencia con malezas, mejora la absorción de nutrientes y agua, y aumenta la resistencia a plagas y enfermedades durante las primeras etapas de desarrollo (Figura 1). Además, aseguran una población adecuada por hectárea, evitando pérdidas de rendimiento por fallas en la emergencia. En la producción comercial de maíz, el utilizar semillas con alta calidad fisiológica no es solo una práctica recomendada, sino un requisito indispensable para lograr la máxima expresión genética del híbrido o variedad, optimizar los insumos invertidos (fertilizantes, agua, manejo agronómico) y asegurar una cosecha rentable y de alta calidad.

El análisis de germinación es una prueba clave para evaluar la calidad fisiológica de las semillas, ya que determina el porcentaje de semillas viables capaces de producir plántulas normales bajo condiciones controladas de laboratorio. Este análisis permite estimar el potencial de establecimiento de la planta en campo y su uniformidad.



Cuadro 3. Parámetros de calidad fisiológica, evaluados en semilla de maíz.

Característica	Descripción	Importancia
Poder germinativo	Porcentaje de semillas que germinan bajo condiciones óptimas.	Indica la viabilidad de la semilla.
Vigor	Capacidad de la semilla para germinar rápida y uniformemente, incluso bajo condiciones adversas.	Relacionado con el establecimiento exitoso del cultivo.
Resistencia al estrés	Capacidad de germinar y establecerse bajo condiciones de estrés (salino, hídrico, etc.).	Importante para zonas con condiciones variables o marginales.
Longevidad	Tiempo que la semilla conserva su viabilidad en almacenamiento.	Afecta la duración útil del lote de semilla.
Índice de emergencia	Porcentaje de semillas que desarrollan plántulas completas y sanas.	Refleja el potencial productivo de la semilla.

Certificación

El proceso de certificación consiste en una inspección de campo seguido de un análisis de laboratorio que comprueba la calidad de las semillas, desde su origen hasta su comercialización. Al aprobarse la inspección de campo y los análisis del laboratorio, la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER) otorga una etiqueta oficial que avala la calidad de la semilla.



Figura 2. Pruebas de calidad fisiológica, en semilla de maíz, germinación estándar entre papel y longitud de plúmula.



Reglas para la calificación de semillas

Las reglas de calificación de semillas establecen los criterios y procedimientos obligatorios para evaluar la calidad de las semillas para siembra, abarcando aspectos genéticos, físicos, fisiológicos y fitosanitarios, contienen los aspectos de calidad evaluados en campo y laboratorio, (Cuadro 4) La calificación de semillas en México consiste en un proceso técnico y legal que da garantía al agricultor de que la semilla que compra es pura, viable, sana, protegiendo así la productividad y el comercio de semillas.

Seguir las reglas no es solo un requisito normativo, sino una práctica estratégica para aseguramiento de la calidad y seguridad fitosanitaria y sostenibilidad del cultivo, garantizando que la semilla cumpla su función en el proceso de transferencia tecnología al campo.

Cuadro 4. Reglas de laboratorio para semilla comercial de maíz.

Categoría	Semilla pura (%)	Materia inerte máximo (%)	Semillas fuera de tipo (Otras variedades, genéticamente modificadas) máximo (%)	Semillas de otros cultivos (máximo) (%)	Germinación (mínimo) (%)	Contenido de humedad (%)
Registrada	99	1	1	0	90	12-14
Certificada	99	1	2	0	90	12-14
Habilitada	95	5	2	0	80	12-14

Este análisis no evalúa la composición química, sino que se enfoca en la identificación y cuantificación de contaminantes visibles o separables físicamente (figura 3).

Inspecciones de campo

El técnico responsable de calificación en campo realizará las inspecciones que se consideren necesarias de acuerdo con la fecha de siembra declarada en la solicitud, siendo responsabilidad del productor de semilla ratificar tal fecha de siembra real en que se llevó a cabo dicha actividad (cuadro 5 muestra algunas tolerancias de campo). Las inspecciones se podrán realizar en las siguientes etapas:

1. Siembra: Para garantizar la identidad del material genético que se va a multiplicar.
2. Previo a la floración: Para garantizar la identidad del material genético y evaluar la calidad genética de los progenitores.
3. Floración: Para evaluar aislamiento, desmezcle y desespigamiento (en producción



de semilla híbrida) además de verificar que la liberación de polen del progenitor femenino o de plantas fuera de tipo en ambos progenitores no rebase los límites permitidos.

4. Cosecha: Para verificar que únicamente se cosechen los surcos del progenitor femenino y no existan plantas fuera de tipo con semilla formada.



Figura 3. Componentes de un análisis de pureza física de muestra de semilla de maíz (materia prima)

Cuadro 5. Tolerancias de campo, establecidas en la regla de producción de semilla de maíz.

Factor	Categoría		
	Básica	Registrada	Certificada
Plantas fuera de tipo, incluyendo otras variedades y genéticamente modificadas	0	2 en 1,000	5 en 1,000
Plantas de otros cultivos	0	0	0
Plantas de malezas	0	0	0
Mazorcas fuera de tipo	0	1 en 1, 000	5 en 1,000

Categorías de Semilla Otorgadas por SNICS

Los técnicos del SNICS realizan visitas de inspección a los lotes de producción, evaluando tanto el campo como las instalaciones de beneficio y los análisis de laboratorio. Este proceso garantiza que la semilla cumpla con los estándares de calidad física, genética,



fisiológica y sanitaria, asegurando la trazabilidad desde la semilla básica hasta la comercial. La categoría otorgada no solo protege los derechos del obtentor, sino que también respalda al agricultor, asegurando que la semilla que adquiere es confiable, uniforme y apta para producción comercial. El otorgamiento de una categoría garantiza la de los lotes o unidades de producción, protegen el derecho del obtentor y aseguran la trazabilidad desde la semilla básica hasta la comercial. Básicamente, el proceso inicia con la inspección de técnicos del SNICS, que analiza el lote (campo, beneficio, laboratorio). Si es favorable, emite una Etiqueta oficial, foliada y con marcas de seguridad. En la figura 3 se presentan las categorías de semilla establecidas

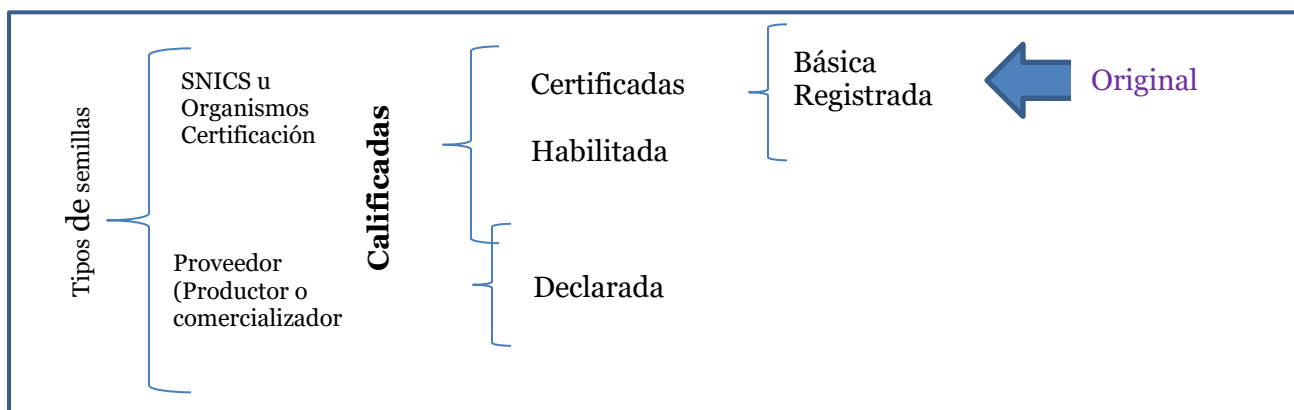


Figura 4.- Tipos y categorías de semilla reconocidas por SNICS. Fuente: SNICS Jalisco.

Las especificaciones de cada categoría son:

- ☐ La semilla básica, es la obtenida directamente del Fitomejorador, como resultado de un proceso de mejoramiento genético. El proceso de transferencia tecnológica de una nueva variedad, inicia con semilla básica.
- ☐ Semilla Registrada. Se obtiene, a través del incremento de semilla básica, además de un proceso de registro ante el SNICS y evaluada como una nueva variedad que cumple con las condiciones de: Nueva, estable y homogénea.
- ☐ Semilla Habilitada. Cuando en un proceso de producción de semilla en campo o laboratorio, no se cumplieron cabalmente las reglas de calificación, sin embargo, la semilla de la especie en cuestión, no cumple con el abastecimiento requerido en una zona, se habilita para su siembra, especificando que parámetro, no se cumplió por completo.
- ☐ Semilla certificada. Es la semilla que proviene de semilla registrada o básica y que luego de ser inspeccionada y analizada, cumple satisfactoriamente con los estándares de identidad genética, pureza, germinación, vigor y sanidad establecidos en las reglas técnicas. Su certificación garantiza que conserva las



características de la variedad declarada y que es apta para producción comercial y distribución legal. La etiqueta de esta categoría, respalda la calidad y legalidad del lote, permite la trazabilidad, y garantiza que cumple con los estándares oficiales.

Una semilla certificada es aquella que ha sido producida, controlada y verificada bajo normas oficiales para garantizar su pureza genética, alto poder germinativo, sanidad y calidad física. Está libre de impurezas, plagas y enfermedades, y presenta un crecimiento uniforme y vigoroso. Se entrega en envases sellados con una etiqueta oficial que garantiza su origen, variedad, lote y calidad (figura 5). Su uso permite obtener cultivos más productivos, uniformes y sanos, con respaldo técnico y trazabilidad asegurada.

Ahora bien, en contraste con la semilla certificada, existe otra categoría, no calificada por SNICS, la semilla Declarada, la cual no requiere verificación oficial; su calidad y características son declaradas por el productor de semilla, lo que la hace más económica y accesible para autoconsumo, producción local o experimental, pero con mayor riesgo de variabilidad, presencia de plagas o enfermedades y en ocasiones menor uniformidad en el cultivo. La elección entre ambas depende del objetivo de producción, y la tolerancia al riesgo en el rendimiento agrícola.



Figura 5. Ejemplo de una etiqueta de semilla certificada con los puntos que deben señalarse para garantizar la trazabilidad. Fuente: SNICS, Jalisco.

Conclusiones

La semilla constituye el insumo estratégico más relevante para garantizar la productividad agrícola y la seguridad alimentaria en México. La riqueza genética del maíz, con 64 razas



identificadas, requiere de un manejo estratégico, en el cual el aseguramiento de la calidad en cada etapa del proceso productivo se lleva a cabo mediante un sistema de producción y certificación de semillas.

La evaluación integral de la calidad de la semilla en sus cuatro dimensiones —física, genética, sanitaria y fisiológica— permite garantizar la pureza, identidad varietal, viabilidad, vigor y ausencia de patógenos. Estos atributos son determinantes para el establecimiento uniforme del cultivo, la adaptación a condiciones agroclimáticas diversas y la optimización del rendimiento potencial de las variedades y líneas mejoradas.

El proceso de certificación, coordinado por el SNICS y fundamentado en normas internacionales (ISTA) y nacionales, asegura la trazabilidad, autenticidad y legalidad del material genético desde su origen hasta la comercialización. La clasificación en categorías de semilla (básica, registrada, certificada, habilitada y declarada) establece criterios diferenciados de control de calidad, siendo la semilla certificada la más confiable para la producción comercial a gran escala.

Programas de apoyo como MASAGRO generado por el CIMMyT, han demostrado la relevancia del uso de semillas híbridas y regionalmente validadas, contribuyendo a la sostenibilidad productiva y reducción de la dependencia de importaciones.

Bibliografía

- Association Official Seed Analysts (AOSA). (1992). Seed vigour testing handbook. Association Official Seed Analysts. Contribution No. 32 to the Handbook of Seed Testing. US, 6(2), 1-126.
- CONABIO. (2020). Maíces. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Ciudad de México, México. Recuperado de <https://www.biodiversidad.gob.mx/diversidad/alimentos/maices> el 3 de junio de 2025.
- Domínguez-García, I. A., Reyes Altamirano-Cárdenas, J., Barrientos-Priego, A. F., & Ayala-Garay, A. V. (2019). Análisis del sistema de producción y certificación de semillas en México. *Revista Fitotecnica Mexicana*, 42(4), 347-356. Disponible en https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-73802019000400347&script=sci_arttext
- Félix-Lizárraga, J. U., Ruiz-Torres, N. A., Rincón-Sánchez, F., Sánchez-Ramírez, F. J., Borrego-Escalante, F., & Benavides-Mendoza, A. (2023). Selección de poblaciones de maíz con base en la producción temprana de biomasa bajo condiciones de estrés salino. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 14(3), 449-458.



- FIRA. (2024). Panorama Agroalimentario 2024, maíz. Recuperado de <https://www.fira.gob.mx/InfEspDtoXML/abrirArchivo.jsp?abreArc=122742> el 19 de mayo de 2025.
- García-Salazar, J. A., Ramírez-Jaspeado, R., Ávila-Soler, E., & Ramírez-Barraza, B. A. (2023). ¿Es posible disminuir la dependencia alimentaria de maíz en México? *Revista Fitotecnia Mexicana*, 46(3), 299-307. Recuperado de <https://www.scielo.org.mx/pdf/rfm/v46n3/0187-7380-rfm-46-03-299.pdf> el 2 de junio de 2025.
- Gobierno de México – SMA. (2022). Manual para el análisis físico y biológico de semillas. Fuente: <https://sma.gob.mx/wp-content/uploads/2022/08/Manual-semillas-.pdf>
- Gobierno de México – SNICS. (2013, actualizado). Acreditación internacional del Laboratorio Central de Referencia. Fuente: <https://www.gob.mx/snics/articulos/acreditacion-internacional-del-laboratorio-central-de-referencia>
- Gobierno de México – SNICS. (2021). Reglas Técnicas para la calificación de semilla de maíz (PDF). Fuente: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/651861/Maiz_Reglas_Tecnicas_020721.pdf
- Hellin, J., Keleman, A., López, D., Donnet, L., & Flores, D. (2013). La importancia de los nichos de mercado: un estudio de caso del maíz azul y del maíz para pozole en México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 36(Supl. 3-a), 315-328. Recuperado de <https://www.scielo.org.mx/pdf/rfm/v36s3-a/v36s3-aa8.pdf> el 8 de junio de 2025.
- ISTA. (2016). Reglas Internacionales para el Análisis de Semillas (traducción al español). Fuente: https://snics.gob.mx/doc/boletin_ista2016.pdf
- Ley Federal de Producción, Certificación y Comercio de Semillas. (2018). Recuperado de https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LFPCCS_110518.pdf
- Massieu, T. Y., & Montenegro, L. J. (2002). El maíz en México: biodiversidad y cambios en el consumo. *Análisis Económico*, 17(36), 281-303. Disponible en <https://uiimseminario.wordpress.com/wp-content/uploads/2015/04/3612.pdf>
- Matsuoka, Y., Vigouroux, Y., Goodman, M. M., Sanchez G., J., Buckler, E., & Doebley, J. (2002). A single domestication for maize shown by multilocus microsatellite genotyping. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(9), 6080-6084. <https://doi.org/10.1073/pnas.052125199>
- Peretti, A. (1994). Manual para análisis de semillas. Editorial Hemisferio Sur.



- Revista Fitotecnia Mexicana. (2019). Ley Federal de Producción, Certificación y Comercio de Semillas (PDF). Fuente: <https://revistafitotecniamexicana.org/documentos/42-4/3a.pdf>
- Romero, C., Tonatiuh, A., Becerril-Piña, R., Díaz-Delgado, C., Mastachi-Loza, C. A., Vilchis-Francés, A., & Arévalo-Mejía, R. (2023). Maíz de temporal: ¿es suficiente el conocimiento etnoecológico para afrontar la variabilidad climática? *Economía, Sociedad y Territorio*, 23(71), 185-215. Recuperado de <https://www.scielo.org.mx/pdf/est/v23n71/2448-6183-est-23-71-185.pdf> el 20 de mayo de 2025.
- Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas (SNICS). (2025). Boletín Informativo de Producción de Semilla Calificada por el SNICS, Ciclos Agrícolas PV 2024 / OI 2024-2025. Año 7, No. 1. México. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/1004877/BOLETIN-JUNIO-2025_READY.pdf
- Tadeo-Robledo, M., Zamudio-González, B., Espinosa-Calderón, A., Turrent-Fernández, A., & Valdivia-Bernal, R. (2015). Rendimiento de maíces nativos e híbridos en diferente fecha de siembra y sus unidades calor. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(1), 33-43.
- Virgen-Vargas, J., Zepeda-Bautista, R., Ávila-Perches, M. A., Espinosa-Calderón, A., Arellano-Vázquez, J. L., & Gámez-Vázquez, A. J. (2016). Producción y calidad de semilla de maíz en valles altos de México. Recuperado de <https://www.redalyc.org/journal/437/43743010019/html/>
- Xu, G., Zhang, X., Chen, W., Zhang, R., Li, Z., Wen, W., Warburton, M., Li, J., Li, H., & Yang, X. (2022). Population genomics of *Zea* species identifies selection signatures during maize domestication and adaptation. *BMC Plant Biology*, 22, 72. <https://doi.org/10.1186/s12870-022-03427-w>.

SEGURIDAD ALIMENTARIA



Patógenos responsables de infecciones asociadas al consumo de ceviche de pescado

Fidel Avila-Ramos.
Mauricio Arredondo-Castro.
Juan José Fernando Borrayo-González.
Carlos Omar De la Cruz-Moreno.
Socorro Marisa Salgado-Moreno.
Ranferi Gutiérrez-Leyva.
Carlos Alfredo Carmona-Gasca.





Resumen

El ceviche es un pilar de la gastronomía de Nayarit, especialmente en su zona costera. Su importancia radica en ser un platillo emblemático que refleja la riqueza de los recursos marinos del estado. Su sencillez, frescura y sabor lo han convertido en un favorito local y un atractivo turístico. En Nayarit, el ceviche se prepara típicamente con pescado, camarón o una combinación de ambos, curado en jugo de limón, mezclado con verduras frescas como cebolla, jitomate, pepino y cilantro. Se sirve a menudo con tostadas, galletas saladas o totopos. La popularidad del ceviche en Nayarit lo posiciona no solo como un alimento, sino como una tradición culinaria que forma parte de la identidad cultural y social de la región. Desde el punto de vista microbiológico, el ceviche presenta un caso interesante y crucial. Su preparación tradicional no implica cocción por calor, sino un proceso de desnaturalización de proteínas por la acción del ácido cítrico del limón. Este proceso, conocido como "curado", modifica la textura y apariencia del pescado, dándole la apariencia de estar cocido. Sin embargo, este proceso no es tan efectivo como el calor para eliminar todos los microorganismos patógenos como *Vibrio*, *Salmonella* y *Escherichia coli*, así como de parásitos como el Anisakis. Para mitigar los riesgos, preferiblemente realizar el manejo adecuado en la cadena de frío, la higiene en la manipulación de los alimentos y el uso de utensilios limpios. Por último, es recomendable congelar el pescado a temperaturas muy bajas por un tiempo determinado para inactivar parásitos.

Palabras clave: Comida del mar, patógenos, ETAs, gastronomía, parasitosis.



Introducción

La carne de pescado cruda o insuficientemente cocida y las hueveras de peces han sido utilizadas en diferentes culturas para la preparación de platos como el gravetlaks noruego, el glasmastaresill sueco, el seljodki ruso, el siika finlandés, el rollmop alemán, el tartar francés o el carpaccio italiano. Otras especialidades gastronómicas de la cocina oriental como el sashimi, el nigui y el sushi se prepara con pescado crudo envuelto en arroz macerado en vinagre al que se agregan algas y verduras. En estos, la carne se marina con diferentes especias y líquidos aromáticos que no provocan la muerte de bacterias o parásitos que pueden vivir en la musculatura, ya que éstos solamente se inactivan con el calentamiento.

El ceviche es un plato tradicional latinoamericano hecho con pescado, crustáceos, moluscos solos o mezclados crudos, estos son marinados en jugo de limón persa (*Citrus latifolia*) o naranja agria (*Citrus aurantium*), condimentados con cebolla (*Allium cepa*), chile, principalmente piquín (*Capsicum annuum* var. *glabriusculum*). o chiltepín (*Capsicum annuum* var. *aviculare*), cilantro (*Coriandrum sativum*) y sal. Esta preparación se cocina a través de la acidez del jugo cítrico, que según las creencias de los cocineros es que "cuece" el pescado sin la necesidad de calor. El ceviche puede variar según la región y los gustos, incluyendo ingredientes como tomate (*Solanum lycopersicum*), pepino (*Cucumis sativus*), aguacate (*Persea americana*), frutas o incluso leche de tigre, este último es una salsa característica de la gastronomía peruana. El ceviche es un plato muy popular en la región del Pacífico latinoamericano, es parte de la cultura gastronómica en varios países. El ceviche en la región del pacífico mexicano es una de las grandes delicias de la gastronomía, se prepara con pescado fresco, limón, zanahoria, pepino y jitomate, tiene un sabor fresco y ligero. A diferencia de otros ceviches, este va con pescado triturado o picado y lleva un toque de zanahoria, lo que lo hace un plato ligero, nutritivo y fresco. Se sirve en tostadas y se adereza con guacamole o salsa macha.

Especies de pescado utilizadas para preparar de ceviches

Técnicamente cualquier especie de pescado se utiliza para la preparación del cebiche, la tilapia (*Oreochromis niloticus*), es uno de los peces que actualmente tiene mayor aceptación por parte de los consumidores y se considera una atractiva opción del menú en cadenas de restaurantes a nivel nacional. En términos de volumen de producción, Taiwán es el mayor exportador del mundo y junto con Tailandia e Indonesia constituyen los mayores proveedores de filetes de tilapia congelados. En el Pacífico mexicano, son comunes para preparar cebiche: el esmedregal (*Seriola rivoliana*), lenguado (*Paralichthyidae*) la cabrilla (*Serranidae*), el barrilete (*Katsuwonus pelamis*). Algunas especies determinadas como sobre-explotadas fueron tiburón (*Carcharhinidae*, *Sphyrnidae*, *Echinorhinidae*, *Lamnidae*, *Squatinaidae*), la sierra (*Scomberomorus*), pulpo, mero (*Epinephelus*), la lisa (*Mugilcephalus*), el huachinango (*Lutjanus peru*), la



corvina (*Sciaenidae*), el cazón (*Triakidae*), el bagre (*Aridae*), el robalo (*Centropomus*), camarón (*Penaeus*), la berrugata (*Menticirrhus* sp.), la bandera (*Ariidae*) el atún (*Thunnus*); por su tendencia, especies como pámpano (*Carangidae*), el pargo (*Lutjanidae*) y la mojarra de mar (*Gerreidae*), el bonito (*Sarda*), el jurel (*Carangidae*) y la lebrancha (*Mugil*). Algunas especies de mariscos que también se consumen en cebiche son: la langosta (*Panulirus*), el caracol (*Melongenidae*, *Muricidae*, *Strombidae*, *Thaididae*, *Turbinidae*), la almeja (*Arcidae*, *Pectinidae*, *Spondylidae* y *Veneridae*), el calamar (*Loligo*), camarón (*Penaeus*), el ostión (*Crassostrea*) y el pulpo (*Octopus vulgaris*).

Patógenos que se encuentran en los pescados

Las enfermedades transmitidas por los alimentos (ETA), constituyen un grave problema de salud a nivel mundial, motivo por el cual la inocuidad de los alimentos ha sido el principal reto del Sistema de Salud Pública. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), los patógenos de transmisión alimentaria pueden ser causa de infecciones o intoxicaciones de leves a graves enfermedades. A través de la identificación de microorganismos por criterios fisiológicos, morfológicos y moleculares, se aporta la información necesaria del agente causante y el promotor de ETAs, lo cual es esencial para la vigilancia del producto a ser comercializado y el control epidemiológico de las enfermedades causadas por dichos microorganismos. Estos microorganismos han jugado un papel importante en la comunidad científica, es así que las colecciones microbianas mediante la existencia de cerapios, cada día adquieren mayor protagonismo, constituyéndose una fuente sustentable para la preservación ex situ de la diversidad microbiana.

Bacterias asociadas a enfermedades por consumo de alimentos del mar no cocinados

La mayoría de los patógenos causantes de ETAs, son microorganismos mesófilos, con excepción de *Listeria monocytogenes*, *Yersinia enterocolitica*, y *Clostridium botulinum* tipo E, que presentan un comportamiento psicofílico. Mientras que *Alicyclobacillus*, *Geobacillus stearothermophilus* y *Bacillus sporothermodurans* se consideran ejemplos de microorganismos termofílicos de importancia en alimentos e industrias de bebidas. La temperatura entre 4 y 12° C ayuda a frenar la actividad metabólica de los microorganismos en los alimentos, se preserva la vida útil de alimentos procesados, pasteurizados y la comida cruda. La disminución de temperaturas detiene el desarrollo de microorganismo mesófilos y termófilos, pero no de los microorganismos psicotrofos, en los que se pueden ralentizar su actividad metabólica ajustando otros parámetros intrínsecos y extrínsecos.

En todos los países que llevan a cabo programas de vigilancia de las enfermedades transmitidas por los alimentos. *Salmonella*, *S. aureus* son los agentes más presentes en la



mayoría de los países, *E. coli* O157 y *E. coli* verotoxigénica (VTEC). A pesar de los conocimientos sobre estos organismos y los factores que contribuyen a la enfermedad, parece que apenas disminuye el número de casos, y el impacto socioeconómico de las enfermedades transmitidas por los alimentos del mar siguen siendo muy elevados. Una de las razones que dificultan el control es que, la vigilancia de autoridades sanitarias es inadecuada o ausente y los responsables de la preparación y los consumidores no comprenden plenamente la importancia que suponen las enfermedades transmitidas por los alimentos.

Como un ejemplo muy particular, la flora microbiana de la tilapia viva, ~~ésta~~ depende de la flora existente en las aguas de donde proviene y varía de acuerdo con el hábitat de la especie, sobre todo con la temperatura, profundidad y grado de contaminación de las aguas. Se destaca la presencia de psicrófilos Gram negativos incluyendo *Pseudomonas*, *Shewanella*, *Moraxella*, *Acinetobacter*, *Flavobacterium* y bacterias de la familia Aeromonadaceae. Entre los Gram positivos existe una proporción variable de *Bacillus*, *Micrococcus*, *Clostridium*, *Lactobacillus* y *Corynebacterium*. Las bacterias patógenas o indicadoras de contaminación raramente son encontradas en el pescado recién capturado, a no ser que provenga de aguas excesivamente contaminadas con materia fecal.

La microflora de los crustáceos es semejante a la de los pescados recién capturados, está formada principalmente por *Pseudomonas*, *Achromobacter*, *Micrococcus* y *Corynebacterium*; pero también se pueden encontrar *Flavobacterium*, *Alteromonas*, *Moraxella*, *Escherichia*, *Proteus*, *Serratia*, *Bacillus*, *Vibrio*, *Clostridium*, hongos filamentosos y levaduras. Debido a que es un alimento perecedero, se conserva desde su captura a bajas temperaturas, lo que determina que la proporción de *Acinetobacter*/*Moraxella* en algunos casos sea del 80%. Entre las bacterias que participan en la descomposición de estos alimentos se encuentran *Pseudomonas*, *Shewanella*, *Alteromonas* y especies de la familia Enterobacteriaceae. La elaboración del ceviche acarrea no solo la flora normal y adquirida de la materia prima a utilizar, sino que también la flora que se agregue durante su elaboración y de ingredientes adicionales.

En un estudio de calidad sanitaria en Compostela Nayarit, México se tomaron 19 muestras de ceviche de pescado de establecimientos que tenían venta de mariscos, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 1.

De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-113-SSA1-1994: Método para la cuenta de microorganismos coliformes totales en placa, al evaluar la cantidad de microorganismos de manipulación se encontró que la gran mayoría de cevicherías no cumplen con las condiciones sanitarias adecuadas; en cuanto a los hábitos del manipulador se halló que el 78.94% de las personas no se lava las manos antes de tener contacto con los alimentos, y el 79% toca el dinero y los alimentos, además solo el 58% mantiene refrigerado el ceviche, lo cual promueve el crecimiento bacteriano, en la mayoría



de los establecimientos se encontraron bacterias por encima del límite permisible. Los resultados indican una contaminación bacteriana, pero es exacerbada por el mal manejo del alimento o por contaminación cruzada.

Tabla 1: Muestra el número de bacterias, fermentadoras, no fermentadoras y enterobacterias que se encontraron en el ceviche de pescado procedentes de los diferentes establecimientos.

Establecimiento	Fermentadoras UFC/g	No fermentadoras UFC/g	Enterobacterias UFC/g
1	35,000	15,500	50,500
2	7,550	1,050	8,600
3	72,500	11,500	84,000
4	1,400	1,600	3,000
5	815	660	1,475
6	7,500	39,000	46,500
7	1,000	40,500	41,500
8	500	104,000	104,500
9	42,000	4,000	46,000
10	91,000	94,500	185,500
11	0	56,000	56,000
12	0	828,000	828,000
13	1,500	76,500	78,000
14	500	345,500	346,000
15	0	34,000	34,000
16	5,500	67,000	72,500
17	0	71,500	71,500
18	1,000	62,000	63,000
19		175,500	175,500
Promedio	2,115	207,467	205,351

El lavado de manos es de suma importancia, Los microorganismos patógenos que afectan a los animales y al ser humano también afectar a vida de anaquel del ceviche, por lo que es importante hacer conciencia en el cumplimiento de las normas sanitarias en cuanto manejo de los utensilios y almacenamiento de los productos alimentarios, así como de la higiene personal y de la limpieza del área de preparación, siendo todo lo anterior importante para la inocuidad del alimento.

Otro estudio que se realizó en el año 2015, sobre la incidencia de *Salmonella* y *Staphylococcus aureus* en ceviche de pescado en los mercados de Piura, Perú,



concluyeron que las condiciones intrínsecas de estos productos eran desfavorables para el crecimiento de microorganismos patógenos. Sin embargo, enfatizaron la necesidad de realizar estudios sobre la calidad microbiológica del ceviche para mitigar el riesgo de transmisión de ETAs, sugirieron la implementación de programas de vigilancia en los puestos de comida.

Dos años después, examinó el control microbiológico de diversas especies de pescado en España, destacando que el consumo de productos de la pesca bien cocinados reduce el riesgo asociado a bacterias patógenas. Aunque las especies bacterianas encontradas no representaron un riesgo significativo para la seguridad alimentaria, el estudio subraya la importancia de mantener buenas prácticas de higiene y tratamiento de los productos congelados para garantizar la inocuidad del pescado consumido.

En 2018, un equipo de investigadores llevó a cabo una evaluación microbiológica de pescados y mariscos en los mercados de Huánuco, Perú. Este estudio reveló que la calidad higiénica del pescado crudo era inadecuada, con un alto porcentaje de muestras contaminadas por *Salmonella* y coliformes, lo que pone de manifiesto la inseguridad del consumo de alimentos crudos de origen marino. Los hallazgos resaltaron la necesidad de mejorar los estándares de higiene en la cadena de suministro de pescado.

En el 2019, se realizó una investigación la calidad microbiológica del pescado fresco en el mercado La Tiendona, San Salvador. El estudio identificó la contaminación con bacterias nocivas, sugirió que se establecieran registros y controles para garantizar la inocuidad de los productos pesqueros. Además, recomendaron que los consumidores cocinarán adecuadamente el pescado, dado los microorganismos son sensibles a altas temperaturas, lo que puede reducir el riesgo de enfermedades.

Finalmente, en 2021, se presentó un análisis sobre la calidad microbiológica del ceviche de leche tigre en Trujillo. Su investigación mostró que el 16% de las muestras analizadas contenían *Salmonella*, y que la mayoría de los establecimientos no cumplían con las condiciones sanitarias adecuadas. Este estudio concluyó que el consumo de ceviche implica un alto riesgo debido a prácticas de higiene inadecuadas y la contaminación microbiana.

Parasitosis asociadas al consumo de comida del mar

Las infestaciones por helmintos asociadas al consumo de marisco crudo incluyen aquellas causadas por nematodos, trematodos y cestodos, especialmente *Estrongyloides*, especies de *Diphyllobothrium* y miembros de la familia Anisakidae. Las manifestaciones clínicas asociadas a las infecciones helmínticas van desde la ausencia de síntomas hasta síntomas gastrointestinales crónicos leves, reacciones alérgicas y, en raras ocasiones, perforación intestinal y enfermedad invasiva. El diagnóstico se confirma mediante la detección de óvulos o segmentos de gusanos en muestras de heces. Muchos gusanos están presentes de forma natural en aguas marinas y dulces, y la mayoría de los animales marinos están



infectados; sin embargo, a pesar de la elevada prevalencia de helmintos en el marisco, rara vez se notifican brotes asociados a este alimento. Esta observación se debe probablemente a varios factores: en primer lugar, los helmintos no son capaces de multiplicarse en los alimentos; en segundo lugar, los largos periodos de incubación dificultan la identificación de la fuente de infección y, en tercer lugar, es probable que las infecciones estén infradiagnosticadas y no se notifiquen, debido en parte a la falta de pruebas diagnósticas rutinarias. No obstante, el consumo de marisco crudo puede ser fuente de infección por helmintos, los que se eliminan mediante una congelación adecuada y la cocción. Las estrategias de control para reducir el riesgo de infecciones por helmintos incluyen la inspección visual del pescado, lavado con velas, que tienen el objetivo de buscar parásitos que sean lo suficientemente grandes como para ser detectados visualmente.

Los protozoos son una causa poco común de enfermedades transmitidas por los alimentos en los Estados Unidos, y los brotes de origen común casi siempre son transmitidos por el agua. Entre los protozoos causantes de enfermedades reconocidas asociadas a los alimentos de origen marino se encuentra. *Giardia* es uno de los parásitos intestinales más comúnmente identificados en Estados Unidos. Las manifestaciones clínicas pueden incluir dolor abdominal, flatulencia, anorexia y un curso prolongado de diarrea acuosa y maloliente; la infección asintomática es común. El diagnóstico de laboratorio suele realizarse mediante la identificación de trofozoitos o quistes en muestras de heces o mediante la detección de antígenos fecales por enzimo-inmunoanálisis. Los seres humanos y otros animales son el reservorio de la infección. Se han notificado brotes de giardiasis de origen alimentario en los que la transmisión se produjo por contaminación de alimentos por manipuladores infectados. Los protozoos son sensibles al calor y a la congelación prolongada. Las estrategias para prevenir la transmisión alimentaria incluyen una cocción adecuada y la prevención de la contaminación de los alimentos durante su preparación.

Virus de importancia en enfermedades alimentarias

Norovirus es un virus ARN estructurado que se encuentra entre los calicivirus reconocidos como patógenos humanos. La infección por norovirus causa una enfermedad autolimitada caracterizada por diarrea, vómitos, náuseas, calambres abdominales, a veces, cefalea, mialgias y fiebre baja. El virus puede identificarse por microscopía electrónica o PCR de transcriptasa inversa en muestras de heces y por inmunoensayo enzimático para la detección del antígeno viral en muestras de suero. El humano es el único reservorio conocido, se transmite de persona a persona por vía fecal-oral o a través de alimentos o agua contaminados. Los norovirus pueden persistir en el ambiente por semanas o meses e infectar a personas de todas las edades. La mayoría de los brotes se registran en guarderías, cruceros, centros de cuidados de larga duración y otras poblaciones cerradas.



Es una de las principales causas de enfermedades y brotes de origen alimentario, aunque es probable que el número de brotes notificados esté muy subestimado debido a la falta de disponibilidad o uso rutinario de pruebas diagnósticas. La adopción de la PCR con transcriptasa inversa por parte de los Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades y los laboratorios estatales de salud pública en la década de 1990 ha mejorado y aumentado enormemente la identificación de norovirus como agente etiológico de brotes de origen alimentario.

La comida del mar recolectada en aguas contaminadas por aguas residuales ha causado brotes de gastroenteritis por norovirus. Se han asociado grandes brotes con el consumo de pescados o mariscos crudos o cocinado de forma inadecuada, como una serie de brotes asociados a ostras y almejas en los que estuvieron implicadas las aguas costeras. Los mariscos, especialmente los moluscos bivalvos que se alimentan por filtración, pueden acumular grandes cantidades de virus. La contaminación de las zonas de recolección con aguas residuales humanas, que se ha producido tras el vertido de aguas residuales por la borda de los barcos de recolección de ostras y por la escorrentía de aguas residuales a las zonas de recolección tras fuertes lluvias, ha sido una fuente importante de brotes. Además, una cocción insuficiente, como la cocción de las almejas al vapor sólo hasta que se abren en lugar de a temperaturas más altas que matan los norovirus, ha contribuido a la aparición de enfermedades y brotes. Las medidas de control se han centrado en la vigilancia de la presencia de coliformes fecales en las aguas de recolección y en el fomento de una cocción adecuada del marisco; sin embargo, los continuos brotes de enfermedades han vuelto a llamar la atención sobre los riesgos asociados al consumo de ostras.

El virus de la hepatitis A contiene ARN en su material genético, se clasifica como picornavirus, las manifestaciones clínicas varían en gravedad, la infección por el virus es la más grave asociada al consumo de marisco. En la mayoría de los casos, se trata de una enfermedad aguda y autolimitada asociada a fiebre, malestar, ictericia, anorexia y náuseas; los síntomas pueden durar de varias semanas a varios meses y en el peor de los casos, pueden producir muertes de forma fulminante. La gravedad aumenta con la edad y, en raras ocasiones, puede producirse una hepatitis prolongada y recidivante. En lactantes y niños pequeños, la infección suele ser asintomática. El diagnóstico se realiza mediante pruebas serológicas que miden los anticuerpos de inmunoglobulina M contra el virus de la hepatitis A. El largo periodo de incubación de la enfermedad (de 2 a 8 semanas) puede dificultar la identificación de la fuente de infección, es probable que la infección por el virus de la hepatitis A asociada al marisco esté infradeclarada. En todo el mundo se producen casos esporádicos y epidémicos.

El ser humano es el único reservorio del virus de la hepatitis A, y la transmisión se produce generalmente por vía fecal-oral. En Estados Unidos se han descrito brotes asociadas a ostras y almejas desde la década de 1960. Este virus es resistente al calor y



capaz de soportar la cocción al vapor, por lo que una cocción adecuada disminuye la posibilidad de ingerir partículas virales del virus. Pero como el marisco suele prepararse con prácticas que no bastan para inactivar el virus, muchas estrategias de prevención se dirigen a controlar la contaminación antes de la preparación de los alimentos. La contaminación se produce con mayor frecuencia cuando las zonas de cultivo de marisco están contaminadas con aguas residuales humanas. El mayor brote notificado se produjo en China en 1988; casi 300.000 personas resultaron infectadas tras consumir almejas recogidas en una zona contaminada por aguas residuales. En las dos últimas décadas se han notificado menos brotes de infección por el virus de la hepatitis A asociados al consumo de marisco en los Estados Unidos, lo que puede atribuirse, al menos en parte, a la aplicación de mayores medidas de control para prevenir la contaminación fecal de los lechos de recolección durante la década de 1980.

Cuando hay disminución de casos está asociada a las estrategias de control eficaces para reducir el riesgo de infección a través de los alimentos de origen marino. Recientemente, la disponibilidad de métodos de secuenciación molecular para mejorar los datos epidemiológicos ha sido fundamental para relacionar casos dispersos en múltiples estados con productos alimentarios contaminados. El aumento de las capacidades de los laboratorios de salud pública para la secuenciación molecular mejorará la capacidad para identificar brotes de infecciones por virus de la hepatitis A.

Otras bacterias formadoras de toxinas

Staphylococcus aureus, *Clostridium perfringens* y *Bacillus cereus* pueden formar enterotoxinas que causan enfermedades gastrointestinales agudas. La enfermedad típica de la intoxicación por *S. aureus* y *B. cereus* es la aparición de náuseas, vómitos y diarrea leve entre 1 y 6 horas después de la ingestión de alimentos contaminados. Los periodos de incubación son muy cortos porque la toxina preformada está presente en el alimento ingerido. La intoxicación por *C. perfringens* tiene un periodo de incubación ligeramente más largo, porque la toxina no está preformada, sino que se produce en el tracto gastrointestinal. Los síntomas incluyen diarrea acuosa y calambres abdominales que comienzan entre 8 y 16 h después de la ingestión del alimento contaminado. La duración de los síntomas suele ser inferior a 24 horas, por lo que es probable que muchos casos no se diagnostiquen. El diagnóstico se confirma mediante el aislamiento del organismo en muestras de heces, vómitos o alimentos. Además, la enterotoxina de *S. aureus* puede detectarse en muestras de alimentos, lo que puede ser útil en situaciones en las que el organismo ha muerto durante el procesado o la preparación de los alimentos y, por tanto, no puede cultivarse.

Sólo algunas cepas de *S. aureus* producen una toxina que provoca enfermedades gastrointestinales. El principal reservorio es el ser humano, que porta la bacteria en las



fosas nasales, la piel o las heridas. La contaminación por *S. aureus* de los alimentos, incluidos los mariscos, suele deberse a la contaminación por un trabajador de la industria alimentaria durante la preparación de los alimentos. *B. cereus* y *C. perfringens* se encuentran en el suelo y son ubicuos. Se han publicado reportes esporádicos de enfermedades debidas a la presencia de estos organismos en alimentos de origen marino, pero los mecanismos en estos casos parecen ser similares a los de otros alimentos. Para prevenir brotes de enfermedades mediadas por toxinas, es importante mantener los alimentos refrigerados y garantizar el enfriamiento adecuado de los alimentos calientes a temperaturas de refrigeración. Los brotes suelen estar asociados a alimentos que se dejan a temperaturas inadecuadas durante periodos prolongados, lo que permite la multiplicación del organismo y la producción de enterotoxinas.

En Estados Unidos se invierten millones de dólares en programas de detección de brotes de enfermedades transmitidas por los alimentos antes de que se generalicen y también para reducir la cifra estimada de 6,5 a 33 millones de personas que enferman y 9.000 que mueren cada año a causa de enfermedades transmitidas por los alimentos. Estas iniciativas deberían estimular a otros países a llevar a cabo programas de vigilancia adecuados para poder determinar la carga real de las enfermedades de origen alimentario en diversos niveles nacionales. Si en los países industrializados, como Estados Unidos y el Reino Unido, se reconoce ahora que es un problema importante, pero muchas veces se desconoce la magnitud en los países donde el crecimiento urbano es más rápido de lo que pueden soportar las infraestructuras de salud pública y en las zonas rurales, donde tradicionalmente se consumen alimentos preparados con pescado crudo como el cebiche. Este problema se agudiza cuando los inmigrantes procedentes de países en vías de desarrollo, los viajes internacionales son habituales y el libre comercio se globaliza. Las organizaciones internacionales, como la OMS y la FAO y la OMC, dependen de buenos datos sobre brotes, encuestas alimentarias y demografía de la población, todos los países tienen que participar.

Conclusiones

Resulta evidente que el consumo de ceviche de pescado, aunque culturalmente valorado y ampliamente difundido, representa un riesgo significativo para la salud pública cuando no se cumplen las condiciones higiénicas necesarias en su preparación y manipulación. El análisis de estudios epidemiológicos y microbiológicos revela que las enfermedades transmitidas por alimentos han adquirido mayor relevancia en las últimas décadas, debido a la aparición de nuevos agentes patógenos, la reemergencia de microorganismos tradicionales en alimentos previamente considerados seguros, y el aumento de brotes de gran magnitud. Factores como la globalización alimentaria, el desarrollo de nuevas industrias como la acuicultura, y la demanda de alimentos tradicionales por parte de poblaciones migrantes han contribuido a esta problemática. Sin embargo, la limitada



capacidad de vigilancia sanitaria en muchos países, basada principalmente en mecanismos de notificación pasiva, dificulta el seguimiento preciso de estas enfermedades. Los datos internacionales coinciden en señalar a *Salmonella* como el principal agente causante de enfermedades alimentarias agudas, seguido por *Clostridium botulinum* y *E. coli verotoxigénica* en países industrializados, mientras que en países en desarrollo predominan *E. coli enterotoxigénica*, *Shigella*, *Vibrio cholerae* y diversos parásitos. En todos los casos, el control inadecuado de la temperatura durante la preparación y almacenamiento de los alimentos se identifica como uno de los factores más determinantes en la ocurrencia de brotes. Por tanto, se concluye que el fortalecimiento de los sistemas de vigilancia, la educación sanitaria y la implementación de buenas prácticas de higiene son prácticas esenciales para reducir los riesgos asociados al consumo de ceviche y otros alimentos de origen marino.

Bibliografía

- Barrett, K. A., Nakao, J. H., Taylor, E. V., Eggers, C., & Gould, L. H. (2017). Fish-associated foodborne disease outbreaks: United States, 1998–2015. *Foodborne Pathogens and Disease*, 14(9), 537-543. <https://doi.org/10.1089/fpd.2017.228>
- Bhaskar, S. V. (2017). Foodborne diseases—disease burden. In *Food safety in the 21st century* (pp. 1-10). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801773-9.00001-7>.
- Chatreman, N., Seecharran, D., & Ansari, A. A. (2020). Prevalence and distribution of pathogenic bacteria found in fish and fishery products: A Review. *Journal of Fisheries and Life Sciences*, 5(2), 53-65. Microsoft Word - 53- (176) ProofJournal of Fisheries and Life Sciences
- Chlebicz, A., & Śliżewska, K. (2018). Campylobacteriosis, salmonellosis, yersiniosis, and listeriosis as zoonotic foodborne diseases: a review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(5), 863. <https://doi.org/10.3390/ijerph15050863>.
- Echandi, M. L. A., y Ulate, C. C. (2012). Calidad microbiológica de la materia prima y el producto final del ceviche de tilapia y de camarón expendidos en el Área Metropolitana de San José, Costa Rica. *UNED Research Journal/Cuadernos de Investigación UNED*, 4(1), 85-92. [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.redalyc.org/pdf/5156/515651981010.pdf](https://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.redalyc.org/pdf/5156/515651981010.pdf).
- Eiras, J. C., Pavanelli, G. C., Takemoto, R. M., & Nawa, Y. (2018). An overview of fish-borne nematodiasis among returned travelers for recent 25 years—unexpected diseases



- sometimes far away from the origin. *The Korean Journal of Parasitology*, 56(3), 215. <https://doi.org/10.3347/kjp.2018.56.3.215>.
- Fleming, L. E., Katz, D., Bean, J. A., & Hammond, R. (2018). Epidemiology of seafood poisoning. In *Foodborne Disease Handbook* (pp. 287-310). CRC Press. <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781351072113-9/epidemiology-seafood-poisoning-lora-fleming-dolores-katz-judy-bean-roberta-hammond>.
- García Lañas, G. (2015). Incidencia de *Salmonella sp* y *Staphylococcus aureus* en cebiche de pescado expedido en establecimientos del mercado capullanas y mercados zonales de Piura. <https://core.ac.uk/reader/250076680>.
- Gauthier, D. T. (2015). Bacterial zoonoses of fishes: a review and appraisal of evidence for linkages between fish and human infections. *The Veterinary Journal*, 203(1), 27-35. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2014.10.028>.
- Gowda, C. (2015). Recognizing clonorchiasis: a foodborne illness leading to significant hepatobiliary disease. *Clinical Liver Disease*, 6(2), 44-46. 10.1002/cld.489.
- Hikal, W. M., y Said-Al Ahl, H. A. (2017). Food related parasitic infection: a review. *American Journal of Food Science and Health*, 3(2), 30-34. 10.2478/helm-2021-0022.
- Lake, R. J., Devleesschauwer, B., Nasinyama, G., Havelaar, A. H., Kuchenmüller, T., Haagsma, J. A. y Speybroeck, N. (2015). National studies as a component of the World Health Organization initiative to estimate the global and regional burden of foodborne disease. *PLoS One*, 10(12), e0140319. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0140319>.
- Marco Vásquez Ampuero, J., Richard Tasayco Alcántara, W., Ángel Chuquiyauri Talenas, M., & Apac Sotil, S. (2018). Evaluación microbiológica de pescados y mariscos expendidos en mercados de la ciudad de huánuco. <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.redalyc.org/pdf/5860/586077211002.pdf>.
- Novoslavskij, A., Terentjeva, M., Eizenberga, I., Valciņa, O., Bartkevičs, V., & Bērziņš, A. (2015). Major foodborne pathogens in fish and fish products: a review. *Annals Of Microbiology*, 66(1), 1-15. <https://doi.org/10.1007/s13213-015-1102-5>
- Robertson, L. J., Sprong, H., Ortega, Y. R., van der Giessen, J. W., y Fayer, R. (2014). Impacts of globalization on foodborne parasites. *Trends in Parasitology*, 30(1), 37-52. 10.1016/j.pt.2013.09.005.
- Roldán Adalid, I. (2017). Control microbiológico de panga (*Pangasius hypophthalmus*), tilapia (*Oreochromis spp.*) y merluza (*Merluccius merluccius*) ultracongelado. Análisis de



- presencia de bacterias patógenas.
<https://agris.fao.org/search/en/providers/125048/records/67488b2f6b7cc10eeb5abfca>.
- Semenas, L. (2013). Sushi y ceviche: ¿Peligrosamente ricos? *Desde la patagonia. Difundiendo saberes*, 10(15), 26-33. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://desdelapatagonia.uncoma.edu.ar/wp-content/uploads/2016/07/Semenas_sushi_DLP_Vol10N15_2013.pdf.
- Shafi, A., Farooq, U., Akram, K., Khan, M. Z., Hayat, Z., & Hayat, K. (2021). Molecular epidemiology of foodborne diseases. In *Sequencing Technologies in Microbial Food Safety and Quality* (pp. 109-154). CRC Press. <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9780429329869-4/molecular-epidemiology-foodborne-diseases-afshan-shafi-umar-farooq-kashif-akram-muhammad-zaki-khan-zafar-hayat-khizar-hayat>.
- Silva, C., Calva, E., & Maloy, S. (2014). One Health and food-borne disease: Salmonella transmission between humans, animals, and plants. *One health: People, Animals, and Theenvironment*, 137-148. <https://doi.org/10.1128/9781555818432.ch9>.
- Todd, E. C. (2014). Foodborne diseases: Overview of biological hazards and foodborne diseases. *Encyclopedia of Food Safety*, 221. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-378612-8.00071-8>.
- Torgerson, P. R., Devleesschauwer, B., Praet, N., Speybroeck, N., Willingham, A. L., Kasuga, F. y de Silva, N. (2015). World Health Organization estimates of the global and regional disease burden of 11 foodborne parasitic diseases, 2010: a data synthesis. *PLoS Medicine*, 12(12), e1001920. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1001920>.
- Vásquez García, Jacqueline Liliana. (2021). Calidad microbiológica del ceviche de leche tigre comercializado ambulatoriamente (Barrio Chicago Trujillo, del 2020). <https://repositorio.usanpedro.edu.pe/items/3af94b76-bb67-4f0f-9909-6d741e735666>.
- Wu, Y., Wen, J., Ma, Y., Ma, X., & Chen, Y. (2014). Epidemiology of foodborne disease outbreaks caused by *Vibrio parahaemolyticus*, China, 2003–2008. *Food Control*, 46, 197-202. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2014.05.023>.

MEDICINA ALTERNATIVA



Abanico Académico

Plantas utilizadas en medicina tradicional mexicana: *Heterotheca inuloides* Cass (Árnica mexicana)

Fátima Jaqueline Ramos-Parga.
Perla Ivonne Gallegos-Flores.
Edgar León Esparza-Ibarra.
Emmanuel De La O-Cuevas.
Lucía Delgadillo-Ruíz.
Josefina Huerta-García.





Resumen

En medicina tradicional el uso y aplicación de plantas ha sido fundamental en todas las culturas del mundo, en la actualidad científicos han confirmado que los efectos terapéuticos de las plantas medicinales se deben a la presencia de compuestos bioactivos o fitoquímicos los cuales presentan propiedades antioxidantes, citotóxicas, antiinflamatorias, antivirales y antimicrobianas, este conocimiento científico ha validado el uso de este material vegetal en la medicina moderna; especialmente ante el aumento de la resistencia de microorganismos a los antibióticos actuales. La Organización Mundial de la Salud, reconoce a la medicina tradicional y plantas medicinales como un recurso vital para la atención primaria de salud, es por ello que en México, el uso de estas plantas combina el conocimiento ancestral con el científico para ofrecer alternativas de tratamiento, sin embargo, el uso generalizado de estas plantas puede poner en peligro de extinción algunas especies vegetales si no se utilizan de manera sostenible. El presente capítulo de libro se enfoca en la familia de plantas Asteraceae, conocida por sus propiedades antioxidantes y antibacterianas, gracias a su alto contenido de compuestos fenólicos, flavonoides y terpenoides. Dentro de esta familia, destaca la especie vegetal *Heterotheca inuloides* Cass, conocida popularmente como árnica mexicana, esta planta, endémica de México, es utilizada en medicina tradicional para tratar padecimientos inflamatorios, gastrointestinales, infecciones y heridas; los principales compuestos bioactivos identificados en *H. inuloides* Cass son los sesquiterpenos, flavonoides y fitoesteroles de tipo cadineno, los cuales son responsables de su actividad antimicrobiana y antiinflamatoria, demostrando su eficacia contra bacterias como *Helicobacter pylori* y *Staphylococcus aureus* y su efecto antiinflamatorio comparable con algunos fármacos distribuidos en el sector salud. Finalmente se resalta la necesidad de seguir generando investigación para identificar completamente la composición química y la seguridad de las plantas medicinales, con el fin de aportar una base científica sólida al uso empírico y tradicional de esta planta.

Palabras clave: *Heterotheca inuloides* Cass., Familia Asteraceae, Medicina tradicional, Plantas medicinales.



Introducción

Desde la antigüedad, el hombre ha utilizado los recursos naturales de su entorno para satisfacer sus necesidades básicas, tal es el caso de las plantas, que durante milenios han sido utilizadas para producir alimento, refugio, ropa, calzado, tintes, tinturas, fertilizantes, fragancias, cosméticos y tratar sus enfermedades; para este último concepto, aún se conserva evidencia antigua sobre el uso de plantas con efectos biológicos, los primeros registros escritos sobre la preparación de remedios herbales y sus beneficios en salud se encuentran en tablillas sumerias y en inscripciones egipcias, indias y chinas de aproximadamente 5.000 años de antigüedad, como el papiro de Ebers, los textos del Rigveda y el libro Pen T'Sao, respectivamente, mientras que en México es posible encontrar registros del uso de plantas con fines medicinales (por los olmecas, mayas, mixtecos y aztecas), como el *Códice De la Cruz Badiano* o el *Libellus de Medicinalibus Indorum Herbis*, es difícil establecer un periodo conciso para los primeros registros del uso medicinal de las plantas, debido a que la mayoría de la literatura mesoamericana, en forma de *códices*, fue quemada en los años posteriores a la Conquista por los misioneros españoles; de acuerdo con registros arqueológicos, los procesos de domesticación y el uso de plantas en Mesoamérica comenzaron hace aproximadamente 7000 y 5000 años, respectivamente.

A pesar del avance en la medicina convencional y la síntesis química de medicamentos industrializados, el uso de plantas medicinales para la obtención de compuestos fitoquímicos con potencial terapéutico no ha disminuido, ejemplo de ello son las plantas como la reina de los prados (*Spiraea ulmaria*), la amapola (*Papaver somniferum*), la dedalera (*Digitalis purpurea*) y el barbasco (*Lonchocarpus utilis*), que a partir de estas se han obtenido fármacos de gran importancia médica como el ácido acetilsalicílico, la morfina, la digoxina y la diosgenina, respectivamente.

La experimentación e investigación científica sobre la acción farmacológica de ciertas plantas, ha generado el conocimiento e identificación de los compuestos responsables de los efectos nutracéuticos en el hombre, estos agentes químicos son denominados fitoquímicos los cuales pueden ser de una variada naturaleza química y han demostrado proporcionar un gran número de propiedades tales como antioxidantes, antivirales, antiinflamatorias, sedantes y antimicrobianas; aprovechando este último efecto muchos de los antibióticos actualmente utilizados para tratar infecciones bacterianas y micóticas fueron aislados a partir de plantas y proporcionan nuevas fuentes terapéuticas contra los microorganismos resistentes a los antibióticos, es por ellos que las plantas aromáticas y medicinales en todo el mundo, son consideradas de gran interés por sus propiedades organolépticas, químicas y medicinales.

La importancia de la medicina tradicional en México, como ya se mencionó anteriormente, se remota al mundo prehispánico, dado que desde entonces las prácticas médicas alcanzaron gran auge entre los pueblos mesoamericanos, prueba de ello se



encuentra en el extenso conocimiento y uso de los recursos naturales, principalmente de las plantas en todo el territorio nacional, esta práctica representa una alternativa esencial para el tratamiento de diversas enfermedades ya que al ser un país con grandes desigualdades económicas, es difícil acceder a un tratamiento médico en los principales sistemas de salud, esto hace que la población con recursos limitados recurra a la medicina tradicional por ser menos costosa y más accesible que un tratamiento biomédico de la medicina convencional.

En el país cuenta con una gran diversidad de flora compuesta por especies nativas e introducidas de diversas partes del mundo, una familia de plantas con gran importancia en la medicina tradicional por sus efectos biológicos es la familia Asteraceae; dentro de esta familia, *Heterotheca inuloides* Cass, conocida popularmente como árnica mexicana, es ampliamente utilizada por sus efectos biológicos y por la gran variedad de compuestos fitoquímicos (sesquiterpenos, flavonoides y fitoesteroides de tipo cadineno), lo que la hace una alternativa de tratamiento para la población vulnerable y que no tiene acceso a la medicina convencional. Por lo tanto, este capítulo de revisión se realizó con el propósito de documentar la importancia que tiene las plantas medicinales en la medicina tradicional y moderna, especialmente *H. inuloides* Cass, así como registrar su composición química y efectos biológicos.

Medicina tradicional

La medicina tradicional (MT) también puede denominarse medicina alternativa o terapia no alopática, que es la totalidad de los conocimientos y prácticas ancestrales, ya sean explicables o no, utilizadas para diagnosticar, prevenir o eliminar enfermedades físicas, mentales y sociales. Estas incluyen diversos conocimientos y creencias de salud que incorporan productos medicinales de base vegetal, animal y mineral, por otro lado, la medicina moderna (MM), a veces denominada medicina convencional o terapia alopática, se basa en el estudio científico de las enfermedades, sus síntomas y su manejo mediante productos farmacéuticos, radiación o cirugía por parte del personal de atención médica y los usuarios del servicio de salud.

La MT, es reconocida como un recurso fundamental para la salud de millones de personas a nivel mundial, por lo tanto, la organización mundial de la salud (OMS) la define como: la suma total de los conocimientos, habilidades y prácticas basadas en las teorías, creencias y experiencias propias de diferentes culturas, sean explicables o no, utilizadas tanto en mantener la salud como en la prevención, diagnóstico y tratamiento de enfermedades físicas y mentales, confiado exclusivamente en experiencia práctica, observación y transmitido de generación en generación, de forma oral o escrita (OMS, 2013, p.15).

La OMS en el año 2012, menciona que la población mundial utiliza rutinariamente



la MT para satisfacer sus necesidades primarias de atención médica y que gran parte de los tratamientos tradicionales implica el uso de extractos de plantas o sus principios activos. Se estima que en África, hasta el 80% de la población utiliza la MT para satisfacer sus necesidades básicas de salud, mientras que en algunos países desarrollados, el porcentaje de la población que utiliza esta alternativa terapéutica es del 38% en Bélgica, 42% en EE. UU., 48% en Australia, 60% en China, 70% en Canadá y el 75% en Francia, además la MT sigue implementándose en los países en desarrollo, donde sus sistemas de salud aún están en crecimiento como Asia y Latinoamérica.

En México, la MT es una opción que sigue practicándose en muchas comunidades indígenas del país, incluyendo grupos indígenas como los mixtecos y tlapanecos de Guerrero, los mayas-chontales de Tabasco, Tének de la Huasteca veracruzana y Mochó y Kakchikel de Chiapas, donde el uso rutinario de más de 5,000 especies de plantas medicinales es fundamental para sus prácticas de sanación médica, por lo tanto, las plantas medicinales son el recurso terapéutico por excelencia en la MT.

Plantas medicinales

De acuerdo con la OMS, una planta medicinal (PM), es definida como cualquier especie vegetal que contiene sustancias que pueden ser empleadas para propósitos terapéuticos y que además de ser esenciales en la MT también tienen importantes aplicaciones en la MM; ya que son fuente directa de principios activos que se emplean como materia prima para la elaboración de medicamentos semisintéticos más complejos. Las PM poseen en uno o más de sus órganos vegetales (flores, raíces, hojas, semillas, frutos) metabolitos secundarios (MS) que presentan acción farmacológica y nutraceútica en el ser humano; muchos de estos MS son sumamente complejos y aún se desconoce la naturaleza química de algunos de ellos y otros han sido aislados, purificados e incluso sintetizados industrialmente.

La mayoría de los MS, presentan baja toxicidad en el organismo, sin embargo, para evitar intoxicaciones, es necesario considerar ciertos factores antes de utilizar una PM, ejemplo de ello pueden ser los factores externos de la propia planta; como la contaminación microbiológica, presencia de restos de plaguicidas, herbicidas o metales pesados, también debe considerarse que la planta utilizada puede no ser la auténtica, debido a que al momento de la recolección existe confusión la especie indicada con otra diferente, es importante asegurarse que los procesos de secado, conservación y preparación de la PM sean los correctos, porque estos parámetros inciden directamente en los componentes activos del producto terapéutico y, por ende, en su calidad farmacológica, es decir, el poder curativo de las PM depende principalmente de su habitat, recolección y su forma de preparación.



La forma de preparación de la PM suele tener particularidades específicas dependiendo del tipo de PM de la que se trate, así como su método de administración, esto debe ser un factor importante a considerar para tener éxito en el tratamiento tradicional, los distintos modos de preparación y aplicación son utilizados con base en la experiencia, tal es el caso de las flores y hojas (órganos vegetales sensibles al calor) que son preparados tradicionalmente por el método de infusión, el cual consiste en añadir el material vegetal en agua caliente (punto de ebullición) y dejar reposar hasta que se alcance la temperatura ambiente, mientras, en el caso de cortezas y raíces, la forma tradicionalmente de preparar es por decocción, debido a la naturaleza de estos, porque tienden a ser órganos más robustos, más duros y necesitan de un método más eficiente al momento de extraer sus principios activos.

Además de considerar el método de preparación dependiendo el tipo de planta y órgano vegetal, también es importante mencionar que cada país, cultura o comunidad, adopta un sistema de tratamiento que puede ser igual o diferente a la otra, por ejemplo, una de las principales prácticas de sanación de los mixtecos y tlapanecos de Guerrero, son las limpias con huevo y hojas de algunas plantas aromáticas como ruda (*Ruta Chalepensis* L.) (*Yuku ruda*, mixteco) (*íná mikhun* tlapaneco) o pericón (*Tagetes lucida* Cav.) (*Biña mo mo´*, tlapaneco); donde de acuerdo a la cosmovisión de sus curanderos; en las limpias se establece una conversación sagrada con espíritus para convencerlos de que se eliminen las energías negativas del cuerpo y este sane; asimismo, también estos pueblos indígenas clasifican a las plantas en frías y calientes, las cuales sirven para tratar los padecimientos fríos o calientes, por ejemplo, la fiebre es considerada una enfermedad caliente, por lo tanto se usan plantas frías como el sauce (*Salix pallida* Kunth.) (*Íxe rngi´i*, tlapaneco) y el limón (*Citrus limón* L.) (*Limón iyaa*, mixteco) y si es una enfermedad fría como el dolor de estómago, se usan plantas calientes como el epazote (*Teloxys ambrosioides* L.) (*Miña tsiga´*, tlapaneco) (*Minu nduxi* mixteco).

Plantas medicinales en México

México cuenta con una de las diversidades más ricas de flora compuesta por especies nativas e introducidas de diversas partes del mundo, que junto con su riqueza cultural, constituyen la medicina tradicional mexicana (MTM), actualmente es difícil determinar con precisión el número de familias, géneros o especies mexicanas existentes, sin embargo, se predice un número aproximado de 29,000 especies de plantas vasculares (nativas e introducidas), de este número, se estima que entre 3,000 y 5,000 plantas se utilizan actualmente con fines medicinales, algunas de ellas son: árnica (*Heterotheca inuloides* Cass), epazote (*Chenopodium ambrosioides* L.), hierbabuena (*Mentha spicata*), romero (*Salvia rosmarinus*), lavanda (*Lavandula angustifolia*), manzanilla (*Chamaemelum nobile*), sábila (*Aloe vera*), entre otras, las cuales se pueden encontrar en



lugares tan populares como jardines de las grandes ciudades o en los traspacios de las casas del campo mexicano otras se exhiben frescas en los puestos de los “tianguis” o secas por las tiendas naturistas. Desafortunadamente el uso de este material vegetal sigue siendo la primera atención médica disponible en muchas zonas rurales para aliviar enfermedades de la población sin seguridad social, como una alternativa menos costosa y asequible a las terapias convencionales de elevado costo, por lo que, la comercialización tan generalizada y el uso indiscriminado de estas plantas medicinales puede ponerlas en peligro de extinción, tal es el caso de *Magnolia dealbata*, utilizada en MTM por sus propiedades diuréticas, *Cephalocereus senilis* (cactus viejito) y *Asphytum asterias* (falso peyote) de importancia por sus compuestos alcaloides y usados como plantas ornamentales y medicinales.

Extractos de plantas

Los extractos de plantas (EP), son ampliamente usados en MT debido a sus efectos nutracéuticos y sus efectos antimicrobianos, donde estos últimos inhiben el crecimiento y supervivencia de microorganismos. Los EP son una mezcla de varios compuestos lipofílicos aromáticos, principalmente compuestos fenólicos, flavonoides y terpenoides y pueden obtenerse de diferentes partes anatómicas de las plantas (flores, raíces, corteza, hojas, semillas, frutos) mediante el uso de diversos solventes y métodos de extracción.

En las preparaciones terapéuticas las PM pueden consumirse directamente o pueden realizarse extractos, para estas preparaciones lo más común es usar hojas y flores, y esporádicamente el tallo o la raíz elaborando infusiones o en presentación homeopática, en la mayoría de los casos se desconoce el o los principios activos relacionados con los efectos benéficos en el organismo; en respuesta a esto, en años recientes diversos grupos de investigación se han enfocado en identificar los compuestos con actividad biológica para aportar mayor conocimiento a la MT y así, tener una mayor seguridad en su aplicación. Los efectos biológicos de los extractos vegetales y productos naturales ha revelado el potencial biológico de las plantas, permitiendo de esta manera un avance al uso empírico de las especies vegetales medicinales con una base científica.

Existe una serie de factores que determinan la bioefectividad de los EP, entre ellos destaca el tipo de compuesto y su concentración, estos dos factores están asociados a:

1. La planta: rasgos genéticos, edad, madurez de la planta, otros.
2. Factores ambientales: condiciones físicas, bióticas y abióticas en las que crece la planta.
- 3) Agronómicos: Cultivo, cosecha.
3. Tipo de disolvente utilizado para la extracción de los compuestos de la planta.
4. Condiciones de extracción: Tiempo, temperatura, pH.

Los extractos pueden presentarse como: extractos líquidos obtenidos sin la eliminación o eliminando de forma parcial el solvente, y extractos secos: obtenidos con la



eliminación total del solvente. Los principales métodos utilizados en el proceso de extracción y fabricación de extractos se mencionan a continuación:

1. Maceración: consiste en el simple contacto del material vegetal con el líquido extractor, por un período de tiempo determinado. Esta maceración puede ser estática (sin movimiento) o dinámica (con movimiento). Es indicado para la fabricación de extractos sensibles a degradación térmica, cuando se desea mantener intactas las características sensoriales de la planta.
2. Infusión: Es el método de preparación del té casero, este método también es muy usado para plantas sensibles a la degradación térmica, buscando una mejor calidad sensorial del extracto obtenido.
3. Decocción o reflujo: el líquido extractor en ebullición entra en contacto con la planta. Indicado para extracción de activos no termosensibles y para extracción de MS en partes más rígidas de las plantas como tallos, raíces y semillas.
4. Digestión: el contacto planta-sustancia extractora se mantiene a una temperatura de 40°C a 60°C. Este método es muy usado para extractos de frutas y vegetales, en ocasiones durante el proceso de digestión es recomendable la implementación de enzimas para obtener extractos con mayor impacto sensorial.

La parte esencial en la preparación de los extractos para su aplicación biológica, está relacionada con la concentración de los MS, porque de ellos depende el efecto del producto terapéutico, además, es importante considerar que el procedimiento de extracción se realice a bajas temperaturas y en el menor tiempo posible para evitar la degradación de los principios activos en los extractos.

Familia Asteraceae

La familia Asteraceae también conocida como Compositae, es una de las familias de angiospermas más extensa, que incluye más de 1,600 géneros y 25,000 especies en todo el mundo, actualmente sus miembros se agrupan en 16 subfamilias y 50 tribus. Asteraceae se caracteriza por presentar inflorescencias conocidas como cabezuelas (capítulos) las cuales están conformadas por numerosas flores dispuestas sobre un receptáculo rodeado por un involucre de brácteas llamadas filarios, que simulan un cáliz, cada cabezuela contiene una o numerosas flores gamopétalas epíginas con un cáliz modificado en un vilano y estambres sinántereos. La principal forma de dispersión de la semilla para la familia Asteraceae es a través del viento y la estructura involucrada es el vilano.

Esta familia es un grupo altamente heterogéneo respecto a la morfología de sus partes vegetativas (raíz, tallo y hojas) ya que presentan todos los tipos de formas, disposición y altura, por ejemplo algunas especies son árboles que alcanzan más de 30 m,



como *Dasyphyllum excelsum* (tayú del norte o palo santo) en Chile, sin embargo, muchas otras son arbustos y la mayoría son hierbas perennes como *Helianthus annuus* (girasol), en cambio, la morfología de la parte reproductiva (inflorescencia) es muy homogénea, por lo tanto, el reconocimiento de subfamilias, tribus, géneros y especies de Asteraceae suele ser complejo, ya que además de caracteres macromorfológicos (filotaxia, forma, conación y número de series del involucro o tipo de cabezuelas), es necesario observar y analizar microcaracteres (orientación y sexualidad de las flores, variaciones en los apéndices apicales y basales de las anteras, elementos del vilano, entre otros), a través de la observación en un estereoscopio o microscopio.

Asteraceae está distribuida en todo el mundo y se puede encontrar en una amplia gama de hábitats naturales, aunque la mayoría de las especies se localizan con frecuencia en áreas tropicales y subtropicales. Las plantas de esta familia han sido cultivadas ampliamente por su valor nutricional, ornamentales y usos medicinales, esta familia presenta numerosas actividades farmacológicas, incluyendo propiedades antivirales, antimicrobianas, antidiabéticas, antipiréticas, antitumorales, antiinflamatorias, hepatoprotectoras, antiparasitarias, y cicatrizantes; cuyas propiedades medicinales se atribuyen a la presencia de compuestos bioactivos entre los que destacan polifenoles como flavonoides y terpenoides, incluyendo las lactonas sesquiterpénicas.

Diversidad de Asteraceae en México

A partir de las 50 tribus identificadas de la familia Asteraceae, en México se ha registrado la presencia de 26 tribus identificadas principalmente por la morfología de las cabezuelas, el tipo de flores, la forma, orientación e indumento de las ramas del estilo, el ápice, la base y forma del collar de las anteras, la forma de las cipselas, presencia o ausencia de fitomelanina en las cipselas, así como la simetría, persistencia y tipo de elementos que integran el vilano, estos caracteres morfológicos son los más importantes para su clasificación taxonómica

Considerando la propuesta más reciente de clasificación de Asteraceae en el 2020, en México se encuentran dos subfamilias introducidas Calenduleae y Arctotideae y seis subfamilias que agrupan 26 tribus; el mayor número de tribus (17) se encuentra en la subfamilia Asteroideae, seguida de Mutisioideae y Vernonioideae con tres, cada una; mientras que las subfamilias Carduoideae, Cichorioideae y Gochnatioideae están representadas por una sola tribu cada una. En cuanto al número de géneros y especies, se ha determinado que en el país existen 428 géneros, de los cuales 324 son nativos, 67 endémicos y 37 introducidos; y el número de especies corresponde a 3129, de ellas 1065 son nativas, 1996 endémicas y 64 introducidas. Los estados con mayor número de especies son Oaxaca (1,040), Jalisco (956), Durango (909), Guerrero (855) y Michoacán (837) y los



biomas con la mayor riqueza de géneros y especies son el bosque templado (1,906) y el matorral xerófilo (1,254).

Debido a la gran diversidad de especies de Asteraceae, esta familia es considerada una de las más utilizadas en la MTM, las especies *Achillea millefolium* (mil-en-rama, plumajillo, plumajo o mil hoja), *Árnica montana* (Árnica europea), *Bellis perennis* (margarita enana), *Calendula officinalis* (margarita naranja, clavelina), *Chamaemelum nobile* (Manzanilla), *Eupatorium cannabinum* (purguera), *Helichrysum stoechas* (perpetua amarilla) y *Taraxacum officinale* (diente de león) se han utilizado en diferentes remedios naturales, para aliviar dolor de estómago, insomnio y como ansiolíticos, además de los beneficios para la salud, algunas de ellas como *C. nobile* y *H. stoechas*, también se emplean para usos culinarios.

***Heterotheca inuloides* Cass**

Heterotheca inuloides Cass, conocida popularmente como árnica mexicana, es una de las especies nativas ampliamente utilizada en México en la MT para tratar diferentes padecimientos como: procesos inflamatorios, gastrointestinales y citotóxicos. En las preparaciones terapéuticas de esta planta principalmente se utilizan los capullos secos (inflorescencias) en forma de infusión, aunque en ocasiones se ocupan las hojas y tallos, en la Tabla 1, se describe la taxonomía de esta especie vegetal.

Tabla 1. Taxonomía de *Heterotheca inuloides* Cass

Reino:	Plantae
División:	Magnoliophyta
Clase:	Magnoliopsida
Orden:	Asterales
Familia:	Asteraceae
Subfamilia:	Asteroideae
Genero:	<i>Heterotheca</i>
Especie:	<i>Heterotheca inuloides</i> Cass

La principal característica botánica es la presencia de una inflorescencia en forma de una cabezuela (capítulo) que consta de muchas flores unidas a un disco en el centro y rodeada de flores liguladas en la periferia y rodeada por brácteas involucreales (Figura 1); esta planta tiene olor débil y sabor amargo, es una planta herbácea y perenne, de hasta 1 m de altura, pero el tamaño varía mucho dependiendo de los hábitats de crecimiento, con hojas alternas, lanceoladas y pubescentes con márgenes dentados.



Figura 1. *Heterotheca inuloides* Cass (Árnica de flores amarillas).

H. inuloides Cass, es una planta endémica de México, abundante en las zonas altas montañosas del centro de México. Crece como hierba silvestre, principalmente en las regiones más frías y templadas a altitudes entre 2000 y 3000 metros. También se encuentra entre vegetación secundaria, así como malezas y campos de pasto. Florece de julio a noviembre en sus hábitats naturales, en cambio bajo cultivo llega a florecer todo el año. La distribución de vida silvestre de *H. inuloides* Cass, está reportada principalmente en el centro del país: Colima, Durango, Guanajuato, Hidalgo, Ciudad de México, Michoacán, Morelos, Nuevo León, Oaxaca, Puebla, Querétaro, San Luís Potosí, Tlaxcala, Veracruz y Zacatecas.

En Zacatecas, las colecciones de referencia, como el herbario de la Universidad Autónoma de Zacatecas (HUAZ) confirman la presencia de *H. inuloides* Cass en el estado, además de que se han registrado ejemplares y se conoce su presencia en diversos municipios incluyendo, Fresnillo, Jerez, Concepción Del Oro, Mazapil, Genaro Codina y General Pánfilo Natera. Su hábitat en el estado se relaciona con ecosistemas de matorral xerófilo, que son comunes en Zacatecas y donde esta planta prospera.

Actualmente, *H. inuloides* Cass, no está incluida en la Lista Roja Nacional Mexicana de Plantas Amenazadas “NOM-059-SEMARNAT-2010”, lo que implica que el estado de conservación de la especie es de no riesgo; sin embargo, su recolección excesiva en algunas regiones de México puede representar una amenaza significativa para ciertas poblaciones de plantas silvestres, debido a que esta planta juega un papel importante en la MTM, por lo tanto, es considerada como un recurso fitogenético incluido en programas de conservación *ex situ* en México.

Usos medicinales de *H. inuloides* Cass

H. inuloides Cass, es ampliamente conocida en la medicina tradicional por sus efectos biológicos en el ser humano, existen diferentes maneras de preparar esta especie para uso terapéutico, tradicionalmente, los tés, infusiones y decocciones de *H. inuloides* Cass sola



o en combinación con otras hierbas. Las partes de la planta comúnmente utilizadas son las inflorescencias, seguidas de las hojas y tallos, los usos terapéuticos pueden ser de manera interna y manera externa, en la Tabla 2, se enlistan algunos de los padecimientos más comunes y el modo de preparación de *H. inuloides* Cass.

H. inuloides Cass, se han utilizado principalmente para disminuir el dolor de contusiones, reumatismo, para lavar heridas y otras afecciones dolorosas asociadas con procesos inflamatorios, también se ha utilizado para el tratamiento de trastornos gastrointestinales, incluyendo diarrea, gastritis, dolor de estómago y úlceras, para tratar problemas dermatológicos como erisipela, inflamación cutánea tópica, granos, erupciones cutáneas, quemaduras e infecciones causadas por picaduras de insectos o arañas, golpes, úlceras, enfermedades vasculares, fiebre, enfermedad renal e infecciones del tracto urinario, tos, enfermedades pulmonares, enfermedades dentales, infecciones vaginales, además, se ha utilizado para tratar el cáncer y la diabetes.

Tabla 2. Aplicación terapéutica y modo de uso de *H. inuloides* Cass

Padecimiento	Preparación y modo de uso
Inflamación de estomago	Preparar una infusión con tallos de árnica en 0.5 L de agua y administrarla vía oral.
Tos y problemas respiratorios	Preparar una infusión con 5 g de planta en 0.5 L de agua. Beber una taza antes de cada comida durante 3 días.
Hemorroides	Hervir una rama con inflorescencias en 0.5 L de agua. Dar baños de asiento con la infusión todas las noches durante una semana.
Reumatismo	Prepara una infusión con inflorescencias frescas en un litro de agua. Beber una taza después de cada comida durante 15 días.
Infecciones y padecimientos de la piel	Aplicado macerado o en pomada, que se hace moliendo la planta con manteca.
Heridas	Cocer hojas y tallos para hacer lavados en la zona afectada.
Padecimientos cardiovasculares	Se hace una infusión con la planta y se toma como té

Composición química de *H. inuloides* Cass

En las últimas décadas se ha intensificado el estudio de la acción farmacológica de ciertas PM, buscando el conocimiento e identificación de los compuestos responsables de estos efectos, denominados compuestos bioactivos. Estos compuestos pueden ser de una variada naturaleza química presentes en el aceite esencial y extractos orgánicos de diversas partes, como raíces, partes aéreas y flores de *H. inuloides* Cass. Los principales



constituyentes de *H. inuloides* son sesquiterpenos, flavonoides y fitoesteroles de tipo cadineno. Se ha demostrado que los compuestos con un esqueleto de cadineno poseen actividad citotóxica contra líneas celulares de tumores humanos. Aunque esta planta se ha utilizado ampliamente, hasta la fecha, los informes sobre la toxicidad de *H. inuloides* Cass son limitados y existe poca información disponible sobre la seguridad y toxicidad, especialmente de sus compuestos puros.

Compuestos polifenólicos

Estos compuestos son considerados de gran importancia por sus propiedades antioxidantes y antiinflamatorias, favoreciendo la protección contra el envejecimiento celular, salud cardiovascular y la prevención de enfermedades crónico-degenerativas como el cáncer y la diabetes mellitus tipo 2. El contenido fenólico total en extractos e infusiones de *H. inuloides* Cass ha permitido identificar en las flores secas: luteolina, kaempferol, kaempferol-3,7-dimetil éter, quercetina y algunos derivados; quercetina-3,3'-dimetil éter, quercetina-3,4'-dimetil éter, eriodictol-7,3'-dimetil éter, catequina, flavonoles, O-glucósidos, guayacol, ácido elágico, hidroxycinamatos, ácido cafeico, cumarina, vainillina entre muchos más compuestos fenólicos. La diversidad estructural de los compuestos fenólicos aislados e identificados en *H. inuloides* Cass se debe a la variación en los patrones de hidroxilación, metoxilación y glicosilación.

Compuestos sesquiterpénicos

La presencia de sesquiterpenos en PM le confiere efectos biológicos como antiinflamatorios, antimicrobianos, antitumorales y antioxidantes. El género de plantas *Heterotheca*, se ha caracterizado por sintetizar sesquiterpenos con esqueleto de cadineno (Figura 2), donde se han encontrado compuestos que derivan de esta estructura como: 7-hidroxicalaleno (1), calaleno (2), 4-metoxi-isocalaleno (3), 4-hidroxiisocalaleno (4), calacoreno (5), 7-hidroxi-3,4-dihidroxicalaleno (6), 1-isopropil-4,6-dimetil-1,2,8a,8b-tetrahidro-2-naftol (7), 1 α -hidroxi-1(4H)-isocalaleno-4-ona (8), 2,3-epoxi-7-hidroxi- β -calacoreno (9), ácido calaleno-15-oico (10), entre otros compuestos derivados de este sesquiterpeno (Figura 3).

Triterpenos y fitoesteroles

El beneficio a la salud de los triterpenos y fitoesteroles, está relacionado a la salud cardiovascular y confieren propiedades antiinflamatorias, antioxidantes y antitumorales. Se han reportado algunos alcoholes triterpénicos y esteroides libres: α -amirina, β -amirina, 3 β -friedelinol, β -sitosterol, estigmasterol, estigmast-7-enol, estigmastanol, α -espinasterol, lanosterol, cicloartenol, 24-metilencolest-7-enol, avenast-7-enol, campesterol, espinasteril 3-O- β -D-glucopiranosido.

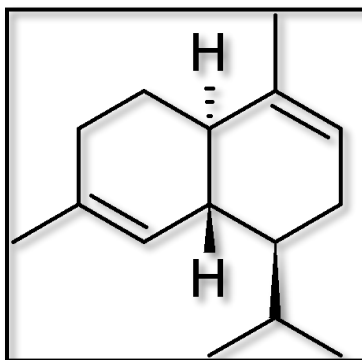


Figura 2. Estructura química del compuesto Cadineno.

Compuestos orgánicos volátiles (COV) y otros compuestos

Los COV incluyen monoterpenos y sesquiterpenos. Se han identificado más de 30 monoterpenos volátiles en *H. inuloides* Cass: α -pineno, sabineno, β -pineno, mirceno, 1,4-cineol, α -terpineno, p-cimeno, cis- β -ocimeno, β -felandreno, limoneno, trans- β -ocimeno, β -terpineno, terpinoleno, linalol, cis-sabineno, alcanfor, mentona, borneol, β -terpineol, carvona, geraniol. Anetol, acetato de bornilo, eugenol, acetato de geranilo, β -elemeno, alcohol bencílico, benzaldehído, p- α -dimetilestireno, 1-p-menten-9-al, β -cubebeno, α -cadineno, germacreno-D, α -curcumeno, β -muuroleno, β -cadineno, α -bergamoteno y trans-nerolidol.

La gran diversidad en la composición y concentración de MS de *H. inuloides* Cass, está determinada por las regiones geográficas o hábitats, la edad de la planta, la defoliación, el régimen de fertilización o la disponibilidad de nitrógeno, se ha documentado que algunos compuestos sesquiterpenicos se correlacionan con la edad de la planta y son mayores en tallos florales de plantas de 15 meses que en aquellos de plantas de 4 u 8 meses. En investigaciones realizadas con especies del género *Heteroteka*, se ha observado que la concentración de monoterpenos foliares es el resultado de factores genéticos y ambientales, que aumentan en condiciones de estrés, como lo es la falta de nitrógeno, así como en la defoliación. Además, se ha reportado que factores ambientales como la latitud, la duración del día, la intensidad de la luz, la temperatura y la radiación UV tienen un impacto en la biosíntesis de compuestos de tipo flavonoides. Estos antecedentes sugieren que la variabilidad metabólica en el contenido de metabolitos está asociada con los atributos ambientales y la condición morfofisiológica de la planta.

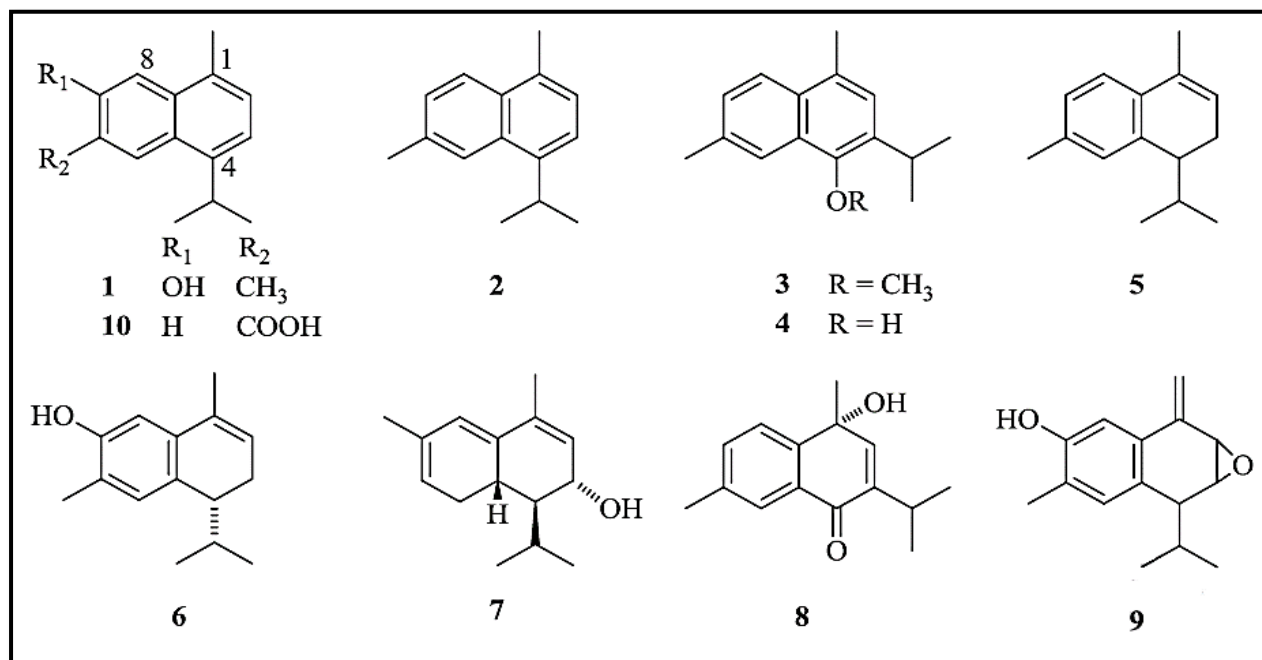


Figura 3. Cadinenos aislados de *H. inuloides* Cass.

Actividad biológica

H. inuloides Cass, es ampliamente conocida por su uso en la MTM por los principios activos que posee y por demostrar que los extractos y algunos compuestos aislados de esta planta exhiben un amplio espectro de actividades biológicas como antimicrobiana, antioxidante, antitumoral, antiinflamatoria, citotóxica y quelante.

Actividad antimicrobiana

La capacidad antimicrobiana de *H. inuloides* Cass, se ha evaluado utilizando diferentes cepas de interés clínico, donde se ha reportado que el extracto metanólico mostró actividad contra *Helicobacter pylori* con una concentración mínima inhibitoria (CMI) de $31,25 \mu\text{g mL}^{-1}$, siendo esta actividad 28 veces superior a la del metronidazol (CMI = $300 \mu\text{g mL}^{-1}$), mientras que los extractos etanólicos tienen actividad frente a *Streptococcus mutans* con una CMI = $32,5 \mu\text{g mL}^{-1}$, sin embargo, su efectividad del extracto fue menor que el gluconato de clorhexidina utilizado como fármaco de referencia (CMI = $1,2 \mu\text{g mL}^{-1}$), por otra parte, extractos hidroetanólicos de flores de Árnica presentan efecto antimicrobiano sobre *Eikenella corrodens* (bacteria periodontopatógena) ATCC BAA-1152. Los extractos de *H. inuloides* Cass obtenidos a partir de los solventes diclorometano y metanol han mostrado actividad antifúngica contra *Microsporum gypseum* CECT 2908 y *Trichophyton mentagrophytes* CECT 2795; sin embargo, en ambos casos, la concentración requerida de los extractos para producir un efecto similar al de la nistatina



y la anfotericina fue de 250 a 500 veces mayor.

Se ha evidenciado que los sesquiterpenos 7-hidroxicadalenol y 7-hidroxi-3,4-dihidrocadalenol presentes en esta planta, ejercen actividad contra *Bacillus subtilis*, *Brevibacterium ammoniagenes*, *Staphylococcus aureus* ATCC 12598, *S. aureus* ATCC 33591, *Streptococcus mutans*, *Propionibacterium acnes* y *Trichophyton mentagrophytes*; donde los valores de CMI oscilaron entre 6,23 y 12,5 $\mu\text{g mL}^{-1}$. El sesquiterpeno 7-hidroxi-3,4-dihidrocadalenol, también exhibe actividad bactericida contra *Staphylococcus aureus* resistente a la meticilina con una concentración bactericida mínima (CBM) de 12,5 $\mu\text{g mL}^{-1}$. Con respecto a la actividad antiparasitaria, se ha reportado que el β -cariofileno mostró propiedad antihelmíntica con una IC₅₀ de 1.3 $\mu\text{g mL}^{-1}$ y los compuestos 7-hidroxi-3,4 dihidrocadalenol así como el 7-hidroxicadalenol fueron activos contra trofozoítos de *Giardia intestinalis*, con valores de IC₅₀ de 15.3 ± 1.98 y 13.5 ± 0.83 $\mu\text{g mL}^{-1}$, respectivamente, pero fueron considerablemente menos potentes que el metronidazol (IC₅₀ = 0.281 ± 0.064 $\mu\text{g mL}^{-1}$).

Actividad antiinflamatoria

Las preparaciones elaboradas con *H. inuloides* Cass, se han utilizado como agentes antiinflamatorios y analgésicos en la medicina tradicional mexicana. Las propiedades antiinflamatorias se han evaluado mediante diferentes modelos *in vitro* e *in vivo*. La administración intraperitoneal de extracto acuoso de *H. inuloides* (0.1 g kg⁻¹) produjo una inhibición del 29% en el edema de las extremidades inferiores inducido por carragenina en modelo murino. El extracto elaborado con butanol, mostró una actividad antiinflamatoria superior al 50% en el modelo murino (dosis efectiva (ED₅₀) = 0.0297 g kg⁻¹). La administración intraperitoneal del extracto con butanol (0.05-0.1 g kg⁻¹) también inhibe el efecto inflamatorio inducido por dextrano (38,9-68,1%). Los compuestos 7-hidroxicadalenol, 7-hidroxi-3,4-dihidrocadalenol y dicadalenol exhibieron efectos antiinflamatorios en el mismo modelo experimental, sin embargo, solo el compuesto dicadalenol exhibió actividad antiinflamatoria *in vivo*. El efecto del aceite esencial de *H. inuloides* Cass, a 30 $\mu\text{g mL}^{-1}$, fue equivalente al celecoxib, un fármaco antiinflamatorio no esteroideo utilizado en el tratamiento de la osteoartritis, a la misma concentración.

Actividad antioxidante

Las infusiones de flores secas de *H. inuloides* Cass mostraron capacidad antioxidante de $1,32 \pm 0.0006$ $\mu\text{moleq de FeSO}_4/\text{mL}$ por el método FRAP (Poder Antioxidante Reductor del Hierro, por sus siglas en inglés). Se ha descrito que el 7-hidroxicadalenol, el 7-hidroxi-3,4-dihidrocadalenol, el kaempferol y la quercetina inhiben la peroxidación lipídica microsomal, al igual que inhiben la autooxidación de lípidos y la peroxidación lipídica mitocondrial. Otros compuestos que han demostrado poseer la capacidad de inhibir la



peroxidación lipídica son el quercetin-3,7,3'-trimetil éter y los derivados semisintéticos 7-acetoxi- 3,4-dihidrocadaleno, 7-hidroxicadalenol y pentaacetato de quercetina. En un modelo de hepatotoxicidad inducida por CCl₄, el pretratamiento con extractos de *H. inuloides* Cass o quercetina protegió al hígado contra la peroxidación lipídica y mantuvo la actividad antioxidante basal para atenuar el aumento de la actividad del aspartato aminotransferasa (AST) y alanina aminotransferasa (ALT), atenuó el aumento de la fosfatasa alcalina, bilirrubina total, creatinina y creatinina quinasa, las cuales son enzimas y proteínas que indican daño hepático.

Actividad citotóxica

Los extractos orgánicos de *H. inuloides* Cass han mostrado actividad citotóxica contra células P388 de leucemia murina, el 7-hidroxicadalenol y el 7-hidroxi-3,4-dihidrocadalenol mostraron actividad citotóxica contra carcinoma de mama (células BT-20), carcinoma epitelial de cuello uterino (células HeLa), células cutáneas de melanoma humano (células B-16) y células cutáneas de melanoma murino. Los sesquiterpenos epóxido de β -cariofileno y β -cariofileno han mostrado actividad citotóxica contra líneas celulares tumorales. Se ha documentado que los compuestos con esqueleto de cadineno poseen la capacidad de inhibir la proliferación de líneas celulares tumorales. El grupo fenólico hidroxilo en el carbono 7 (C-7) tiene un papel en las actividades citotóxicas de 7-hidroxicadalenol y el 7-hidroxi-3,4-dihidrocadalenol, y es necesario para la efectividad citotóxica. La eliminación del grupo hidroxilo y su reemplazo por grupos acetilo o -benzoilo resulta en una disminución de la actividad citotóxica.

Actividad insecticida

El uso de agroquímicos es una práctica constante en la agricultura y que los productores utilizan como primera opción para la eliminación de plagas, sin embargo, el uso intensivo de pesticidas ha provocado el desarrollo de poblaciones de plagas resistentes y una reducción drástica de sus depredadores naturales además de provocar daños a la salud del agricultor y daño al medio ambiente, por tanto, es importante desarrollar e implementar nuevas estrategias de control de plagas, incluyendo insecticidas menos tóxicos, de espectro reducido, menos persistentes y ecológicos, a partir de plantas o de sus metabolitos secundarios. Estudios de investigación han evidenciado que diferentes especies del género *Heterotheca* han mostrado actividad insecticida y acaricida contra el ácaro de la abeja *Varroa jacobsoni* (Acari: Varroidae), larvas de tercer estadio de *Spodoptera litura* (Lepidoptera: Noctuidae) y larvas de la oruga medidora de la soja *Pseudoplusia includens* (Lepidoptera: Noctuidae). *H. inuloides* Cass se ha evaluado como una opción en la lucha contra *Sitophilus zeamais* y *Zabrotes subfasciatus*, estos insectos son plagas importantes que infestan los granos almacenados del maíz (*Zea mays*) y el frijol (*Phaseolus vulgaris*). Los polvos de hojas y flores de *H. inuloides* causaron una



mortalidad del 87.7% para *S. zeamais* en granos de maíz tratados 15 días después de la infestación.

Conclusiones

Actualmente, *H. inuloides* Cass, no ha sido prohibida por la Secretaría de Salud en México para su aplicación y uso en medicina tradicional, en preparaciones como infusiones o té, ni en suplementos alimenticios herbales, sin embargo, la toxicidad y la seguridad de esta planta medicinal mexicana aún sigue evaluándose para generar evidencia científica de su efectividad farmacológica y nutraceutica. A pesar de la evidencia científica disponible, actualmente sigue siendo necesaria la evaluación fitofarmacológica de la planta para estimar la toxicidad aguda, subaguda y crónica de los extractos y otros metabolitos secundarios, esto con el objetivo de garantizar los efectos beneficiosos en el organismo, así como la seguridad en la administración, ya que algunos metabolitos derivados de tipo cadineno han mostrado toxicidad en diferentes modelos biológicos.

Bibliografía

- Balleza, J.J. & Villaseñor, J. L. (2002). La familia Asteraceae en el estado de Zacatecas (México). *Acta Botánica Mexicana*, (59), 5-69. <https://doi.org/10.21829/abm59.2002.893>
- Chamorro-Cevallos, G., Mojica-Villegas, M. A., García-Martínez, Y., Pérez-Gutiérrez, S., Madrigal-Santillán, E., Vargas-Mendoza, N., Morales-González, J. A., & Cristóbal-Luna, J. M. (2022). A Complete Review of Mexican Plants with Teratogenic Effects. *Plants (Basel, Switzerland)*, 11(13), 1675. <https://doi.org/10.3390/plants11131675>
- Cilia-López, V., Cariño-Cortés, & R., Zurita-Salinas, L. (2021). Ethnopharmacology of the Asteraceae family in Mexico. *Botanical Sciences*. 99(3), 455-486. <https://doi.org/10.17129/botsci.2715>
- Coballase-Urrutia, E., Pedraza-Chaverri, J., Camacho-Carranza, R., Cárdenas-Rodríguez, N., Huerta-Gertrudis, B., Medina-Campos, O., Mendoza-Cruz, M., Delgado-Lamas, G., & Espinosa-Aguirre, J. (2010). Antioxidant activity of *Heterotheca inuloides* extracts and of some of its metabolites. *Toxicology*. 276(1): 41-48. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2010.06.013>
- Dávila-Rangel, I. E., Charles-Rodríguez, A. V., López-Romero, J. C., & Flores-López, M. L. (2024). Plants from Arid and Semi-Arid Zones of Mexico Used to Treat Respiratory Diseases: A Review. *Plants (Basel, Switzerland)*, 13(6), 792. <https://doi.org/10.3390/plants13060792>
- Egas, V., Toscano, R. A., Linares, E., Bye, R., Espinosa-García, F. J., & Delgado, G. (2015). Cadinane-Type Sesquiterpenoids from *Heterotheca inuloides*: Absolute Configuration and



- Anti-inflammatory Activity. *Journal of natural products*, 78(11), 2634–2641. <https://doi.org/10.1021/acs.jnatprod.5b00571>
- Handa, S., Khanuja, S., Longo, G., & Rakesh, D. (2008). Extraction technologies for medicinal and aromatic plants. *International centre for science and high technology*. 21-25.
- Hernández-Caracheo, K., Guerrero-López, L., Rodríguez-Sánchez, B., Rodríguez-Núñez, E., Rodríguez-Chávez, J. L., Delgado-Lamas, G., Campos-Guillén, J., Amaro-Reyes, A., Monroy-Dosta, M. D. C., Zavala-Gómez, C. E., Chaparro-Sánchez, R., Rodríguez-Morales, J. A., Pérez-Moreno, V., & Ramos-López, M. A. (2023). Evaluation of the Insecticidal Potential of *Heterotheca inuloides* Acetonic and Methanolic Extracts against *Spodoptera frugiperda* and Their Ecotoxicological Effect on *Poecilia reticulata*. *Plants (Basel, Switzerland)*, 12(20), 3555. <https://doi.org/10.3390/plants12203555>
- Jarić, S., Kostić, O., Miletić, Z., Marković, M., Sekulić, D., Mitrović, M., & Pavlović, P. (2024). Ethnobotanical and ethnomedicinal research into medicinal plants in the Mt Stara Planina region (south-eastern Serbia, Western Balkans). *Journal of ethnobiology and ethnomedicine*, 20(1), 7. <https://doi.org/10.1186/s13002-024-00647-2>
- Juárez-Rosete, C. (2013). Hierbas aromáticas y medicinales en México: Tradición e innovación. *Revista Biociencias*. 2 (3). 119-129. ISSN 2007-3380.
- Kriplani, P., Guarve, K., Baghael, U. (2017). *Arnica montana* L. - a plant of healing: review. *The Journal of pharmacy and pharmacology*. 69(8), 925–945. <https://doi.org/10.1111/jphp.12724>
- Lin, L., & Harnly, J. (2012). LC-PDA-ESI/MS Identification of the Phenolic Components of Three Compositae Spices: Chamomile, Tarragon, and Mexican Arnica. *Natural product communications*. 7 (6). 749-752. Doi: 10.1177/1934578X1200700615
- Lucía, C. A., Jacqueline, B. R., Alberto, B. L., David, B. A., & Beatriz, R. A. (2021). Actualized inventory of medicinal plants used in traditional medicine in Oaxaca, México. *Journal of ethnobiology and ethnomedicine*, 17(1), 7. <https://doi.org/10.1186/s13002-020-00431-y>
- Morales Ramos, J. G., León-Figueroa, D. A., Picón Pérez, M. S., Arbulú Ballesteros, M. A., Llontop Ynga, E. G., Coaguila Cusicanqui, L. A., Morales Ramírez, S. M., & Chirinos Ríos, C. A. (2024). Traditional medicine in Incahuasi: An ethnobotanical study. *F1000Research*, 12, 1075. <https://doi.org/10.12688/f1000research.138398.2>
- Nieto-Ramírez, M., García-Trejo, J., Caltzontzin-Rabell, V., Chávez-Jaime, R., & Estrada-Sánchez, M. (2018). Efecto de las condiciones de cultivo en la producción de fenoles, flavonoides totales y su capacidad antioxidante en el árnica (*Heterotheca inuloides*). *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(21), 4296-4305. <https://doi.org/10.29312/remexca.voi21.1530>



- NORMA Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010 (2010). Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo. <https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/4254/semarnat/semarnat.htm>
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2013). Estrategia de la OMS sobre medicina tradicional 2014-2023. ISBN: 9789243506098. <https://www.who.int/es/publications/i/item/9789241506096>
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (9 de Agosto 2023). *Medicina tradicional*. Organización Mundial de la Salud. Recuperado 15 de Agosto 2025. <https://www.who.int/es/news-room/questions-and-answers/item/traditional-medicine#:~:text=%C2%BFCu%C3%A1l%20es%20la%20posici%C3%B3n%20de,la%20cobertura%20universal%20de%20salud>
- Palma-Tenango, M., Miguel-Chávez, R. S., & Soto-Hernández, R. M. (2017). Aromatic and medicinal plants in Mexico. In *InTech eBooks*. <https://doi.org/10.5772/66507>
- Panda, S. K., Da Silva, L. C. N., Sahal, D., & Leonti, M. (2019). Editorial: Ethnopharmacological Studies for the Development of Drugs with special reference to Asteraceae. *Frontiers in Pharmacology*, 10. <https://doi.org/10.3389/fphar.2019.00955>
- Redonda-Martínez, R. (2022). Tribus de Asteraceae en México, morfología y clave de identificación. *Acta Botanica Mexicana*, 129. <https://doi.org/10.21829/abm129.2022.2122>
- Rodríguez-Chávez, J., Egas, V., Linares, E., Bye, R., Hernández, T., Espinosa-García, F., & Delgado, G. (2017). Mexican Arnica (*Heterotheca inuloides* Cass. Asteraceae: Astereae): Ethnomedical uses, chemical constituents and biological properties. *Journal of ethnopharmacology*, 195, 39–63. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2016.11.021>
- Rodríguez-Chávez, J. L., Coballase-Urrutia, E., Nieto-Camacho, A., & Delgado-Lamas, G. (2015). Antioxidant Capacity of “Mexican Arnica” *Heterotheca inuloides* Cass natural products and some derivatives: Their Anti-Inflammatory Evaluation and Effect on *C. Elegans* Life Span. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2015, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2015/843237>
- Rolnik, A., & Olas, B. (2021). The Plants of the *Asteraceae* Family as Agents in the Protection of Human Health. *International journal of molecular sciences*, 22(6), 3009. <https://doi.org/10.3390/ijms22063009>
- Rosas-Piñón, Y., Mejía, A., Díaz-Ruiz, G., Aguilar, M., Sánchez-Nieto, S., & Rivero-Cruz, J. (2012).



- Ethnobotanical survey and antibacterial activity of plants used in the Altiplane region of Mexico for the treatment of oral cavity infections. *Journal of ethnopharmacology*. 141(3), 860–865. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2012.03.020>
- Soori, B. I. P., Regmi, K., & Pappas, Y. (2024). Factors Influencing the Integration of Traditional Medicine and Mainstream Medicine in Mental Health Services in West Africa: A Systematic Review Using Narrative Synthesis. *Community mental health journal*, 60(6), 1117–1130.
- Susanna, A., B. G. Baldwin, R. J. Bayer, J. M. Bonifacino, N. García-Jacas, S. C. Keeley, J. R. Mandel, S. Ortiz, H. Robinson & T. F. Stuessy. (2020). The classification of the Compositae: a tribute to Vicki Ann Funk (1947-2019). *Taxon* 69: 800-807. <https://doi.org/10.1002/tax.12235>
- Villaseñor, J. L. 2018. Diversidad y distribución de la familia Asteraceae en México. *Botanical Sciences* . 96(2): 332-358. <https://doi.org/10.17129/botsci.1872>
- Yuan, Z., Pan, Y., Leng, T., Chu, Y., Zhang, H., Ma, J., & Ma, X. (2022). Progress and Prospects of Research Ideas and Methods in the Network Pharmacology of Traditional Chinese Medicine. *Journal of pharmacy & pharmaceutical sciences: a publication of the Canadian Society for Pharmaceutical Sciences, Societe canadienne des sciences pharmaceutiques*, 25, 218–226. <https://doi.org/10.18433/jpps32911>

Características del propóleo y usos en medicina alternativa.

Cesar Ibarra-Gudiño.
Sergio Martínez-González.
Ranferi Gutiérrez-Leyva.
Fidel Ávila-Ramos.
Ulises Mercado-Burciaga.
Edgar Alfredo Ramírez-Acevedo.
Carlos Alfredo Carmona-Gasca.





Resumen

El propóleo es una sustancia resinosa recolectada por abejas melíferas de diversas fuentes vegetales, utilizada desde la antigüedad por sus propiedades adhesivas y medicinales. Su nombre proviene del griego y significa “defensa de la ciudad”, en referencia a su función protectora en la colmena. Las abejas lo emplean para sellar grietas, reforzar estructuras y embalsamar intrusos, lo que sugiere una función antimicrobiana natural. La composición del propóleo varía según la flora local, pero comúnmente contiene flavonoides, ácidos fenólicos, vitaminas y minerales. Entre los compuestos identificados destacan la galangina, pinocembrina, crisina, quercetina y ácido cafeico, con propiedades antibacterianas, antifúngicas, antiinflamatorias y antioxidantes. Estudios han demostrado su eficacia frente a bacterias como *Bacillus subtilis*, *Staphylococcus aureus* y *Proteus vulgaris*, así como hongos como *Candida albicans* y *Trichophyton rubrum*. Los flavonoides presentes en el propóleo han mostrado efectos terapéuticos como protección capilar, acción espasmolítica, antiviral y estabilización de tejidos. Sin embargo, la variabilidad en su composición y la falta de estudios clínicos rigurosos limitan su uso farmacéutico formal. Se requiere mayor investigación para validar sus efectos y establecer estándares de calidad. El documento concluye que, aunque el propóleo posee un amplio potencial terapéutico y comercial, su aplicación médica debe basarse en evidencia científica sólida. La revisión busca ser un punto de partida para futuras investigaciones sobre sus propiedades químicas y biológicas.

Palabras clave: Propóleo, flavonoides, actividad antimicrobiana, composición química, medicina alternativa.



Introducción

En los últimos años se ha renovado el interés por las propiedades del propóleo, el producto resinoso de la colmena que recolectan las abejas. El uso del propóleo se remonta al menos al año 300 a.C., cuando se aprovecharon sus cualidades resinosas y pegajosas. Pronto el propóleo se introdujo en los remedios de la medicina popular. Sin embargo, aparte de algunos estudios realizados a principios de este siglo, la mayor parte de los trabajos sobre la composición, las propiedades farmacológicas y los usos comerciales de los preparados a base de propóleos se han llevado a cabo en los últimos treinta años. Muchos de los informes que tratan del propóleo no son accesibles para la mayoría de los lectores, salvo en forma de resúmenes, ya que la mayoría han sido publicados por revistas de Europa del Este.

Con el reciente aumento del interés por la química y la farmacología del propóleo parece oportuno intentar recopilar gran parte de la información disponible. Esta revisión trata del origen y los usos del propóleo, la actividad farmacológica atribuida a sus extractos y los compuestos que se han aislado e identificado a partir de ellos. También se discute si existe una base química para los efectos farmacológicos publicados del propóleo. No ha sido posible evaluar con claridad muchos de los resultados comunicados sobre el propóleo, ya que gran parte de la información sólo ha estado a disposición en forma de breves resúmenes. No obstante, se espera que esta revisión y bibliografía constituyan un punto de partida para los interesados en el tema.

Origen del propóleo

El propóleo (propolis o beeglue) es el nombre genérico de la sustancia resinosa recolectada por las abejas melíferas de diversas fuentes vegetales. La palabra propóleo deriva del griego pro-, para o en defensa, y polis-, la ciudad, es decir defensa de la ciudad (o de la colmena). Los primeros observadores del comportamiento de las abejas eran conscientes del origen vegetal del propóleo. En 1908 se documentó que las abejas obtenían el propóleo de las ramas, hojas y yemas de los abedules, fresnos, olmos y bálsamos, por lo que la composición del propóleo variaba en función de su origen. En 1926 se aisló la crisina del propóleo, el compuesto responsable del color de la cera de abejas, y supo que el propóleo se obtenía de *Populus nigra* var. *pyramidalis*. Estos últimos, examinaron el propóleo como contaminante de la cera de abejas y concluyeron que las variedades estadounidenses procedían de las yemas de *Populus nigra* y del aliso, *Alnus viridis*. También se encontraron granos de polen de *Lupinus*, *Robinia* y *Onobrychis* en la fracción insoluble del propóleo, y se afirmó que la cera del propóleo era aparentemente cera vegetal. Sin embargo, se afirmaba que se desconocía el origen de la cera del propóleo. En la actualidad se acepta que las abejas recolectan propóleos de diversas fuentes vegetales. en particular especies de álamos, abedules, olmos, alisos, hayas, coníferas y castaños de Indias. Se sabe muy poco de estos árboles como fuentes de propóleos, y aún menos de las fuentes de



propóleos en los trópicos. Existen indicios de que, en Australia Occidental, las abejas obtienen propóleos de las gramíneas (*Xanthorrhoea*), que son exclusivas de Australia. Si el propóleo es alterado de alguna manera por las abejas sigue siendo un punto discutible. Existen pruebas de que algunos compuestos presentes en los árboles de los que las abejas se alimentan para obtener propóleos se encuentran inalterados después de que las abejas los hayan utilizado.

Recolección de propóleos por las abejas melíferas

El mecanismo de recolección y entrega de propóleos por las abejas obreras dentro de la colmena ha sido descrito por varios autores. Un informe describe claramente la recolección de propóleos en los álamos: las yemas que se desarrollaban en las ramas a principios de marzo atraían a las recolectoras de propóleos. Las abejas arrancaban trozos del exudado resinoso de las yemas con las patas traseras y las piezas bucales. Los trozos se humedecían con la lengua y se formaban gránulos con las mandíbulas. Con ayuda de las patas, las abejas llevan las bolitas desde la boca a lo largo de los pelos de la tibia hasta la corbícula, la hendidura sin pelos de la cara externa de la tibia posterior. Mientras introducía un trozo de propóleos en la corbícula, la abeja ya buscaba a tientas más propóleos. Se ha ilustrado los intrincados movimientos de las patas en este procedimiento.

La recolección del propóleos puede durar mucho tiempo y verse interrumpida por visitas a la colmena para alimentarse. Una vez llenas las corbículas, las abejas entregaban finalmente el propóleo a la colmena. Podían tener que esperar en la pared de la colmena - los registros oscilaban entre una hora y dos días- antes de que la carga de propóleos fuera retirada por otras abejas, que la utilizaban inmediatamente. Al parecer, las abejas que normalmente buscan propóleo también lo utilizan en la colmena. Estas abejas eran más viejas que las que construían panales y tapaban celdas de miel, y las glándulas cereras de la mayoría estaban atrofiadas.

Los factores que desencadenan la recolección de propóleos por las abejas no se conocen del todo. Algunos observadores han sugerido que los factores estacionales pueden ser más responsables que la disponibilidad de propóleos. En el norte de Europa, las abejas recolectan propóleos desde finales de junio hasta el final de la temporada de vuelo, pero en Italia ya lo hacen en marzo, con los primeros signos de la primavera. Otra sugerencia es que la recolección de propóleos se inicia por algún cambio inherente al comportamiento de las recolectoras a finales del verano, y no por las condiciones climáticas. Es concebible que estos factores estén interrelacionados con los que intervienen en la utilización del propóleos por las abejas.

Uso del propóleo por las abejas

Las abejas utilizan el propóleo en una fina capa sobre las paredes internas de su colmena



u otra cavidad que habiten. Se utiliza para tapar agujeros y grietas, reparar panales, reforzar los finos bordes del panal y para hacer la entrada de la colmena impermeable o más fácil de defender. El propóleo también se utiliza como sustancia «embalsamadora» para cubrir el cadáver de un invasor de la colmena que las abejas han matado, pero no pueden transportar fuera de la colmena, por ejemplo, las polillas de la cera *Galleria mellonella* y *Achroia grisella*, *Acherontia atropos*, *Vespa vulgaris*, *V. crabro*, y pequeños caracoles (*Limacida*, *Arionida*).

Las abejas cubren al invasor con propóleo y cera, y los restos quedan en el fondo o en una de las paredes de la colmena. El instinto que provoca las pautas de comportamiento mencionadas es interesante, y debe considerarse con el que desencadena la recolección de propóleos. Se han propuesto varias racionalizaciones. Una de ellas sugiere que el propóleo se utiliza para proporcionar un revestimiento impermeable a la colmena o a la cavidad del nido que limita la salida del vapor de agua que necesita la cría en desarrollo. Otra interpretación es que las abejas utilizan el propóleo durante la fase de «terminación» de una determinada parte del nido, tras lo cual abandonan esa zona. En este sentido, el proceso de «embalsamamiento» de los intrusos sería simplemente una continuación de la actividad de las abejas para «completar» el nido. Esto parece encontrar apoyo en algunas observaciones según las cuales el propóleo se recoge durante el periodo de disminución de la cría, antes de la llegada del invierno. A la vista de los usos que las abejas dan al propóleo, parece razonable sugerir que su recolección puede producirse también en respuesta a condiciones ambientales adversas en la colonia, por ejemplo, un mantenimiento deficiente o la presencia de intrusos.

Cabe destacar que algunas razas de abejas melíferas recolectan propóleos más activamente que otras. Las abejas caucásicas de las montañas grises recolectan bastante más que las abejas de los bosques oscuros, mientras que las abejas italianas, ucranianas y del Lejano Oriente recolectan muy poco. Las abejas tropicales *Apis cerana*, *A. florea*, *A. dorsata* y las abejas tropicales africanas *A. mellifera* no utilizan propóleos; las abejas de Carniola utilizan cera en lugar de propóleos. Aparte del uso puramente mecánico de las propiedades pegajosas y cementantes del propóleo, su uso puede tener una base química. El «embalsamamiento» de los intrusos puede servir para contener la putrefacción y, por tanto, la propagación de infecciones y enfermedades.

La presencia de propóleos dentro de la colmena también puede proporcionar un entorno poco propicio para el crecimiento de bacterias y otros microorganismos. Se ha sugerido que el propóleo es de hecho responsable de la menor incidencia de bacterias y mohos dentro de la colmena que en la atmósfera exterior. Los componentes volátiles del propóleo reducen la aeroflora dentro del colmenar. Es probable que intervengan muchos factores, y habrá que seguir trabajando para conocer a fondo este interesante aspecto del comportamiento de las abejas. Sin embargo, parece válido preguntarse si las propiedades químicas del propóleo no sólo pueden ser beneficiosas para las abejas, sino que pueden



tener un valor farmacológico general. La mayor parte de los trabajos que se exponen a continuación tratan de responder a esta pregunta, y en las secciones siguientes se intenta evaluar las pruebas disponibles.

Composición y componentes del propóleo

El propóleo es una goma resinosa y pegajosa, cuyo color varía del amarillo verdoso al marrón oscuro según su procedencia y edad. Se asemeja a un pegamento aromático. Es difícil de eliminar de la piel humana, ya que parece interactuar bastante con los aceites y proteínas de la piel. Es duro y quebradizo cuando está frío, pero se vuelve blando y muy pegajoso cuando está caliente.

Como es una mezcla, los propóleos no se presta fácilmente a la extracción o al fraccionamiento, por lo que no es sorprendente que la mayoría de los primeros intentos de determinar la composición del propóleos se centraran en el simple fraccionamiento de la mezcla. El método habitual consistía en extraer la fracción soluble en alcohol, denominada fracción resinosa, dejando la fracción insoluble en alcohol o cera. El propóleo «bálsamo» designaba la fracción que podía extraerse con alcohol al 70%. A principios del siglo XX, las estimaciones de la composición bruta del propóleos, presumiblemente basadas en muestras de diversas procedencias, eran cualitativamente similares. Se hicieron pocos intentos de purificar más e investigar las fracciones individuales. Excepciones notables son los trabajos, que identificó el alcohol cinámico y el ácido cinámico como constituyentes del propóleos, y de Dietrich, que detectó trazas de vainillina. En 1927, Jaubert descubrió que el color de la cera de abejas se debía a la presencia del pigmento flavonoide crisina, que también podía aislarse del propóleos.

Hasta 1969 no apareció ningún informe sobre la identificación de otros compuestos en el propóleo. La falta de interés y de actividad se debió probablemente a la naturaleza intratable del propóleos y a la falta de técnicas apropiadas de separación y análisis. En 1969, aplicaron técnicas de separación e identificación en una investigación sobre los componentes del propóleos. Se identificaron seis pigmentos flavonoides aislada y demostrada ser 5,7-dihidroxi-4' metoxiflavona (acacetina) (9), 5-hidroxi- 4', 7-dimetoxiflavona, 3,5,7 trihidroxi-4'-metoxiflavona (kaempferida), 3,4',5-trihidroxi-7-metoxiflavona (ramnocitrina), 5,7-dihidroxi-3,4'-dimetoxiflavona y 3,5-dihidroxi-4',7-dimetoxiflavona. También se aislaron dos flavanonas (-)-5-hidroxi-7 -metoxiflavanona (pinostrobin) y (-)-5-hidroxi-4', 7- dimetoxiflavanona y el aromático simple 3-hidroxi-4-metoxibenzaldehído (isovanillina).

La cantidad de cada uno de estos compuestos oscilaba entre el 1 y el 4% de la muestra original de propóleos. Se obtuvieron pruebas para de la presencia de derivados de otra flavona, la quercetina, pero los compuestos no se caracterizaron con más detalle. Los compuestos aislados se encontraron sistemáticamente en muestras de propóleos



recogidas en diferentes regiones y por diversas razas de abejas. Las composiciones de flavonas y flavanonas de estos extractos correspondían a las encontradas. Tras la observación de que el propóleo mostraba una actividad antibacteriana significativa frente a *Bacillus subtilis*, *B. alvei* y *Proteus vulgaris*, los franceses consiguieron aislar la flavona galangina a partir de extractos de propóleos y demostrar que la actividad bacteriostática atribuida a su muestra de propóleos se debía. Trabajos posteriores del mismo grupo dieron lugar al aislamiento de una flavanona, la pinocembrina, que también mostraba una actividad similar a la galangina. Además, se aislaron e identificaron las flavonas crisina, tectocrisina e isalpinina. Resulta interesante saber que estos compuestos se habían aislado anteriormente.

A partir de las yemas jóvenes de los álamos, de los que se sabe que las abejas recogen propóleos; los resultados indican que estas flavonas se encuentran en los propóleos sin cambios. Trabajos más recientes han permitido aislar el ácido cafeico y el ácido ferúlico a partir de muestras de propóleos de Europa del Este. Se sabe que ambos compuestos tienen actividad antibacteriana sobre algunos microorganismos grampositivos y gramnegativos. Investigaciones sobre los componentes antimicrobianos del propóleo permitió aislar e identificar 17 componentes, 9 de los cuales habían sido aislados previamente en otras muestras de propóleos. Los compuestos aislados por primera vez fueron las dos flavonas pectolinarigenina, quercetina-3,3'-dimetiléter, tres flavanonas, sakuranetina, pinobanksina (25) y su derivado 3-acetato, éster bencílico p-cumárico y un éster de ácido cafeico con un alcohol aromático.

Un estudio preliminar de los componentes del propóleo recolectado por las abejas en la región suroeste de Australia Occidental ha puesto de manifiesto la presencia de los siguientes compuestos: cuatro flavanonas, pinostrobin, sakuranetina, isosakuranetina y pterostilbeno y el derivado naftalénico xantorrhoeol. También se detectaron trazas de crisina y alcohol 3,5-dimetoxibencílico. El ácido mirístico se aisló de una muestra de propóleos, junto con cantidades de otros ácidos grasos comprendidos entre C7 y C18. Los ácidos grasos constituyentes representaban aproximadamente el 5% de la muestra.

Se ha señalado la presencia de pequeñas cantidades de vitaminas en los propóleos obtenidos en Estados Unidos. La vitamina B1, B10, B2, B6, A, C y E, así como el ácido nicotínico y el ácido pantoténico se detectaron en cantidades variables. Se han detectado cobre y manganeso en el propóleo a niveles de 8 mg y 40 mg/kg respectivamente. Se ha demostrado que el residuo de ceniza del propóleo contiene hierro, calcio, aluminio, vanadio, estroncio, manganeso y silicio.

Los primeros trabajos sobre la caracterización del propóleo mencionan que informó de que no había alcaloides ni aceites volátiles, sin embargo, un informe reciente describe la composición de las fracciones volátiles del vapor de una muestra de propóleo. Los compuestos identificados en la fracción eran ácido benzoico, alcohol bencílico, ácido sórbico, vainillina y probablemente eugenol. Además, se informó de que en el destilado de



vapor se identificaron fenil vinil éter, anisil vinil éter y ciclohexilbenzoato. Es discutible si estos tres últimos compuestos se encuentran realmente en el propóleo, ya que a veces están presentes en polímeros sintéticos. El ciclohexilbenzoato se utiliza a veces como plastificante, y es probable que los compuestos fueran artefactos de los procedimientos de manipulación y separación.

De los escasos trabajos realizados sobre los componentes del propóleo se desprenden algunos puntos interesantes. El grupo más numeroso de compuestos aislados es, con mucho, el de los pigmentos flavonoides, omnipresentes en el reino vegetal. Por tanto, no es sorprendente que se hayan aislado las mismas flavonas de diferentes muestras de propóleos, sobre todo porque la mayoría representan las estructuras más simples de flavona, flavanona o flavonol. La serie de flavonoides aislados del propóleos se correlaciona razonablemente bien con los presentes en las plantas de las que las abejas recolectan propóleos, pero relativamente pocos de los muchos flavonoides presentes en las yemas de las plantas son detectables en el propóleos; por ejemplo, *Betula nigra* contiene 19 flavonoides en cantidades razonables y en cantidades traza. Se ha sugerido que algunas de las flavonas son modificadas por una enzima en la abeja melífera. De ser así, parece probable que cualquier transformación deba producirse en presencia de enzimas en la saliva de las abejas durante la recolección. Los compuestos aromáticos simples presentes en el propóleos también son comunes en las plantas y su presencia en el propóleos no es inesperada. Más interesante es la presencia de xantorhoeol, pterostilbeno y alcohol 3,5-dimetoxibencílico en la muestra de propóleos de Australia Occidental.

El xantorhoeol se ha encontrado anteriormente en la gramínea *Xanthorrhoea pressii*. También se ha aislado sakuranetina de esta planta, e isosakuranetina de la especie afín *X. australis*. Aunque se sabe que las especies de eucalipto, contienen una serie de hidroxiestilbenos y metoxiestilbenos, no se ha descrito que el pterostilbeno sea uno de sus componentes. Una explicación podría ser que las abejas transforman los estilbenos naturales por metilación o desmetilación en pterostilbeno. Aunque se encuentran resorcinolos alquílicos en las especies australianas de *Grevillea*, el patrón de sustitución puede indicar de que se trata de un producto de degradación del pterostilbeno.

Hay que subrayar que los numerosos compuestos ya aislados del propóleo sólo representan una pequeña proporción del total. La mayoría proceden de la fracción de propóleos soluble en disolventes orgánicos, un pequeño porcentaje del total. Es probable que la mayor parte del propóleos que no es fácilmente soluble en agua o en disolventes orgánicos consista en material polimérico natural. Será necesario investigar mucho más para delimitar correctamente los componentes, que sin duda variarán en función de la fuente vegetal.



Esto plantea la cuestión del valor de la simple determinación de la «composición» del propóleo. Si se quiere dar credibilidad a una mínima parte de la actividad farmacológica atribuida al propóleo, hay que aportar pruebas satisfactorias de la presencia de los compuestos responsables. Hasta ahora, muchas de las «investigaciones» llevadas a cabo deben calificarse de investigaciones pseudocientíficas. Deben realizarse intentos más rigurosos para aislar los compuestos implicados, utilizando bioensayos apropiados para guiar los procesos de separación y purificación. Esto adquiere mayor importancia cuando se trata de compuestos farmacológicamente activos presentes sólo en cantidades mínimas.

Actividad biológica de los constituyentes del propóleo

Aunque se ha trabajado mucho para determinar el espectro de actividad farmacológica y los constituyentes del propóleo, se han hecho pocos intentos para determinar si los compuestos presentes en una muestra concreta son responsables, total o parcialmente, de su actividad declarada.

En 1960, se descubrió que el propóleo mostraba actividad bacteriostática frente a *Bacillus subtilis*, *Proteus vulgaris* y *B. alvei*. El efecto era menos marcado frente a *Salmonella gallinarum*, *S. pullorum* y *S. dublin*, e insignificante frente a diferentes cepas de *E. coli*. Tras el fraccionamiento de la muestra de propóleo, se aislaron la galangina y la pinocembrina, que resultaron ser en parte responsables de la actividad. De hecho, la galangina en concentraciones de 0 - 065 mg/ml inhibió a *B. subtilis* durante 12 h. Niveles más elevados (0-080 mg/ml) inhibieron el crecimiento de *B. alvei* durante 24 h y de *P. vulgaris* durante 12 h. Se necesitó el doble de esta concentración para inhibir *S. gallinarum* durante 24 h. Aunque no se pudo estimar la concentración de galangina en la muestra de propóleo, parece que otros compuestos presentes también pueden contribuir a la actividad observada. Otros trabajos mostraron que otro constituyente, la pinocembrina, inhibió *B. subtilis* durante 24 h a 0 - 03 mg/ml. Ninguno de los demás constituyentes identificados (crisina, tectocrisina, isalpinina) fue activo frente a este microorganismo.

En un estudio de los componentes del propóleo, detectaron componentes activos contra *B. subtilis*, *Staphylococcus aureus*, *E. coli* y *Candida albicans*. Los autores concluyeron que, de los 26 o más compuestos detectables en el extracto de propóleo, sólo el acetato de pinobanksina-3, la pinocembrina, el éster benílico del ácido p-cumárico y un éster del ácido cafeico mostraban una actividad antimicótica significativa.

De todos los demás constituyentes aislados de distintas muestras de propóleo, sólo se ha comprobado la actividad biológica de unos pocos. El ácido cafeico muestra lo siguiente: actividad antibacteriana frente a *S. aureus*, *C. diphteriae*, *P. vulgaris*; actividad tuberculostática *in vitro* frente a *Mycobacterium tuberculosis*; actividad fungistática frente a *Helminthosporium carbonum*; inhibición del crecimiento de *Streptomyces*



scabies. Esto concuerda con la actividad del extracto de propóleos frente a la mayoría de estos microorganismos, tal y como han observado otros investigadores. El ácido ferúlico muestra actividad antibacteriana frente a algunas bacterias grampositivas y gramnegativas, y posiblemente también contribuye a la actividad bactericida y bacteriostática del propóleo. El ácido ferúlico también tiene un marcado efecto astringente y, al igual que los ácidos orgánicos que contienen un doble enlace bencílico y un grupo metoxilo aromático (por ejemplo, el ácido 3,4-dimetoxicinámico), una importante actividad colerética (aumento de la secreción de bilis por el hígado) similar a la del desoxicolato sódico.

La pinocembrina posee una actividad antimicrobiana considerable frente a los hongos *Alternaria*. La sakuranetina es activa contra los hongos que pudren la madera. Varias flavonas aisladas del propóleo han demostrado tener una actividad espasmolítica similar a la de la papaverina, en ensayos realizados en el intestino delgado de ratones in vitro, utilizando acetilcolina para provocar la contracción. En comparación con el clorhidrato de papaverina (100 %), las actividades de las flavonas fueron las siguientes: pectolinarigenina; quercetina, kaempferida. Las flavanonas sakuranetina e isosakuranetina resultaron tener una actividad insignificante a las concentraciones utilizadas en los ensayos, limitadas por la insolubilidad de los compuestos.

Se sabe que los estilbenos poseen propiedades fungicidas y fungistáticas frente a los hongos que pudren la madera, y se cree que la presencia de estos compuestos en ciertas frondosas proporciona cierta protección. Se ha observado la actividad antifúngica del pterostilbeno. Se ha informado de que el pterostilbeno se ha utilizado en el tratamiento de la diabetes (probablemente en la medicina popular), pero no se ha encontrado confirmación de ello.

Los principales componentes del propóleo de la mayoría de las procedencias son las flavonas, los flavonoles y las flavanonas. Esto es especialmente cierto en el caso de los propóleos recolectados en Europa del Este, donde se ha llevado a cabo la mayor parte de los trabajos sobre la actividad farmacológica del propóleos. Queda por saber si estos compuestos son directa o indirectamente responsables de algunos de los efectos observados. Sin embargo, dado que el uso del propóleo parece estar muy extendido en algunos países, es útil tener en cuenta las propiedades farmacológicas conocidas de estos compuestos ubicuos.

En los últimos treinta años se han dedicado muchos esfuerzos a determinar los efectos fisiológicos y terapéuticos de los pigmentos flavonoides. Algunos de los primeros resultados contradictorios provocaron un gran debate y falta de interés, pero en los últimos años varios trabajadores se han esforzado por reexaminar las propiedades terapéuticas de los compuestos flavonoides. Aquí se resumen algunos de los resultados más recientes. Existen revisiones exhaustivas sobre la investigación de la acción



fisiológica, la farmacodinámica y los usos terapéuticos de los flavonoides.

En la actualidad se acepta generalmente que la gran mayoría de los flavonoides son inocuos pero tienen el efecto antibiótico de más de 20 flavonoides sobre cepas de *Salmonella*, *Staphylococcus aureus*, *Proteus vulgaris*, *E. coli* y otros organismos. Ningún compuesto carecía de actividad inhibidora frente a uno o más de los diez tipos de bacterias estudiados. La luteolina (5,7,3',4'-tetrahidroxiflavona) y la apigenina (5,7,4'-trihidroxiflavona) tuvieron un marcado efecto protector sobre las úlceras gástricas inducidas en cobaya y rata. El éter 3'-metilo de la apigenina (acacetina) no fue eficaz, lo que sugiere que es necesario que haya grupo(s) hidroxilo(s) libre(s) en el anillo B. Por otra parte, la acacetina disminuye la inflamación inducida por la formalina y reduce la fragilidad capilar cuando se administra por vía oral (25-100 mg/kg) a ratones⁷⁸. El éter 3',4'-dimetil de la luteolina tiene propiedades hipocoleréticas y espasmolíticas.

Se ha demostrado que la quercetina aumenta *in vitro* la capacidad de fijación de histamina de varias fracciones de proteínas (en particular las γ -globulinas). Varios compuestos flavonoides ejercen un efecto antiinflamatorio en las articulaciones, la piel y las mucosas. Se ha sugerido que algunos flavonoides estabilizan el tejido conjuntivo y los vasos sanguíneos, protegen la vitamina C frente a la oxidación y disminuyen la actividad de las enzimas destructoras de mucopolisacáridos. El eriodictiol (5, 7, 3', 4' - tetrahidroxiflavanona) administrado por vía oral o parenteral a ratas previno la aparición de insuficiencia pulmonar aguda, que fue inducida por varios procedimientos y que normalmente resulta de quemaduras respiratorias, traumatismos torácicos y no torácicos y shock.

En general, los flavonoides con 3' 4'-dihidroxilación ejercen un efecto beneficioso sobre los capilares al (a) quelar metales, evitando así la oxidación del ácido ascórbico, (b) prolongar la acción de la adrenalina al inhibir la o-metiltransferasa, (c) inhibir la hialuronidasa y la histamina, y contrarresta el efecto de los anticoagulantes. Si estos grupos hidroxilos faltan, o están parcial o totalmente metilados, el efecto disminuye. Aunque la mayoría de los flavonoides aislados del propóleo carecen del patrón de 3',4'-dihidroxilación, es interesante observar que una de las principales vías de metabolismo de los flavonoides implica la hidroxilación en la posición 3', así como la desmetilación del grupo metiléter en la posición 4'.

Pruebas recientes demostraron que los compuestos flavonoides polimetoxilados pueden inhibir significativamente la agregación eritrocitaria *in vitro* e *in vivo*. Esto tiene cierta importancia, ya que las enfermedades y lesiones van acompañadas de agregación celular en bloque. Si ésta es grave y prolongada, pueden producirse daños y agrandamiento de los órganos.

Los resultados obtenidos con ciertas flavonas sugieren que estos compuestos pueden utilizarse clínicamente. Los efectos beneficiosos de los flavonoides contra la permeabilidad y la fragilidad capilar anormales también pueden explicarse si actúan



reduciendo la agregación de las células sanguíneas y mejorando la microcirculación.

Se ha sugerido que, además de actuar como agentes antipatógenos, los flavonoides pueden potenciar las enzimas que desintoxican los hidrocarburos, mostrar actividad antiinflamatoria, ejercer una acción antiadhesiva sobre las células sanguíneas y mostrar actividad antitrombogénica. Algunos flavonoides parecen tener efectos antivirales en animales. Las células tratadas con quercetina muestran una menor sensibilidad al Herpesvirus hominis. A pesar de estos y otros informes, siguen existiendo inconsistencias en cuanto a la acción beneficiosa de los flavonoides. Particularmente dudoso es su efecto clínico cuando se administran por vía oral. Se ha argumentado, sin embargo, que los efectos beneficiosos a menudo sólo son aparentes tras un tratamiento prolongado. No se han realizado estudios específicos para determinar la actividad de otros componentes flavonoides del propóleo.

Actividad antibacteriana y antifúngica

La primera investigación sistemática de la actividad antibacteriana del propóleo sobre una serie de bacterias, el propóleo fundido mostraba actividad bacteriostática contra *S. aureus*, *Salmonella* y otras bacterias. Varios trabajos más, procedentes de estudios de sólo extractos crudos de propóleos, de diversas fuentes, obtenidos por diferentes procedimientos de extracción. Ello explica quizás algunas entradas aparentemente contradictorias, por ejemplo; *Streptococcus* y *Escherichia*. En general, los resultados deben tomarse con cierta precaución y considerarse, en el mejor de los casos, indicativos; la falta de estudios comparativos con antibióticos eficaces aceptados también les resta valor.

En un estudio detallado de la actividad antimicrobiana del propóleo, Li analizó 15 muestras recogidas en diferentes partes de EE.UU. en distintas estaciones. Los extractos mostraron una fuerte actividad inhibidora *in vitro* en 25 de las 39 especies bacterianas probadas.

Bacillus larvae fue la más inhibida, y otras 24 fueron sensibles, incluidos cocos grampositivos y bacilos acidorresistentes; 7 bacilos gramnegativos fueron resistentes. De las 39 especies de hongos, 20 resultaron inhibidas. 2 levaduras mostraron resistencia. La sensibilidad *in vitro* de *Trichophyton rubrum* al propóleo respalda en cierta medida la afirmación de la eficacia de la pomada de propóleos en el tratamiento de una infección cutánea por este organismo. Además, la actividad contra las bacterias acidorresistentes es interesante si se tiene en cuenta la afirmación de que el propóleo puede utilizarse para el tratamiento de pacientes tuberculosos.

El extracto alcohólico de propóleos controlaba la loque americana en las abejas melíferas. El extracto se administraba directamente, se mezclaba con miel diluida o se pulverizaba sobre los panales en forma de solución acuosa o salina. A 500 µg/ml, la



enfermedad sólo se controló durante el tratamiento, pero concentraciones más elevadas destruyeron larvas sanas y provocaron deformidades. El sulfatiazol a 132 mg/ml eliminó la infección. El propóleo a 25 mg/ml mostró efecto bactericida frente a 20 cultivos de *Staphylococcus*, 10 de *Streptococcus* y 10 de *E. coli* aislados del esputo de niños con neumonía crónica.

Se ha descrito el tratamiento de la candidiasis del lactante con propóleos en una mezcla de alcohol y agua. Otros tratan de la utilización del propóleos en el tratamiento de vaginitis y cervicitis, de enfermedades cutáneas supurativas causadas por cepas de *Staphylococcus* resistentes a los antibióticos, y de la alteración de la microfiora tras una intervención quirúrgica en el oído. Un informe señala que el almacenamiento durante 3-4 años a 4°C o a temperatura ambiente no reduce la actividad antibacteriana del extracto de propóleo. A pesar del carácter un tanto arbitrario de la mayoría de estos experimentos, los resultados indican que el propóleos posee actividad antibacteriana. Es lamentable que incluso ahora algunos experimentos se realicen con extractos crudos.

Conclusiones

En esta revisión se ha intentado recopilar la mayor parte de la información sobre el propóleo publicada en los últimos setenta años. Muchas de las afirmaciones sobre su acción farmacológica no han sido confirmadas, pero parece probable que su uso con fines comerciales aumente. Es evidente que será necesario estudiarlo con mayor profundidad antes de que pueda considerarse con fines terapéuticos; dado que su composición es en gran medida desconocida, no debería recomendarse en medicamentos. Al igual que con cualquier otra preparación farmacéutica, quienes afirman sus efectos beneficiosos deben aportar pruebas sólidas. Además, es necesario examinar la preparación para detectar efectos secundarios. Dado que un número considerable de personas parece utilizar propóleo y sus preparaciones, se justifica una mayor investigación sobre sus propiedades farmacológicas, y se espera que esta revisión sirva de base para dichas investigaciones.

Bibliografía

- Avila-Ramos, F., Carmona-Gasca, C. A., Martínez-González, S., & Arredondo-Castro, M. (2020b). Propóleo un aditivo y antioxidante natural en pollo de engorda. *BIOTecnia*, 22(3), 87-92. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v22i3.971>
- Almuhayawi, M. S. (2020). Propolis as a novel antibacterial agent. *Saudi journal of biological sciences*, 27(11), 3079-3086. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.09.016>.
- Bankova, V., Trusheva, B., y Popova, M. (2021). Propolis extraction methods: A review. *Journal of apicultural research*, 60(5), 734-743. <https://doi.org/10.1080/00218839.2021.1901426>



- Braakhuis, A. (2019). Evidence on the health benefits of supplemental propolis. *Nutrients*, 11(11), 2705. <https://doi.org/10.3390/nu11112705>.
- Burdock, G. A. (1998). Review of the biological properties and toxicity of bee propolis (propolis). *Food and Chemical toxicology*, 36(4), 347-363. [https://doi.org/10.1016/S0278-6915\(97\)00145-2](https://doi.org/10.1016/S0278-6915(97)00145-2)
- de Freitas, M. C., de Miranda, M. B., de Oliveira, D. T., Vieira-Filho, S. A., Caligorne, R. B., y de Figueiredo, S. M. (2017). Biological activities of red propolis: A review. *Recent patents on endocrine, metabolic & immune drug discovery*, 11(1), 3-12. <https://doi.org/10.2174/1872214812666180223120316>
- Forma, E., y Brys, M. (2021). Anticancer activity of propolis and its compounds. *Nutrients*, 13(8), 2594. <https://doi.org/10.3390/nu13082594>.
- Ghisalberti, E. L. (1979). Propolis: a review. *Bee world*, 60(2), 59-84. <https://doi.org/10.1080/0005772X.1979.11097738>
- Hossain, R., Quispe, C., Khan, R.A. *et al.* Propolis: An update on its chemistry and pharmacological applications. *Chin Med* 17, 100 (2022). <https://doi.org/10.1186/s13020-022-00651-2>.
- Ibarra-Espain, J. I., Carmona-Gasca, C. A., Escalera-Valente, F. & Avila-Ramos, F. (2020b). Efecto del propóleo y aceite de orégano adicionados en la dieta sobre parámetros productivos, leucocitos, metabolitos en sangre y estabilidad oxidativa de la pechuga de pollo. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 11(1), 153-166. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v11i1.4882>
- Irigoit, Y., Navarro, A., Yamul, D., Libonatti, C., Tabera, A., y Basualdo, M. (2021). The use of propolis as a functional food ingredient: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 115, 297-306. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.06.041>
- Kasote, D., Bankova, V., y Viljoen, A. M. (2022). Propolis: Chemical diversity and challenges in quality control. *Phytochemistry Reviews*, 21(6), 1887-1911. <https://doi.org/10.1007/s11101-022-09816-1>
- Mountford-McAuley, R., Prior, J., y Clavijo McCormick, A. (2023). Factors affecting propolis production. *Journal of Apicultural Research*, 62(1), 162-170. <https://doi.org/10.1080/00218839.2021.1938456>
- Pasupuleti, V. R., Sammugam, L., Ramesh, N., y Gan, S. H. (2017). Honey, propolis, and royal jelly: a comprehensive review of their biological actions and health benefits. *Oxidative medicine and cellular longevity*, 2017(1), 1259510. <https://doi.org/10.1155/2017/1259510>.



- Pobiega, K., Kraśniewska, K., y Gniewosz, M. (2019). Application of propolis in antimicrobial and antioxidative protection of food quality—A review. *Trends in food science & technology*, 83, 53-62. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.11.007>
- Przybyłek, I., y Karpiński, T. M. (2019). Antibacterial properties of propolis. *Molecules*, 24(11), 2047. <https://doi.org/10.3390/molecules24112047>
- Santos, L. M., Fonseca, M. S., Sokolonski, A. R., Deegan, K. R., Araújo, R. P., Umsza-Guez, M. A., y Machado, B. A. (2020). Propolis: types, composition, biological activities, and veterinary product patent prospecting. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(4), 1369-1382. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10024>.
- Abbasi, A. J., Mohammadi, F., Bayat, M., Gema, S. M., Ghadirian, H., Seifi, H. y Bahrami, N. (2018). Applications of propolis in dentistry: a review. *Ethiopian journal of health sciences*, 28(4). <http://dx.doi.org/10.4314/ejhs.v28i4.16>.
- Sforcin, J. M. (2007). Propolis and the immune system: a review. *Journal of ethnopharmacology*, 113(1), 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2007.05.012>
- Sforcin, J. M. (2016). Biological properties and therapeutic applications of propolis. *Phytotherapy research*, 30(6), 894-905. <https://doi.org/10.1002/ptr.5605>
- Stojanović, S. T., Najman, S. J., Popov, B. B., y Najman, S. S. (2020). Propolis: chemical composition, biological and pharmacological activity—a review. *Acta Medica Medianae* 59(2). <https://www.aseestant.ceon.rs/index.php/amm/article/view/24920>
- Zarate, M. S. H., Del Rosario Abraham Juárez, M., García, A. C., López, C. O., Chávez, A. J. G., De Jesús Nezahualcóyotl Segoviano Garfias, J., & Ramos, F. A. (2018). Flavonoids, phenolic content, and antioxidant activity of propolis from various areas of Guanajuato, Mexico. *Food Science And Technology*, 38(2), 210-215. <https://doi.org/10.1590/fst.29916>
- Zabaiou, N., Fouache, A., Trousson, A., Baron, S., Zellagui, A., Lahouel, M., y Lobaccaro, J. M. A. (2017). Biological properties of propolis extracts: Something new from an ancient product. *Chemistry and physics of lipids*, 207, 214-222. <https://doi.org/10.1016/j.chemphyslip.2017.04.005>
- Zulhendri, F., Chandrasekaran, K., Kowacz, M., Ravalia, M., Kripal, K., Fearnley, J., y Perera, C. O. (2021). Antiviral, antibacterial, antifungal, and antiparasitic properties of propolis: a review. *Foods*, 10(6), 1360. <https://doi.org/10.3390/foods10061360>
- Zulhendri, F., Lesmana, R., Tandean, S., Christoper, A., Chandrasekaran, K., Irsyam, I., y Wathoni, N. (2022). Recent update on the anti-inflammatory activities of propolis. *Molecules*, 27(23), 8473. <https://doi.org/10.3390/molecules27238473>.



Zullkiflee, N., Taha, H., y Usman, A. (2022). Propolis: Its role and efficacy in human health and diseases. *Molecules*, 27(18), 6120. <https://doi.org/10.3390/molecules27186120>

Revisión del uso del veneno de abeja en la salud humana

Cesar Ibarra Gudiño.
Wilbert Alfredo Flores Del Real.
Rosa Isela Lepe Aguilar.
Socorro Salgado Moreno.
Bladimir Peña Parra.
Carlos Alfredo Carmona Gasca.
Sergio Martínez González.
María Guadalupe Orozco Benítez.





Resumen

La apitoxina es un veneno producido por las abejas hembra utilizada desde hace más de 3,000 años como medicina alternativa, su aplicación terapéutica abarca enfermedades autoinmunes, inflamatorias y neurodegenerativas como artritis reumatoide, esclerosis lateral amiotrófica, Alzheimer y Parkinson. Se describen cinco tipos de terapia: apipuntura, picaduras controladas, inyección, aplicación tópica y electroterapia. El veneno contiene más de 30 compuestos bioactivos, destacando la melitina que puede representar del 40 al 60% por su efecto analgésico y antitumoral, y la apamina por su acción neuroprotectora. Se han documentado efectos antimicrobianos, antifúngicos y antiinflamatorios, así como beneficios en enfermedades como Alzheimer, diabetes y cáncer. La apitoxina modula vías inmunológicas, reduce inflamación y promueve apoptosis en células malignas. Aunque sus beneficios son amplios, se reportan efectos adversos en casi el 29% de los pacientes, incluyendo reacciones inmunes y alteraciones reproductivas, por lo tanto, se recomienda establecer protocolos preventivos. El presente capítulo concluye proponiendo diferentes líneas de investigación para aplicar apitoxina en medicina veterinaria, especialmente en animales de compañía, como alternativa terapéutica innovadora.

Palabras clave: *Apitoxina, medicina alternativa, terapias naturales, enfermedades crónicas, melitina, apamina, fosfolipasa A2*



Introducción

La apitoxina, también conocida como veneno de abeja, ha despertado creciente interés en el ámbito biomédico por sus propiedades terapéuticas y su potencial como agente alternativo en el tratamiento de diversas enfermedades humanas. Producida por las abejas obreras como mecanismo de defensa, esta sustancia compleja ha sido utilizada desde tiempos ancestrales en prácticas de medicina tradicional, y actualmente se investiga con mayor rigor científico por sus efectos antiinflamatorios, analgésicos, neuroprotectores y antitumorales.

Este capítulo presenta una revisión integral sobre la composición bioquímica de la apitoxina, sus mecanismos de acción y sus aplicaciones clínicas en patologías como artritis reumatoide, esclerosis lateral amiotrófica, enfermedad de Alzheimer, Parkinson, diabetes tipo 2 y ciertos tipos de cáncer. Se analizan los principales componentes activos —como la melitina, apamina y fosfolipasa A2— y su interacción con procesos inmunológicos, neurológicos y celulares, destacando su capacidad para modular respuestas inflamatorias, inducir apoptosis y mejorar la función cognitiva.

Asimismo, se abordan los distintos métodos de aplicación terapéutica, desde la apipuntura y las picaduras controladas hasta las formulaciones tópicas e inyectables, considerando sus ventajas, limitaciones y riesgos potenciales. Se discuten los efectos adversos reportados, la necesidad de protocolos clínicos estandarizados y las implicaciones éticas en su uso humano.

Finalmente, se propone una línea de investigación emergente en medicina veterinaria, orientada al aprovechamiento de la apitoxina en animales de compañía, como alternativa terapéutica innovadora. Esta perspectiva abre nuevas posibilidades para el desarrollo de tratamientos integrativos, sostenibles y basados en productos naturales, en consonancia con los principios de la medicina complementaria y la salud global.

La apitoxina una terapia ancestral y moderna

Las terapias basadas en compuestos naturales pueden ser complementos eficaces a los tratamientos convencionales para muchas enfermedades y la terapia con veneno de abeja es una de ellas; y ha sido utilizada desde hace más de 3000 años como una medicina alternativa dadas sus características farmacológicas. La apitoxina se ha investigado en el tratamiento de diversos padecimientos, incluyendo: enfermedades autoinmunes e inflamatorias como la Artritis Reumatoide, Esclerosis Amiotrofia Lateral y dermatitis atópica crónica; y a su vez en enfermedades neurodegenerativas como la enfermedad del Alzheimer y la enfermedad de Parkinson.

Se ha documentado que se pueden obtener hasta 15 productos de la colmena, entre los cuales se incluye el veneno de abeja llamado también apitoxina y que es una sustancia natural producida por las abejas hembra. Debido a su composición, se ha utilizado para tratar y contrarrestar problemas de salud. Sin embargo, su uso y aplicación no han sido



regulados y siempre existe el riesgo de que el individuo experimente una reacción alérgica, dependiendo del número de aguijonazos que reciba el individuo (Cuadro 1).

Las manifestaciones clínicas pueden ir de leves a graves; variables como la edad, peso corporal, enfermedades presentes en el individuo y que tan rápido se consigue la atención médica, influyen en la respuesta. Los principales efectos que se observan de manera local en el sitio donde el aguijón lesionó la piel, son: dolor, hinchazón, prurito, eritema y urticaria. En el Cuadro 1 se enlista los diferentes tipos de terapia con veneno de abeja.

Cuadro 1. Tipos de terapia con veneno de abeja.

Tipo de terapia	Descripción
Apipuntura	-Veneno de abeja purificado y diluido inyectado en puntos de acupuntura específicos para optimizar los efectos terapéuticos.
Picaduras de abeja	-Picadura de abeja administrada en un sitio específico; este método conlleva un alto riesgo de reacciones anafilácticas fatales.
Terapia de inyección	-Inyección de veneno de abeja en un lugar definido con precisión
Aplicación tópica	-Aplicación directa de ungüentos o cremas de veneno de abeja sobre la piel para tratamiento localizado.
Electroterapia con veneno de abeja	-Combinación de veneno de abeja con estimulación eléctrica para potenciar los efectos terapéuticos.

Composición del veneno de abeja y sus efectos

El veneno de abeja es una toxina natural producida por las abejas y juega un papel importante en la defensa de su colonia. El veneno contiene varios tipos de péptidos como se muestra en el cuadro tres, como melitina, apamina, adolapamina, fosfolipasa A2, hialuronidasa, serotonina, histamina, dopamina y noradrenalina y péptidos de degranulación de mastocitos. La apamina representa alrededor del 2% al 3% del peso seco de veneno de abeja y es una neurotoxina peptídica que contiene 18 residuos de aminoácidos estrechamente entrecruzados; y es conocida por sus funciones farmacológicas. En el Cuadro 2, se mencionan algunas características de la apitoxina.

El componente principal responsable del dolor asociado a una picadura de abeja es la Melitina, que constituye entre el 40% y el 60% del veneno total. La melitina actúa



directamente sobre las terminaciones nerviosas, provocando la sensación de dolor tanto en humanos como en animales como se muestra en Figura 1.

Cuadro 2. Características generales de la apitoxina.

Parámetro	Características
Apariencia	-Líquido, transparente y pálido
Sabor	-Agudo y amargo
Olor	-Aromático a miel acentuado
pH	-Reacción ácida. Producto de un par de glándulas, una de naturaleza ácida y otra alcalina.
Efectos térmicos	-Rápido secamiento a la temperatura ambiente
Unidades convencionales	-Una abeja aporta .0010 mg de apitoxina seca y cuando el apitoxina líquida alrededor de 0.35 mg



Figura 1. Aplicación de apitoxina.

El veneno de abeja, también conocido como apitoxina, es una sustancia compleja con una diversa cantidad de proteínas y sustancias biomoleculares. Su composición se señala en el Cuadro 3, está varía entre distintas especies de abejas. En la actualidad, se han identificado 34 toxinas en el veneno, lo que nos indica su complejidad química (Cuadro 3).

En el caso de la enfermedad de Parkinson, la terapia con veneno de abeja ha demostrado ser eficaz para la mejora de calidad de vida de los pacientes. Además, sus propiedades antiinflamatorias son notables; se ha observado una disminución en el número de células inflamatorias infiltradas contra *Propionibacterium* acné, lo que ha despertado el interés de la industria farmacéutica por sus diversas acciones, estas se señalan en el Cuadro 4. Además, la apitoxina bloquea las vías de comunicación celular que conducen a la producción de quimiocinas y citoquinas moleculares proinflamatorias clave en la respuesta inmunitaria del cuerpo.



Cuadro 3. Compuestos de la apitoxina.

Agentes dilatadores y dispersantes	Agentes terapéuticos	microelementos	Componentes volátiles
-Hialuronidasa	-Agua	-Procamina A y B	N-Butil Acetato
	-Glucosa		Isopentil Acetato
-Histamina V	-Fructuosa	-Lisolecitina	N-Hexil Acetato
	Fosfolipasa A2 y B	-Serotonina	Benzil Acetato
	-Adipasa	-Colina	N-Octil Acetato
	-Dopamina	-Cardioped	N-Decil Acetato
	-Apamina	-Péptido MCD o 401	Benzil Alcohol
	-Melitina	-Fosfato de Magnesio	N-Nonanol
	-Secapina		
	-Tertiapina	-Inhibidor de la	
	-Minimina	proteasa	
	-Adolapina	-Triftofano.	
	-Noradrenal		

Actividad antimicrobiana y antifúngica de la apitoxina

La apitoxina, con componentes como la melitina y la fosfolipasa A2, exhibe una potente actividad antimicrobiana (Cuadro 4). Es afectiva también contra agentes que causan la caries dental y periodontitis en humanos. Es efectiva contra otras bacterias como: *Streptococcus* (*Salivarius*, *Sobrinus*, *Mutans*, *Mitis*, *Sanguinis*), *Lactobacillus Casei* y *Enterococcus Faecalis*. Además, estudios *in vitro* han demostrado su efecto antifúngico contra *Trichophyton rubrum*. La melitina es uno de los péptidos disruptores de membrana catiónicos de hélice más estudiados.

Impacto de la picadura de abeja en el dolor corporal

La inyección subcutánea de veneno de abeja induce la activación a largo plazo de actividades neuronales de la espina dorsal que se expande desde las capas superficiales a las capas profundas. En un estudio reciente evaluó el índice de dolor por picadura de abeja en 25 puntos diferentes del cuerpo, utilizando una escala del 1 al 10. Los resultados revelaron que las zonas menos dolorosas fueron el cráneo, la punta del dedo medio y la parte superior del brazo, con puntuaciones entre 2 y 3. Por el contrario, las zonas más sensibles y dolorosas fueron la ventana de la nariz (9.0), el labio superior (8.7) y el eje del pene (7.3). En el Cuadro 5 se muestran los diferentes funcionamientos de los elementos químicos de la apitoxina en el individuo.



Cuadro 4. Acciones de la apitoxina.

Acción	Sustancia completa
Analgésica	***
Antiagregante	**
Plaquetario	
Antiarrítmica	**
Antibiótico	***
Antiinflamatorio	***
Antitumoral	***
Antiviral	***
Eritropoyetina	**
Vasomotora	**
Cardiotónica	***
Fibrinolítica	**
Hipotensora	*
Inmunoactivante	***
Radioprotectora	**

Leve* **Moderada**** **Elevada*****

La apitoxina y su potencial anticancerígeno

Estudios epidemiológicos llevados a cabo entre 1949 y 1978 revelaron una sorprendente correlación: los apicultores tenían una incidencia significativamente menor de cáncer, especialmente de pulmón, en comparación con la población general. Esta observación ha impulsado la investigación sobre los componentes del veneno de abeja, como la Melitina, por sus posibles propiedades anticancerígenas.

La clave de la acción de la Melitina radica en su capacidad para identificar y atacar selectivamente las células cancerosas. Estas células exhiben fosfolípidos cargados negativamente, principalmente fosfatidilserina, en la superficie de sus membranas, lo que permite que la Melitina se una a ellas con facilidad. Una vez unida, la Melitina actúa interfiriendo con la calmodulina, una proteína que se une al calcio y que es crucial para la proliferación celular. Al suprimir la calmodulina, la Melitina detiene la activación de enzimas esenciales para el ciclo celular (quinasas dependientes de ciclina), la reorganización de los cromosomas, la síntesis de ADN y la división celular. De hecho, se ha demostrado que la Melitina frena el crecimiento y la capacidad de las células de leucemia humana para formar colonias en estudios de laboratorio.

Investigaciones de laboratorio también han destacado los beneficios de la apitoxina en el tratamiento del cáncer. Por ejemplo, en células de cáncer de ovario, la combinación de apitoxina y cisplatino (un fármaco de quimioterapia) fue más efectiva para eliminar las células cancerosas que cualquiera de los dos tratamientos por separado, potenciando la



apoptosis (muerte celular programada). De manera similar, en las células de cáncer cervical humano (línea celular HeLa), la Melitina indujo un aumento en la apoptosis y también se ha observado que previene el crecimiento del cáncer de pulmón a través de este mismo mecanismo.

Cuadro 5. Funcionamientos los elementos químicos de la apitoxina.

	Cardiovascular	Digestivo	Respiratorio	Nervioso	Endócrino	Tegumentario	Genitourinario	Osteomio articular	Inmunológico
Glucosa	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Fructuosa	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Hialuronidasa	✓			✓		✓			
Dopamina	✓			✓	✓				
Apamina	✓								✓
Melitina	✓			✓	✓				✓
Histamina V	✓	✓		✓		✓			
Adolapina				✓				✓	
Serotonina	✓	✓							
Colina	✓			✓					
Hierro	✓	✓		✓	✓				
Yodo		✓		✓	✓	✓			✓
Potasio	✓			✓				✓	
Azufre		✓			✓	✓			
Calcio	✓			✓	✓		✓	✓	
Magnesio		✓			✓			✓	
Cobre	✓							✓	
Zinc	✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓

En resumen, la Melitina tiene la capacidad de detener el ciclo celular, inhibir el crecimiento e inducir la muerte celular programada en diversas células cancerosas. Estudios con líneas celulares de cáncer de hígado y osteosarcoma han confirmado que la Melitina desencadena la apoptosis al aumentar la expresión de ciertas proteínas



mitocondriales y de membrana (como 7A6 y Fas). Además, la Melitina puede prevenir la metástasis de las células cancerosas al reducir su capacidad de movimiento y migración, suprimiendo una vía molecular clave (la vía dependiente de Rac1).

Efectos neuroprotectores de la apitoxina

La actividad neuroprotectora del veneno de abeja ha generado gran interés debido a su posible aplicación en enfermedades neurodegenerativas; tales como; Esclerosis Múltiple: en ratas Lewis con encefalomiелitis experimental alérgica (un modelo de esclerosis múltiple), la apitoxina redujo los síntomas clínicos. Esclerosis Lateral Amiotrófica (ELA): en ratones con ELA inducida, el veneno de abeja mejoró la actividad motora y aumentó la supervivencia en un 18% al reducir la muerte de neuronas motoras en la médula espinal.

En un modelo de ratones con lesiones similares a la enfermedad de Parkinson, la Apamina, un componente del veneno de abeja, mostró un efecto protector parcial sobre las neuronas dopaminérgicas. La fosfolipasa A2 (BvPLA2), otro componente principal, se encarga de estimular la proliferación de células T y promueve la supervivencia de las neuronas dopaminérgicas en modelos de Parkinson. También se ha observado que BvPLA2 disminuye la activación de la microglía en ratones transgénicos alfa-sinucleína. Estos estudios sugieren un posible efecto terapéutico en humanos, siendo la vía de administración subcutánea la más efectiva para la apitoxina.

Apitoxina en la enfermedad de Alzheimer y diabetes

La enfermedad de Parkinson es un trastorno neurodegenerativo caracterizado por síntomas motores típicos. Debido a la pérdida gradual de neuronas dopaminérgicas, y representa la segunda enfermedad degenerativa más común del sistema nervioso central.

En el contexto de la enfermedad de Alzheimer, la fosfolipasa A2 del veneno de abeja, en ratones genéticamente modificados, redujo los depósitos de amiloide beta en el hipocampo, mejoró el metabolismo de la glucosa, desactivó la microglía y previno la inflamación neuronal, lo que se tradujo en una mejora en la memoria y el aprendizaje.

Actualmente, se está desarrollando una vacuna activa contra el Alzheimer basada en estos hallazgos, con resultados preliminares prometedores para retrasar la progresión de la enfermedad; y por su parte la Apamina se ha presentado como una nueva estrategia de tratamiento con beneficios potenciales en el tratamiento y mejora del déficit de atención en el Alzheimer.

En relación con la enfermedad de la diabetes, la apitoxina ha demostrado actividad antidiabética en ratas inducidas con aloxano, al aumentar la secreción de insulina por las células beta del páncreas. Esto conduce a una disminución de los niveles de glucosa, triglicéridos y colesterol en la sangre.

Como es sabido, la metformina es el medicamento aprobado para controlar los problemas de salud globales relacionados con la diabetes mellitus tipo 2. El tratamiento



con veneno de abeja como un bioactivo natural y como una terapia alternativa es crucial para controlar procesos metabólicos. Por lo tanto, algunos estudios han demostrado que el veneno de abeja mejora las condiciones de vida de una persona con diabetes.

Consideraciones y efectos adversos de la Apiterapia

A pesar de los beneficios potenciales, el tratamiento con apitoxina puede presentar efectos adversos en un 28.87% de los pacientes. Por lo tanto, es crucial implementar un protocolo preventivo de reacciones inmunes antes de iniciar cualquier terapia. Además, dosis elevadas de apitoxina pueden afectar las células de Leydig y Sertoli en los túbulos seminíferos, causando alteraciones ultraestructurales que pueden interferir con la espermatogénesis normal, llevando al desprendimiento de espermátidas y, en algunos casos, espermatoцитos. Finalmente, la falta de esterilización adecuada del equipo utilizado para la extracción e inyección de la apitoxina puede provocar la formación de nódulos subcutáneos enrojecidos y sensibles al tacto.

Conclusiones

Dados los resultados positivos obtenidos con la apiterapia en humanos, se propone una línea de investigación y desarrollo de protocolos específicos para el tratamiento de enfermedades en animales de compañía, como el distemper canino, artritis, dolores musculoesqueléticos, mediante la aplicación de apitoxina, con el objetivo de mejorar su salud y bienestar.

Bibliografía

- Abdulsalam, M. A., Ebrahim, B. E., & Abdulsalam, A. J. (2016). Immune thrombocytopenia after bee venom therapy: a case report. *BMC Complementary and Alternative Medicine*, 16(1). <https://doi.org/10.1186/s12906-016-1091-3>
- Alcalá-Escamilla, K. I., & Moguel-Ordóñez, Y. B. (2024). Principales componentes bioactivos y propiedades terapéuticas del veneno de abeja (*Apis mellifera* L.). Revisión. *Revista Mexicana De Ciencias Pecuarias*, 15(1), 230–248. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v15i1.6572>
- An, H., Lee, W., Kim, K., Kim, J., Lee, S., Han, S., Lee, K., Lee, C., & Park, K. (2014). Inhibitory effects of bee venom on *Propionibacterium acnes*-induced inflammatory skin disease in an animal model. *International Journal Of Molecular Medicine*, 34(5), 1341-1348. <https://doi.org/10.3892/ijmm.2014.1933>
- An, H., Kim, J., Kim, W., Gwon, M., Gu, H. M., Jeon, M. J., Han, S., Pak, S. C., Lee, C., Park, I. S., & Park, K. (2018). Therapeutic effects of bee venom and its major component, melittin, on



- atopic dermatitis in vivo and in vitro. *British Journal of Pharmacology*, 175(23), 4310–4324. <https://doi.org/10.1111/bph.14487>
- Ahmed, O. (2018). Bee venom and hesperidin effectively mitigate Complete Freund's Adjuvant-Induced arthritis via immunomodulation and enhancement of antioxidant defense system. *Archives of Rheumatology*, 33(2), 198–212. <https://doi.org/10.5606/archrheumatol.2018.6519>
- Alvarez-Fischer, D., Noelker, C., Vulinović, F., Grünewald, A., Chevarin, C., Klein, C., Oertel, W. H., Hirsch, E. C., Michel, P. P., & Hartmann, A. (2013). Bee venom and its component apamin as neuroprotective agents in a Parkinson disease mouse model. *PLoS ONE*, 8(4), e61700. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0061700>
- Baek, H., Jang, H. I., Jeon, H. N., & Bae, H. (2018). Comparison of administration routes on the protective effects of bee venom phospholipase A2 in a mouse model of Parkinson's disease. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 10. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2018.00179>
- Baek, H., Lee, C., Choi, D. B., Kim, N., Kim, Y., Ye, Y. J., Kim, Y., Kim, J. S., Shim, I., & Bae, H. (2018). Bee venom phospholipase A2 ameliorates Alzheimer's disease pathology in A β vaccination treatment without inducing neuro-inflammation in a 3xTg-AD mouse model. *Scientific Reports*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-35030-1>
- Park, J., Kwon, O., An, H., & Park, K. K. (2018). Antifungal Effects of Bee Venom Components on *Trichophyton rubrum*: A Novel Approach of Bee Venom Study for Possible Emerging Antifungal Agent. *Annals of Dermatology*, 30(2), 202. <https://doi.org/10.5021/ad.2018.30.2.202>
- Cho, S. Y., Peck, K. R., Kim, J., Ha, Y. E., Kang, C., Chung, D. R., Lee, N. Y., & Song, J. (2013). *Mycobacterium chelonae* infections associated with Bee venom acupuncture. *Clinical Infectious Diseases*, 58(5), e110–e113. <https://doi.org/10.1093/cid/cit753>
- Choi, H., Kang, S., Roh, D., Choi, S., Ryu, Y., & Lee, J. (2018). Bee venom stimulation of a lung meridian acupoint reduces inflammation in carrageenan-induced pleurisy: an alternative therapeutic approach for respiratory inflammation. *Journal of Veterinary Science*, 19(5), 708. <https://doi.org/10.4142/jvs.2018.19.5.708>
- Chung, E. S., Lee, G., Lee, C., Ye, M., Chung, H., Kim, H., Bae, S. S., Hwang, D., & Bae, H. (2015). BEE Venom Phospholipase A2, a novel FOXP3+ regulatory T cell inducer, protects dopaminergic neurons by modulating neuroinflammatory responses in a mouse model of Parkinson's disease. *The Journal of Immunology*, 195(10), 4853–4860. <https://doi.org/10.4049/jimmunol.1500386>



- Danneels, E., Van Vaerenbergh, M., Debyser, G., Devreese, B., & De Graaf, D. (2015). Honeybee venom proteome profile of queens and winter bees as determined by a mass spectrometric approach. *Toxins*, 7(11), 4468–4483. <https://doi.org/10.3390/toxins7114468>
- Cai, M., Choi, S., & Yang, E. (2015). The effects of bee venom acupuncture on the central nervous system and muscle in an animal HSOD1G93A mutant. *Toxins*, 7(3), 846–858. <https://doi.org/10.3390/toxins7030846>
- Chen, J., Guan, S., Sun, W., & Fu, H. (2016). Melittin, the major Pain-Producing substance of bee venom. *Neuroscience Bulletin*, 32(3), 265–272. <https://doi.org/10.1007/s12264-016-0024-y>
- Choi, K., Hwang, C., Gu, S., Park, M., Kim, J., Park, J., Ahn, Y., Kim, J., Song, M., Song, H., Han, S., & Hong, J. (2014). Cancer cell growth inhibitory effect of Bee venom via increase of death receptor 3 expression and inactivation of NF-kappa B in NSCLC cells. *Toxins*, 6(8), 2210–2228. <https://doi.org/10.3390/toxins6082210>
- Chung, K., An, H., Cheon, S., Kwon, K., & Lee, K. (2015). Bee venom suppresses testosterone-induced benign prostatic hyperplasia by regulating the inflammatory response and apoptosis. *Experimental Biology and Medicine*, 240(12), 1656–1663. <https://doi.org/10.1177/1535370215590823>
- Leandro, L. F., Mendes, C. A., Casemiro, L. A., Vinholis, A. H., Cunha, W. R., De Almeida, R., & Martins, C. H. (2015). Antimicrobial activity of apitoxin, melittin and phospholipase A2 of honey bee (*Apis mellifera*) venom against oral pathogens. *Anais Da Academia Brasileira De Ciências*, 87(1), 147–155. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201520130511>
- Park, J. H., Yim, B. K., Lee, J., Lee, S., & Kim, T. (2015). Risk Associated with Bee Venom Therapy: A Systematic Review and Meta-Analysis. *PLoS ONE*, 10(5), e0126971. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0126971>
- Park, J., Kwon, O., An, H., & Park, K. K. (2018b). Antifungal Effects of Bee Venom Components on *Trichophyton rubrum*: A Novel Approach of Bee Venom Study for Possible Emerging Antifungal Agent. *Annals of Dermatology*, 30(2), 202. <https://doi.org/10.5021/ad.2018.30.2.202>
- Smith, M. L. (2014). Honey bee sting pain index by body location. *PeerJ*, 2, e338. <https://doi.org/10.7717/peerj.338>
- Stela, M., Cichon, N., Splawska, A., Szyposzynska, M., & Bijak, M. (2024). Therapeutic potential and mechanisms of Bee venom therapy: A Comprehensive review of Apitoxin applications and safety enhancement strategies. *Pharmaceuticals*, 17(9), 1211.



<https://doi.org/10.3390/ph17091211>

- Tilinca, M., & Florea, A. (2017). Ultrastructural analysis of early toxic effects produced by bee venom phospholipase A2 and melittin in Sertoli cells in rats. *Toxicon*, 141, 94–103. <https://doi.org/10.1016/j.toxicon.2017.12.039>
- Yang, E. J., Jiang, J. H., Lee, S. M., Yang, S. C., Hwang, H. S., Lee, M. S., & Choi, S. (2010). Bee venom attenuates neuroinflammatory events and extends survival in amyotrophic lateral sclerosis models. *Journal of Neuroinflammation*, 7(1), 69. <https://doi.org/10.1186/1742-2094-7-69>
- Ye, M., Chung, H., Lee, C., Yoon, M. S., Yu, A. R., Kim, J. S., Hwang, D., Shim, I., & Bae, H. (2016). Neuroprotective effects of bee venom phospholipase A2 in the 3xTg AD mouse model of Alzheimer's disease. *Journal of Neuroinflammation*, 13(1). <https://doi.org/10.1186/s12974-016-0476-z>
- Ye, M., Chung, H., Lee, C., Song, J. H., Shim, I., Kim, Y., & Bae, H. (2016). Bee venom phospholipase A2 ameliorates motor dysfunction and modulates microglia activation in Parkinson's disease alpha-synuclein transgenic mice. *Experimental & Molecular Medicine*, 48(7), e244. <https://doi.org/10.1038/emm.2016.49>
- You, C. E., Moon, S. H., Lee, K. H., Kim, K. H., Park, C. W., Seo, S. J., & Cho, S. H. (2016). Effects of emollient containing bee venom on atopic dermatitis: a Double-Blinded, Randomized, Base-Controlled, multicenter study of 136 patients. *Annals of Dermatology*, 28(5), 593. <https://doi.org/10.5021/ad.2016.28.5.593>
- Zarrinnahad, H., Mahmoodzadeh, A., Hamidi, M. P., Mahdavi, M., Moradi, A., Bagheri, K. P., & Shahbazzadeh, D. (2017). Apoptotic Effect of Melittin Purified from Iranian Honey Bee Venom on Human Cervical Cancer HeLa Cell Line. *International Journal of Peptide Research and Therapeutics*, 24(4), 563–570. <https://doi.org/10.1007/s10989-017-9641-1>

AMBIENTAL



**Expansión e impacto de *Cherax
quadricarinatus* en Nayarit, México:
nuevos registros de traslocación y
establecimiento en cuatro
cuerpos de agua.**

J. Raúl Tapia-Varela.
Carlos A. Romero-Bañuelos.
César A. Tapia-Varela.
José T. Nieto-Navarro.
Raquel Enedina Medina-Carrillo.
Lisset del C. Ramos-Ramírez.





Resumen

El acocil de garra roja (*Cherax quadricarinatus*), originario de Australia y Papúa Nueva Guinea, ha sido introducido en México con fines acuícolas y actualmente se reconoce como una especie invasora con alto potencial de dispersión. En Nayarit, desde su introducción en 2001, se ha establecido en varios cuerpos de agua, entre ellos Aguamilpa, Santa María del Oro, La Curva y Pochotitán. Su éxito se debe a su rápido crecimiento, elevada fecundidad, plasticidad alimentaria y capacidad de adaptación, lo que le ha permitido desplazar a camarones nativos del género *Macrobrachium* y alterar la dinámica de los ecosistemas acuáticos. Aunque su presencia genera ingresos económicos mediante una pesquería emergente, también representa riesgos ecológicos y sanitarios al ser portador potencial de patógenos. La dualidad entre impacto ambiental negativo y valor socioeconómico emergente plantea la necesidad de implementar estrategias integrales de manejo, regulación y educación ambiental que permitan equilibrar el aprovechamiento de esta especie con la conservación de la biodiversidad dulceacuícola de Nayarit.

Palabras clave: Especie invasora, pesquería emergente, impacto ecológico, manejo ambiental.



Introducción

La langosta o acocil de garra roja, *Cherax quadricarinatus* (Von Martens, 1868), es un crustáceo decápodo de agua dulce nativo del norte de Australia y Papúa Nueva Guinea. Por su capacidad productiva y adaptación, esta especie ha sido introducida en regiones fuera de su área de distribución natural, siendo ya una especie con presencia global. Actualmente *C. quadricarinatus* está presente en cinco continentes en África; en nueve países; en América 18 países entre ellos México; en Asia la especie se ha establecido en 15 países mientras que en Europa se ha registrado su presencia en 21 y en Oceanía se han reportado poblaciones en Australia de donde es nativo en y cuatro países más.

Esta amplia distribución refleja tanto la alta adaptabilidad de *C. quadricarinatus* a diferentes condiciones ambientales como su relevancia económica dentro de la acuicultura mundial, lo cual ha favorecido su introducción intencional en numerosas regiones geográficas. De acuerdo con el anuario estadístico de pesca y acuicultura, la clasificación de las especies del género *Macrobrachium* y *Cherax* como "langostinos" dificulta la distinción individual de las tres especies endémicas (*Macrobrachium tenellum*, *M. diguetis* y *M. americanum*). No obstante, en el caso de *C. quadricarinatus*, se tiene la certeza de que es la única especie exótica de la familia Parastacidae registrada oficialmente en México, lo que la hace un caso de estudio particular y relevante para la gestión de especies invasoras en el país. El langostino por su volumen se encuentra posicionado en el lugar 47 de la producción pesquera en México; Sin embargo, por su valor, lo encontramos en el lugar 37. La tasa media de crecimiento anual de la producción en los últimos 10 años es de 10.58%. A nivel nacional Veracruz es el primer productor de langostinos con 471 ton, seguido por Tabasco con 438 ton, en tercer lugar, Guerrero 325 ton, cuarta posición Michoacán con una producción anual de 36 ton. Y en quinto lugar Nayarit con 19 ton, reportadas en el 2024.

En México, *C. quadricarinatus* fue introducida con fines comerciales en 1986 en el estado de Querétaro y posteriormente en 1995 en la Ciudad de México, debido a la necesidad de revitalizar la industria camaronícola nacional, afectada severamente por enfermedades virales como el virus del síndrome de Taura (VST). Sin embargo, su incorporación al país se realizó sin una evaluación adecuada de los posibles impactos negativos sobre la acuicultura local ni sobre los ecosistemas acuáticos haciendo de esta una especie exótica que ha logrado establecerse exitosamente en diversos ecosistemas fuera de su área de distribución original. Se cataloga como una especie con alto potencial invasor. Entre las características que favorecen su dispersión destaca su capacidad para escapar de los sistemas de cultivo, lo que ha permitido la formación de poblaciones silvestres en distintas regiones de México.

Existen registros documentados de ejemplares capturados en ambientes naturales en los estados de Tamaulipas, Nuevo León, Morelos, Jalisco, Sinaloa, San Luis Potosí y Nayarit. Por otro lado, se ha reportado su cultivo en 15 estados del país entre ellos



Chihuahua Ciudad de México, Nayarit, Yucatán entre otros.

Características biológicas y potencial de crecimiento

C. quadricarinatus presenta una elevada tasa de crecimiento. En condiciones óptimas, puede alcanzar una longitud total corporal de hasta 250 mm y un peso húmedo de 600 g en un periodo de nueve meses. En entornos controlados, esta especie puede crecer hasta 35 cm de longitud y superar los 600 g de peso. En general, se estima que los adultos pueden alcanzar entre 20 y 25 cm de longitud corporal, con los machos superando los 500 g y las hembras llegando hasta los 400 g.

Comportamiento y manejo en cultivo

C. quadricarinatus exhibe un comportamiento gregario (La tendencia de los animales a actuar colectivamente como un grupo unificado, sin una dirección centralizada. En este comportamiento, los individuos a menudo siguen a los demás, permitiendo que las decisiones emerjan del conjunto en lugar de basarse en información individual), característica poco común entre los cangrejos de río. A pesar de poseer pinzas grandes y bien desarrolladas, se considera una especie pasiva. Estudios han demostrado que puede mantenerse a densidades superiores a los 100 individuos por metro cuadrado sin que ocurran interacciones agresivas significativas. Esta conducta no agresiva tiene una probable base adaptativa relacionada con su hábitat natural, durante el estiaje, las poblaciones tienden a agregarse en cuerpos de agua reducidos, y la agresión abierta bajo estas condiciones disminuiría la supervivencia, comprometiendo así la capacidad de recuperación durante las temporadas más favorables.

Las hembras son menos territoriales y agresivas que los machos, lo que permite densidades de cultivo más altas y una mayor biomasa total en sistemas de monocultivo de hembras. No obstante, bajo condiciones de cultivo intensivo, se ha observado canibalismo y agresión intraespecífica, causas relevantes de mortalidad durante la fase de engorde, especialmente cuando los juveniles se mantienen en tanques de alta densidad sin refugios. El canibalismo se incrementa cuando existen diferencias marcadas de tamaño entre los individuos, lo que fomenta la agresión y la dominancia de los ejemplares más grandes sobre los más pequeños, constituyendo así una limitante importante para la intensificación del cultivo.

La separación por tallas y la provisión de refugios adecuados ha demostrado ser una estrategia efectiva para reducir la depredación intraespecífica. Otras estrategias son la inclusión de triptófano en la dieta artificial, se observaron las tasas de canibalismo más bajas con la inclusión de triptófano entre el 1% y 2% en la dieta artificial. Lo que puede favorecer el crecimiento y reducir la agresividad. Además, la exposición a luz prolongada (entre 18 y 24 horas por día) disminuye la competencia y agresión intraespecífica,



mejorando la supervivencia. En particular, un fotoperiodo de 18 horas de luz y seis horas de oscuridad ha demostrado ser el más eficaz para maximizar la supervivencia de juveniles, por lo que se recomienda para sistemas de cultivo industrial. La tasa de supervivencia observada en el grupo con 18 horas de luz (18L:6D) fue del $74.17 \pm 3.69\%$, mientras que en condiciones de oscuridad constante (0L:24D), que tuvo la supervivencia más baja, fue del $35.67 \pm 2.52\%$. Esto representa una mejora del 107.99% en la tasa de supervivencia al aplicar 18 horas de luz en comparación con la oscuridad constante.

Vías de dispersión y riesgos asociados

La comercialización global de *C. quadricarinatus* como especie de interés acuícola y ornamental aumenta significativamente el riesgo de introducciones en ambientes no nativos. Las vías principales de escape incluyen desde unidades de cultivo hasta liberaciones intencionales por parte de particulares. El éxito en el establecimiento de nuevas poblaciones se debe en gran parte a la cantidad de individuos que sean traslocados. Además, la flexibilidad de su conducta alimentaria y su tolerancia a los cambios en las condiciones ambientales hacen más grande aún su potencial de dispersión y colonización. Lo anterior, aunado con la alta capacidad reproductiva, ya mencionada, convierte a *C. quadricarinatus* en una amenaza real para la biodiversidad local en muchos de los ecosistemas donde se ha introducido.

Dimorfismo sexual y reproducción en *Cherax quadricarinatus*

C. quadricarinatus presenta un dimorfismo sexual evidente: los machos exhiben un parche rojo en el propodio de las quelas y pinzas proporcionalmente más grandes y robustas que las de las hembras. Estas características permiten una identificación visual sencilla de los sexos en ejemplares adultos, aspecto relevante tanto para el manejo en acuicultura como para estudios ecológicos y evolutivos.

En la figura 1, a la izquierda se observa una hembra, la cual se caracteriza por presentar quelas más delgadas y sin el parche rojo en el propodio, un cefalotórax menos robusto, abdomen más ancho y desarrollado, adaptado para la incubación de huevos. A la derecha se muestra un macho, distinguible por sus quelas más robustas, con un parche rojo conspicuo en el propodio, un cefalotórax más voluminoso y un abdomen relativamente estrecho. Estas diferencias morfológicas permiten una fácil identificación sexual en ejemplares adultos.

Otra característica distintiva son los gonoporos; en las hembras, estos se localizan en la base del tercer pereiópodo, mientras que en los machos están ubicados en la base del quinto pereiópodo. En algunos casos, pueden observarse individuos intersexuales, los cuales suelen presentar características mixtas, como la presencia del parche rojizo en las quelas combinado con la posición de los gonoporos en el tercer pereiópodo.



Madurez sexual y ciclo reproductivo

La madurez sexual se alcanza entre los siete y nueve meses bajo condiciones óptimas de cultivo. Los machos tienden a crecer más rápido y alcanzar tamaños mayores que las hembras, lo cual puede influir en su éxito reproductivo dentro de poblaciones naturales o cultivadas.

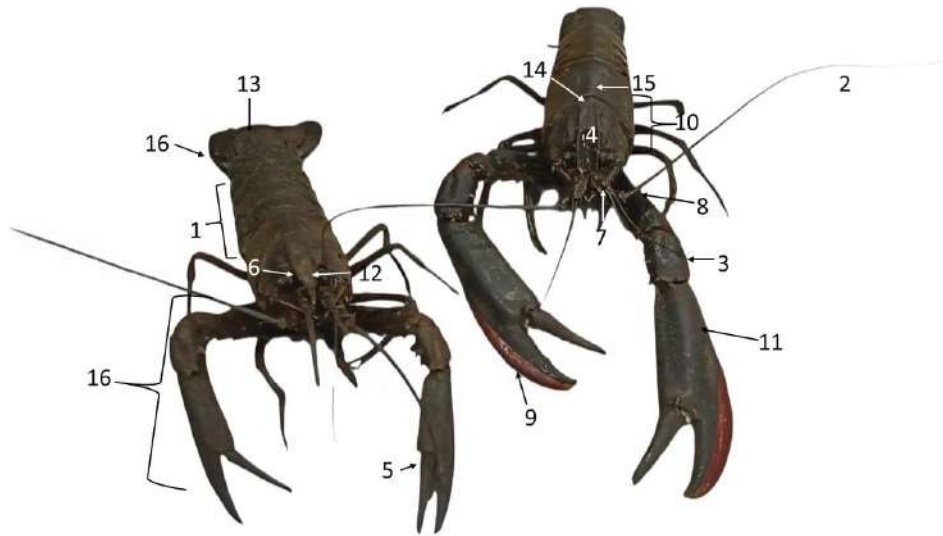


Figura 1. Dimorfismo sexual en *C. quadricarinatus*. 1). Abdomen, 2). Antenas, 3). Carpo, 4). Cefalotorax, 5). Dactilopodio, 6). Espinas laterales del rostro, 7). Flagelos antenulares, 8). Mero, Parche rojo, 9). Pereiópodos, 10). Propodio, 11). Rostro, 12). Telson, 13). Surco cefálico, 14). Surco suprabranquial, 15). Quelas y 16). Urópodos.

C. quadricarinatus es una especie gonocórica con desove múltiple, lo que significa que puede reproducirse varias veces al año. Se han registrado entre tres y cinco eventos reproductivos anuales, dependiendo de las condiciones ambientales, especialmente temperatura y fotoperíodo. La fecundidad varía en función del tamaño de la hembra, oscilando entre 100 y 1,000 huevos por desove, con un promedio de 300 a 800 huevos. Tras la cópula, las hembras retienen los huevos fertilizados en sus pleópodos, donde permanecen adheridos mediante setas hasta la eclosión. El desarrollo embrionario y eclosión de *C. quadricarinatus*, se divide en siete etapas bien definidas. Las primeras seis etapas de madurez (Figura 2) se caracterizan por etapa 1: Huevos ovalados, de aproximadamente 2 mm de longitud, color verde oliva; etapa 2: Color marrón oscuro, forma más redondeada, breve duración; etapa 3: Huevo opaco sin desarrollo larvario visible, color amarillo/naranja; etapa 4: Aparición de translucidez, color rojizo, con densidades variables internas; etapa 5: Ojos visibles como manchas negras densas; etapa 6: Apéndices (patas y antenas) claramente discernibles; saco vitelino rojizo visible. En la última etapa de eclosión (figura 3), el juvenil se desprende del huevo, pero permanece



adherido a los pleópodos maternos de una a dos semanas antes de iniciar su vida independiente.

Este desarrollo directo, sin una fase larval libre, simplifica considerablemente los procesos de reproducción en cautiverio, ya que no requiere infraestructuras especializadas para el mantenimiento de fases larvales planctónicas.



Figura 2. Etapas del desarrollo embrionario de *C. quadricarinatus*. **Etapa 1:** Huevos ovalados, de aproximadamente 2 mm de longitud, color verde oliva. **Etapa 2:** Color marrón oscuro, forma más redondeada, breve duración. **Etapa 3:** Huevo opaco sin desarrollo larvario visible, color amarillo/naranja. **Etapa 4:** Aparición de translucidez, color rojizo, con densidades variables internas. **Etapa 5:** Ojos visibles como manchas negras densas. **Etapa 6:** Apéndices (patas y antenas) claramente discernibles; saco vitelino rojizo visible. **Etapa 7** ("eclosionado y adherido"): El juvenil se desprende del huevo, pero permanece adherido a los pleópodos maternos durante 1 o 2 semanas antes de iniciar su vida independiente.



Figura 3. Última etapa de eclosión de *C. quadricarinatus*, permanece adherido a los pleópodos maternos antes de una vida independiente.

Reproducción natural vs. incubación artificial

Aunque la reproducción natural ocurre eficientemente en ambientes controlados, la producción de juveniles avanzados (2–20 g) por puesta suele ser menor a 100 individuo, lo cual limita su uso en sistemas intensivos. Para superar esta limitante, se ha desarrollado tecnología de incubación artificial basada en protocolos europeos utilizados en otras especies de cangrejos. Este método permite mantener huevos y crías a altas densidades, optimizando la producción de juveniles viables para engorde comercial. La temperatura óptima para la incubación artificial se encuentra entre 20 °C y 24 °C, y es fundamental para garantizar tasas de eclosión elevadas y desarrollo saludable de los juveniles.

Potencial invasor vinculado al éxito reproductivo

El alto potencial invasor de *C. quadricarinatus* está estrechamente relacionado con su capacidad reproductiva y adaptativa. Su habilidad para establecerse y reproducirse exitosamente en ambientes fuera de su rango nativo ha sido documentada en múltiples regiones geográficas. Esta capacidad se ve favorecida por ciertas características de la especie tales como su madurez temprana: alcanzan la madurez sexual en menos de un año; tienen desoves múltiples por lo que pueden reproducirse varias veces al año; su alta fecundidad ya que cada hembra puede producir hasta mil huevos por desove y finalmente su desarrollo directo, debido a que no requieren de una fase larval libre, lo cual reduce la dependencia de condiciones específicas del medio ambiente. Las características anteriores



permiten que incluso pequeñas introducciones puedan dar lugar a poblaciones autosostenidas, incrementando el riesgo de expansión y colonización de nuevos hábitats.

Parámetros de simulación para el crecimiento poblacional de *C. quadricarinatus*

De acuerdo con un estudio en cinco poblaciones nativas de *C. quadricarinatus* en Australia, la especie puede duplicar su abundancia en un periodo de diez generaciones (5 años), lo que equivale a una tasa de crecimiento finita semestral de **b = 1.0718**. Con este valor se aplicó el modelo malthusiano para simular un evento de reclutamiento con la introducción de una hembra y un macho, estimando la variación poblacional en el supuesto de recursos ilimitados y sin considerar efectos de competencia, mortalidad adicional o migración.

El modelo de Malthus es uno de los primeros enfoques matemáticos para explicar el crecimiento poblacional. Se basa en la suposición de que los recursos son ilimitados y que la población aumenta de manera proporcional a su tamaño, sin considerar factores como competencia, migración o mortalidad adicional (Mortalidad por depredación, natural o por pesca). Formalmente, si $P(t)$ representa la población en el tiempo t , la tasa de cambio se expresa como: $\frac{dp}{dt}=KP$ donde k es la constante de proporcionalidad. La solución general es: $P(t) = P_0 e^{Kt}$ siendo P_0 la población inicial. Aunque este modelo es limitado, resulta útil para describir dinámicas poblacionales a corto plazo.

El Cuadro 1 presenta los resultados obtenidos del ajuste y la simulación del modelo malthusiano aplicado al crecimiento poblacional de *C. quadricarinatus*. El modelo de crecimiento Malthusiano fue utilizado en este estudio, por lo que utilizando el coeficiente $b= 1.0718$ se realizó la simulación con este mismo modelo con 10 eventos de reclutamiento.

Valores de entrada para la proyección: (P_0) Población cero o inicial; (K) Constante de proporcionalidad y (e) número de Euler

En el (Cuadro 1) los resultados del modelo Malthusiano mostraron un incremento poblacional de *C. quadricarinatus* de 2 a 90,323 individuos en cinco años. La tasa estimada corresponde a un crecimiento promedio del 170.8% cada seis meses, reflejando un patrón claramente exponencial. Estos resultados evidencian el alto potencial de expansión de la especie bajo condiciones ambientales favorables.

Tasa de Dispersión

El crecimiento poblacional en entornos invadidos suele evaluarse mediante la velocidad de propagación espacial, conocida como tasa de dispersión. *Cherax quadricarinatus* es considerado un superinvasor debido a sus elevadas tasas de expansión. En la cuenca del Inkomati (África), se ha registrado una dispersión de 8 km por año aguas abajo y 4.7 km



por año aguas arriba. En el río Mbuluzi (Mozambique), la propagación alcanza en promedio 14.6 km por año. En Nayarit (México), desde su punto de introducción, se ha determinado una tasa de dispersión de 2.2 km por año.

Cuadro 1. Modelo de crecimiento Malthusiano.

año	Población Reclutada
0	2
1	6
2	17
3	50
4	146
5	425
6	1.241
7	3.625
8	10.589
9	30.926
10	90.323

Análisis del impacto ecológico y necesidad de control sanitario

Cherax quadricarinatus puede alterar significativamente los ecosistemas de agua dulce donde se establece. Sus hábitos omnívoros le permiten competir efectivamente con especies autóctonas por recursos como alimento y refugio, provocando cambios en la estructura comunitaria y en las redes tróficas locales. Los estudios disponibles muestran que *C. quadricarinatus* ejerce un fuerte impacto sobre la estructura y dinámica de comunidades acuáticas. En Australia, su introducción provocó la pérdida total de la cobertura de macrófitas y una reorganización de la comunidad bentónica, mientras que en experimentos de mesocosmos en Martinica se evidenció una alta depredación sobre caracoles nativos e invasores, con diferencias según sexo y tamaño de los individuos. Los machos grandes fueron particularmente eficientes, reduciendo la supervivencia de las presas a menos del 20 %.

Evidencias adicionales confirman su elevada presión depredadora: se ha documentado la eliminación completa de poblaciones de caracoles bajo condiciones controladas y, en el lago Kariba, la depredación sobre peces juveniles afectó el reclutamiento pesquero con pérdidas anuales estimadas en más de 200 toneladas. Estos resultados resaltan la capacidad de la especie para alterar redes tróficas y reducir la biodiversidad nativa. En México, su presencia se asocia con la disminución de macroinvertebrados nativos y con el desplazamiento de camarones del género *Macrobrachium*. En algunos cuerpos de agua, *C. quadricarinatus* constituye hasta el 85 % de las capturas, evidenciando un claro dominio sobre las especies locales. En conjunto, estas observaciones confirman el elevado potencial invasor de la especie y su capacidad



para transformar los ecosistemas que coloniza. Además, *C. quadricarinatus* puede modificar el hábitat físico mediante la excavación de madrigueras, lo que puede causar erosión en los márgenes de cuerpos de agua y afectar la calidad del sedimento.

C. quadricarinatus puede ser portador asintomático de numerosos patógenos tales como virus, bacterias hongos y parásitos, lo que representa una amenaza adicional para la fauna acuática nativa, causando brotes de enfermedades con consecuencias ecológicas y económicas graves.

Entre los principales agentes infecciosos asociados se encuentran iridovirus (CQIV), el cual es letal para *C. quadricarinatus* y otras especies como *Litopenaeus vannamei* y *Procambarus clarkii*; el virus de la mancha blanca (WSSV) que puede ser transmitido horizontalmente a camarones; el virus de la cabeza amarilla (YHV), con potencial de transmisión cruzada; la *Paracoxiella cheracis*, implicado en mortalidades en cultivos de Australia, Ecuador e Israel, y *Aphanomyces astaci*, agente causante de la peste del cangrejo, al cual *C. quadricarinatus* es resistente, pero puede actuar como vector hacia especies susceptibles. Dado este riesgo, se recomienda implementar medidas estrictas de bioseguridad en las importaciones y en el manejo de poblaciones silvestres, con el fin de prevenir la diseminación de patógenos a través de esta especie.

Recomendaciones para el manejo de *Cherax quadricarinatus* como especie invasora

Por el alto potencial invasivo de *Cherax quadricarinatus*, se requiere un enfoque integrado que combine políticas públicas, ciencia y la participación de la ciudadanía. Es clave que existan normas que regulen el movimiento de esta especie para prevenir nuevas introducciones, además, los programas de manejo deben incluir participación comunitaria para mejorar su efectividad y percepción social. La prevención mediante educación pública es clave para evitar liberaciones accidentales de *Cherax quadricarinatus*. En zonas invadidas se recomienda controlar hembras e individuos intersexuales y aplicar un manejo integrado con métodos biológicos, físicos y químicos. Estudios de largo plazo son indispensables para evaluar la eficacia de estas acciones.

Registro y expansión de *C. quadricarinatus* en Nayarit

En Nayarit, en canales de riego y cuerpos de agua en los márgenes derecho e izquierdo del río Santiago, se ha establecido una población asilvestrada de *C. quadricarinatus*; su origen probable se remonta a 2001, tras un intento de policultivo con *Oreochromis* y *C. quadricarinatus* en “El Tizate”, cuyos estanques estaban conectados a canales del sistema fluvial Lerma-Santiago. La presencia en el medio natural fue detectada en 2004 en el canal El Tule, cerca de Santiago Ixcuintla. Esa región se caracteriza por sistemas de agua dulce y salobre donde se desarrolla una pesquería artesanal que incluye especies nativas del género *Macrobrachium*, especialmente *M. americanum*, de alto valor comercial, así como



Oreochromis spp. y camarón blanco (*Litopenaeus vannamei*).

Desde 2011, *C. quadricarinatus* pasó de ser una captura incidental a constituir una pesquería emergente que actualmente involucra a cerca de 100 pescadores. Su aprovechamiento se realiza mediante trampas artesanales y redes, y representa un ingreso económico importante para comunidades ribereñas. En varias zonas, ha desplazado a *M. americanum* como especie dominante en las capturas.

Su expansión ha generado impactos ecológicos significativos, con una reducción visible en las poblaciones de *M. tenellum*, *M. digueti* y *M. americanum*. Esta última, de reproducción dependiente de ambientes salobres, enfrenta depredación directa y competencia por espacio y recursos. La presencia de *C. quadricarinatus* plantea riesgos para la biodiversidad local y la estabilidad de pesquerías tradicionales.

Invasividad de cangrejos de agua dulce y el caso de *Cherax quadricarinatus*

Las especies acuáticas invasoras amenazan la biodiversidad global. Los cangrejos de agua dulce, compiten con nativos, destruyen hábitats y alteran redes tróficas. Su éxito se debe en parte a la exclusión competitiva, mediada por agresividad y territorialidad, que desplaza a especies menos competitivas.

Para abordar esta problemática, destaca la necesidad de evaluar la magnitud de la invasión en áreas protegidas. Un modelo ampliamente aceptado es el de (Blackburn et al., 2011). Que describe el proceso de invasión en cuatro etapas: transporte, introducción, establecimiento y propagación, cada una limitada por barreras específicas (geográficas, de supervivencia, reproducción o dispersión). Este marco, constituido por cuatro etapas, permite clasificar el avance de una especie invasora y guiar estrategias de manejo adecuadas.

1. Etapa de transporte, la especie aún no ha salido de su área nativa por lo que se requieren acciones preventivas.
2. Etapa de introducción, se ha trasladado fuera de su rango natural y se busca evitar su dispersión.
3. Durante el establecimiento, la especie sobrevive y se reproduce en el nuevo entorno y la población es autosuficiente.
4. Etapa final es la de propagación, en la cual los individuos se distribuyen activamente y colonizan nuevos sitios lejanos del punto original.

Según este modelo, *Cherax quadricarinatus* se encuentra actualmente en la etapa de propagación. Diversos registros confirman el establecimiento de poblaciones autosuficientes en cuatro nuevos sitios de traslocación asociados a actividades antropogénicas, la Laguna de Santa María del Oro, la Presa de Aguamilpa, la Laguna de La Curva y la Laguna de Pochotitán (Figura 4).



Figura 4. Cuatro nuevos sitios de registro de la presencia de *Cherax quadricarinatus* en Nayarit.

La expansión de *C. quadricarinatus* en Aguamilpa, Laguna de Santamaria del Oro, Laguna de la Curva y Laguna de la Curva, puede tener consecuencias ecológicas importantes, como la competencia con especies nativas, alteraciones en los ciclos de nutrientes y cambios en la estructura de la cadena alimentaria. Es por eso que deben diseñarse estrategias de manejo enfocadas en la contención, monitoreo y mitigación de impactos, a fin de proteger la integridad de los ecosistemas invadidos.

Conclusiones

La expansión de *Cherax quadricarinatus* en cuerpos de agua como Aguamilpa, la Laguna de Santa María del Oro, la Laguna de la Curva y la Laguna de Pochotitán representa un caso alarmante de invasión biológica en Nayarit. Su presencia puede generar consecuencias ecológicas significativas, entre ellas la competencia con especies nativas, alteraciones en los ciclos de nutrientes y modificaciones en la estructura de las redes tróficas. Desde su introducción en 2001, en la margen izquierda del río Santiago, esta especie ha demostrado una notable capacidad de adaptación y dispersión, favorecida por su alta fecundidad, plasticidad alimentaria y conductas que facilitan su establecimiento. Como resultado, ha desplazado a especies nativas, en particular a los camarones del género *Macrobrachium*, y ha alterado la dinámica ecológica de los ecosistemas invadidos. Además, se reconoce su potencial como vector de patógenos, lo que incrementa los riesgos sanitarios asociados a su proliferación. En el plano socioeconómico, la captura artesanal de *C. quadricarinatus* se ha convertido en una fuente de ingreso para comunidades ribereñas, lo que plantea un dilema en el diseño de estrategias de manejo y control. El hecho de que tenga un impacto ecológico negativo, pero también un valor económico obliga a buscar un equilibrio entre cuidar la biodiversidad y atender las necesidades de la sociedad. Ante este escenario, resulta indispensable implementar estrategias integrales de



gestión que incluyan regulación normativa, educación ambiental, monitoreo poblacional y vigilancia epidemiológica. El control reproductivo selectivo, combinado con investigaciones de largo plazo, será fundamental para evaluar la eficacia de las medidas aplicadas y mitigar los impactos de la especie. Solo a través de un manejo adaptativo y sostenido será posible proteger la integridad de los ecosistemas dulceacuícolas del occidente de México.

Bibliografía

- Ahmed, D. A., Sousa, R., Bortolus, A., Aldemir, C., Angeli, N. F., Błońska, D., Haubrock, P. J. (2025). Parallels and discrepancies between non-native species introductions and human migration. *Biological Reviews*, 100(3), 1365–1395. <https://doi.org/10.1111/brv.70004>
- Arias A, Torralba-Burrial A (2021) First record of the redclaw crayfish *Cherax quadricarinatus* (Von Martens, 1868) on the Iberian Peninsula. *Limnetica*, 40, in press. <https://doi.org/10.1111/raq.12531>
- Akmal, S.G., Santoso, A., Santoso, A., Yuliana, E., Patoka, J., 2021. Redclaw crayfish (*Cherax quadricarinatus*): spatial distribution and dispersal pattern in Java, Indonesia. *Knowledge & Management of Aquatic Ecosystems*, (422), 16. <https://doi.org/10.1051/kmae/2021015>
- Azofeifa-Solano JC, Naranjo-Elizondo B, Rojas-Carranza AH, Cedeño-Fonseca M (2017) Presence of the Australian redclaw crayfish *Cherax quadricarinatus* (von Martens, 1868) (Parastacidae, Astacoidea) in a freshwater system in the Caribbean drainage of Costa Rica. *BioInvasions Records*, 6:(4), 351–355, <https://doi.org/10.3391/bir.2017.6.4.08>
- Baudry T, Millet L, Jarne P, David P, Grandjean F (2024) Multiple invasions and predation: the impact of the crayfish *Cherax quadricarinatus* on invasive and native snails. *Ecology and Evolution* 14: e11191, <https://doi.org/10.1002/ece3.11191>
- Haubrock, P. J., Oficialdegui, F. J., Zeng, Y., Patoka, J., Yeo, D. C., & Kouba, A. (2021). The redclaw crayfish: A prominent aquaculture species with invasive potential in tropical and subtropical biodiversity hotspots. *Reviews in Aquaculture*, 13(3), 1488-1530. <https://doi.org/10.1111/raq.12531>
- Hou, Y., Jia, R., Sun, W., Ding, H., Li, B., & Zhu, J. (2023). Red Claw Crayfish *Cherax quadricarinatus* Cultivation Influences the Dynamics and Assembly of Benthic Bacterial Communities in Paddy Fields. *Environments*, 10(10), 178. <https://doi.org/10.3390/environments10100178>



- Jones, R. W., Weyl, O. L. F., Swartz, E. R., & Hill, M. P. (2013). Using a unified invasion framework to characterize Africa's first loricariid catfish invasion. *Biological Invasions*, 15(10), 2139–2145. <https://doi.org/10.1007/s10530-013-0438-7>
- Jones, C. M., & Valverde, C. (2020). Development of mass production hatchery technology for the redclaw crayfish, *Cherax quadricarinatus*. *Freshwater Crayfish*, 25, 1-6. <http://dx.doi.org/10.5869/fc.2020.v25-1.001>
- Jutagate, T., Kwangkhwang, W., & Saowakoon, S. (2023). Growth and competitions of the Australian red-claw crayfish, *Cherax quadricarinatus* (von Martens, 1868) in Thailand: the experimental approaches. *Aquatic Invasions*, 18(1), 103–117. <https://doi.org/10.3391/ai.2023.18.1.103301>
- Mendoza-Alfaro, R.; Rodríguez-Almaraz, G.; Castillo-Alvarado, S.A. (2011). Riesgo de Dispersión y Posibles Impactos de los Acociles Australianos del Género *Cherax* en México; Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO): México city, México, 2011; 140p. <https://doi.org/10.13140/2.1.4722.7528>
- Nie, X.; Huang, C.; Wei, J.; Wang, Y.; Hong, K.; Mu, X.; Liu, C.; Chu, Z.; Zhu, X.; Yu, L. Effects of Photoperiod on Survival, Growth, Physiological, and Biochemical Indices of Redclaw Crayfish (*Cherax quadricarinatus*) Juveniles. *Animals* 2024, 14, 411. <https://doi.org/10.3390/ani14030411>
- Nunes AL, Zengeya TA, Hoffman AC, Measey GJ, Weyl OL (2017) Distribution and establishment of the alien Australian redclaw crayfish, *Cherax quadricarinatus*, in South Africa and Swaziland. *PeerJ* 5: e3135, <https://doi.org/10.7717/peerj.3135>
- Oficialdegui, F. (2022). *Cherax quadricarinatus* (redclaw crayfish). CABI Compendium. <https://doi.org/10.1079/cabicompendium.89135>
- Owens, L., & Elliman, J. (2025). Effect of husbandry on the emergence of pathogens in the aquaculture of redclaw crayfish (*Cherax quadricarinatus*) in Australia. *Aquaculture*, 603, 742380. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2025.742380>
- Rodríguez-Almaraz G.A., Mendoza, R., Aguilera-González, C., Barriga, C. y Tirado-Velarde, M. (2018). Registros adicionales de poblaciones silvestres del acocil australiano *Cherax quadricarinatus* en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 89, 1322-1327. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2018.4.2065>
- Rigg, D.P; Saymour, J.E.; Courtney, R.L.; Jones, C.M. A (2020). Review of juvenile redclaw crayfish *Cherax quadricarinatus* (von Martens, 1898) aquaculture: Global production practices and innovation. *Freshw. Crayfish* 2020, 25, 13–30. <https://doi.org/10.5869/fc.2020.v25-1.013>



- Shaked, S. A., Levy, T., Moscovitz, S., Wattad, H., Manor, R., Ovadia, O., Sagi, A., & Aflalo, E. D. (2023). All-female crayfish populations for biocontrol and sustainable aquaculture. *Aquaculture*, 580, 40377. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2023.740377>
- Smith, G., Glendinning, S., & Ventura, T. (2023). Transcriptomic changes following induced demasculinisation of Australian red claw crayfish *Cherax quadricarinatus*. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(4), 3292. <https://doi.org/10.3390/ijms24043292>
- Tapia-Varela, J. R., Ponce-Palafox, J. T., Palacios-Salgado, D. S., Romero-Banuelos, C. A., Nieto-Navarro, J. T., & Aguiar-García, P. (2020). Establishment of the exotic invasive redclaw crayfish *Cherax quadricarinatus* (Von Martens, 1868) in the Coastal Plain of San Blas, Nayarit, SE Gulf of California, Mexico. *BioInvasions Records*, 9(2), 357-366. <https://doi.org/10.3391/bir.2020.9.2.21>

EDUCACIÓN



Pertinencia de la evaluación con base a progresiones de aprendizaje en Medicina Veterinaria.

Martha Elba Ruiz-Riva-Palacio.
Roberto Montes-de-Oca-Jiménez.
Pilar Eliana Rivadeneira-Barreiro.
Pablo Cleomenes Zambrano-Rodríguez.
Pedro Sánchez-Aparicio.
Edalhi García-Faz.





Resumen

Las progresiones de aprendizaje representan una estrategia poderosa en el ámbito de la investigación educativa mundial, ya que revolucionan la concepción y comprensión de las competencias respecto a los tópicos centrales de una disciplina. El proceso Educativo al ser planificado requiere de verificación o valoración que determine los niveles de saberes y logros por parte de los estudiantes, a fin de proporcionar información relevante para los actores del proceso educativo. La evaluación, vista desde una perspectiva de dimensión macro y micro, requiere de un manejo profundo de los métodos, técnicas, instrumentos, niveles y agentes que intervendrán en este proceso, pero sobre todo la plena conciencia del modelo de enseñanza y aprendizaje a utilizarse. La valoración o evaluación va más allá de un seguimiento escolar, se trata de una herramienta poderosa para identificar los resultados y niveles de logros alcanzados. Las progresiones de aprendizaje como modelo educativo, describen cómo evoluciona la adquisición de los conocimientos por parte de los estudiantes, estableciendo relación complementaria de hitos y niveles alcanzados de forma sucesiva. En tanto la evaluación cuantitativa en las progresiones de aprendizaje es un método que utiliza números para medir el desempeño de los estudiantes; lo ideal es utilizar una evaluación de tipo integral con base a los objetivos que se desean alcanzar en cada una de las disciplinas; mayormente se requiere ampliar los saberes prácticos en las diversas áreas disciplinares. Las progresiones de aprendizaje en Medicina Veterinaria se refieren a cómo los estudiantes evolucionan su comprensión y habilidades en áreas clave de la disciplina a medida que avanzan en su formación. Estas progresiones no son metas fijas, sino rutas de aprendizaje que indican el progreso esperado en la adquisición de conocimientos y competencia. Los cambios en el sistema de educación requieren ser evaluados a través de la emisión de Opinión Técnica Administrativa, siguiendo la guía de los criterios esenciales para evaluar planes y programas de estudio aplicable a la licenciatura en medicina veterinaria y zootecnia. El presente capítulo tiene como objetivo analizar las características de la evaluación según las progresiones de aprendizaje y su aplicación en el ámbito de la educación en medicina veterinaria.

Palabras clave: Evaluación, progresiones de aprendizaje, medicina veterinaria.



Introducción

Desde los años 90s la calidad educativa se mide a través del proceso de evaluación o valoración de los niveles de desempeño de los estudiantes, siendo una estrategia que proporciona información sobre el método de Enseñanza en las diferentes áreas del conocimiento. Obtener información de los niveles de logro y dominio de las competencias por parte de los estudiantes, a través de la realimentación, permite diseñar estrategias de enseñanza –aprendizaje que favorezcan la adquisición de los saberes, competencias y perfiles determinados al inicio de los currículos y las unidades de aprendizaje. Cada país aplica sistemas educativos según las condiciones, experiencias y aprendizajes; sin embargo, existe una tendencia hacia la aplicación de sistemas especializados y con engranajes holísticos, donde se valoran no solo los objetos de intervención sino los factores asociados a los desempeños exhibidos por los estudiantes.

La valoración educativa ha repercutido de manera frontal en las nociones de calidad educativa y los procesos de ejecución de la evaluación. Es por ello que se pone de manifiesto la imperiosa necesidad de determinar cómo, en qué momento, quien, dónde, a través de que evaluar, a fin de obtener un sistema de evaluación robusto y efectivo. Este camino ha sido recorrido por diferentes países y sus experiencias resultan enriquecedoras, desde la perspectiva de progresiones de aprendizaje, estrategia didáctico-pedagógica respecto al mapeo de los niveles de logro de las competencias, las cuales fungen como descriptores de la evolución continua del logro e identificadores de los procesos cognoscitivos del estudiante y del dominio de las competencias profesionales y de egreso. El conducir al estudiante a un aprendizaje funcional, progresivo y coherente, que responda las exigencias de un contexto cada vez más complejo, implica el diseño de programas académicos pertinentes que fomenten el logro y dominio de las competencias; pero sobre todo un proceso de valoración confiable y eficiente en términos de conocimiento funcional.

Las progresiones de aprendizaje describen el desarrollo de una competencia en niveles de complejidad creciente, como pasos de un camino hacia los logros expresados en el perfil de egreso, proporcionando un mapa detallado de cómo los estudiantes se vuelven cada vez más hábiles y competentes en aspectos particulares de las competencias de egreso; con base al proceso de evaluación. Esta tiene por objeto medir una meta, los objetos de intervención con base al tipo de conocimiento que buscamos desarrollar en el estudiante y una medida de progreso hacia esa meta, esto implica evaluar los niveles de progreso en el dominio de un saber por ello es fundamental abordar la pertinencia de utilización de evaluación cualitativas y cuantitativas con base a las progresiones de Aprendizaje. La evaluación del desempeño tiene por objetivo medir los conocimientos, destrezas, habilidades y actitudes de los estudiantes en un periodo determinado, con indicadores y criterios definidos, que establezcan los niveles de logro que parten de un rango jerárquico que va de menor a mayor y puede representarse en expresiones cuantitativas (5.0, 8.3, 10.0 - 50, 83 o 100) o indicadores cualitativos (Insuficiente, Satisfactorio, Sobresaliente); esta se da progresivamente y de forma permanente, es consecutiva a lo largo de una línea temporal continua, puede ser en un bimestre, trimestre o semestre, es acumulativa y realizada por los docentes, al finalizar el abordaje de los objetos de intervención definidos con antelación.

La valoración inherente a las Progresiones de Aprendizaje es la cualitativa, cuyo propósito principal es conducir a los estudiantes por los caminos o rutas para que puedan avanzar en el dominio de la competencia. Este tipo de valoración se realiza de manera constante y sostenida durante el proceso de aprendizaje con el acompañamiento del profesor, quien a través de la



retroalimentación enfatiza puntos a mejorar con base a los estándares, indicadores y criterios previamente definidos, el docente es quien señala la manera correcta de ejecución de cada tarea. Las valoraciones del profesor en relación al aprendizaje del estudiante no confluyen en una nota o calificación sino en pautas, explicaciones, aclaraciones, preguntas, comparaciones, ejemplificaciones, descripciones, problematizaciones, interpelaciones, que permiten al estudiante avanzar y dar saltos cualitativos y cuantitativos en sus aprendizajes. Cada uno de estos saltos constituye el avance progresivo de hito a hito, de nivel a nivel. Al alcanzar un nuevo hito o nivel, el aprendiz no puede dar automáticamente el siguiente paso, el profesor es el encargado de crear nuevas situaciones de aprendizaje que promuevan y motiven al estudiante a plantear nuevas hipótesis, generar dudas, nuevas preguntas, replantear problemas, modificar certezas, revisar procedimientos, ampliar su perspectiva, crear nuevos escenarios, pensar nuevas soluciones a viejos problemas, proponer viejas soluciones a problemas emergentes, dando un nuevo salto en sus aprendizajes.

Aprendizaje y evaluación

Las propuestas pedagógicas actuales están enfocadas en proporcionar una educación integral, que incluya el desarrollo de conocimientos, habilidades y actitudes acordes a las exigencias de un mundo en constante cambio social y tecnológico. El objetivo principal es capacitar a los estudiantes para que adquieran competencias que les permitan ser autónomos, productivos, participativos, respetuosos, colaborativos y propositivos en su rol de ciudadanos. Los diversos niveles educativos incluyen como perfil de egreso determinadas competencias para la vida, mismas que requieren ser evaluadas para dar constancia del logro de los objetivos enmarcados para cada nivel educativo. La enseñanza es el proceso por el que un docente promueve en sus estudiantes la capacidad para desarrollar aprendizajes significativos, fomentando procesos de crecimiento personal y social, mediante la participación de éstos en actividades significativas, intencionales, planificadas y sistemáticas. En la enseñanza, los docentes reconstruyen los conocimientos, para hacerlos accesibles al estudiantado y brindarles los apoyos pertinentes de acuerdo a sus características cognitivas. El constructivismo es una corriente de pensamiento en psicología, en el que convergen tres paradigmas: el cognoscitivista, el psicogenético y el sociocultural. Los tres han sido aplicados en la educación (Cuadro 1), enfatizando la concepción de los estudiantes como mentes activas que construyen su conocimiento, basándose en los elementos que han aportado cada uno de los paradigmas.

Díaz-Barriga y Hernández, proponen que “la construcción del conocimiento escolar es en realidad un proceso de elaboración, en el sentido de que el estudiante selecciona, organiza y transforma la información que recibe de muy diversas fuentes, estableciendo relaciones entre dicha información y sus ideas o conocimientos previos. Así, aprender un contenido quiere decir que el estudiante le atribuye un significado, construye una representación mental por medio de imágenes o proposiciones verbales, o bien elabora una especie de teoría o modelo mental como marco explicativo de dicho conocimiento”.

Cuadro 1. Paradigmas y su concepción sobre la enseñanza, aprendizaje, el estudiante y el docente.



Paradigmas	Enseñanza	Aprendizaje	Estudiante	Docente
Cognitivo	Se orienta al logro de aprendizajes significativos con sentido y al desarrollo de habilidades estratégicas generales y específicas de aprendizaje. Parte de sus conocimientos previos, nivel de desarrollo cognitivo y su conocimiento estratégico.	Determinado por conocimientos y experiencias previas. Las representaciones y significados se construyen significativamente.	Es un sujeto activo procesador de información que posee competencia cognitiva para aprender y solucionar problemas.	Organizador de experiencias didácticas que promuevan el aprendizaje con sentido de los contenidos. Promotor de estrategias cognitivas y metacognitivas.
Psicogenético	Se centra en los bachilleres y enfatiza sus actividades, iniciativas y curiosidades para lograr su auto-estructuración y autodescubrimiento en los contenidos escolares.	Determinado por el nivel de desarrollo cognitivo, a su vez, el aprendizaje contribuye para lograr avances en el desarrollo cognitivo.	Es un constructor activo de su propio conocimiento y el reconstructor de los distintos contenidos escolares a los que se enfrenta.	Facilita y promueve el desarrollo y autonomía de estudiantes, así como de crear una atmósfera de reciprocidad, respeto y autoconfianza en el aula.
Sociocultural	Los procesos educativos son foros culturales en los que maestros, maestras, y estudiantes negocian, discuten, comparten y contribuyen a reconstruir los códigos y contenidos curriculares, así como habilidades, actitudes, valores, normas., etc.	Proceso interactivo mediante el cual el estudiantado se aproxima a la vida intelectual de quienes los rodean.	Es un ser social, producto y protagonista de múltiples interacciones sociales que le permiten reconstruir y co-construir los saberes.	Es un agente cultural que enseña en un contexto sociocultural determinado, y es un mediador entre el saber sociocultural y los procesos de apropiación del conocimiento en el aula.

La coherencia entre la enseñanza y la evaluación es fundamental, ya que esta relación propicia, desarrolla y valora el aprendizaje de los estudiantes. Si la enseñanza está dirigida hacia el logro de adquisición de información la evaluación estaría direccionada a la corroboración de conocimientos declarativos. Este tipo de evaluación se considera tradicional y únicamente pretende verificar si se abarcaron los conocimientos, esta no permite medir la adquisición de competencias, y deja a un lado el proceso de consolidación del aprendizaje; por lo tanto, es un tipo de evaluación que cada vez se práctica menos. Por el contrario, una enseñanza cuyo objetivo sea desarrollar competencias, requerirá de un modelo de evaluación diferente, ya que estará compuesta por la adquisición de conocimientos, habilidades y actitudes, siendo vital el generar oportunidades para que el estudiante demuestre lo aprendido en estos tres rubros. Es por ello que la evaluación como práctica educativa no puede permanecer estática, y a lo largo de los años se han propuesto diversos parámetros de evaluación, cada uno de ellos responde a formas de pensamiento, interpretación de la realidad y momento histórico.



Las competencias se demuestran en la ejecución de actividades significativas como situaciones y problemas similares a los presentes en la vida cotidiana. Las actividades propuestas deben ser pertinentes, con trascendencia personal -social y con cierto grado de complejidad. Con estas actividades se pretende fomentar la aplicación de los conocimientos previamente adquiridos desde un enfoque práctico, actualizado, para solucionar problemas, además de actitudes en la interacción con otros compañeros y compañeras. También el sistema de evaluación integral debe ser capaz de describir el grado de desarrollo que ha alcanzado un estudiante a lo largo del ciclo escolar. En este sentido las actividades significativas propuestas deben propiciar que los estudiantes muestren un determinado grado de desempeño movilizándolo sus recursos, y deben utilizarse frecuentemente para dar oportunidad de mejorar o mostrar nuevos desempeños. De este modo, cada actividad significativa genera una nueva oportunidad para evaluar el progreso mediante estrategias de evaluación auténtica, como son la recolección de evidencias para un portafolios, ejercicios de coevaluación y autoevaluación, etc. Este tipo de información cualitativa no puede brindarse con la sola asignación de una calificación mediante exámenes de conocimientos. No se rechaza el uso de pruebas objetivas, pero no se deben considerar como único criterio de evaluación, ni como el más importante; pues el enfoque de competencias requiere que, además de conocimientos, se evalúen habilidades y actitudes. En este sentido la estrategia de evaluación mediante progresiones de aprendizaje cobra vital importancia en la enseñanza integral actual.

Evaluación según la estrategia de progresiones de aprendizaje

Las progresiones de aprendizaje constituyen secuencias didácticas planificadas para la adquisición gradual de conocimientos y habilidades, que favorezcan la adquisición de competencias y correcta evaluación. Esta estrategia permite seleccionar los contenidos relevantes para el desarrollo integral del perfil de egreso, asegurando que los alumnos adquieran las habilidades de manera efectiva, sin sobrecarga de materias y contenidos académicos asociados al plan de estudio. Las progresiones de aprendizaje ofrecen claridad a los docentes al proporcionando una guía para la instrucción y evaluación. Ofrecen una ruta a seguir para impartir desde los conocimientos básicos hasta la comprensión avanzada de un área temática, lo que permite a los educadores garantizar que cada nuevo concepto se enseñe en el momento oportuno en el proceso de aprendizaje del estudiante. Cuando los docentes analizan la secuencia del contenido, pueden planificar sus lecciones con mayor eficacia y anticipar los puntos críticos para que se logre el aprendizaje por parte de los estudiantes.

Existen ciertas pautas y criterios a tener en cuenta para la aplicación de las progresiones de aprendizaje:

Los objetivos de aprendizaje: La aplicación de las progresiones de aprendizaje inician con la definición de los objetivos o estándares finales para un curso o grado. Estos se establecen en función de los saberes que se pretende que sean adquiridos por los alumnos.

Secuenciación de contenido: Teniendo en cuenta los objetivos marcados se debe establecer una secuencia de las subhabilidades y los conocimientos necesarios para alcanzarlos. En este punto se desglosan los objetivos generales en objetivos de aprendizaje específicos, que se van desarrollando de menor alcance a mayor, con un aumento gradual en la complejidad.



Alineación de evaluaciones: Se requiere realizar un alineamiento de las evaluaciones con el progreso del aprendizaje, lo que garantiza que los estudiantes sean evaluados en el contenido adecuado en el momento oportuno. Este método permite ir evaluando cada etapa del proceso de aprendizaje, a diferencia del método tradicional donde las evaluaciones incluían mucho contenido académico y no permitía ver la relación, ni el progreso de cada hito o temática.

Revisión iterativa: Las progresiones de aprendizaje no son definitivas, requieren actualización y ajustes periódicos según los datos de rendimiento y la retroalimentación de los estudiantes. En este sentido cuando una temática es difícil para los estudiantes la progresión puede adaptarse para incluir otras actividades prácticas o recursos visuales que refuercen el concepto.

Una progresión de aprendizaje aplicada a las materias de medicina veterinaria podría comenzar con la comprensión de conceptos básicos, posteriormente el estudio teórico de las aplicaciones de los conocimientos, su interrelación con varias materias, y concluir con las clases prácticas. Al seguir esta progresión, los docentes pueden diseñar lecciones que se complementen entre sí, lo que genera experiencias de aprendizaje significativas. Las progresiones de aprendizaje permiten desarrollar evaluaciones más específicas y eficaces. Los docentes pueden crear evaluaciones alineadas con la parte específica de la progresión en la que se encuentran los estudiantes, en lugar de evaluaciones que cubran una amplia gama de contenidos. Esto permite obtener mediciones precisas de la comprensión del alumnado en cada etapa de su aprendizaje. Una evaluación eficaz al final de la unidad podría consistir en el desarrollo de un proyecto teórico-práctico donde se integren todos los contenidos aprendidos. De esta manera, las progresiones de aprendizaje no solo guían la instrucción, sino que también informan cómo se diseñan las evaluaciones, garantizando que sean significativas y relevantes para el lugar actual de los estudiantes en la secuencia de aprendizaje.

Guía para implementar progresiones de aprendizaje en Medicina Veterinaria

El desarrollo de progresiones de aprendizaje debe ser un trabajo colectivo que englobe los esfuerzos de docentes, desarrolladores curriculares y expertos en la materia. Esta colaboración permite garantizar que la progresión sea integral y refleje un consenso sobre las mejores prácticas para la enseñanza del contenido. Se debe utilizar un diseño inverso donde se comienza con la planificación del fin deseado, indicando los resultados de aprendizaje a alcanzar, y en función de estos se planifican los conocimientos y habilidades esenciales que los estudiantes van a recibir. Este enfoque ayuda a crear una progresión lógica y eficaz. También se debe incorporar el aprendizaje diferenciado, que reconoce que los tiempos y ritmos de cada estudiante son diferentes, el aprendizaje debe ser gradual y cada alumno tiene distintos niveles de conocimientos previos. Las progresiones de aprendizaje deben permitir cierta flexibilidad para adaptarse a la instrucción diferenciada y apoyar a todos los estudiantes.

Proporcionar hitos claros, definiendo puntos de referencia para ayudar tanto a profesores como a los alumnos a monitorear su progreso de enseñanza y/o aprendizaje. Las evaluaciones deben ser formativas, recopilando datos sobre la comprensión de los estudiantes, fundamentando la instrucción y realizando los ajustes necesarios. Esto podría incluir exámenes, debates, notas, interacciones prácticas, fórum, eventos científicos, que permitan comprender el contenido por parte de los estudiantes. Una herramienta a utilizar son los mapas de competencias transversales en asignaturas correlacionadas. Garantizar que las oportunidades de desarrollo profesional



docente se alineen con la progresión del aprendizaje. En este sentido incluir prácticas profesionales, talleres y actividades que permitan aplicar los conocimientos teóricos en lo práctico. La comunicación y retroalimentación también constituyen puntos básicos de la estrategia de progresión del aprendizaje ya que mantener informados a los padres, estudiantes y demás partes interesadas sobre el progreso es fundamental. La transparencia ayuda a todos a comprender los objetivos de aprendizaje y cómo cada etapa del progreso contribuye al éxito general del estudiante. Un mapa de competencias es una representación estructurada de las habilidades, conocimientos y actitudes que los estudiantes deben adquirir y desarrollar a lo largo de su formación académica, mismas que se pueden lograr a través del diseño de progresiones del aprendizaje. El mapa de competencias está asociado a la evaluación formativa y no sólo sumativa, permitiendo identificar qué competencias transversales e interdependientes son esenciales y cómo se interrelacionan entre sí para lograr un desempeño profesional óptimo. Requiere especificar los niveles de dominio de la competencia para planificar los contenidos de la progresión del aprendizaje y puede representarse con figuras o matrices para sintetizar perfiles de competencias.

La matriz de Anderson se utiliza para generar la interacción entre las dimensiones claves del aprendizaje: la dimensión gradual de los procesos cognitivos representados por los verbos y el proceso gradual de la dimensión del conocimiento. Siguiendo la descripción actualizada de los seis procesos cognitivos representados por verbos se denota la acción (Recordar, Comprender, Aplicar, Analizar, Evaluar, Crear): estos procesos corresponden a las etapas por las que un estudiante avanza mientras aprende, desde la simple memorización hasta la creación de una idea, el diseño y creación de un proceso o servicio, basado en lo aprendido de manera progresiva. Esta herramienta brinda opciones para una acción pedagógica expresada como resultados de aprendizaje, en diferentes dimensiones del conocimiento y con diferentes procesos cognitivos, seleccionados conforme la meta de aprendizaje.

La relevancia del constructo radica en su capacidad para estructurar y guiar la planeación del proceso formativo, asegurando una adquisición coherente y progresiva de las habilidades. Un ejemplo de progresiones de aprendizaje sería su aplicación para abordar la enseñanza de diversos temas de química inorgánica, química orgánica y biología, donde las perspectivas teóricas de estas asignaturas interconectadas deben ser aplicadas con la experiencia práctica. De igual forma las asignaturas relacionadas con microbiología, patología, y clínica, constituyen otro ejemplo de materias cuyo contenido se extiende a varias asignaturas transversales, siendo necesario su abordaje de forma relacionada para una educación veterinaria integral. Es prioritario mapear el estado de implementación y avance de las progresiones de aprendizaje, en las facultades de medicina veterinaria, con base a los criterios internacionales utilizados en progresiones de aprendizaje en diferentes áreas del conocimiento. Se deben establecer tablas de equivalencias para la equiparación de aprendizajes de naturaleza cualitativa, así como sistemas integrales de valoración de progresiones de aprendizaje en la medicina veterinaria, intercambiando saberes, experiencias y retos adquiridos en el proceso de valoración de progresiones de aprendizaje y su consenso para cada área de intervención y cada unidad de aprendizaje; partiendo si ese modelo de progresión de aprendizajes es aplicable a toda la malla curricular. La evaluación cualitativa es inherente a la Progresión de aprendizaje, implica una serie de características que contrastan con la evaluación cuantitativa y la complementan, su objetivo principal es formar los caminos y las



rutas para que puedan avanzar en la profundización, experticia y calidad de sus aprendizajes, debe ser sostenida y constante.

Aplicación de progresiones de aprendizaje en Medicina Veterinaria

En las progresiones de aprendizaje como propuesta de integración curricular los docentes que comparten el trabajo en la formación de grado, trabajan en conjunto, aunque con distintas especializaciones, para compartir la cultura institucional y la convicción de que la integración curricular es una estrategia de mejoramiento. Para la evaluación integral de los estudiantes en medicina veterinaria se tienen en cuenta las conexiones existentes en las temáticas de las asignaturas que cada quien enseña para construir un recurso didáctico. En este sentido el estudio de caso representa una estrategia didáctica para la Medicina Veterinaria, permitiendo la integración de contenidos de Anatomía, Fisiología, Metodología de la Investigación y Clínica de Animales de Compañía.

Para lograr el desarrollo de esta estrategia didáctica las pautas a seguir serían:

1. Reconocer que temáticas específicas de Fisiología y Anatomía serían necesarias abordar para el estudio del caso planteado.
2. Reconocer los principios éticos y del bienestar animal indispensables para el abordaje del caso clínico.
3. Identificar las herramientas metodológicas para solución del caso.
4. Integrar en el análisis clínico los conceptos requeridos para realizar las tareas prácticas.
5. Incorporar destrezas y habilidades sociales de negociación y generación de consenso en el trabajo en equipo.
6. Resignificar los saberes previos a través de un aprendizaje por descubrimiento.

Para realizar esta actividad se le solicita a los estudiantes que redacten un informe en el que argumenten los síntomas observados en el paciente, los hallazgos clínicos- patológicos, los resultados derivados de análisis de laboratorio y de estudios complementarios. También se debe justificar el uso de pruebas para diagnóstico diferencial y en función de estos como se realizó el análisis lógico para descartar otras patologías. En el informe se solicita una descripción del método clínico para llegar al diagnóstico completo. Los estudiantes deberán exponer los resultados preparando una exposición grupal con el apoyo de la informática (ejemplo: power point) en la que se presenten las conclusiones del caso. Esta podría incluir una representación de cómo comunicar al propietario del animal el caso, el diagnóstico, el tratamiento y las recomendaciones para evitar que reaparezca este problema. Esta tarea se enfoca en el desarrollo de competencias sociales como la cooperación, el respeto por la opinión de los demás, la capacidad para acordar una determinada estrategia de trabajo y la mejora de su autoestima. La evaluación aplicando las progresiones de aprendizaje se realizarán en base a las acciones verificables de cada estudiante, en cada una de etapas de este proyecto de caso clínico, siendo valorado el desempeño en cada una de las diferentes actividades, la adquisición de múltiples conocimientos (materias), y elaborando rúbricas correspondientes para cada etapa. La actividad Caso clínico tiene como objetivo desarrollar en los estudiantes la capacidad de análisis integral, con el uso de recursos cognitivos como: elaboración de opiniones fundamentadas en las evidencias teóricas, la elaboración de conclusiones y que puedan explicitar los mecanismos metacognitivos que permitieron la resolución del caso clínico.



Por otra parte, el caso clínico brinda un ejemplo de situación problema que tienen lugar en la práctica profesional y les permitirá desarrollar las competencias necesarias para su posterior desempeño como médicos veterinarios.

Evaluación de la propuesta educativa a través de la Opinión Técnica Académica (OTA)

La actividad de revisión, análisis y dictaminación de la pertinencia y oportunidad de los planes de estudios para las carreras de salud se lleva a cabo por la Comisión Interinstitucional para la Formación de Recursos Humanos para la Salud (CIFRHS), con la finalidad de otorgar la Opinión Técnica Académica (OTA). El objetivo principal de esta evaluación es lograr la mejora continua de las instituciones encargadas de la Formación de los Recursos Humanos vinculados a la salud. La Guía de los criterios esenciales para evaluar planes y programas de estudio aplicables a la Licenciatura en Medicina Veterinaria y Zootecnia, está conformada por los 9 criterios de evaluación que engloban el cumplimiento de 151 ítems. En la guía de criterios se identifica al Licenciado en Medicina Veterinaria y Zootecnia como una persona con sólida formación profesional, que cuenta con los conocimientos, aptitudes, actitudes, habilidades y destrezas relacionadas con la salud animal, la Salud Pública, la producción animal, la gestión y legislación de la MVZ, así como investigación. Además, debe promover la participación comunitaria, aplicar programas institucionales, regionales y nacionales dirigidos a promover la salud y prevenir enfermedades. Tendrá competencias para desenvolverse en áreas clínicas, administrativas, de investigación y de enseñanza junto con equipos multidisciplinarios. Los evaluadores deben contar con la Licenciatura en Medicina Veterinaria y Zootecnia, experiencia mínima de tres años en la disciplina, y preferentemente con experiencia comprobable en educación, actividades de diseño o en evaluación curricular.

Dentro de los campos a evaluar se encuentran:

1. Campo disciplinar: Bases metodológicas, teóricas, filosóficas y científicas que comprende una disciplina.
2. Perfil profesional: Conjunto de conocimientos, habilidades, destrezas, actitudes y valores, a ser adquiridas por el estudiante al término del proceso educativo.
3. Campo clínico: Establecimiento para la atención médica del Sistema Nacional de Salud que cuenta con la infraestructura, equipamiento, pacientes, personal médico, paramédico y administrativo que conforman un escenario educativo para desarrollar las actividades teórico prácticas previstas en el plan de estudios. (Norma Oficial Mexicana NOM 234-SSA1-2003 Utilización de campos clínicos para ciclos clínicos e internado de pregrado).
4. Perfil de Ingreso: Conjunto de conocimientos, habilidades, destrezas, actitudes y valores, necesarios en el aspirante para poder desempeñarse exitosamente a lo largo del proceso educativo y culminar el plan de estudios.
5. Estructura curricular y programas de estudio: Componente del plan de estudios que responde al perfil profesional y se concreta en un documento que sistematiza el conjunto de actividades que deberán desarrollar profesores y estudiantes para el logro de los objetivos educativos o competencias planteadas en la asignatura, área o módulo.



6. Acervo Bibliohemerográfico básico y complementario: La Institución Educativa deberá presentar con evidencias probatorias de los servicios que ofrece la biblioteca, de los derechos de autor para efectos del fotocopiado del material.
7. Perfil del docente: Conjunto de conocimientos, habilidades, destrezas, actitudes, profesional y docente, así como formación didáctica y experiencia en investigación que debe cubrir el personal académico para impartir los contenidos de El plan de estudios de estudio, los cuales deben ser congruentes con la unidad académica o asignatura en el que va a participar.
8. Infraestructura y equipamiento: Conjunto de espacios dentro de la institución educativa donde se refuerza el conocimiento y se propician experiencias para la aplicación de lo adquirido, a partir de escenarios debidamente equipados con la tecnología necesaria para la disciplina.
9. Sistema de evaluación: Conjunto de instrumentos y procedimientos que permitan recolectar y analizar información acerca del desempeño de los estudiantes, los docentes, El plan de estudios, los egresados y el propio plan de estudios, encaminados a su mejora.

Los criterios van encaminados a la evaluación integral del plan educativo con énfasis al desarrollo de habilidades enfocadas en medidas de prevención, promoción y salud pública, que forman parte de las prácticas a realizar por los estudiantes para alcanzar el perfil profesional y que se desarrollan en escenarios comunitarios. El Programa pedagógico elaborado por la institución educativa debe especificar las actividades de enseñanza-aprendizaje que el estudiante dentro de los campos clínicos o escenarios de práctica deben desarrollar de acuerdo a las características de este último y bajo supervisión de profesionales en el área de la disciplina. Cada programa debe estar respaldado con un Convenio o Carta de Intención que garantice su realización. Los resultados de la evaluación realizada sobre el Programas de estudios de la carrera de Medicina Veterinaria y Zootecnia, derivado del análisis metodológico y desde el enfoque de las disciplinas relacionadas entre sí y el perfil integral, permitirá a la CIFRHS con base en los criterios antes verificar la Oportunidad y Pertinencia para obtener el Reconocimiento de Validez Oficial de Estudios (RVOE). Este Reconocimiento garantiza la formación de médicos veterinarios especialistas competentes en los diversos campos disciplinarios del saber y el quehacer de la medicina.

Conclusiones

El aprendizaje se concibe como un proceso continuo y progresivo en el cual los estudiantes avanzan en la comprensión de contenidos interrelacionados en el currículo, contribuyendo al desarrollo de competencias cada vez más integrales y significativas. En este sentido las progresiones de aprendizajes permiten formar los caminos y las rutas para que puedan avanzar en la profundización, experticia y calidad de las materias, para una evaluación de tipo integral con base a los objetivos que se desean alcanzar en cada una de las disciplinas. Los atributos de egreso deben abarcar todos los componentes de conocimiento, habilidades y actitudes necesarios para lograr los objetivos educacionales del programa educativo. Las acciones por parte de los actores educativos, son imprescindibles para la calidad de la enseñanza de la medicina veterinaria. La aplicación de estrategias como las abordadas en este capítulo representan un nuevo camino para la mejora de la enseñanza de esta especialidad, así como su formalización para obtener la



evaluación pertinente ante las instancias reguladoras.

Bibliografía

- Arráez Aybar, Luis Alfonso, Carabantes Alarcón David, del Castillo García Benito, Iglesias Peinado Irene, Nogales Espert Ángel, Núñez Cortés Jesús Millán, Lozano Fernández Rafael y Palacios Aláiz Evangelina. (2008). Adquisición de competencias transversales en alumnos de pregrado de Ciencias de Salud en la Universidad Complutense: Una experiencia positiva. *Revista EDUC MED*, 11(3), 169-177. Recuperado de <http://scielo.isciii.es/pdf/edu/v11n3/original3.pdf>.
- Bennett, N. (1979). *Estilos de enseñanza y progreso de los alumnos*. Madrid: Morata. Carretero, M. (Comp.). (1998). *Desarrollo y aprendizaje*. Buenos Aires: Aique. Convenio Andrés Bello [CAB]. (2006). *Estudios sobre eficacia escolar en Iberoamérica. 15 buenas investigaciones*. Bogotá: CAB.
- La Comisión Interinstitucional para la Formación de Recursos Humanos para la Salud (CIFRHS), *Guía de los criterios esenciales para evaluar planes y programas de estudio aplicable a la licenciatura en medicina veterinaria y zootecnia.pdf*. http://www.cifrhs.salud.gob.mx/site1/planesprogramas/criterios_esenciales.html. Septiembre 2025.
- Dapino, D., Stella Maris Galván; Antonio Felipe; compilación de Dora Dapino; Stella Maris Galván; Antonio Felipe; ilustrado por Matías Zapata; Marcela Stella. (2021). *La integración curricular en Medicina Veterinaria: fundamentos y estrategias para el desarrollo de competencias profesionales*. 1a Ed., Rosario: UNR Editora, 2021. ISBN 978-987-702-526.
- Diez de Ultzurrún, A. (Coord.). (2011). *El aprendizaje de la lectoescritura desde una perspectiva constructivista*. Vol. 1. *Actividades para realizar en el aula: textos funcionales y cuentos*. Barcelona: Graó.
- Daura Toyos, Florencia Teresita. (2011). Las estrategias docentes al servicio del desarrollo del aprendizaje autorregulado. *Revista Estudios Pedagógicos*, 37(2), 77-88. Recuperado de <http://www.scielo.cl/pdf/es-tped/v37n2/art04.pdf>
- Heritage, M. (2006). *Learning Progressions: Supporting Instruction and Formative Assessment*. National Center for Research on Evaluation, Standards and Student Testing (CRESST). Washington, DC.: Council of Chief State School Officers. Recuperado de: <http://www.renlearn.co.uk/wp-content/uploads/2014/03/learning-progressions-supporting-instruction-and-formative-assessment.pdf>
- Ibarra Martínez Luis, Rodríguez Aguayo Luis, Tricallotis Campaña Marcos Antonio y Maino Menéndez Mario Rafael. (2004). Caracterización de las actividades del médico veterinario chileno. *Revista Avances en Ciencias Veterinarias*, 19(1), 3-9. Recuperado de: <http://www.avancesveterinaria.uchile.cl/index.php/ACV/article/view/9149/9148>
- Martínez González Sergio, Zepeda García Jesús, Figueroa Morales Rafael, Gómez Danés Alejandro Ángel, Peña Parra Bladimir y Herrera Gallardo María Teresa. (2011). Propuesta para la formación pertinente del personal en ciencias veterinarias. *Revista Abanico Veterinario*, 1(2), pp.38-45. <http://132.248.9.34/hevila/Abanicoveterinario/2011/vol1/no2/5.pdf>
- Norman G. Willis, Fonda A Monroe, J. Andre Potworowski, Gary Halbert, Brian R. Evans, John E. Smith, Kenneth J Andrews, Lynelle Spring, Andrea Bradbrook. (2007). *Envisioning the Future of Veterinary Medical Education: The Association of American Veterinary Medical Colleges Foresight Project, Final Report*. *Journal of Veterinary Medical Education (JVME)*, 34 (1). DOI.10.3138/jvme.34.1.1.
- Oriana Betancourt Gallegos y Myriam Velasco Chacur. (2019). Formación inicial del Médico Veterinario: una experiencia en el Modelo Educativo por Competencias. *Educere*, 23 (75), 323-335.
- Universidad Católica de Temuco. (2007). *Modelo educativo UC Temuco. Principios y lineamientos*. Dirección General de Docencia. Chile: Editorial UC Temuco. Recuperado de: <https://uct.cl/archivos/modeloeducativo.pdf>
- Universidad Católica de Temuco. (2016). *Competencias genéricas para la formación de profesionales integrales*. Dirección General de Docencia. Recuperado de <http://dfhc.uctemuco.cl/wp-content/uploads/2016/11/Descargar.pdf>.

Progresiones de aprendizaje en la Medicina Veterinaria ¿Moda, transformación o solución?

Martha Elba Ruiz-Riva-Palacio.
Roberto Montes-de-Oca-Jiménez.
Pilar Eliana Rivadeneira-Barreiro.
Pablo Cleomenes Zambrano-Rodríguez.
Pedro Sánchez-Aparicio.
Edalhi García-Faz.





Resumen

Las progresiones de aprendizaje han emergido como una estrategia didáctico-pedagógica poderosa respecto al mapeo de los niveles de logro de las competencias, estas fungen como descriptores de la evolución continua del logro e identificadores de los procesos cognoscitivos del estudiante; a fin de implementar estrategias de enseñanza aprendizaje que faciliten el dominio de las competencias profesionales y de egreso. El conducir al estudiante a un aprendizaje funcional progresivo, pertinente y coherente, que responda a las exigencias de un contexto cada vez más complejo, implica el diseño de programas académicos pertinentes que fomenten el logro y dominio de las competencias. El reto que supuso el COVID-19, a nivel mundial, permitió entre otras cosas realizar un replanteamiento respecto a nuestra capacidad de reacción, a nuestros recursos, competencias y conocimientos para hacer frente a las diversas crisis de un mundo globalizado. Ante esta realidad, en el ámbito educativo las progresiones de aprendizaje describen el desarrollo de una competencia en niveles de complejidad creciente, como pasos de un camino hacia los logros expresados en el perfil de egreso, proporcionando un mapa detallado de cómo los estudiantes se vuelven cada vez más hábiles y competentes en aspectos particulares del dominio de cada competencia. El contenido y secuencia de la malla curricular de la licenciatura en medicina veterinaria ofertada por los diferentes organismos académicos, normalmente es establecida con base al conocimiento y experticia de los eruditos de la disciplina, quienes con base a su lógica proponen los objetos de intervención a abordar, esta forma de estructurar la enseñanza permite visualizar un problema no solucionado en los últimos años, el cómo aprenden los alumnos. Corcoran y colaboradores sugieren que hay conceptos que los estudiantes comprenden más fácilmente que otros, y que esta secuencia cognitiva no es necesariamente la misma que la sugerida por la lógica disciplinar. El objetivo de este capítulo es presentar los beneficios de esta estrategia didáctica-pedagógica, como una herramienta poderosa del ámbito de la psicología cognitiva, que permite la construcción de los descriptores de logro de cada competencia de egreso.

Palabras clave: Medicina Veterinaria, progresiones, procesos cognoscitivos.



Introducción

La malla curricular y los objetos de intervención en educación se han establecido de manera tradicional con base al modelo educativo en boga a nivel mundial, articulado con los criterios y experticia de los agentes educativos de cada Nación. El contar con un proceso de planificación y clarificación del modelo para cada uno de los agentes que intervienen en el proceso de enseñanza y aprendizaje es de vital ayuda, pues permite seguir la ruta hacia el objetivo planteado.

La Medicina veterinaria constituye una de las profesiones que más requiere cambios y adaptación para ajustarse a las necesidades de la salud animal y humana. La responsabilidad del Médico Veterinario en el actuar social cada vez es mayor y en este sentido, la formación de profesionales que puedan responder a este grado de demanda social es responsabilidad activa tanto de los docentes como de los estudiantes durante su proceso de formación.

El desempeño deseado para los Médicos Veterinarios depende del desarrollo de competencias alcanzadas durante la carrera profesional: conocimientos científicos básicos, técnicos y prácticos en las ciencias pecuarias, prevención de las zoonosis, aplicación de tratamientos eficaces contra enfermedades aplicados teniendo en cuenta diagnósticos, gestión constante de la eficiencia sostenible de sistemas productivos y capacidad para certificar la seguridad alimentaria, así como la capacidad investigativa, resolver problemas y generar nuevos conocimientos y tecnologías entre otras.

Esto significa que para adquirir una habilidad o comprender un concepto avanzado, es necesario dominar ciertos aspectos básicos y fundamentales antes que abordar objetos de intervención más complejos.

Es por ello que las instituciones universitarias deben actualizar y replantear la concepción y práctica educativa de manera que se garantice el logro de un empleo para el cual sea competente el futuro profesional.

Las progresiones de aprendizaje surgen como una solución para la actualización de los sistemas educativos. Estas son descriptores de la evolución continua del logro e identificadores de los procesos cognoscitivos del estudiante; a fin de implementar estrategias de enseñanza aprendizaje que faciliten el dominio de las competencias profesionales y de egreso. El conducir al estudiante a un aprendizaje funcional progresivo, pertinente y coherente, que responda a las exigencias de un contexto cada vez más complejo, implica el diseño de programas académicos pertinentes que fomenten el logro y dominio de las competencias.

Progresiones de Aprendizaje

Las progresiones de aprendizaje son herramientas que permiten identificar el nivel de avance que posee un individuo en un campo específico de conocimiento, es un mapa de aprendizaje que permite ubicar en qué punto se encuentra con respecto a los saberes,



habilidades, valores y actitudes, adquiridos en un curso académico.

Para ubicar los aprendizajes superficiales y sobre todo los profundos en el mapeo, se requieren dos tipos de indicadores descriptivos que los caracterizan, en primera instancia los hitos que señalan componentes cuantitativos del aprendizaje; y, por otro lado, están los niveles que señalan componentes cualitativos del aprendizaje en el que se encuentra la persona, como se exhibe en la Figura 1, representación gráfica de progresiones de Aprendizaje.

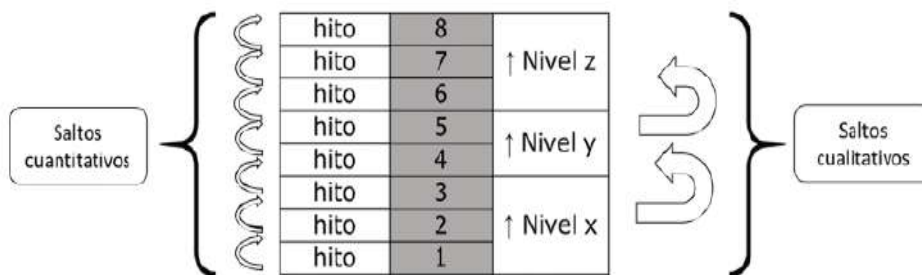


Figura 1. Representación gráfica de progresiones de aprendizajes.

Esta imagen implica el punto de partida del aprendizaje, esto es el desconocimiento del objeto de intervención o de aprendizaje, a partir de aquí el estudiante irá abonando al conocimiento gradual y progresivo del objeto, a través de saltos cuantitativos sucesivos; en cada hito recorrido se aprenden: características, funciones, componentes, variantes, diferencias entre sí por el hito correspondiente, pero semejantes por el nivel donde se encuentran, esto es, si el hito demarca la progresión cuantitativa, el nivel, refleja la progresión cualitativa. La progresión de aprendizaje es una relación complementaria de dos componentes constitutivos: hitos y niveles, si bien tienen características diferentes – uno es de naturaleza cuantitativa y otro cualitativa, el componente principal y definitorio para consolidar el aprendizaje lo constituye el nivel (de orden cualitativo). Los niveles marcan los puntos de referencia entre el aprendizaje actual y el aprendizaje deseado, los peldaños para llegar al aprendizaje deseado son los hitos.

Los ámbitos de conocimiento parten de límites que se construyen de forma arbitraria, pues estos se crean con base a necesidades y funciones de cualquier tipo y naturaleza, generalmente estos son determinados por los Estados, Instituciones; investigadores, grupos sociales o individuos con necesidades particulares de aprendizaje; por ende, los ámbitos de conocimiento son culturales e históricos.



Educación en Medicina Veterinaria, transformación y progresiones de aprendizajes como solución

La educación veterinaria no está exenta de establecer ámbitos particulares de conocimiento, corrientes y metodologías educativas que permitan a los estudiantes exhibir conocimientos funcionales con base a su perfil de egreso. La profesión en Medicina Veterinaria implica que el gestor profesional pueda ofrecer respuesta en relación con las demandas de la sociedad, y esto implica una constante evolución para adaptarse a necesidades tradicionales y emergentes.

Si bien es cierto que las progresiones de aprendizaje prometen ser de gran utilidad en el diseño de currículos, métodos de enseñanza y evaluaciones del aprendizaje en ciencias, es importante reconocer que en la actualidad existen concepciones diversas sobre la estructura y contenidos esperados de tales progresiones, y sobre las estrategias que deben seguirse para desarrollarlas y validarlas. Así se encuentran progresiones de aprendizaje que describen la evolución de los conocimientos de los estudiantes tal y como parecen ocurrir bajo los currículos y formas de enseñanza actuales; en otros las progresiones describen secuencias posibles de aprendizaje bajo formas de instrucción diseñadas para sacar ventaja de los trampolines conceptuales identificados en cierta área. Adicionalmente, hay educadores que comienzan la construcción de progresiones de aprendizaje con base en el análisis de la complejidad de los conceptos a enseñar, seguida de investigaciones diseñadas para validar la secuencia propuesta haciendo uso de datos recolectados en las aulas. En otras situaciones, la progresión de aprendizaje se genera directamente a partir del análisis de las explicaciones o respuestas dadas por estudiantes en diversos grados escolares a preguntas diseñadas para investigar sus ideas sobre un tema determinado.

El aprendizaje se concibe como un proceso continuo y progresivo en el cual los estudiantes avanzan en la comprensión de contenidos interrelacionados en el currículo, contribuyendo al desarrollo de competencias cada vez más integrales y significativas. Debatir si existen modelos de progresión que sean aplicables a todos los aprendizajes, incluyendo la Medicina Veterinaria es un reto en la actualidad.

La estrategia de progresiones de aprendizaje comienzan tomando como punto inicial el no conocimiento (desconocimiento) del objeto a evaluar, y posteriormente el estudiante deberá conocer el objeto de intervención cada vez mejor a través de una sucesión de saltos cuantitativos, que impliquen aprender características, funciones, matices, variantes, componentes diferentes entre sí por el hito al que corresponden; pero similares por el nivel en el que se encuentran; es decir que, si el hito demarca la progresión cuantitativa, el nivel, refleja la progresión cualitativa

El reto de esta estrategia radica en que sea diseñada de forma tal que permita evaluar el desarrollo de competencias afines con el perfil del estudiante en formación. Para ello los docentes deben implementar cambios en los niveles epistemológicos, metodológicos y



prácticos. En este sentido las progresiones de aprendizaje representan una solución.

El análisis de las directrices para la propuesta de plan de estudio por parte de la Organización mundial de salud animal (OMSA) como de carácter indispensable en la carrera de la Medicina Veterinaria, permite identificar y ordenar la enseñanza para esta profesión siguiendo un orden jerárquico, donde las materias se impartan de menor a mayor complejidad. El orden de aplicación de los cursos debe tener en cuenta primeramente el estudio de materias básicas, seguido de aquellas especializadas y por ultimo las avanzadas Cuadro 1.

En el Cuadro 1 se identifican cuáles serían las competencias específicas que son aquellas propias de cada profesión, y las competencias genéricas, para el desarrollo del futuro profesional en un contexto interpersonal e interdisciplinario. El estudiante debe llegar a ser el gestor (organizador y regulador) de su aprendizaje de manera autónoma, lo que debe desarrollarse en niveles de dificultad adecuados, crecientes, y en relación con el desarrollo de competencias específicas o propias de su profesión.

Cuadro 1. Ejemplo de propuesta de Plan de estudios para la Carrera de Medicina Veterinaria según la OMSA.

Asignaturas	Orden dentro del ciclo de estudios	Competencias			Descripción
		Generales	Específicas	Avanzadas	
Fisiología	Inicio	x			Técnicas y principios fisiológicos de base (en laboratorio), principales sistemas de especies animales de importancia en el País Miembro.
Patología	Mitad	x	Zoonosis Enfermedades trasfronterizas Epidemiología Enfermedades emergentes y reemergentes		De la enfermedad: causas, procesos, desarrollos y consecuencias. Aspectos clínicos, diagnóstico y patología anatómica. Incluye laboratorio o práctica.
Enfermedades contagiosas	Mitad - Final	x	Zoonosis Epidemiología Enfermedades trasfronterizas Prevención control	Manejo de enfermedades contagiosas	Enfermedades emergentes y reemergentes. Patogénesis, diagnóstico, prevención, y métodos y programas de control. El contenido se vincula con patología, microbiología e inmunología.

Un ejemplo de competencias genéricas sería la Gestión del Conocimiento, la cual está vinculada con el procesamiento de la información, según las necesidades del aprendizaje y los requerimientos del medio sociocultural. En un Nivel básico esta competencia se evidencia cuando el estudiante reconoce las habilidades y/o procesos



cognitivos con los cuales puede identificar, seleccionar, interpretar y aplicar información básica para dar solución a problemáticas relacionadas con su profesión futura.

Para el estudiante de la carrera de Medicina veterinaria, en el módulo de Patología que forma parte del nivel básico de formación en el Área Salud Animal, se incluye aplicación inicial de los fundamentos teórico-prácticos del funcionamiento de la triada epidemiológica, proceso de la enfermedad infecciosa y características morfológicas de los agentes etiológicos biológicos, para comprender y aplicar procedimientos de diagnóstico y tratamientos. Este curso requiere diseñar metodologías activas de aprendizaje y de evaluación compleja de resultados de aprendizaje, que permitan integrar los saberes básicos con la competencia genérica gestión del conocimiento.

El plan de estudios básico de formación veterinaria incluye asignaturas que se asocian a una o más de las competencias que se pretenden alcanzar por los estudiantes. Algunas competencias como investigación, no corresponden a una asignatura en particular, dado que la gran mayoría de los cursos la incluyen en sus programas. Las habilidades de comunicación sólo se asocian con los cursos de comunicación o con un contenido afín, puesto que este aspecto también se trata en otras materias.

Este plan básico brinda recomendaciones para el orden en que se deben impartir las materias, especificando si se requieren al inicio, mitad o final del plan de estudios. La sucesión recomendada deberá ajustarse al elaborar un currículo específico, para lograr un plan de estudios alcanzable por los estudiantes. Se reflejan las características del programa y los requisitos de egreso.

Las asignaturas que tratan competencias generales, entre ellas ciencias básicas veterinarias y producción animal, pueden incluirse en su totalidad a inicios del plan de estudios o formar parte de los requisitos para la admisión. El contenido de la materia puede presentarse como asignatura individual o alternativa, como cursos cuyo contenido puede combinarse o integrarse en varias asignaturas, según las modalidades de enseñanza, por ejemplo, aprendizaje didáctico, en laboratorio o práctico, en pequeños grupos, análisis de problemas, o clases autodirigidas.

El plan de estudios propuestos por la OMSA no constituye un modelo único de formación, busca adaptarse a la variedad de sistemas educativos cuyos planes de estudios pueden durar cuatro, cinco o seis años. En Estados Unidos, los estudiantes suelen realizar al menos dos años de estudios preparatorios para cumplir con los requisitos educativos mínimos exigidos para ser admitidos en veterinaria que posteriormente imparte una formación de cuatro años. En otros países las escuelas de medicina veterinaria aceptan a los estudiantes al concluir los estudios de bachillerato, siendo el plan de estudios es de cinco o seis años. Por ello la dinámica para el modelo básico deberá ajustarse en dependencia de los criterios de admisión de cada escuela.

La construcción de competencias debe evitar una carga excesiva de contenidos académicos: se deben seleccionar aquellos que sean necesarios, suficientes y relevantes



para el desarrollo integral del perfil de egreso. Esto asegura que los estudiantes adquieran las habilidades de manera efectiva, sin sobrecargar la carga académica de los planes de estudio con contenidos redundantes y que no estén asociados a desempeños específicos.

Al determinar la duración y profundidad de cada curso que se incluya en el currículo, también es necesario considerar el nivel de competencias que se espera de los veterinarios recién licenciados con respecto a las competencias avanzadas, para una formación integral.

En este sentido la Organización Panamericana de la Salud en la Conferencia Sanitaria Panamericana, del 2017, planteo que “la formación de profesionales de la salud debe planificarse en relación con las necesidades presentes y futuras de los sistemas de salud”. Para ello se estableció la necesidad de crear estrategias de acción, mecanismos de cooperación y articulación permanente entre las instituciones de salud y educativas, de manera que sea posible adaptar la formación de los profesionales sanitarios a un modelo universal, equitativo y de calidad en la prestación de servicios de atención a la salud.

La Comisión Interinstitucional para la Formación de Recursos Humanos para la Salud (CIFRHS), actualmente funge como órgano principal, encargado de la evaluación curricular de los programas educativos del sector de salud. Coadyuva en el establecimiento de requisitos para la apertura, fortalecimiento, desarrollo y funcionamiento de instituciones dedicadas a la formación, capacitación y actualización de recursos humanos para la salud, y con ello garantizar profesionales competentes además de la seguridad de los pacientes y usuarios. Siguiendo las guías establecidas se da respuesta a la labor de revisión de los Planes y Programas de Estudio de las carreras ubicadas dentro de los diversos campos de la salud como requisito para la obtención del Reconocimiento de Validez Oficial de Estudios (RVOE) emitido por la SEP dentro del Acuerdo Secretarial 17/11/17.

El Comité de Evaluación (COEVA) de la CIFRHS elaboró los Lineamientos para obtener la Opinión Técnico Académica, respecto de la apertura y funcionamiento de Instituciones Particulares de Educación Superior dedicadas a la formación de Recursos Humanos para la Salud que contempla 9 Criterios Esenciales como requisitos para la evaluación de los Planes y Programas de Estudio, a continuación, expuestos:

1. Campo disciplinar: Bases metodológicas, teóricas, filosóficas y científicas que comprende una disciplina. Los componentes del campo disciplinar son:
 - Cuerpo de conocimientos de la disciplina.
Sustento de la disciplina, considera el desarrollo histórico, teórico y científico.
 - Métodos, técnicas y procedimientos que se aplican en la disciplina.
Describe los métodos, técnicas y procedimientos requeridos para desempeñarse en la disciplina y que además se encuentran dentro de los



temas y contenidos de El plan de estudios de estudio.

- Escenarios debidamente equipados con tecnología aplicada en la disciplina. Describe los escenarios para el actuar del profesional en el área de la disciplina y las tecnologías actuales que se requieren para un desempeño competente, tomando en cuenta las acciones de promoción, prevención y control de riesgos, así como las tendencias a la práctica clínica.
2. Perfil profesional: Conjunto de conocimientos, habilidades, destrezas, actitudes y valores, a ser adquiridas por el estudiante al término del proceso educativo. Los componentes del perfil profesional que se deben evaluar son:
 - Elementos del perfil profesional.
Áreas y competencias que debe cubrir el recién egresados al terminar el proceso educativo.
 - Evaluación del perfil profesional.
Congruencia del perfil profesional con el campo disciplinar, el marco normativo vigente de la profesión y las necesidades de salud de la población.
 3. Campo clínico: Establecimiento para la atención médica del Sistema Nacional de Salud que cuenta con la infraestructura, equipamiento, pacientes, personal médico, paramédico y administrativo que conforman un escenario educativo para desarrollar las actividades teórico prácticas previstas en el plan de estudios. (Norma Oficial Mexicana NOM 234-SSA1-2003 Utilización de campos clínicos para ciclos clínicos e internado de pregrado).
 4. Perfil de Ingreso: Conjunto de conocimientos, habilidades, destrezas, actitudes y valores, necesarios en el aspirante para poder desempeñarse exitosamente a lo largo del proceso educativo y culminar el plan de estudios.
 5. Estructura curricular y programas de estudio: Componente del plan de estudios que responde al perfil profesional y se concreta en un documento que sistematiza el conjunto de actividades que deberán desarrollar profesores y estudiantes para el logro de los objetivos educativos o competencias planteadas en la asignatura, área o módulo. Los componentes de la organización, estructura curricular y programas de estudio y práctica que se deben evaluar son:
Estructura y mapa curricular: Es la organización sistemática del Plan de estudios compuesta por un conjunto de criterios, programas, metodologías y procesos que contribuyen a la formación integral y a la construcción de la propuesta curricular.
 - Programas de estudio: Descripción sistematizada de los contenidos de las asignaturas o unidades de aprendizaje, ordenadas por secuencias o áreas relacionadas con los recursos didácticos y bibliográficos indispensables con los cuales se regulan los procesos de enseñanza y aprendizaje.
 6. Acervo Bibliohemerográfico básico y complementario: La Institución Educativa



deberá presentar con evidencias probatorias de los servicios que ofrece la biblioteca, de los derechos de autor para efectos del fotocopiado del material.

Acervo básico: Conjunto de materiales Bibliohemerográfico (libros, revistas y otros materiales impresos o digitalizados), incluidos dentro del plan de estudios y requeridos para que los estudiantes puedan dominar los contenidos planteados

Acervo complementario: Conjunto de materiales Bibliohemerográfico (libros, revistas y otros materiales impresos o digitalizados) requeridos para que los estudiantes puedan ampliar el conocimiento de los contenidos planteados en el plan de estudios.

7. Perfil del docente: Conjunto de conocimientos, habilidades, destrezas, actitudes, profesional y docente, así como formación didáctica y experiencia en investigación que debe cubrir el personal académico para impartir los contenidos de El plan de estudios de estudio, los cuales deben ser congruentes con la unidad académica o asignatura en el que va a participar.
8. Infraestructura y equipamiento: Conjunto de espacios dentro de la institución educativa donde se refuerza el conocimiento y se propician experiencias para la aplicación de lo adquirido, a partir de escenarios debidamente equipados con la tecnología necesaria para la disciplina.

Infraestructura: Conjunto de áreas físicas e instalaciones propias de la institución educativa indispensables para realizar las actividades especificadas en el plan y programas de estudio.

Equipamiento: Conjunto de instrumentos, equipos, mobiliario y materiales propios de la institución educativa, indispensables para realizar las actividades especificadas en el plan y programas de estudio, suficiente para atender a la matrícula propuesta.

9. Sistema de evaluación: Conjunto de instrumentos y procedimientos que permitan recolectar y analizar información acerca del desempeño de los estudiantes, los docentes, El plan de estudios, los egresados y el propio plan de estudios, encaminados a su mejora.

Cabe destacar que debido a las diferencias políticas y socioeconómicas de cada país las necesidades de educación cambian y deben ser ajustadas en consecuencia. Sin embargo, se debe conservar el propósito original del modelo, donde los alumnos adquieran las competencias que se esperan de los recién licenciados para garantizar servicios veterinarios nacionales de calidad.



Conclusiones

Las progresiones de aprendizaje representan una estrategia didáctica-pedagógica, eficiente y reconocida en el ámbito de la psicología cognitiva y en la educación. Describen cómo las habilidades y conocimientos más complejos se construyen sobre una base sólida de conceptos y destrezas previas. Son secuencias lógicas en la que los pasos se van construyendo unos sobre otros de manera gradual. Cada paso en la progresión se basa en lo aprendido en los pasos anteriores y agrega nuevas capas de conocimiento o habilidad; permitiendo a los estudiantes avanzar y consolidar lo que han aprendido antes de enfrentarse a desafíos más complejos; lo cual implica la construcción de los descriptores de logro de cada competencia de egreso, en donde el dominio de una competencia comprende diversos procesos cognoscitivos que una vez internalizados permiten al sujeto realizar determinadas tareas. Su implementación en el currículo de la medicina veterinaria requiere de un diseño curricular coherente y consistente, evaluación variada y significativa, esto es formativa e integral, así como el fomento del aprendizaje colaborativo y la integración de tecnología educativa, pero sobre todo un trabajo arduo que enlace la parte disciplinaria y la parte de cognoscitiva en los estudiantes que permita el alcance de las competencias de egreso de los estudiantes de Medicina Veterinaria.

Bibliografía

- Bennett, N. (1979). Estilos de enseñanza y progreso de los alumnos. Madrid: Morata. Carretero, M. (Comp.). (1998). Desarrollo y aprendizaje. Buenos Aires: Aique.
- Brown N. J. S., Nagashima S. O., Fu A., Timms M. & Wilson M. A. (2020) framework for analyzing scientific reasoning in assessments, *Educational Assessment*, 15(3), 142-174
- La Comisión Interinstitucional para la Formación de Recursos Humanos para la Salud (CIFRHS), Guía de los criterios esenciales para evaluar planes y programas de estudio aplicable a la licenciatura en medicina veterinaria y zootecnia. Septiembre 2025
- Convenio Andrés Bello [CAB]. (2006). Estudios sobre eficacia escolar en Iberoamérica. 15 buenas investigaciones. Bogotá: CAB.
- Corcoran, T., Mosher, F.A. & Rogat, A. (2019) Learning progressions in science: An evidence based approach to reform. Consortium for Policy Research in Education Report #RR-63. Philadelphia, PA: Consortium for Policy Research in Education.
- Dapino, D., Stella Maris Galván; Antonio Felipe; compilación de Dora Dapino; Stella Maris Galván; Antonio Felipe; ilustrado por Matías Zapata; Marcela Stella. (2021). La integración curricular en Medicina Veterinaria: fundamentos y estrategias para el desarrollo de competencias profesionales. 1a Ed., Rosario: UNR Editora, 2021. ISBN 978-987-702-526.
- Diez de Ultzurrún, A. (Coord.). (2011). El aprendizaje de la lectoescritura desde una perspectiva constructivista. Vol. 1. Actividades para realizar en el aula: textos funcionales y cuentos. Barcelona: Graó.
- Duncan R. G. & Rivet A. E. (2013) Science learning progressions, *Science*, 339(6118), 396-297.



- Duschl, R., Maeng, S. & Sezen, A. (2012) Learning progressions and teaching sequences: A review and analysis. *Studies in Science Education*, 47(2), 123-182.
- Furtak, E. M. (2012) Linking a Learning Progression for Natural Selection to Teachers' Enactment of Formative Assessment. *Journal of Research in Science Teaching*, 49(9) 1181-1210.
- Heritage, M. (2006). Learning Progressions: Supporting Instruction and Formative Assessment. National Center for Research on Evaluation, Standards and Student Testing (CRESST). Washington, DC.: Council of Chief State School Officers. Recuperado de: <http://www.renlearn.co.uk/wp-content/uploads/2014/03/learning-progressions-supporting-instruction-and-formative-assessment.pdf>. Marzo 2025
- Hirschfeld, L., & Gelman, S. (Comp.). (2002). Cartografía de la mente. La especificidad de dominio en la cognición y en la cultura. Barcelona: Gedisa.
- Ibarra Martínez Luis, Rodríguez Aguayo Luis, Tricallotis Campaña Marcos Antonio y Maino Menéndez Mario Rafael. (2004). Caracterización de las actividades del médico veterinario chileno. *Revista Avances en ciencias veterinarias*, 19(1), 3-9.
- Martínez González Sergio, Zepeda García Jesús, Figueroa Morales Rafael, Gómez Danés Alejandro Ángel, Peña Parra Bladimir y Herrera Gallardo María Teresa (2011). Propuesta para la formación pertinente del personal en ciencias veterinarias. *Revista Abanico Veterinario*, 1(2), pp.38-45.
- Mc Cormick, R., & James, M. (1997). Evaluación del curriculum en los centros escolares. Madrid: Morata.
- OIE. (2013). Plan de Estudios Básico de Formación Veterinaria Directrices de la OIE. <https://www.woah.org/app/uploads/2021/03/plan-de-estudios-basico-de-formacion-veterinaria.pdf>. Marzo 2025
- Stevens S., Delgado C. & Krajcik J.S. (2010) Developing a hypothetical multi-dimensional learning progression for the nature of matter, *Journal of Research in Science Teaching*, 47, 687-715.

ANIMALES DE LABORATORIO



Abanico Académico

Investigación en animales de laboratorio

María Isabel Chávez-Ruvalcaba.
Blanca Marisa López-Alvarado.
Lucia Delgadillo-Ruiz.
Verónica Bañuelos-Melero.
Josefina Huerta-García.
Francisca Chávez-Ruvalcaba.





Resumen

La investigación con animales de laboratorio constituye una base fundamental en la ciencia biomédica, al permitir el estudio controlado de procesos fisiopatológicos y terapéuticos, con resultados reproducibles y de valor traslacional, sin embargo, suelen ser limitados debido a: diferencias interespecie, artificialidad y conclusiones parciales. El objetivo de este trabajo es analizar el papel de los animales de laboratorio en la investigación biomédica, enfatizando su relevancia científica, las consideraciones éticas y el marco regulatorio en México. En este contexto, la NOM-062-ZOO-1999 y lineamientos internacionales han promovido la aplicación de los principios de las 3R (reemplazo, reducción y refinamiento), mejorando el bienestar animal mediante el uso de modelos alternativos, la disminución en el número de animales y el perfeccionamiento de procedimientos. Además, los programas de manejo conductual; incluyendo alojamiento social, enriquecimiento ambiental y entrenamiento con refuerzo positivo, aseguran tanto la salud física como psicológica de los animales, incrementando la confiabilidad de los hallazgos. Factores como las diferencias sexuales en la respuesta inmune, las variables ambientales y los riesgos ocupacionales, entre ellos zoonosis y accidentes, subrayan la necesidad de una planeación integral y de medidas de bioseguridad. En conclusión, la experimentación animal seguirá siendo indispensable para el progreso científico, aunque requiere actualización normativa, transparencia y supervisión ética continua para garantizar un uso responsable que equilibre la validez científica con el respeto al bienestar animal.

Palabras clave: Animales de experimentación, laboratorios, investigaciones biomédicas.



Introducción

Los modelos experimentales son una herramienta invaluable en la investigación científica, ofreciendo la capacidad de controlar variables, identificar relaciones causa efecto, permitiendo replicar resultados. Si bien pueden ser costosos, consumir mucho tiempo o pueden en ocasiones no ser aplicables, su contribución es significativa. Para este fin los animales que están expuestos a los experimentos deben ser completamente sanos.

La experimentación animal es hoy una piedra angular de la ciencia médica contemporánea. Los animales de laboratorio son cruciales no solo por la estrecha relación con los investigadores y con las personas que los manejan, los hallazgos obtenidos a través de su estudio benefician tanto a la salud de los humanos como a los propios animales, es por ello que estos animales deben estar en perfectas condiciones gozando de una óptima salud, de lo contrario los resultados podrían ser poco confiables o distorsionados por enfermedades preexistentes al estudio.

Normas básicas para el manejo de animales de laboratorio

En México, el uso de animales de laboratorio está regulado por leyes y normas oficiales. La norma que menciona las especificaciones técnicas para la producción, cuidado y uso de los animales de laboratorio es: NORMA Oficial Mexicana NOM-062-ZOO-1999, establece las especificaciones técnicas para su producción, cuidado y uso, con el objetivo de asegurar la obtención de resultados confiables en la investigación científica, la docencia biomédica y el control de calidad, a la vez que se minimiza el número de animales utilizados, esta norma publicada el 22 de agosto de 2001 en el Diario oficial de la nación, también estimula la obligatoriedad de que las instituciones formen un comité interno para el cuidado y uso de los animales de laboratorio (comité de Ética).

Otras leyes relevantes incluyen la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) en el artículo 1) parte IV menciona la preservación y protección de la biodiversidad y en el artículo 3) en la parte V Biotecnología, menciona que toda aplicación tecnológica que utilice recursos biológicos, organismos vivos o sus derivados para la creación o modificación de productos o procesos para usos específicos. También la Ley General de Vida Silvestre y la Ley Federal de Sanidad Animal, que buscan garantizar el trato humanitario a los animales y asegurar que su uso responsable y ético en fines científicos. El SENASICA (Servicio Nacional de Sanidad e Inocuidad y Calidad Agroalimentaria) organismo administrativo descentralizado de SADER (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural) es la entidad responsable de recopilar y gestionar datos oficiales sobre animales de laboratorio.

Ética en la investigación animal

La investigación en animales de laboratorio ha proporcionado grandes avances. No obstante, ha enfrentado la oposición de movimientos pro-derechos animales, que a



menudo fundamenta sus argumentos en una visión que iguala a hombres y animales.

En México existe una falta de información pública sobre las instituciones que utilizan animales con fines científicos. Datos solicitados al Instituto Nacional de Transparencia, Acceso a la Información y Protección de Datos (INAI), revelan que para el uso de animales de experimentación se han registrado en centros de hospitalización, colegios, hospitales, institutos nacionales, tecnológicos y universidades públicas. Se reportó que el 54% de estas instituciones cuentan con comités de ética y entre 2015 al 2021 se utilizaron un total de 2,112, 786 animales, predominantemente mamíferos.

Desde una perspectiva científica también hay debates sobre la aplicabilidad de los resultados en humanos. Aunque los resultados encontrados en los animales son parcialmente aplicables al hombre, la diferencia cualitativa entre ambas especies es el fundamento que justifica la experimentación animal.

Existe un programa llamado CITI (Collaborative Institutional Training Initiative), es un curso en línea, desarrollado por voluntarios que brinda material educativo sobre protección no solo de sujetos humanos en investigaciones biomédicas y de conducta si no buenas prácticas clínicas, conducta responsable de la investigación y el trato humanitario a animales de laboratorio. Aunque es iniciativa del Fred Hutchinson Cancer Research Center y la Universidad de Miami, gran parte de su contenido ha sido adaptado y traducido para investigadores en América latina. Es crucial señalar que las lagunas en la regulación ética de la experimentación en algunos países pueden llevar a investigadores a buscar realizar estudios prohibidos en su país de origen.

Ventajas y limitaciones de los modelos experimentales para el estudio de enfermedades infecciosas

Cardona P.J. en el 2023 menciona la admiración por el control de parámetros en modelos animales, pero también la sensación de artificialidad que pueden generar. Es importante reconocer los límites de estos modelos y aplicar los principios de las 3R (reemplazo, refinamiento y reducción) para minimizar el uso de animales. Un ejemplo de estudio por demás importante es el modelo de meningoencefalitis en conejos, demostrando ser eficaz y reproducible, al contribuir con el tratamiento de la meningitis neumocócica en humanos.

Las principales limitaciones de los modelos de experimentación animal incluyen:

- ☐ **Artificialidad:** No siempre reflejan con precisión los procesos fisiopatológicos humanos.
- ☐ **Vacío intelectual:** A menudo son percibidos como demasiado "básicos" por los clínicos y demasiado "aplicados" por los investigadores básicos, dificultando su integración en la práctica clínica.



- ❑ **Imposibilidad de replicar ciertos procesos humanos:** Por ejemplo, en el caso de la tuberculosis, los ratones no pueden lograr la esterilización de *Mycobacterium tuberculosis* en sus tejidos, lo que limita la evaluación de vacunas contra la tuberculosis.
- ❑ **Uso de animales:** Aunque se aplican los principios de las 3R (reemplazo, refinamiento y reducción), sigue siendo necesario minimizar el uso de animales y buscar alternativas *in vitro* siempre que sea posible.
- ❑ **Resultados parciales:** En muchos casos, los resultados suelen ser indicios parciales que requieren interpretación, no conclusiones claras y definitivas.
- ❑ **Susceptibilidad diferente:** Los animales pueden tener una susceptibilidad distinta a las enfermedades en comparación con los humanos, lo que limita la extrapolación de los resultados.

La selección del modelo experimental adecuado depende de su capacidad para responder preguntas específicas, minimizar el uso de animales y reflejar de forma fiable los procesos humanos. Es necesario considerar varios aspectos que son clave para el desarrollo adecuado de la experimentación, es clave considerar:

1. **Conocimiento de la fisiopatología humana:** El investigador debe comprender a fondo el estudio del proceso fisiopatológico en humanos antes de diseñar un modelo experimental.
2. **Validación clínica:** El modelo debe demostrar correlación con el proceso que se busca imitar en humanos, como el caso del modelo de meningoencefalitis en conejos, validado por su utilidad en el tratamiento de meningitis neumocócica.
3. **Reproducibilidad y eficacia:** El modelo debe ser reproducible y eficaz, utilizando el menor número de animales posible para cumplir con los objetivos del estudio.
4. **Especie animal y parámetros específicos:** Es fundamental seleccionar la especie animal adecuada, la vía de inóculo, el período de estudio y los parámetros a analizar, asegurando su relevancia clínica.
5. **Principios de las 3R:** Se debe priorizar el reemplazo (usar modelos alternativos como *in vitro*), refinamiento (mejorar los procedimientos para minimizar el sufrimiento) y reducción (usar el menor número de animales).

El refinamiento en la experimentación animal se enfoca en mejorar los procedimientos para minimizar el sufrimiento y optimizar la calidad de los resultados, buscando un equilibrio entre la validez científica y los principios éticos de las 3R. Esto se logra mediante:

- ❑ **La Selección adecuada de la especie animal:** Elegir la especie más apropiada para el estudio, considerando su relevancia para el problema clínico.



- ❑ **La Optimización de la vía de inóculo y parámetros:** Determinar la vía de inoculación, el período de estudio y los parámetros específicos que se analizarán, asegurándose de que sean los más adecuados para resolver el problema.
- ❑ **La Reducción del número de animales:** Diseñar modelos altamente reproducibles y eficaces para utilizar el menor número de animales posible.
- ❑ **La Finalidad específica:** Definir claramente los objetivos del estudio y los parámetros que se investigarán para asegurar su utilidad y relevancia.

La importancia de conocer y controlar las variables ambientales en animales de laboratorio

Importante resulta tener en consideración los factores físicos y químicos del entorno ya que puede influir significativamente en el comportamiento y la fisiología de los animales de laboratorio. El control y registro de las variables es vital para asegurar la fiabilidad de los resultados de la investigación.

Los animales utilizados en investigación, docencia y experimentación son organismos complejos que reaccionan a su entorno. Ya sea que vivan en un ambiente interno estrictamente controlado o en un entorno externo sujeto a cambios climáticos, los animales, a través de sus procesos naturales responderán a diversos factores estresantes de su entorno. Pequeños cambios en su entorno vital y experimental, aunque sean sutiles puede generar resultados confusos y variables. Los efectos del entorno pueden no ser fácilmente perceptibles para el investigador.

El uso de animales, está regido por regulaciones y directrices políticas, que detallan las expectativas de cuidado y uso para diversas especies y delinean las variables ambientales comunes, como los requisitos de alojamiento, saneamiento, alimentación, agua, iluminación y temperatura. El bienestar animal se correlaciona directamente con la idoneidad de las diversas variables ambientales, ya sean físicas, nutricionales o de enriquecimiento social. Las condiciones ambientales deben minimizar el estrés, las enfermedades, la mortalidad, las lesiones y los problemas de comportamiento. El control de variables ambientales, junto con un manejo adecuado, es crucial para el uso adecuado y el bienestar de los animales.

El entorno animal consta tanto del macroambiente como del microambiente. El microambiente se refiere al recinto primario de un animal, que incluye el área inmediata que lo rodea, ya sea en una acuario, jaula, corral o establo y es el entorno en contacto directo con el animal.



Enfoque integral sobre el bienestar psicológico animal en centros de investigación

El cuidado animal en centros de investigación ha evolucionado notablemente en las últimas dos décadas, con un énfasis creciente en el bienestar psicológico de los animales. Este cambio se debe a la comprensión de que los animales poseen necesidades conductuales específicas que, si no se satisfacen, pueden afectar negativamente su salud y su utilidad en la investigación. Por ello, los programas de cuidado animal ahora incluyen el manejo del comportamiento como un componente clave para promover una cultura de cuidado en estas instituciones.

El manejo del comportamiento es un enfoque integral que busca mejorar el bienestar de los animales en cautiverio. Se basa en la comprensión de la conducta natural de cada especie y combina varios elementos para lograr sus objetivos de forma más efectiva que si se aplicaran aisladamente. Sus componentes principales son:

- **Alojamiento social:** Es fundamental, ya que la mayoría de los animales de laboratorio son especies sociales. Proporcionar interacciones sociales adecuadas en grupos o parejas compatibles permite a los animales expresar comportamientos naturales (el acicalamiento, el juego y la crianza) y reduce la incidencia de conductas anormales. Especialmente en animales jóvenes.
- **Enriquecimiento ambiental:** Mejora el bienestar ofreciendo oportunidades específicas de cada especie para ejercitarse, manipular objetos y enfrentar desafíos cognitivos. Se clasifica en categorías como enriquecimiento alimentario, físico, sensorial, cognitivo y ocupacional.
- **Entrenamiento animal:** Particularmente el **entrenamiento con refuerzo positivo (TRP)**, donde los animales realizan una conducta deseada voluntariamente a cambio de una recompensa. Se prefiere al refuerzo negativo y se aplica a diversas especies.
- **Diseño de instalaciones:** Contribuye a crear entornos adecuados para las necesidades conductuales.

La evaluación del comportamiento es crucial para identificar problemas, determinar tratamientos y evaluar su eficacia. Esto puede implicar la recopilación de datos cuantitativos o métodos menos rigurosos pero sistemáticos.

Importancia y regulación de los programas de manejo del comportamiento residen en que representan mejoras significativas en el cuidado animal, ya que optimizan el bienestar psicológico y reducen el estrés en los sujetos de investigación. Debido a su relevancia, los centros de investigación están contratando a más especialistas en comportamiento y bienestar animal, o asignando estas responsabilidades a otros miembros del personal.



Además, estos programas son exigidos por agencias reguladoras y enfatizados en estándares profesionales a nivel mundial. Organizaciones internacionales y leyes federales, como la Ley de Bienestar Animal (AWA) en Estados Unidos, que obligan a las instituciones a desarrollar planes para promover el bienestar psicológico de los animales, incluyendo el enriquecimiento ambiental para todas las especies y el ejercicio para perros. El cumplimiento de estos estándares es vital para las instalaciones que buscan acreditación o reciben fondos federales.

En resumen, el manejo del comportamiento es una estrategia esencial y regulada para asegurar que los animales de investigación no solo estén físicamente sanos, sino que también gocen de un adecuado bienestar psicológico, permitiéndoles expresar sus comportamientos naturales y reduciendo el estrés.

Diferencias sexuales para una perspectiva científica

Factores como la edad, el sexo o factores eco-sociales tienen un impacto considerable en la biología de humanos y animales, afectando en la presencia, resistencia o respuesta a enfermedades. Esto influye en la esperanza de vida y por ende, en la respuesta de los animales de investigación sometidos a experimentos que utilizan fuentes de antígenos, como aquellos infectados con algún patógeno en particular. Los sistemas inmunitario y endocrino tienen una influencia muy importante en estas diferencias.

Muchos genes importantes para la respuesta inmune residen en el cromosoma X (los que codifican para receptores Toll, receptores de citoquinas y otros implicados en la actividad de células inmunes T y B). Considerando que el cromosoma X tiene aproximadamente 1100 genes y el cromosoma Y tiene 100, se hace evidente la diferencia de presencia de estos (XX en mujeres XY en hombres) en la respuesta inmunitaria.

Es interesante que, por ejemplo, las mujeres tienen dos cromosomas X, entonces uno de ellos puede silenciar al otro en caso de tener genes defectuosos. Esto no ocurre en los hombres, lo que puede dar lugar a enfermedades graves como la α -gammaglobulinemia por mutación en la tirosina quinasa BTK, o la inmunodeficiencia combinada grave por mutación en la cadena gamma del receptor de la IL-2 entre otras ya que no posee un segundo cromosoma X que actúe como respaldo, provocando cuadros muy graves en hombres. Otro dato importante es la presencia exclusiva en el cromosoma X de micro RNA, son pequeños RNA bicatenarios que regulan respuestas inmunitarias y que principalmente conllevan a la elevación de las células inmunitarias que tiene que ver con la elevación de células inflamatorias.

Las hormonas también contribuyen en que la respuesta inmune entre hombres y mujeres sea diferente e incluso adaptable a diferentes condiciones o etapas de vida como el embarazo o la lactancia. Por ejemplo, los estrógenos tienen un efecto estimulante en la respuesta inmune, mientras que los andrógenos, al contrario, la inhiben.



Por lo tanto, según la información disponible, las mujeres muestran una mayor respuesta tanto innata como adaptativa frente a antígenos. Se produce una reacción inflamatoria inicial y una mayor producción de anticuerpos. Sin embargo, en la homeostasis del proceso, las mujeres pueden mantener respuestas elevadas por más tiempo, lo que podría originar patologías inmunes. Por el contrario, los hombres pueden tener una respuesta más baja, con mayor riesgo de persistencia de un virus, por ejemplo.

En conclusión, las mujeres tendrían menor afectación en infecciones virales, bacterianas y parasitarias, por el mismo motivo, una mayor respuesta a las vacunas, pero como contrapartida, sufren más enfermedades autoinmunes. Con estos datos podemos relacionar la respuesta de animales (machos y hembras) y tener presente como el sexo influencia la respuesta inmunitaria con el objetivo de analizar los datos que arrojen en la investigación en animales.

Otro aspecto muy importante en la investigación animal, es el dimorfismo sexual, Duncan *et al*: (2021) mencionan la agudeza visual (AV), aunque numerosos estudios han encontrado que los hombres tienen una AV más fina que las mujeres, la agudeza visual puede variar. Dentro de la especie de Saltamontes las diferencias sugieren que las hembras pueden tener una visión más fina que los machos si:)son más grandes que los machos, o 2) necesitan una visión más fina para detectar o discriminar entre machos. Se estimó que el ángulo interommatidial (es una medida anatómica de AV) en tres especies de Saltamontes (*Arphia pseudonietana*, *Dissosteira carolina*, *Spharagemon equule*; total n=98) de ala de banda en las hembras son el sexo más grande y probablemente interpretan señales visuales, en contraste con muchos insectos voladores diurnos donde los machos tienen una visión más fina para adquirir pareja. Con esto, demuestran un dimorfismo sexual sesgado por las hembras en la agudeza, dado el número de especies en las que las hembras son más grandes que los machos y la variabilidad de los comportamientos de apareamiento entre los taxones.

Prevención de riesgos laborales en trabajo con animales de laboratorio

En los laboratorios de investigación donde se trabaja con animales, pueden presentarse diversos riesgos que afectan a quienes los manejan, ya sea trabajadores de limpia, investigadores o estudiantes. Estos riesgos pueden derivar, por ejemplo, en:

- ☐ Accidentes: Como caídas, cortes, quemaduras (térmicas o químicas). Intoxicaciones o incendios.
- ☐ Enfermedades profesionales: Provocadas por la exposición continua a contaminantes químicos, físicos o biológicos.

Aunque la mayoría de las normas y recomendaciones buscan prevenir estos riesgos, desafortunadamente, aún persisten a pesar de su cumplimiento.

Los organismos patógenos, incluyendo los parásitos presentes en los animales domésticos, representa un factor determinante en la salud pública, ya que estos pueden



transmitirse del animal al hombre provocando un periodo patogénico y enfermedad en el huésped donde se aloje.

Patógenos que pueden presentarse en animales de laboratorio

Dentro de los nematodos, *Syphacia obvelata* (*S. obvelata*), *Syphacia muris* (*S. muris*) y *Aspicularis tetráptera* (*A. tetráptera*) son las especies más prevalentes en ratas y ratones. Los machos tienden a estar más parasitados que las hembras. Su erradicación es difícil, ya que los huevos contaminan los lechos, alimentos, manos del cuidador, e incluso pueden flotar en el ambiente y sobrevivir varias semanas en las jaulas. A pesar de ello debe tratar de erradicarse, puesto que la parasitación por estas especies, según se ha ratificado en diversos estudios genera cambios en las respuestas inmunes del huésped, la respuesta e incidencia de diabetes mellitus en roedores diabéticos.

Posibles enfermedades causadas por el contagio de animales de laboratorio

Considerando que la mayor parte de animales de investigación son mamíferos y de estos predominantemente murinos, abordaremos enfermedades que estos pueden contagiar al humano, convirtiéndose por tanto en zoonosis.

Los hantavirus son virus ARN del género *Orthohantavirus*, que se transmiten por roedores de la familia Muridae. Causa fiebre hemorrágica con síndrome renal y síndrome pulmonar, son transmitidos al hombre por la inhalación de heces, orina y saliva aerosolinizadas. Hasta ahora en México no se han reportado casos en humanos, aunque las condiciones ambientales son muy similares a Centroamérica y Estados Unidos, sin embargo, en estudios realizados en 3862 roedores pertenecientes a 82 especies evaluados sistemáticamente a nivel estatal y genotipos desde 1999 hasta 2017 revelaron que 392 individuos que representan 43 especies de roedores fueron seropositivos, y la seroprevalencia varió de 0% a 69:22%. Se han descrito siete genotipos de hantavirus en México, tres de las cuales son potencialmente zoonóticos. Según la distribución de los hospedadores, 16 genotipos podrían estar circulando en México, de estos representan un riesgo para la salud pública (por medio de la viruta de madera que se usa como cama en las jaulas podría trasladarse excretas de murinos infectados).

Syphacia muris presente en murinos de los bioterios es una enfermedad zoonótica. Una de las principales causas que contribuyen a la dispersión de este parásito es la poca higiene dentro de los bioterios y el excesivo número de ratas en un espacio determinado, características que afortunadamente no prevalecen dentro de las instalaciones de la Universidad. Es importante comentar que la mayoría de la cama de las ratas que es viruta de madera se obtiene de algunas carpinterías donde, al estar en espacios abiertos puede haber presencia de ratas del sistema de alcantarillado, que pueden cohabitar y defecar en esta viruta. Al ser transportada a los bioterios puede contaminar a los animales,



considerando que es una enfermedad parasitaria altamente contagiosa.

Las variables en animales de experimentación son más fáciles de medir por el aspecto de que no son afectados por condiciones de pensamiento o psiquiátricas.

Para la investigación se han creado Ratones centinelas, se han desarrollado vacunas y nuevas terapias celulares, para inmunoterapia y cáncer.

Es fundamental establecer acuerdos para la transparencia en la experimentación animal, se recomienda actualizar leyes y reglamentos para el uso de animales de investigación, ya que la transparencia genera confianza pública ya que al ser abiertos se comparten datos sobre cómo se usan los animales para que el público pueda entender mejor porqué y como se realizan las investigaciones, disipando mitos y preocupaciones, ya fomentar un dialogo más informado sobre la ética de la investigación. Además, la transparencia puede promover mejores prácticas dentro de los laboratorios, ya que al saber que sus métodos pueden ser escrutados, los investigadores y las instituciones se esforzaran por cumplir con los más altos estándares éticos y de bienestar animal.

Conclusiones

La actualización de leyes y reglamentos es importante porque el conocimiento científico, las mejores prácticas de bienestar animal y las expectativas éticas de la sociedad están en constante evolución. Normativas claras y modernas aseguran que la investigación sea más humana y responsable, incorporando nuevas tecnologías y métodos que puedan, por ejemplo, reducir el número de animales o minimizar el sufrimiento.

Bibliografía

- Balls M. Replacement of animal procedures: alternatives in research, education and testing. *Lab Anim.* 1994; 28(3):193-211.
<https://doi.org/10.1258/002367794780681714>
- Balls, M., Festing, M. F. W., & Flecknell, P. A. (1994). The three Rs: developments in laboratory animal science. *Laboratory Animals*, 28, 193-231.
<https://doi.org/10.1177/026119299502300614>
- Bloomsmith M.A., Perlman J.E., Hutchinson E., Sharpless M., Weichbrod R.H., Thompson G.A., Norton J.N. (2018). Programas de Gestión del comportamiento para promover el bienestar de los animales de laboratorio 2ª edición, Taylor & Francis Group.
<https://doi.org/10.1201/9781315152189-5>
- Cabellos, C., Martínez-Lacasa, J., Martos, A., Tubau, F., Fernández, A., Viladrich, P. F. (1995). Influence of dexamethasone on efficacy of ceftriaxone and vancomycin therapy in experimental pneumococcal meningitis. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, 39,



2158-2160. <https://doi.org/10.1128/aac.39.9.2158>

- Cardona PJ. Ventajas y limitaciones de los modelos animales experimentales para el estudio de enfermedades infecciosas. *Enferm Infecc Microbiol Clin*. (2003 agosto-septiembre); 21(7); 327-8. [https://doi.org/10.1016/s0213-005x\(03\)72957-7](https://doi.org/10.1016/s0213-005x(03)72957-7).
- Cooke, A., Tonks, P., Jones, FM, O'SHEA, HELEN, Hutchings, P. y Fulford, AJ (1999). La infección por *Schistosoma mansoni* previene la diabetes mellitus insulínica dependiente en ratones diabéticos no obesos. *Inmunología parasitaria*, 21 (4), 169-176. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3024.1999.00213.x>
- Duncan AB, Salazar BA, Garcia SR, Brandley NC. A sexual Dimorphism in the Spatial Vision of North American Band-Winged Grasshoppers. *Integr Org Biol*. (2021) Apr 7; 3(1):obab008. <https://doi.org/10.1093/iob/obab008>.
- Frias-Alvarez P., Ortiz-Millan G. Use of animals for scientific and educational purposes by Mexican institutions. *Gac Med Mex* (2024); 160(2):202-210. English. <https://doi.org/10.24875/GMM.24000067>. PMID 39116848.
- Hogan C.M., Norton J. N. y Reynolds R.P. Factores ambientales: Macroambiente versus microambiente. 2018. *Gestión de programas de cuidado y uso de animales en investigación, educación y pruebas*. 2a edición. Taylor & Francis Group, LLC. <https://doi.org/10.1201/9781315152189-20> PMID 29787210
- Klein SL, Flanagan KL, Sex differences in immune responses. *Nat Rev Immunol* (2016) Oct; 16(10):626-38. <https://doi.org/10.1038/nri.2016.90>.
- Litewka S., Goodman K., Braunschweiler Y. P., El programa CITI: una alternativa para la capacitación en ética de la investigación en América Latina. (2008) *Acta Bioeth*; 14(1):54-60. <https://doi.org/10.4067/s1726-569x2008000100007>
- Orme, I. M. The search for new vaccines against tuberculosis (2001). *Journal of Leukocyte Biology*, 70, 1-10. <https://doi.org/10.1189/jlb.70.1.1>
- Pennell LM, Galligan CL, Fish EN. Sex affects immunity. *J Autoimmun*. (2012) May; 38(2-3):J282-91. <https://doi.org/10.1016/j.jaut.2011.11.013>.
- Ribes, S., Doménech, A., Cabellos, C., Tubau, F., Liñares, J., Viladrich, P. F. (2003). Meningitis experimental producida por una cepa de *Streptococcus pneumoniae* serotipo 23F con elevada resistencia a cefalosporinas. *Enfermedades Infecciosas y Microbiología Clínica*, 21, 329-333. [http://doi.org/10.1016/S0213-005X\(03\)72958-9](http://doi.org/10.1016/S0213-005X(03)72958-9)



-
- Viguera-Galván A.L., Lopez-Perez A.M., García-Peña G.E., Rico-Chávez O., Sarmiento-Silva R.E. y Suzán G. Situación actual y perspectivas de los hantavirus en México. *Virus* 2019, 11 (7), 642. <https://doi.org/10.3390/v11070642>
- Viladrich, P. F., Cabellos, C., Pallarés, R., Tubau, F., Martínez-Lacasa, J., & Linares, J., et al. (1996). High doses of cefotaxime in treatment of adult meningitis due to *Streptococcus pneumoniae* with decreased susceptibilities to broad-spectrum cephalosporins. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, 40, 218-220. <https://doi.org/10.1128/AAC.40.1.218>

INFORMACIÓN DE LOS AUTORES



Abanico Académico



Capítulo 1.

Efectos terapéuticos de la miel de abeja en la cicatrización de heridas: una revisión desde la perspectiva neurofarmacológica.

Ramona Guadalupe Hernández-Medina¹

Fidel Avila-Ramos²

Ma. Eugenia Barreto-Arias³

Montserrat Fernández-Moya³

Elena Franco-Robles²

Osmar Antonio Jaramillo-Morales³

¹Maestría en Biociencias, División de Ciencias de la Vida, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato. rg.hernandezmedina@ugto.mx

²Departamento de Veterinaria y Zootecnia, División de Ciencias de la Vida, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato. ledifar@ugto.mx <https://orcid.org/0000-0002-7766-6682>, e.francoRobles@ugto.mx, <https://orcid.org/0000-0003-0345-7578>.

³Departamento de Enfermería y Obstetricia, División de Ciencias de la Vida, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato. mbarreto@ugto.mx, fernandez.m@ugto.mx, <https://orcid.org/0000-0003-2145-9753>, oa.jaramillo@ugto.mx, <https://orcid.org/0000-0002-5325-3760>.



Capítulo 2.

Fitofármacos con efecto analgésico en medicina veterinaria.

Osmar Antonio Jaramillo-Morales¹

Luis Manuel Orozco Castellanos²

Nereida Violeta Vega-Cabrera¹

Fidel Avila-Ramos³

Josué Vidal Espinosa-Juárez⁴

Gerardo Ruvalcaba-Palacios¹

¹Departamento de Enfermería y Obstetricia, División de Ciencias de la Vida, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato. oa.jaramillo@ugto.mx, <https://orcid.org/0000-0002-5325-3760>; nv.vega@uaslp.mx, <https://orcid.org/0000-0003-3449-3774>; grualcabap@ugto.mx, <https://orcid.org/0000-0001-9206-4439>

²Departamento de Farmacia, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato. Dirección Noria Alta S/N, C.P. 36050, orozcoz@ugto.mx, <https://orcid.org/0000-0002-1621-9539>

³Departamento de Veterinaria y Zootecnia, División de Ciencias de la Vida, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato. ledifar@ugto.mx, <https://orcid.org/0000-0002-7766-6682>

⁴Escuela de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Chiapas. josue.espinosa@unach.mx, <https://orcid.org/0000-0002-8123-6343>



Capítulo 3.

Zoonosis parasitarias de perros y gatos: el vínculo silencioso entre mascotas y humanos

Socorro M. Salgado-Moreno¹

Carlos A. Carmona-Gasca¹

Sergio Martínez-González¹

Ruth B. Vironchi-Lujan²

Mario Alberto Macías-Flores³

¹Universidad Autónoma de Nayarit, Unidad Académica de Medicina Veterinaria, Carretera Chapalilla-Compostela Km 3.1.

socorro.salgado@uan.edu.mx <https://orcid.org/0000-0002-1267-5385>

carmonagasca@uan.edu.mx <https://orcid.org/0000-0002-7587-0946>

sergio.martinez@ua.edu.mx <https://orcid.org/0000-0001-9187-6136>

²Unidad de Patología Vida Veterinaria Av. Guadalupe Victoria 443 A3 Heriberto Casas, C.P. 63080, Tepic, Nayarit. admivironchio8@gmail.com

³Universidad de Guanajuato, Doctorado en Biociencias, Campus Irapuato – Salamanca, Carretera Irapuato-Silao km 9, CP 36500 Irapuato, Guanajuato, México. ma.maciasflores@ugto.mx, <http://orcid.org/0000-0001-9917-5545>



Capítulo 4.

Leptospirosis, avances de la enfermedad y del agente causal.

Luz Olivia Castillo Sánchez¹

Alejandro de la Peña Moctezuma¹

Gerardo Uriel Bautista Trujillo²

Carlos Enrique Ibarra Martínez²

Sergio Martínez González³

Bladimir Peña Parra¹

Carlos Alfredo Carmona Gasca³

¹Grupo de investigación en Leptospira y leptospirosis, Centro de Enseñanza, Investigación y Extensión en Producción Animal en Altiplano, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Nacional Autónoma de México, C.P. 76795, Tequisquiapan, México.

olicastillos@yahoo.com.mx, <https://orcid.org/0000-0003-1758-1959>

delapema@unam.mx, <https://orcid.org/0000-0001-9137-2333>

²Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia-Campus II, Universidad Autónoma de Chiapas, Tuxtla-Gutiérrez, Chiapas, México.

gerardo.trujillo@unach.mx, <https://orcid.org/0000-0001-5685-509X>

cibarra@unach.mx, <https://orcid.org/0000-0002-9712-5648>

³Unidad Académica de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma de Nayarit, Km 3.5 Carretera Compostela – Chapalilla, Compostela, Nayarit, México CP 63700.

sergio.martinez@uan.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0002-4916-0967>

jbladimir@uan.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0002-5551-9411>

carmonagasca@uan.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0002-7587-0946>



Capítulo 5.

Algunas plantas de importancia en la clínica veterinaria: generalidades y protocolo terapéutico.

Carlos Omar De la Cruz Moreno¹

Juan José Fernando Borrayo González¹

Sergio Martínez González¹

Fidel Avila Ramos²

Carlos Alfredo Carmona Gasca¹

Juan Antonio Hernández Ballesteros¹

¹Universidad Autónoma de Nayarit, Unidad Académica de Medicina Veterinaria, Carretera Chapalilla-Compostela Km 3.1.

carlosdelacruz@uan.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0002-4612-5410>

fernando.borrayo@uan.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0003-2599-637X>

sergio.martinez@uan.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0002-4916-0967>

carmonagasca@uan.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0002-7587-0946>

antonio.hernandez@uan.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0001-8628-7919>

²Departamento de Veterinaria y Zootecnia, División de Ciencias de la Vida, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato.

ledifar@ugto.mx, <https://orcid.org/0000-0002-7766-6682>



Capítulo 6.

Complejo respiratorio bovino: un enfoque desde los virus involucrados.

Edith Rojas-Anaya¹

Sergio Iván Román-Ponce¹

Francisco Castillo-Rangel.²

Israel Daniel Ricardo González³

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental La Campana, Chihuahua, México. Km 33.3 Carretera Chihuahua – Ojinaga. CP 32910, Aldama, Chihuahua. edith_ra23@hotmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4553-3914>, roman.sergio@inifap.gob.mx, <https://orcid.org/0000-0002-6704-6578>

²Facultad de Zootecnia y Ecología. Universidad Autónoma de Chihuahua. Periférico Francisco. R. Almada Km 1, Pavis Borunda, CP 31453 Chihuahua, Chih. fcastillor@uach.mx, <https://orcid.org/0000-0002-1894-067X>

³Departamento de Medicina y Zootecnia en Rumiantes, FMVZ-UNAM. Dirección completa: Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, Av. Universidad 3000, CP 0451. dricardo007@hotmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2022-2738>



Capítulo 7.

Evaluación de la respuesta inmune de la vacuna de subunidades PLD y CP40 frente a *Corynebacterium pseudotuberculosis* biovar ovis.

Roberto Montes-de-Oca-Jiménez ^{1,2}

María Carla Rodríguez Domínguez¹

Martha Elba Ruiz-Riva-Palacio ²

Pilar Eliana Rivadeneira-Barreiro ³

Pablo Cleomenes Zambrano-Rodríguez ³

Fátima Ingrid López Vivas ¹

¹Centro de Investigación y Estudios Avanzados en Salud Animal. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma del Estado de México. km 15.5 Carretera Panamericana Toluca-Atlacomulco, Toluca, Estado de México, México, C.P. 50200. romojimenez@yahoo.com, ralerodriguez4@gmail.com

²Plantel Sor Juana Inés de la Cruz. UAEM Amecameca. Universidad Autónoma del Estado de México. México- C.P. 56900. meruizr@uaemex.mx

³Departamento de Veterinaria. Facultad de Ciencias Veterinarias. Universidad Técnica de Manabí. 130105. Portoviejo, Ecuador.



Capítulo 8.

Análisis de la metagenómica y resistencia antimicrobiana de *Corynebacterium pseudotuberculosis*.

Dan Israel Zavala-Vargas ^{1,2}

Roberto Montes-de-Oca-Jiménez ^{1,3}

Martha Elba Ruiz-Riva-Palacio ³

¹Centro de Investigación y Estudios Avanzados en Salud Animal, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma del Estado de México. Km 15.5 Toluca. Autopista de cuota. Toluca Atlacomulco. CP 50200. Toluca, Estado de México, México.

danisraelz@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8821-5900>,

rmontesdeocaj@uaemex.mx, <http://orcid.org/0000-0002-0282-2660>

²Hospital General de Chimalhuacán, IMSS-Bienestar, Av. Del Peñón Mz. 400 Lt. 1 Barrio Canteros, Chimalhuacán, Edo. México, México C.P. 56330.

danisraelz@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8821-5900>.

³Plantel Sor Juana Inés de la Cruz, Universidad Autónoma del Estado de México. Amecameca de Juárez C.P. 56900, Estado de México, México,

rmontesdeocaj@uaemex.mx*, <http://orcid.org/0000-0002-0282-2660>

meruizr@uaemex.mx, <http://orcid.org/0000-0001-7653-3231>



Capítulo 9.

Análisis de los mecanismos de resistencia antimicrobiana en *Corynebacterium pseudotuberculosis*.

Dan Israel Zavala-Vargas ^{1,2}

Roberto Montes-de-Oca-Jiménez ^{1,3}

Martha Elba Ruiz-Riva-Palacio³

Pilar Eliana Rivadeneiro-Barreiro⁴

Pablo Cleomenes Zambrano-Rodríguez⁴

Pedro Sánchez Aparicio¹

¹Centro de Investigación y Estudios Avanzados en Salud Animal, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma del Estado de México. Km 15.5 Toluca. Autopista de cuota. Toluca Atlacomulco. CP 50200. Toluca, Estado de México, México.

danisraelz@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8821-5900>

rmontesdeocaj@uaemex.mx, <http://orcid.org/0000-0002-0282-2660>

psanchezap@uaemex.mx, <https://orcid.org/0000-0002-6511-6595>.

²Hospital General de Chimalhuacán, IMSS-Bienestar, Av. Del Peñón Mz. 400 Lt. 1 Barrio Canteros, Chimalhuacán, Edo. México. CP 56330, danisraelz@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8821-5900>.

³Plantel Sor Juana Inés de la Cruz, Universidad Autónoma del Estado de México. Amecameca de Juárez C.P. 56900, Estado de México, México.

rmontesdeocaj@uaemex.mx*, <http://orcid.org/0000-0002-0282-2660>

meruizr@uaemex.mx, <http://orcid.org/0000-0001-7653-3231>

⁴Departamento de Veterinaria. Facultad de Ciencias Veterinarias. Universidad Técnica de Manabí. 130105. Portoviejo, Ecuador, dr

pilar.rb26@hotmail.com, , <https://orcid.org/0000-0003-1921-0967>,

pablozambrano@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3496-881>



Capítulo 10.

Identificación de *Escherichia coli* O157:H7 productora de toxina Shiga por PCR en rumiantes.

Mónica Silva-Vega^{1,2}

Lucía Delgadillo-Ruiz³

Perla Ivonne Gallegos-Flores³

Carlos Meza-López²

Benjamín Valladares-Carranza⁴

Rómulo Bañuelos-Valenzuela²

¹Comité de Investigación del Hospital General “Dr. José Haro Ávila”, Carretera Fresnillo-Valparaíso Km 3.45, Centro, C.P. 99000 Fresnillo, Zac. Fresnillo, Zacatecas, México. msilva@hotmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3276-7519>

²Unidad Académica de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma de Zacatecas. Kilómetro 31.5 Carretera Panamericana, Zacatecas Fresnillo, C.P: 98500 Gral. Enrique Estrada, Zacatecas, México. romulob@uaz.edu.mx, <http://orcid.org/0000-0001-9298-0840>; carmezlop@yahoo.com.mx, <https://orcid.org/0000-0002-6170-5464>

³Unidad Académica de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Zacatecas, Av. Preparatoria S/N Col. Agronómica, Zacatecas, Zacatecas C.P. 98600, México. luciadelgadillo@uaz.edu.mx, <http://orcid.org/0000-0002-6640-2753>; ivonne_gf@uaz.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0002-3247-568X>

⁴Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. Centro de Investigación y Estudios Avanzados en Salud Animal. Universidad Autónoma del Estado de México. Ixtlahuaca de Rayón - Toluca 110, Estado de México, México Toluca de Lerdo, Estado de México, México. benvac2014@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0306-3560>



Capítulo 11.

La fibra dietética sobre la salud intestinal en el pollo de engorda: función digestiva y aplicaciones en nutrición aviar.

Mario Alberto Macías-Flores¹

María Guadalupe Herrera-Hernández²

Osmar Antonio Jaramillo-Morales³

Carlos Omar de la Cruz-Moreno⁴

Carlos Alfredo Carmona-Gasca⁴

Sergio Martínez González⁴

Fidel Avila-Ramos⁵

¹Universidad de Guanajuato, Doctorado en Biociencias, Campus Irapuato – Salamanca, Carretera Irapuato-Silao km 9, CP 36500 Irapuato, Guanajuato, México.
ma.maciasflores@ugto.mx, <http://orcid.org/0000-0001-9917-5545>

²Campo Experimental Bajío- INIFAP. Carretera Celaya-San Miguel de Allende, km 6.5. C. P. 38110, Celaya, Guanajuato.
herrera.guadalupe@inifap.gob.mx, <https://orcid.org/0000-0002-8039-1042>

³Departamento de Enfermería y Obstetricia, División de Ciencias de la Vida, Universidad de Guanajuato, Ex Hacienda El Copal, Km 9 Carretera Irapuato-Silao, Apartado Postal 311, Irapuato, Guanajuato 36500, México. oa.jaramillo@ugto.mx, <https://orcid.org/0000-0002-5325-3760>

⁴Unidad Académica de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma de Nayarit, Km 3.5 Carretera Compostela – Chapalilla, Compostela, Nayarit, México CP 63700.
carlosdelacruz@uan.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0002-4612-5410>
carmonagasca@uan.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0002-7587-0946>
sergio.martinez@uan.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0002-4916-0967>

⁵Universidad de Guanajuato, Departamento de Veterinaria y Zootecnia, Universidad de Guanajuato. Carretera Irapuato-Silao km 9, CP 36500 Irapuato, Guanajuato, México. ledifar@ugto.mx, <https://orcid.org/0000-0002-7766-6682>



Capítulo 12.

Manejo de la garrapata *Rhipicephalus microplus* en las unidades de producción de bovinos.

Oscar Guadalupe Barrón-Bravo¹

César Andrés Ángel-Sahagún²

Ricardo Avilés-Ruiz¹

Pedro Mendoza-de Gives³

Juan Samuel Alcalá-Rico¹

Maya-Cruz Nely Amairani⁴

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro de Investigación Regional Noreste, Campo Experimental Las Huastecas, Carretera Tampico-Mante Km 55, CP 89610, Altamira, Tamaulipas, México. barron.oscar@inifap.gob.mx, <https://orcid.org/0000-0002-3686-5706>; aviles.ricardo@inifap.gob.mx, <https://orcid.org/0000-0002-2143-5543>; alcala.juan@inifap.gob.mx, <https://orcid.org/0000-0003-2530-5639>

²Universidad de Guanajuato, División de Ciencias de la Vida, Departamento de Veterinaria y Zootecnia, Carretera Irapuato-Silao Km 9, CP 36500, Irapuato, Guanajuato, México. csahagun@ugto.mx, <https://orcid.org/0000-0001-5370-6400>

³Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Salud Animal e Inocuidad, Carretera Cuernavaca-Cuautla Km 11.5, C.P. 62550, Morelos, Jiutepec, México. mendoza.pedro@inifap.gob.mx, <https://orcid.org/0000-0001-9595-3573>

⁴Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Altamira, Carretera Tampico-Mante km 24.5, C.P. 89600, Altamira, Tamaulipas, México. L20820235@altamira.tecnm.mx



Capítulo 13.

Prácticas tecnológicas en ranchos ganaderos en el norte de México.

Sergio Iván Román-Ponce¹

José María Carrera-Chávez²

Francisco Castillo-Rangel³

Edith Rojas-Anaya⁴

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental La Campana, Chihuahua, México. Km 33.3 Carretera Chihuahua – Ojinaga. C.P. 32910, Aldama, Chihuahua. roman.sergio@inifap.gob.mx, <https://orcid.org/0000-0002-6704-6578>.

² Instituto de Ciencias Biomédicas. Departamento de Ciencias Veterinarias. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Av. Benjamín Franklin no. 4650, Zona Pronaf Condominio La Plata, C.P. 32310 Juárez, Chihuahua. jose.carrera@uacj.mx, <https://orcid.org/0000-0002-6899-9485>.

³ Facultad de Zootecnia y Ecología. Universidad Autónoma de Chihuahua. Perif. Francisco. R. Almada Km 1, Pavis Borunda, C.P. 31453 Chihuahua, Chihuahua. fcastillor@uach.mx, <https://orcid.org/0000-0002-1894-067X>

⁴Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental La Campana, Chihuahua, México. Km 33.3 Carretera Chihuahua – Ojinaga. C.P. 32910, Aldama, Chihuahua. rojas.edith@inifap.gob.mx, <https://orcid.org/0000-0002-4553-3914>



Capítulo 14.

Conceptos básicos sobre el calostro bovino.

Karla Rodríguez-Hernández¹

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, C.E. La Laguna. Boulevard Prof. José Santos Valdés 1200 Pte., Col. Centro, C.P. 27440, Matamoros, Coahuila, México. rodriguez.karla@inifap.gob.mx, <https://orcid.org/0000-0001-9333-3135>



Capítulo 15.

Parámetros reproductivos en bovinos del sistema familiar-traspatio.

Ricardo Avilés-Ruiz¹

Oscar Guadalupe Barrón-Bravo²

Rubén Darío Garza-Cedillo³

Miguel Ruiz-Albarrán⁴

Abner Josué Gutiérrez-Chávez⁵

Juan Samuel Guadalupe Jesús Alcalá-Rico⁶

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, CIRNE, Campo Experimental Las Huastecas, Villa Cuauhtémoc, Altamira, Tamaulipas, México. aviles.ricardo@inifap.gob.mx, <https://orcid.org/0000-0002-2143-5543>

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, CIRNE, Campo Experimental Las Huastecas, Villa Cuauhtémoc, Altamira, Tamaulipas, México. barron.oscar@inifap.gob.mx, <https://orcid.org/0000-0002-3686-5706>

³Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, CIRNE, Campo Experimental Río Bravo, Río Bravo, Tamaulipas, México. garza.ruben@inifap.gob.mx, <https://orcid.org/0000-0002-3168-3321>

⁴Universidad Autónoma de Tamaulipas, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia “Dr. Norberto Treviño Zapata”, Ciudad Victoria, Tamaulipas, México. miguel.ruiz@docentes.uat.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0002-1419-151X>

⁵Universidad de Guanajuato, DICIVA, Irapuato, Guanajuato, México. ajgutierrez@ugto.mx, <http://orcid.org/0000-0003-1702-508X>

⁶Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, CIRNE, Campo Experimental Las Huastecas, Villa Cuauhtémoc, Altamira, Tamaulipas, México. alcalá.juan@inifap.gob.mx, <https://orcid.org/0000-0003-2530-5639>



Capítulo 16.

El uso de suplementos alimenticios modifica la producción de cabritos y la composición de la leche en cabras bajo sistema de pastoreo.

Ricardo Avilés-Ruiz¹

Mauricio Velázquez-Martínez²

Juan Samuel Guadalupe Jesús Alcalá Rico¹

Oscar Guadalupe Barrón-Bravo¹

Jorge Maldonado-Jaquez³

Leonardo Iván Vélez-Monroy³

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, CIRNE, Campo Experimental Las Huastecas, Villa Cuauhtémoc, Altamira, Tamaulipas.

aviles.ricardo@inifap.gob.mx, <https://orcid.org/0000-0002-2143-5543>

alcala.juan@inifap.gob.mx, <https://orcid.org/0000-0003-2530-5639>

barron.oscar@inifap.gob.mx, <https://orcid.org/0000-0002-3686-5706>

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, CIRNE, Campo Experimental San Luis, Graciano Sánchez, San Luis Potosí.

velazquez.mauricio@inifap.gob.mx, <https://orcid.org/0000-0002-5767-364X>

³Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, CIRNOC, Campo Experimental La Laguna, Matamoros, Coahuila.

maldonado.jorge@inifap.gob.mx, <https://orcid.org/0000-0001-8173-1048>

velez.ivan@inifap.gob.mx



Capítulo 17.

Composición bromatológica y digestibilidad in vitro de vainas de *Leucaena leucocephala* y *esculenta* como alimento potencial para rumiantes.

Carlos Meza-López¹

Lucía Delgadillo-Ruiz²

Francisco G. Echavarría-Chairez^{1,3}

Rómulo Bañuelos-Valenzuela¹

¹Unidad Académica de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma de Zacatecas. Carretera Panamericana tramo Zacatecas-Fresnillo, km 31.5, El Cordovel, Juchipila, C.P. 98500, Zacatecas, México.

carmezlop@yahoo.com.mx, <https://orcid.org/0000-0002-6170-5464>

romulob@uaz.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0002-6640-2753>

²Unidad Académica de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Zacatecas. Calzada de La Revolución Mexicana S/N La Fe, C.P. 98615, Guadalupe, Zacatecas, México.

luciadelgadillo@uaz.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0002-6640-2753>

³INIFAP, Centro de Investigación Regional Norte Centro Campo Experimental Zacatecas, Calera de Víctor Rosales, C.P. 98500, Zacatecas, México.

fchava1@yahoo.com, <https://orcid.org/0000-0002-4910-5677>



Capítulo 18.

Desarrollo de nuevas variedades de frijol y tecnologías de producción para el altiplano semiárido de México.

Odilón Gayosso-Barragán¹

Griselda Chávez-Aguilar¹

Jorge Alberto Acosta-Gallegos²

Juan Samuel Guadalupe Jesús Alcalá-Rico³

Deli Nazmín Tirado-González⁴

Ulises Aranda-Lara²

¹Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Agricultura Familiar-INIFAP. Carretera Ojuelos-Lagos de Moreno km 8.5, CP 47540, Ojuelos de Jalisco, Jal., México.

gayosso.odilon@inifap.gob.mx,

<https://orcid.org/0000-0002-8255-7296>,

chavez.griselda@inifap.gob.mx, <https://orcid.org/0000-0001-9406-8871>

²Campo Experimental Bajío-INIFAP. Carretera Celaya-San Miguel de Allende, km 6.5. C. P. 38110, Celaya, Guanajuato, México.

acosta.jorge@inifap.gob.mx, <https://orcid.org/0000-0002-2092-5575>,

aranda.ulises@inifap.gob.mx, <https://orcid.org/0000-0003-2885-5599>

³Campo Experimental Las Huastecas-INIFAP. Carretera Tampico-Mante km 55, C.P. 89610, Altamira, Tamaulipas, México.

alcala.juan@inifap.gob.mx, <https://orcid.org/0000-0003-2530-5639>

⁴Instituto Tecnológico El Llano Aguascalientes-TecNM. Carretera Aguascalientes-San Luis Potosí km. 18.5, C.P. 20330, El Llano, Aguascalientes, México.

deli.tg@llano.tecnm.mx, <https://orcid.org/0000-0002-5668-9025>



Capítulo 19.

Mejora del rendimiento de cultivos agrícolas utilizando acolchados.

Eladio Delgadillo-Ruiz¹

Luz Adriana Arias-Hernández²

Rómulo Bañuelos-Valenzuela³

Lucia Delgadillo-Ruiz⁴

Arturo Berumen-Cervantes⁵

María Maldonado-Santoyo⁶

¹Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, División de Ingenierías, Universidad de Guanajuato, Av. Juárez 77, Col. Centro, Guanajuato C.P. 36000, Guanajuato, Guanajuato, México e.delgadillo@ugto.mx, <https://orcid.org/0000-0002-2004-5340>

²Departamento de Ingeniería Geomática e Hidráulica, División de Ingenierías, Universidad de Guanajuato, Av. Juárez 77, Col. Centro, Guanajuato C.P. 36000, Guanajuato, Guanajuato, México arhadriana@ugto.mx <https://orcid.org/0000-0001-5456-8046>

³Unidad Académica de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma de Zacatecas. Carretera Panamericana Fresnillo-Zacatecas s/n, Centro, CP. 98500 Víctor Rosales, Zacatecas, México. romulob@uaz.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0001-9298-0840>

⁴Unidad Académica de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Zacatecas. Avenida preparatoria s/n colonia Hidráulica, CP. 98068, Zacatecas, Zacatecas, México. delgadillolucia@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-6640-2753>

⁵Instituto Tecnológico Superior de Guanajuato, Carretera Guanajuato-Puentecillas km. 10.5, Puentecillas, C.P. 36262, Guanajuato, Guanajuato, México. arturo.bc@guanajuato.tecnm.mx, <https://orcid.org/0009-0003-3120-9456>

⁶Centro de Innovación Aplicada en Tecnologías Competitivas, Omega 201, Col. Industrial Delta, C.P. 37545, León, Guanajuato, México. msantoyo@ciatec.mx, <https://orcid.org/0000-0001-7205-0240>



Capítulo 20.

Uso potencial de acacia (huizache), en fitorremediación de suelos contaminados de zonas áridas y semiáridas.

Citlalli Selene Ruíz-García¹

Josefina Huerta-García¹

Lucia Delgadillo-Ruíz¹

Cruz Daniel Mandujano-García¹

Felipe de Jesús Escalona-Alcázar²

Perla Ivonne Gallegos-Flores¹

¹Unidad Académica de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Zacatecas, 98066, Zacatecas, México.

citlalli.ruiz@uaz.edu.mx, <https://orcid.org/0009-0005-7437-1087>

josefina.huerta@uaz.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0002-5091-2791>

luciadeldgadillo@uaz.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0002-6640-2753>

cmandujano@uaz.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0001-5716-8443>

ivonne_gf@uaz.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0002-3247-568X>

²Unidad Académica de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Zacatecas, 98060, Zacatecas, México.

fescalona@uaz.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0002-5759-1927>



Capítulo 21.

Cruzas dialélicas para el mejoramiento genético de caracteres fisiológicos de semilla de soya.

Juan Samuel Guadalupe Jesús Alcalá-Rico¹

Neymar Camposeco-Montejo²

Ricardo Avilés-Ruiz³

Odilón Gayosso-Barragan⁴

José Ángel Marroquín-Morales⁵

Oscar Guadalupe Barrón-Bravo⁶

¹Campo Experimental Las Huastecas-INIFAP, Carretera Tampico-Mante km 55, C.P. 89610, Villa Cuauhtémoc, Altamira, Tamaulipas, México. alcala.juan@inifap.gob.mx, <https://orcid.org/0000-0003-2530-5639>

²Departamento de Fitomejoramiento, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Calzada Antonio Narro 1923, Buenavista, C.P. 25315, Saltillo, Coahuila, México. neym_33k@hotmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0638-2452>

³Campo Experimental Las Huastecas-INIFAP, Carretera Tampico-Mante km 55, C.P. 89610, Villa Cuauhtémoc, Altamira, Tamaulipas, México. aviles.ricardo@inifap.gob.mx, <https://orcid.org/0000-0002-2143-5543>

⁴CENID Agricultura Familiar-INIFAP, Km 8.5, Lagos de Moreno - San Luis Potosí, C.P. 47540, Ojuelos de Jalisco, Jalisco, México. gayosso.odilon@inifap.gob.mx, <https://orcid.org/0000-0002-8255-7296>

⁵Campo Experimental Norman E. Borlaug-INIFAP, Calle Norman E. Borlaug s/n km. 12, C.P. 8500, Cd. Obregón, Sonora, México. marroquin.jose@inifap.gob.mx, <https://orcid.org/0000-0003-4471-2459>

⁶Campo Experimental Las Huastecas-INIFAP, Carretera Tampico-Mante km 55, C.P. 89610, Villa Cuauhtémoc, Altamira, Tamaulipas, México. barron.oscar@inifap.gob.mx, <https://orcid.org/0000-0002-3686-5706>



Capítulo 22.

El género *Bacillus* en la agricultura: diversidad de mecanismos para el crecimiento y protección de las plantas.

Esmeralda Plascencia-Ulloa¹

Lily X. Zelaya-Molina²

Ismael F. Chávez-Díaz³

Edgardo Bautista-Ramírez⁴

Zoe Reséndiz-Venado⁵

Nelly E. Cortés-Martínez⁶

¹Centro Universitario de los Lagos-UdeG, Av. Enrique Díaz de León 1144, C.P. 47460 Lagos de Moreno, Jalisco, México. esmeraldaplascenciaulloa@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-3998-3019>.

²Centro Nacional de Recursos Genéticos-INIFAP, Av. Biodiversidad #400, C.P. 47600 Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México. lilyzelayam@yahoo.com.mx, <https://orcid.org/0000-0002-3474-3289>

³Centro Nacional de Recursos Genéticos-INIFAP, Av. Biodiversidad #400, C.P. 47600 Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México. chavez.fernando@inifap.gob.mx, <https://orcid.org/0000-0002-2182-8646>

⁴Campo Experimental Centro Altos de Jalisco-CIRPAC-INIFAP. Av. Biodiversidad 2470, C.P. 47714 Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México. Bautista.edgardo@inifap.gob.mx, <https://orcid.org/0000-0002-2867-925X>

⁵Centro Universitario de los Lagos-UdeG, Av. Enrique Díaz de León 1144, C.P. 47460 Lagos de Moreno, Jalisco, México. zoevenadorez@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-1118-4577>

⁶Centro Universitario de los Altos-UdeG, Av. Rafael Casillas Aceves No. 1200, C.P. 47620 Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México. Nelly.ethel.cortes@hotmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-6316-2121>



Capítulo 23.

Fibras de origen natural.

Dolores Vargas-Álvarez¹

Jesús Tadeo Hernández-Moreno²

Hugo Mauricio Montes de Oca³

¹Facultad de Ciencias Químico-Biológicas, Universidad Autónoma de Guerrero. Av. Lázaro Cárdenas S/N, Col. La Haciendita, CP. 39087, Chilpancingo, Gro. dvargas@uagro.mx, <https://orcid.org/0000-0001-9138-3112>

²Estancias Postdoctorales por México - Facultad de Ciencias Químico-Biológicas, Universidad Autónoma de Guerrero. Av. Lázaro Cárdenas S/N, Col. La Haciendita, CP. 39087, Chilpancingo, Gro. tadeohernandez@uagro.mx, <https://orcid.org/0009-0009-4541-6177>

³Facultad de Ciencias Químico-Biológicas, Universidad Autónoma de Guerrero. Av. Lázaro Cárdenas S/N, Col. La Haciendita, CP. 39087, Chilpancingo, Gro. 18268597@uagro.mx



Capítulo 24.

Normatividad, calidad y certificación de la semilla de maíz en México.

Adriana Natividad Avendaño-Lopez¹

Martín Quintana-Camargo²

María Leonor Román Miranda¹

Gilberto Rodríguez-Pérez³

¹Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias CUCBA. Universidad de Guadalajara. Calle Camino Ramón Padilla Sánchez, CP 2100, 45110 Zapopan, Jalisco.

aavedan@cucba.udg.mx, <https://orcid.org/0000-0003-1713-1165>

maria.roman@academicos.udg.mx, <https://orcid.org/0000-0003-1713-1165>

²Centro Nacional de Recursos Genéticos, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Tepatitlán de Morelos, México. Boulevard de la biodiversidad 400, Rancho las Cruces, CP 47600 Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México

quintana.martin@inifap.gob.mx, <https://orcid.org/0000-0002-5432-8891>

³Tecnológico Nacional de México-Valle del Yaqui, Sonora. Calle 600, Block 611 Col. Valle del Yaqui Bácum. CP 85276, San Ignacio Río Muerto, Sonora, México.

gilberto.rp@vyaqui.tecnm.mx, <https://orcid.org/0000-0003-2297-8598>



Capítulo 25.

Patógenos responsables de infecciones asociadas al consumo de ceviche de pescado.

Fidel Avila-Ramos¹

Mauricio Arredondo-Castro¹

Juan José Fernando Borrayo-Gonzalez²

Carlos Omar de la Cruz-Moreno²

Socorro Marisa Salgado-Moreno²

Ranferi Gutiérrez-Leyva²

Carlos Alfredo Carmona-Gasca²

¹Campus Irapuato-Salamanca, División de Ciencias de la Vida, Programa de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad de Guanajuato, Ex Hacienda El Copal Km. 9, Carretera Irapuato-Silao, Irapuato Guanajuato, México C.P. 36500. ledifar@ugto.mx, <https://orcid.org/0000-0002-7766-6682>, arredondo.m@ugto.mx, <https://orcid.org/0000-0002-7674-5151>

²Unidad Académica de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma de Nayarit, Km 3.5 Carretera Compostela – Chapalilla, Compostela, Nayarit, México CP 63700. fernando.borrayo@uan.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0003-2599-637X>
carlosdelacruz@uan.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0002-4612-5410>
socorro.salgado@uan.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0002-1267-5385>
ranferi.gutierrez@uan.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0002-1990-2720>
carmonagasca@uan.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0002-7587-0946>



Capítulo 26.

Plantas utilizadas en medicina tradicional mexicana: *Heterotheca inuloides* Cass (Árnica mexicana).

Fátima Jaqueline Ramos-Parga¹

Perla Ivonne Gallegos-Flores^{1*}

Edgar León Esparza-Ibarra¹

Emmanuel De La O-Cuevas¹

Lucía Delgadillo-Ruíz²

Josefina Huerta-García³

¹Laboratorio de Biotecnología y Medio Ambiente, Unidad Académica de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Zacatecas, México. Av. Preparatoria s/n Col. Agronómica, Zacatecas, Zac. México. C.P. 98600. fatimaramos11995@gmail.com
_ivonnegf@uaz.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0002-3247-568X>
lesparza@uaz.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0002-6037-3998>
emmanuel.delao@fisica.uaz.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0002-1195-8324>

²Laboratorio Biología de la Conservación, Unidad Académica de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Zacatecas, México. Av. Preparatoria s/n Col. Agronómica, Zacatecas, Zac. México. C.P. 98600. luciadelgadillo@uaz.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0002-6640-2753>.

³Laboratorio de Biología Ambiental y Molecular, Unidad Académica de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Zacatecas, México. Av. Preparatoria s/n Col. Agronómica, Zacatecas, Zac. México. C.P. 98600. josefina.huerta@uaz.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0002-5091-2791>



Capítulo 27.

Características del propóleo y usos en medicina alternativa.

Cesar Ibarra-Gudiño¹

Sergio Martínez-González¹

Ranferi Gutiérrez-Leyva¹

Fidel Avila-Ramos²

Ulises Mercado-Burciaga³

Edgar Alfredo Ramírez-Acevedo³

Carlos Alfredo Carmona-Gasca¹

¹Unidad Académica de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma de Nayarit, Km 3.5 Carretera Compostela – Chapalilla, Compostela, Nayarit, México CP 63700.
cesaribarra@uan.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0002-9090-3726>
sergio.martinez@uan.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0002-4916-0967>
ranferi.gutierrez@uan.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0002-1990-2720>
carmonagasca@uan.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0002-7587-0946>

²Campus Irapuato-Salamanca, División de Ciencias de la Vida, Programa de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad de Guanajuato, Ex Hacienda El Copal Km. 9, Carretera Irapuato-Silao, Irapuato Guanajuato, México C.P. 36500
ledifar@ugto.mx, <https://orcid.org/0000-0002-7766-6682>

³Centro de Bachillerato Tecnológico agropecuario No 130, Km 15.5 Carretera San Blas - Guadalupe Victoria, La Virocha, Nayarit, CP 63758.
ulisesmercado130@dgetaycm.sems.gob.mx, <https://orcid.org/0000-0003-3871-671X>
edgarramirez130@dgetaycm.sems.gob.mx, <https://orcid.org/0000-0001-8789-8076>



Capítulo 28.

Revisión del uso del veneno de abeja en la salud humana.

Cesar Ibarra Gudiño¹

Wilbert Alfredo Flores Del Real¹

Rosa Isela Lepe Aguilar¹

Socorro Salgado Moreno¹

J. Bladimir Peña Parra¹

Carlos Alfredo Carmona Gasca¹

Sergio Martínez González¹

María Guadalupe Orozco Benítez¹

¹Universidad Autónoma de Nayarit. Unidad Académica de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Carretera Compostela – Chapalilla km 3.5. Compostela, Nayarit. México.

cesaribarra@uan.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0002-9090-3726>

wilbert.flores@uan.edu.mx, <https://orcid.org/0009-0003-4046-0423>

isela.aguilar@uan.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0001-6604-3191>

socorro.salgado@uan.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0002-1267-5385>

jbladimir@uan.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0002-5551-9411>

carmonagasca@uan.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0002-7587-0946>

sergio.martinez@uan.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0002-4916-0967>

mgorozco@uan.edu.mx



Capítulo 29.

Expansión e impacto de *Cherax quadricarinatus* en Nayarit, México: nuevos registros de traslocación y establecimiento en cuatro cuerpos de agua.

J. Raúl Tapia-Varela¹

Carlos A. Romero-Bañuelos¹

César A. Tapia-Varela²

José T. Nieto-Navarro³

Raquel Enedina Medina-Carrillo⁴

Lesset del C. Ramos-Ramírez⁴

¹Secretaría de Investigación y Posgrado de la Universidad Autónoma de Nayarit, México. r.tapia@uan.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0003-1561-1595>, romerobanuelos@uan.edu.mx, <http://orcid.org/0000-0002-7351-8156>

²Área Psicopedagógica de la Unidad Académica de Educación y Humanidades de la Universidad Autónoma de Nayarit, México. cesartapia952@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-9766-7842>

³Unidad Académica Escuela Nacional de Ingeniería Pesquera. Universidad Autónoma de Nayarit, Tepic, Nayarit, México. nietojt@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-4449-0860>

⁴Unidad Académica de Ciencias Químico Biológicas y Farmacéuticas. Universidad Autónoma de Nayarit, Tepic, Nayarit, México. lesset.ramos@uan.edu.mx. <http://orcid.org/0000-0002-9234-6177>; raquel.medina@uan.edu.mx. <https://orcid.org/0000-0002-0239-9794>



Capítulo 30.

Pertinencia de la evaluación con base a progresiones de aprendizaje en Medicina Veterinaria.

Martha Elba Ruiz-Riva-Palacio¹

Roberto Montes-de-Oca-Jiménez ^{1,2}

Pilar Eliana Rivadeneira-Barreiro³

Pablo Cleomenes Zambrano-Rodríguez³

Pedro Sánchez-Aparicio²

Edalhi García-Faz¹

¹Plantel Sor Juana Inés de la Cruz. UAEM Amecameca. Universidad Autónoma del Estado de México. México- CP. 56900 marthaelba.ruizrp@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7653-3231>, egarciafa@uaemex.mx, <http://orcid.org/56900.0009-0005-3528-4394>.

²Centro de Investigación y Estudios Avanzados en Salud Animal. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma del Estado de México. km 15.5 Carretera Panamericana Toluca-Atlacomulco, Toluca, Estado de México, México, C.P. 50295 rmontesdeocaj@uaemex.mx, <http://orcid.org/0000-0001-9994-0948>; psanchezap@uaemex.mx, <http://orcid.org/0000-0002-6511-6595>.

³Departamento de Veterinaria. Facultad de Ciencias Veterinarias. Universidad Técnica de Manabí. C.P. 130105. Portoviejo, Ecuador. pilar.rb26@hotmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-1921-0967>; drpablozambrano@gmail.com, <http://orcid.org/50200.0000-0002-3496-8816>



Capítulo 31.

Progresiones de aprendizaje en la Medicina Veterinaria ¿Moda, transformación o solución?

Martha Elba Ruiz-Riva-Palacio¹

Roberto Montes-de-Oca-Jiménez ^{1,2}

Pilar Eliana Rivadeneira-Barreiro³

Pablo Cleomenes Zambrano-Rodríguez³

Pedro Sánchez-Aparicio²

Edalhi García-Faz¹

¹Plantel Sor Juana Inés de la Cruz. UAEM Amecameca. Universidad Autónoma del Estado de México. México- CP. 56900. marthaelba.ruizrp@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7653-3231>; egarciafa@uaemex.mx, <http://orcid.org/56900.0009-0005-3528-4394>.

²Centro de Investigación y Estudios Avanzados en Salud Animal. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma del Estado de México. km 15.5 Carretera Panamericana Toluca-Atlacomulco, Toluca, Estado de México, México, C.P. 50295
rmontesdeocaj@uaemex.mx, <http://orcid.org/0000-0001-9994-0948>; psanchezap@uaemex.mx, <http://orcid.org/0000-0002-6511-6595>.

³Departamento de Veterinaria. Facultad de Ciencias Veterinarias. Universidad Técnica de Manabí. C.P. 130105. Portoviejo, Ecuador. pilar.rb26@hotmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-1921-0967>; drpablozambrano@gmail.com, <http://orcid.org/50200.0000-0002-3496-8816>



Capítulo 32.

Investigación en animales de laboratorio.

María Isabel Chávez-Ruvalcaba¹

Blanca Marisa López-Alvarado¹

Lucia Delgadillo-Ruiz¹

Verónica Bañuelos-Melero²

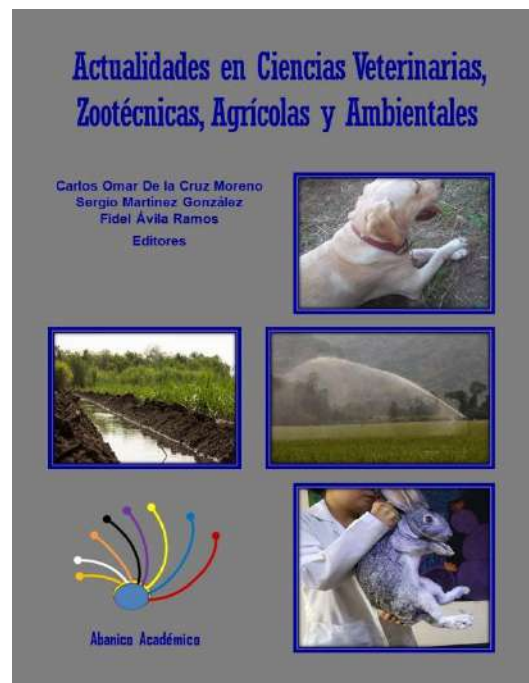
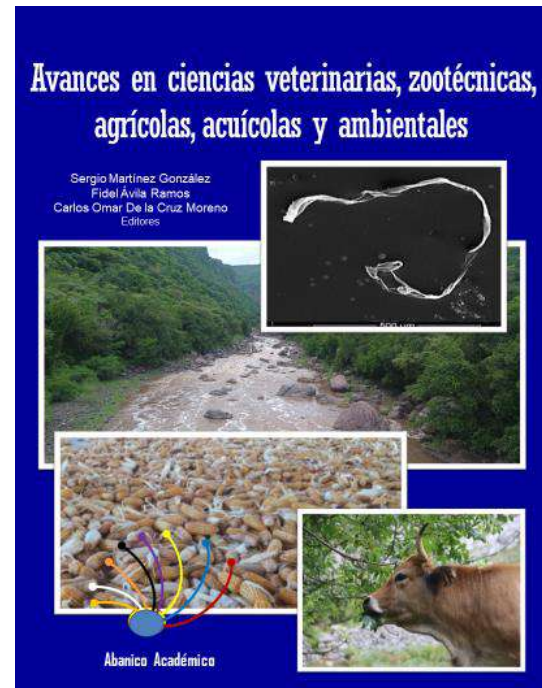
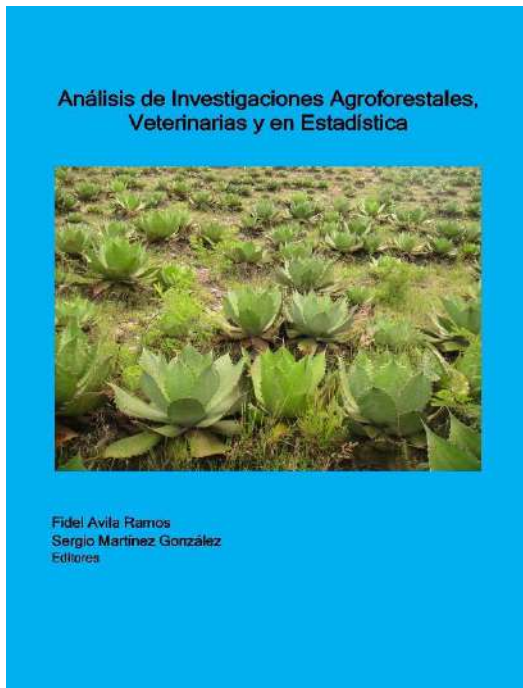
Josefina Huerta-García¹

Francisca Chávez-Ruvalcaba²

¹Unidad Académica de Ciencias Biológicas de la Universidad Autónoma de Zacatecas, Av. Preparatoria S/N, Colonia Agronómica, CP 98066, Zacatecas, Zacatecas, México. iasruv9si@uaz.edu.mx <https://orcid.org/0000-0002-1968-1171>

²Unidad Académica de Enfermería (Nutrición) de la Universidad Autónoma de Zacatecas, Carretera Zacatecas-Guadalajara Km 6, Colonia la Escondida, CP98160, Zacatecas, Zacatecas, México. charuva@uaz.edu.mx <https://orcid.org/0000-0002-8018-4094>

Otras obras de Abanico Académico:





Versión Digital

Compendio de revisiones en ciencias veterinarias, agroforestales, pesqueras y áreas afines

se terminó de editar

el 10 de diciembre de 2025

en las instalaciones

de Abanico Académico

Valle Bravo 16, Colonia Valle Dorado.

Tepic, Nayarit, México.

abanicoacademico@gmail.com

www.abanicoacademico.mx

SECCIÓN 1: MEDICINA VETERINARIA.

1. Efectos terapéuticos de la miel de abeja en la cicatrización de heridas: una revisión desde la perspectiva neurofarmacológica.
2. Fitofármacos con efecto analgésico en medicina veterinaria.
3. Zoonosis parasitarias de perros y gatos: el vínculo silencioso entre mascotas y humanos.
4. Leptospirosis, avances de la enfermedad y del agente causal.
5. Algunas plantas de importancia en la clínica veterinaria: generalidades y protocolo terapéutico.
6. Complejo respiratorio bovino: un enfoque desde los virus involucrados.
7. Evaluación de la respuesta inmune de la vacuna de subunidades PLD y CP40 frente a *Corynebacterium pseudotuberculosis* biovar *ovis*.
8. Análisis de la metagenómica y resistencia antimicrobiana de *Corynebacterium pseudotuberculosis*.
9. Análisis de los mecanismos de resistencia antimicrobiana en *Corynebacterium pseudotuberculosis*.
10. Identificación de *Escherichia coli* O157:H7 productora de toxina Shiga por PCR en rumiantes.

SECCIÓN 2: ZOOTECNIA.

11. La fibra dietética sobre la salud intestinal en el pollo de engorda: función digestiva y aplicaciones en nutrición aviar.
12. Manejo de la garrapata *Rhipicephalus microplus* en las unidades de producción de bovinos.
13. Prácticas tecnológicas en ranchos ganaderos en el norte de México.
14. Conceptos básicos sobre el calostro bovino.
15. Parámetros reproductivos en bovinos del sistema familiar-traspatio.
16. El uso de suplementos alimenticios modifica la producción de cabritos y la composición de la leche en cabras bajo sistema de pastoreo.
17. Composición bromatológica y digestibilidad *in vitro* de vainas de *Leucaena leucocephala* y *esculenta* como alimento potencial para rumiantes.

SECCIÓN 3: AGRICULTURA.

18. Desarrollo de nuevas variedades de frijol y tecnologías de producción para el altiplano semiárido de México.
19. Mejora del rendimiento de cultivos agrícolas utilizando acolchados.
20. Uso potencial de *acacia* (huizache), en fitorremediación de suelos contaminados de zonas áridas y semiáridas.
21. Cruzas dialélicas para el mejoramiento genético de caracteres fisiológicos de semilla de soya.
22. El género *Bacillus* en la agricultura: diversidad de mecanismos para el crecimiento y protección de las plantas.
23. Fibras de origen natural.
24. Normatividad, calidad y certificación de la semilla de maíz en México.

SECCIÓN 4: SEGURIDAD ALIMENTARIA.

25. Patógenos responsables de infecciones asociadas al consumo de ceviche de pescado.

SECCIÓN 5: MEDICINA ALTERNATIVA.

26. Plantas utilizadas en medicina tradicional mexicana: *Heterotheca inuloides* Cass (Árnica mexicana).
27. Características del propóleo y usos en medicina alternativa.
28. Revisión del uso del veneno de abeja en la salud humana.

SECCIÓN 6: AMBIENTAL.

29. Expansión e impacto de *Cherax quadricarinatus* en Nayarit, México: nuevos registros de traslocación y establecimiento en cuatro cuerpos de agua.

SECCIÓN 7: EDUCACIÓN.

30. Pertinencia de la evaluación con base a progresiones de aprendizaje en Medicina Veterinaria.
31. Progresiones de aprendizaje en la Medicina Veterinaria ¿Moda, transformación o solución?

SECCIÓN 8: ANIMALES DE LABORATORIO.

32. Investigación en animales de laboratorio.