









Abanico Microbiano. Enero-Diciembre, 2026; 2:1-15. <https://doi.org/10.21929/abanicomicrobiano/2026.2>

Artículo Original. Recibido: 27/01/2026. Aceptado: 29/03/2026. Publicado: 22/04/2026. Clave: 2026-02.

<https://www.youtube.com/watch?v=5fdAIP-nPaM>

Actividad nematocida del sustrato degradado de *Pleurotus ostreatus* contra *Nacobbus aberrans* y nematodos de vida libre

Nematicidal activity of spent *Pleurotus ostreatus* substrate against *acobbus aberrans* and free-living nematodes

Carreño-Campos Christian^{*1}  ID, Moreno-Ruiz Lilia²  ID, Gómez-Rodríguez Olga³  ID, Chávez-Díaz Ismael⁴  ID, Zelaya-Molina Lily⁴  ID, Aguilar-Marcelino Liliana^{**5}  ID



¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Salud Animal e Inocuidad, Jiutepec, Morelos, México. ²Colegio de la Frontera Sur, Tapachula, Chiapas, México. ³Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Montecillo, Estado de México, México. ⁴Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro Nacional de Recursos Genéticos, Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México. ⁵Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Salud Animal e Inocuidad-Sede Palo Alto, Ciudad de México, México. *Autor Responsable: Carreño-Campos Christian. **Autor para correspondencia: Aguilar-Marcelino Liliana. E-mail: chrcom12@gmail.com, Imoreno@ecosur.mx, olgago@colpos.mx, chavez.fernando@inifap.gob.mx, zelaya.lily@inifap.gob.mx, aguilar.liliana@inifap.gob.mx

RESUMEN

El fitonematodo *Nacobbus aberrans* es un parásito de importancia económica que afecta diversos cultivos. Aunque los nematocidas químicos se han utilizado ampliamente para su control, sus efectos adversos sobre la salud, el medio ambiente y organismos no objetivo han impulsado la búsqueda de alternativas más sostenibles. En este contexto, el hongo comestible *Pleurotus ostreatus* constituye una fuente potencial de compuestos bioactivos con actividad nematocida. En el presente estudio se evaluó el efecto nematocida del extracto crudo hexánico del sustrato degradado de *P. ostreatus* sobre *N. aberrans* como nematodo fitoparásito, y *Caenorhabditis elegans* y *Panagrellus redivivus*, como modelos de nematodos de vida libre. Para los ensayos *in vitro* se incubaron larvas J2 con cuatro concentraciones seriadas del extracto (1.25-10 mg/mL) durante tiempos específicos (*N. aberrans*: 72 h; *C. elegans*: 24 h; *P. redivivus*: 17 y 24 h). La concentración de 10 mg/mL produjo mortalidades de 72.2% ± 3.6 en *C. elegans*, 57.0% ± 1.5 en *P. redivivus* y 28.5% ± 2.9 en *N. aberrans*. Estos resultados indican que el extracto hexánico del sustrato degradado de *P. ostreatus* ejerce un efecto adverso sobre los nematodos de vida libre, mientras que su actividad nematocida es dependiente de la concentración.

Palabras clave: fitoparásitos, hongos comestibles, productos naturales.

ABSTRACT

The phytonematode *Nacobbus aberrans* is a parasite of economic importance that affects various crops. Although chemical nematicides have been widely used for its control, their adverse effects on health, the environment, and non-target organisms have driven the search for more sustainable alternatives. In this context, the edible mushroom *Pleurotus ostreatus* constitutes a potential source of bioactive compounds with nematicidal activity. In the present study, the nematicidal effect of the crude hexanic extract of the spent



substrate of *P. ostreatus* was evaluated on *N. aberrans* as a plant-parasitic nematode, and *Caenorhabditis elegans* and *Panagrellus redivivus* as free-living nematode models. *In vitro* assays were performed by incubating J2 larvae with four serial concentrations of the extract (1.25-10 mg/mL) for specific times (*N. aberrans*: 72 h; *C. elegans*: 24 h; *P. redivivus*: 17 and 24 h). The concentration of 10 mg/mL produced mortalities of $72.2\% \pm 3.6$ in *C. elegans*, $57.0\% \pm 1.5$ in *P. redivivus*, and $28.5\% \pm 2.9$ in *N. aberrans*. These results indicate that the hexanic extract of spent substrate of *P. ostreatus* exerts an adverse effect on free-living nematodes, whereas its nematocidal activity is concentration-dependent.

Keywords: phytoparasites, edible mushrooms, natural products.

INTRODUCCIÓN

Los nematodos fitoparásitos constituyen uno de los principales factores limitantes en la producción agrícola, debido a los daños que ocasionan en el sistema radicular, la interferencia en la absorción de agua y nutrientes y la consecuente reducción del crecimiento y rendimiento de los cultivos; además, incrementan la susceptibilidad de las plantas a otros patógenos (Cedeño-García, 2024). Entre ellos, *Nacobbus aberrans* destaca como un nematodo agallador de amplia distribución, responsable de la formación de protuberancias o “nudos” en las raíces y de síntomas aéreos como clorosis, necrosis foliar y disminución del vigor vegetal, lo que se traduce en pérdidas económicas significativas en diversos sistemas agrícolas (Cristóbal-Alejo *et al.*, 2006; Lax *et al.*, 2022). En contraste, nematodos de vida libre como *Panagrellus redivivus* y *Caenorhabditis elegans* se emplean ampliamente como organismos modelo en estudios de toxicidad ambiental y en la evaluación preliminar de compuestos con potencial nematocida (Pica-Granados, 2008; Wilson & Kakouli-Duarte, 2009).

El control de *N. aberrans* se ha basado principalmente en la aplicación de nematocidas químicos, reconocidos por su alta eficacia y acción rápida. Sin embargo, la restricción progresiva de diversos ingredientes activos, derivada de sus efectos adversos sobre la salud humana, el ambiente y organismos no objetivo, así como del desarrollo de resistencia, ha impulsado la búsqueda de alternativas biológicas más seguras y sostenibles (Baazeem *et al.*, 2022). En este contexto, el sustrato degradado (SD) generado durante el cultivo de hongos comestibles del género *Pleurotus* ha cobrado interés por su contenido de compuestos bioactivos con actividad contra nematodos, bacterias y otros patógenos (Ayala-Martínez *et al.*, 2015; Ocimati *et al.*, 2021; Ocampo-López *et al.*, 2021; Cruz-Arévalo *et al.*, 2024). Asimismo, su aprovechamiento aporta valor agregado como fertilizante orgánico, suplemento para ganado, fuente de energía y material para procesos de biorremediación (Zied *et al.*, 2020). Con base en lo anterior, el objetivo del presente estudio fue evaluar *in vitro* la actividad nematocida del extracto crudo hexánico del SD de *Pleurotus ostreatus* sobre *Caenorhabditis elegans* y *Panagrellus redivivus* como modelos de nematodos de vida libre, y sobre el nematodo fitoparásito *Nacobbus aberrans*.



MATERIAL Y MÉTODOS

Obtención del germoplasma de nematodos

Nacobbus aberrans. Los juveniles de segundo estadio (J2) de *N. aberrans* fueron proporcionados por el Laboratorio de Fitosanidad del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, bajo la dirección de la Dra. Olga Gómez Rodríguez. Los huevos se obtuvieron a partir de raíces infectadas de pimiento (*Capsicum annuum*). Las raíces se lavaron con agua corriente y se cortaron en fragmentos de 1-2 cm, después los fragmentos se sumergieron en NaClO al 1.5 % durante 3 min con agitación. La suspensión se filtró a través de tamices de 200, 350 y 400 μm y se enjuagó con agua destilada. El material retenido en el tamiz de 400 μm se centrifugó a 3000 rpm. El precipitado se resuspendió en 5 mL de MgSO_4 (densidad específica de 1.18) y se centrifugó nuevamente a 3000 rpm durante 3 min. La fase superior se recuperó en un tamiz de 400 μm y los huevos se lavaron 4-5 veces con agua destilada. Posteriormente, los huevos se incubaron en agua destilada durante 8 días a 25 ± 1 °C para obtener larvas J2, de acuerdo con [Cruz-Arévalo et al. \(2024\)](#).

Caenorhabditis elegans. El germoplasma de *C. elegans* fue proporcionado por la Dra. Gloria Sarahí Castañeda Ramírez del Laboratorio de Estudios Ecogenómicos del Centro de Investigación en Biotecnología (CEIB-UAEM). Para obtener poblaciones sincronizadas, los nematodos se trataron con NaOH 1 M y NaClO al 5 %, lo que permitió la liberación de los huevos resistentes a este tratamiento y la eliminación de nematodos adultos y restos celulares. Posteriormente, la suspensión se centrifugó y los huevos recuperados se lavaron tres veces con solución estéril M9 para eliminar los residuos del cloro y restos celulares. Posteriormente, se transfirieron a placas con medio NGM sembradas con *Escherichia coli* OP50, donde se permitió su desarrollo hasta el estadio J2 ([Rodríguez-Morales et al., 2021](#)). Las larvas sincronizadas se transfirieron a solución M9 y se mantuvieron en condiciones estériles hasta su uso o almacenamiento a corto plazo.

Panagrellus redivivus. La cepa de *P. redivivus* fue donada en 2012 por el Dr. Roberto De Lara (Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco) al Laboratorio de Metabólica del CENID-SAI-INIFAP. Los nematodos se cultivaron en medio avena-agua conforme al manual de Van Bezooijen (2006), donde las bacterias ácido-lácticas proliferadas en la avena sirvieron como fuente nutricional. Brevemente, se mezclaron 350 g de avena con 175 mL de agua purificada tibia y la mezcla se colocó en un frasco de vidrio. Se inocularon 2 mL de suspensión de larvas y se incubó a ± 25 °C. El crecimiento poblacional se observó a los 3 días. La obtención de larvas J2 se realizó mediante la técnica de Baermann ([Cruz-Arévalo et al., 2024](#); [Pica-Granados, 2008](#)). El cultivo se cubrió con agua purificada sin agitación y la suspensión se recolectó con pipeta graduada en un matraz Erlenmeyer. Las larvas se separaron durante 2 h y se filtraron a través de tamices de 325 μm y 400 μm con tres lavados con agua purificada. El material retenido



se centrifugó 3 min a 3500 rpm y se ajustó a 5 mL. El conteo larval se realizó en portaobjetos a partir de alícuotas del stock.

Obtención del SD de *P. ostreatus*

El sustrato degradado (SD) de *P. ostreatus* se produjo en el Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), sede Tapachula, bajo la supervisión de la Dra. Lilia Moreno Ruiz y del M.C. René H. Andrade Gallegos. El sustrato está compuesto por pulpa de café (*Coffea canephora*), olote de maíz (*Zea mays*) y pasto pangola (*Digitaria eriantha*) en proporciones iguales de 33.3 % de cada material, los cuales se esterilizaron a 121 °C durante 30 min. El material se inoculó con 2.5 % de semilla de *P. ostreatus* en bolsas perforadas y se incubó durante 30 días, correspondientes al ciclo de cosecha ([Avendaño-Hernández & Sánchez, 2013](#)). Posteriormente, el SD se secó a la sombra durante 5 días hasta alcanzar 8 % de humedad.

Obtención del extracto hexánico

El SD seco se trituró y molió con una criba de 1 cm. Se pesaron 100 g y se distribuyeron en cuatro matraces Erlenmeyer de 500 mL (25 g cada uno). Se añadió hexano en proporción 4:1 (v/p) y el material se dejó macerar durante 24 h a 18-25 °C. Posteriormente, cada matraz se sometió a sonicación durante 15 min. El extracto se filtró con papel Whatman No. 4 y se concentró en rotavapor (Heidolph, Alemania). El extracto crudo hexánico se secó 48 h en campana de flujo laminar y se determinó el rendimiento. Finalmente, se almacenó a 4 °C hasta su uso.

Actividad nematocida *in vitro* del extracto hexánico

Las pruebas *in vitro* se realizaron en el CENID-SAI, INIFAP, Jiutepec, Morelos, México. Los extractos hexánicos se disolvieron con Tween 80 al 1%, se empleó un diseño experimental aleatorio para cada prueba. Se incluyó ivermectina (0.05 mg/mL) como control positivo y Tween 80 (0.01 mg/mL) como control negativo. Se emplearon placas de microtitulación de 96 pozos. En cada pozo se mezcló 50 µL de tratamiento y 50 µL de suspensión larval. Se utilizaron 100 larvas J2 por pozo para *N. aberrans* y *C. elegans*, y 50 larvas J2 para *P. redivivus*. Las placas se sellaron e incubaron a 28 °C: 72 h para *N. aberrans*, 24 h para *C. elegans* y 17 y 24 h para *P. redivivus*. Las concentraciones finales del extracto hexánico se establecieron en un rango de 1.25 a 10 mg/mL, con cuatro repeticiones para cada tratamiento. La mortalidad se determinó mediante observación microscópica y respuesta a estímulo mecánico (4x y 10x). El porcentaje de mortalidad se calculó según [Cruz-Arévalo et al. \(2024\)](#).

Análisis estadístico

Todos los experimentos tuvieron un diseño completamente aleatorizado. Para verificar la normalidad de las tasas de mortalidad registradas se realizó la prueba de Shapiro-Wilk. Posteriormente, se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA) de una vía. La comparación de las medias se efectuó mediante la prueba de Tukey ($p < 0.05$). Los análisis estadísticos se hicieron en el software R v4.3.3.



RESULTADOS

Los resultados de mortalidad de *Nacobbus aberrans*, *Caenorhabditis elegans* y *Panagrellus redivivus* expuestos al extracto hexánico del sustrato degradado (SD) de *Pleurotus ostreatus* en el rango de 1.25-10 mg/mL se presentan a continuación.

Mortalidad en larvas de *Nacobbus aberrans*

El extracto hexánico del SD de *P. ostreatus* mostró actividad nematocida moderada contra larvas J2 de *N. aberrans*, con una mortalidad máxima de 28.5 ± 2.9 % a 10 mg/mL. Las concentraciones de 5.0, 2.5 y 1.25 mg/mL presentaron mortalidades de 6.7 ± 4.2 %, 6.1 ± 4.3 % y 1.9 ± 1.4 %, respectivamente. El control positivo (ivermectina) produjo 100 % de mortalidad, mientras que el control negativo (Tween 80) registró 15.1 ± 3.2 % (Tabla 1).

Tabla 1. Mortalidad promedio de extractos hexánicos del SD de *P. ostreatus* contra larvas J2 de *N. aberrans*

Tratamientos (mg/mL)	<i>Nacobbus aberrans</i> ($\bar{X} \pm DE$)
IVM	100 ± 0^a
TW 80	15.1 ± 3.2^c
10	28.5 ± 2.9^b
5.0	6.7 ± 4.2^{cd}
2.5	6.1 ± 4.3^d
1.2	1.9 ± 1.4^d

IVM: ivermectina (0.05mg/mL); TW 80: Tween 80 (0.01mg/mL); $\pm DE$: Desviación estándar. Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes (Tukey, $p=0.05$).

Mortalidad en larvas de *Caenorhabditis elegans*

En *C. elegans*, el extracto hexánico mostró mayor eficacia nematocida. La concentración de 10 mg/mL produjo 72.2 ± 3.6 % de mortalidad. Las concentraciones de 5.0 y 2.5 mg/mL registraron 64.1 ± 12.4 % y 62.6 ± 5.4 %, respectivamente, mientras que 1.25 mg/mL produjo 35.2 ± 13.8 %. La ivermectina causó 100 % de mortalidad y el control negativo presentó 38.8 ± 11.5 % (Tabla 2).

Mortalidad en larvas de *Panagrellus redivivus*

En el nematodo *P. redivivus*, la mayor mortalidad se observó a 10 mg/mL, con 57.0 ± 11.5 % a las 17 h y 46.5 ± 4.0 % a las 24 h. La concentración de 1.25 mg/mL mostró las mortalidades más bajas (14.0 ± 5.2 % y 14.2 ± 4.3 %, respectivamente). Las concentraciones intermedias (5.0 y 2.5 mg/mL) presentaron mortalidades entre 33-36 %. El control positivo produjo 100 % de mortalidad y el negativo ≤ 5 % (Tabla 3).



Tabla 2. Mortalidad promedio de extractos hexánicos del SD de *P. ostreatus* contra larvas J2 de *C. elegans*

Tratamientos (mg/mL)	<i>Caenorhabditis elegans</i> ($\bar{X} \pm DE$)
IVM	100±0 ^a
TW 80	38.8±11.5 ^c
10	72.2±3.6 ^b
5.0	64.1±12.4 ^b
2.5	62.6±5.4 ^b
1.2	35.2±13.8 ^c

IVM: ivermectina (0.05mg/mL); TW 80: Tween 80 (0.01mg/mL); ±DE: Desviación estándar. Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes (Tukey, p=0.05).

Tabla 3. Mortalidad promedio de extractos hexánicos del SD de *P. ostreatus* contra larvas J2 de *P. redivivus*

Tratamientos (mg/mL)	Lectura 17 h ($\bar{X} \pm DE$)	Lectura 24 h ($\bar{X} \pm DE$)
IVM	100±0 ^a	100±0 ^a
TW 80	4.6±3.2 ^d	1.25±2.5 ^c
10	57.0±11.5 ^b	46.5±4.0 ^b
5	33.2±1.2 ^c	36.6±8.3 ^b
2.5	33.8±6.7 ^c	35.4±12.2 ^b
1.25	14.0±5.2 ^d	14.2±4.3 ^c

IVM: ivermectina (0.05 mg/mL); TW 80: Tween 80 (0.01 mg/mL); ±DE: Desviación estándar. Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes (Tukey, p=0.05).

Alteraciones en nematodos expuestos al extracto hexánico

Además de la mortalidad, se observaron alteraciones morfológicas y conductuales en los nematodos expuestos al extracto crudo hexánico, evidenciadas durante la evaluación microscópica. Los organismos presentaron signos claros de estrés fisiológico y daño estructural (Tablas 4 y 5). Entre los cambios más notables se registraron movimientos erráticos y espasmódicos, caracterizados por contracciones bruscas y descoordinadas que sugieren alteración neuromuscular. Asimismo, se observó inmovilización acompañada de enroscamiento o arqueamiento anormal del cuerpo, particularmente en los tratamientos con mayor concentración del extracto, lo que indica posible afectación de la función muscular o del sistema nervioso.

También se detectaron signos de deshidratación y cambios en la coloración corporal; algunos nematodos presentaron apariencia opaca o decolorada, con tonalidades más oscuras o aspecto translúcido, lo que sugiere pérdida de integridad de la cutícula. Adicionalmente, se observaron inclusiones o cuerpos granulares en el citoplasma, compatibles con acumulación de sustancias tóxicas o alteraciones en procesos metabólicos esenciales. En conjunto, estas alteraciones son consistentes con daño en la



cutícula y disfunción neuromuscular inducidos por la exposición al extracto hexánico del sustrato degradado de *Pleurotus ostreatus*.

Tabla 4. Efectos de los tratamientos y controles sobre la morfología de larvas muertas de J2 de *Nacobbus aberrans*







Tratamientos	Morfología de J2 <i>N. aberrans</i>
Ivermectina	
Tween 80	
10 mg/mL	
5 mg/mL	
2.5 mg/mL	
1.25 mg/mL	



Tabla 5. Efectos de los tratamientos y controles sobre la morfología de larvas muertas de *Caenorhabditis elegans*

Tratamientos	Morfología de J2 de <i>C. elegans</i>
Ivermectina	
Tween 80	
10 mg/mL	
5 mg/mL	
2.5 mg/mL	
1.25 mg/mL	



DISCUSIÓN

En el presente estudio, el extracto crudo hexánico del sustrato degradado (SD) de *Pleurotus ostreatus* mostró actividad nematicida diferencial entre las especies evaluadas, con menor efectividad contra el nematodo fitoparásito *Nacobbus aberrans* (28.5 % \pm 2.9 a 10 mg/mL) en comparación con los nematodos de vida libre *Caenorhabditis elegans* y *Panagrellus redivivus*. Esta mortalidad es considerablemente inferior a la reportada para fracciones acuosas del SD del mismo hongo (87.9 % \pm 5.26) (Cruz-Arévalo *et al.*, 2024), así como a extractos hidroalcohólicos del SD, que alcanzaron 88.3 % a 10 mg/mL y hasta 98 % a 20 mg/mL (Del Porte-Argueta *et al.*, 2025). Estas diferencias sugieren que los compuestos con mayor actividad nematicida en el SD de *Pleurotus* presentan mayor polaridad y, por tanto, se concentran preferentemente en fracciones acuosas o hidroalcohólicas. Asimismo, factores estructurales asociados a la cutícula de *N. aberrans* podrían limitar la penetración de metabolitos lipofílicos presentes en el extracto hexánico (Gomes *et al.*, 2019). Las enzimas hidrolíticas producidas por *Pleurotus*, particularmente proteasas y quitinasas, han sido señaladas como responsables del efecto nematicida en residuos degradados del hongo (Soares *et al.*, 2013; Marques-Ferreira *et al.*, 2019). En concordancia, diversos estudios han demostrado que metabolitos derivados de sustratos degradados por hongos comestibles poseen actividad contra nematodos; sin embargo, la mayoría de los productos naturales evaluados contra *N. aberrans* son de origen vegetal y se enfocan principalmente en *Meloidogyne* spp., considerado el fitonematodo de mayor importancia económica global. Los resultados obtenidos también fueron inferiores a los reportados para extractos de *Pleurotus djamor* contra *Meloidogyne enterolobii* y *N. aberrans*, donde se alcanzaron mortalidades del 87.6 % a 0.625 mg/mL mediante fracciones purificadas como PdR-2 (Sánchez-Salgado *et al.*, 2021; Gómez-Rodríguez *et al.*, 2022). Esta diferencia puede atribuirse a que los extractos crudos hexánicos contienen menores concentraciones relativas de compuestos bioactivos nematicidas, como triterpenos o poliacetilenos, en comparación con fracciones purificadas.

De forma similar, González-Cortázar *et al.* (2021) evaluaron el extracto hidroalcohólico de *Pleurotus djamor* y reportaron una mortalidad del 97 % en larvas de *Haemonchus contortus*. Aunque este valor es superior al observado en *C. elegans* en el presente estudio, las diferencias pueden atribuirse a factores como la cepa del hongo, el origen epigenético, los insumos utilizados en el sustrato, la biogeografía y el método de extracción. Asimismo, la composición química de fracciones hidroalcohólicas puede diferir sustancialmente de la de extractos crudos hexánicos, lo que influye en la eficacia biológica. En este contexto, resulta pertinente evaluar en estudios futuros el efecto de estos extractos y sus fracciones sobre huevos de *P. redivivus* y *N. aberrans*, así como realizar evaluaciones *in situ* para determinar su impacto en organismos del suelo y sistemas agrícolas reales. Cabe destacar que, en comparación con nematicidas sintéticos, los compuestos naturales presentes en el SD de *P. ostreatus* son biodegradables y presentan menor toxicidad para organismos no objetivo. Además, la



diversidad química de los extractos naturales reduce la probabilidad de desarrollo de resistencia en nematodos

En contraste, la mayor susceptibilidad observada en *C. elegans* (72.2 % \pm 3.6 a 10 mg/mL) coincide con estudios previos que reportan elevada sensibilidad de nematodos de vida libre a compuestos derivados de *Pleurotus*. Por ejemplo, extractos acuosos del SD de *P. ostreatus* produjeron mortalidades cercanas al 90 % en *P. redivivus* a 20 mg/mL (Cruz-Arévalo *et al.*, 2024). Asimismo, mezclas de aceites esenciales han mostrado mortalidades superiores al 99 % en nematodos del suelo (Tinoco *et al.*, 2019). Estos resultados apoyan la evidencia de que los nematodos de vida libre presentan mayor susceptibilidad que los fitoparásitos, posiblemente debido a diferencias en la estructura de la cutícula, en la composición lipídica de la superficie corporal y en la capacidad de detoxificación. De hecho, se ha documentado mayor efectividad de metabolitos de *Pleurotus* en nematodos de vida libre como *C. elegans* que en fitoparásitos como *Meloidogyne* spp. (Vera-Morales *et al.*, 2024), patrón que coincide con los resultados del presente estudio. A nivel mecanístico, se ha identificado la 3-octanona como una toxina nematocida clave en *P. ostreatus*. Este compuesto, presente en los toxocistos del hongo, induce parálisis rápida en *C. elegans* mediante alteración de la integridad de la membrana celular y disrupción del equilibrio de calcio intracelular, lo que conduce a la muerte celular sistémica (Armas-Tizapantzi *et al.*, 2019). La presencia de este metabolito en varias especies de *Pleurotus* y su asociación con compuestos volátiles aromáticos (Yin *et al.*, 2019) respalda el potencial nematocida observado en extractos del SD.

En *P. redivivus*, la mortalidad máxima se registró a 10 mg/mL a las 17 h (57 % \pm 11.5), superior a la observada a 24 h (46.5 % \pm 4.0), dependiente de la concentración y el tiempo de exposición. La actividad nematocida del SD de *Pleurotus* se ha relacionado con metabolitos como ácidos grasos y proteasas (Genier *et al.*, 2015; Pineda-Alegría *et al.*, 2020). Resultados similares se han reportado para un extracto crudo de SD de *Flammulina velutipes*, con mortalidades cercanas al 57 % en *Panagrellus* sp. (Marques-Ferreira *et al.*, 2019). Debe considerarse que el SD utilizado en el cultivo de *Pleurotus* contiene residuos vegetales ricos en metabolitos secundarios, incluidos compuestos fenólicos, terpenoides, saponinas, alcaloides y flavonoides (Francis *et al.*, 2002; Chin *et al.*, 2018), varios de los cuales han sido identificados como fitoquímicos con actividad protectora frente a nematodos (Desmedt *et al.*, 2020). Además, la selección de *P. redivivus* como organismo modelo se sustenta en su proximidad filogenética con fitonematodos de importancia fitosanitaria, particularmente géneros como *Bursaphelenchus* y *Aphelenchoides* (Srinivasan *et al.*, 2013). Esta relación taxonómica respalda su uso como organismo sustituto en evaluaciones preliminares de compuestos nematocidas y permite extrapolar razonablemente los resultados hacia nematodos fitoparásitos.

Las alteraciones morfológicas y conductuales observadas en los nematodos expuestos al extracto hexánico, descritas en los Resultados, son compatibles con daño estructural



y disfunción fisiológica. Cambios como espasmos, enroscamiento, decoloración corporal e inclusiones citoplasmáticas han sido asociados con alteraciones de la cutícula y del sistema neuromuscular en nematodos expuestos a compuestos bioactivos. Así también, la cutícula constituye una barrera protectora esencial en nematodos, y su alteración se ha asociado con la acción de compuestos nematicidas. Njom *et al.* (2021) demostraron que la degradación selectiva de colágenos cuticulares como DPY-7 produce pérdida de integridad estructural y muerte del organismo. De forma análoga, los metabolitos lipofílicos presentes en el extracto hexánico del SD de *P. ostreatus* podrían perturbar las interacciones entre proteínas colágenas y cuticulinas, lo que puede provocar alteraciones en la estructura y función de la cutícula y contribuir al efecto nematicida observado.

CONCLUSIONES

El extracto crudo hexánico del sustrato degradado de *Pleurotus ostreatus* mostró actividad nematicida contra *Nacobbus aberrans*, *Caenorhabditis elegans* y *Panagrellus redivivus*, con mayor susceptibilidad en los nematodos de vida libre. La mortalidad máxima se registró en *C. elegans* (72.2 %), seguida de *P. redivivus* (57 %), mientras que *N. aberrans* presentó menor respuesta (28.5 %). Estos resultados evidencian diferencias en la sensibilidad entre nematodos de vida libre y fitoparásitos y confirman el potencial de *P. ostreatus* como fuente de compuestos bioactivos para el manejo biológico de nematodos de importancia agrícola. Asimismo, el uso de organismos modelo permitió anticipar posibles efectos ecológicos y respalda la evaluación futura del extracto en condiciones de suelo y sistemas agrícolas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores dedican este artículo a la memoria del M.C. René H. Andrade Gallegos, quien fue un valioso colaborador del grupo de investigación de El Colegio de la Frontera Sur, (ECOSUR), Tapachula, Chiapas.

FINANCIAMIENTO

El presente estudio fue financiado por la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI). Proyecto Frontera con número: CBF2023-2024-387.

REFERENCIAS

ARMAS-TIZAPANTZI A, Mata G, Hernández-Cuevas LV, Montiel-González AM. 2019. Estructuras tipo toxocistos en *Pleurotus ostreatus* y *P. pulmonarius*. *Scientia fungorum*. 49:e1250. <https://doi.org/10.33885/sf.2019.49.1250>

AVENDAÑO-HERNÁNDEZ RJ, Sánchez JE. 2013. Self-pasteurised substrate for growing oyster mushrooms (*Pleurotus* spp.). *African Journal of Microbiology Research*. 7(3):220-226. <https://academicjournals.org/journal/AJMR/article-abstract/DB3EBDB17834>



AYALA-MARTÍNEZ M, Ojeda RD, Soto-Simental J, Rivero PN, Meneses MM, Zepeda-Bastida A. 2015. Antibacterial activity of spent substrate of mushroom *Pleurotus ostreatus* enriched with herbs. *Journal of Agricultural Science*. 7 (11):225-231. <https://doi.org/10.5539/jas.v7n11p225>

BAAZEEM A, Alorabi M, Darwesh H, Alotaibi SS, El-Deen AN, Iqbal S, Naqvi SAH. 2022. Biological control of root-knot nematode (*Meloidogyne javanica*) by potential antagonism of endophytic fungi isolated from Taify roses. *Journal of King Saud University – Science*. 34(8):e102329. <https://doi.org/10.1016/J.JKSUS.2022.102329>

CEDEÑO-GARCÍA FJ. 2024. Incidencia de nematodos fitoparásitos y prácticas asociadas a su manejo en el cultivo de banano (*Musa × paradisiaca* L.) en el cantón Pueblo Viejo. Tesis de Licenciatura. Universidad Técnica de Babahoyo. Babahoyo, Los Ríos, Ecuador. Pp. 73. https://rraae.cedia.edu.ec/vufind/Record/UTB_d3a880fa942117caa4750316604e13f2/Description

CHIN S, Behm CA, Mathesius U. 2018. Functions of flavonoids in plant-nematode interactions. *Plants*. 7(4):e85. <https://doi.org/10.3390/plants7040085>

CRISTÓBAL-ALEJO J, Mora-Aguilera G, Manzanilla-López RH, Marbán-Mendoza N, Sánchez-García P, Cid del Prado-Vera I, Evans K. 2006. Epidemiology and integrated control of *Nacobbus aberrans* on tomato in Mexico. *Nematology*. 8(5):727-737. <https://doi.org/10.1163/156854106778877929>

CRUZ-ARÉVALO J, Hernández-Velázquez VM, Cardoso-Taketa AT, González-Cortazar M, Sánchez-Vázquez JE, Peña-Chora G, Villar-Luna E, Aguilar-Marcelino L. 2024. Hydroalcoholic extracts from *Pleurotus ostreatus* spent substrate with nematocidal activity against *Nacobbus aberrans* Phytonematode and the non-target species *Panagrellus redivivus*. *Plants*. 13(13):e1777. <https://doi.org/10.3390/plants13131777>

DEL PORTE-ARGUETA R, Téllez-Téllez M, Acosta-Urdapilleta ML, Gómez-Rodríguez O, Wong-Villarreal A, Carreño-Campos C, Aguilar-Marcelino L. 2025. Sustrato degradado de *Pleurotus ostreatus* como nematocida de *Nacobbus aberrans* en plantas de chile (*Capsicum annuum*). *Revista Mexicana de Fitopatología*. 43(2):e64. <https://doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.2407-2>

DESMEDT W, Mangelinckx S, Kyndt T, Vanholme B. 2020. A phytochemical perspective on plant defense against nematodes. *Frontiers in Plant Science*. 11:e602079. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.602079>

FRANCIS G, Kerem Z, Makkar HPS, Becker K. 2002. The biological action of saponins in animal systems: a review. *British Journal of Nutrition*. 88(6):587-605. <https://doi.org/10.1079/BJN2002725>



GENIER HLA, De Freitas-Soares EF, de Queiroz JH, de Souza-Gouveia A, Araújo JV, Riveiro-Braga F, Rebouças-Pinheiro I, Megumi-Kasuya MC. 2015. Activity of the fungus *Pleurotus ostreatus* and of its proteases on *Panagrellus* sp. larvae. *African Journal of Biotechnology*. 14(17):1496-1503. <https://doi.org/10.5897/AJB2015.14447>

GOMES EH, Soares FEF, Souza DC, Lima LT, Sufiate BL, Ferreira TF, Queiroz JH. 2019. Role of *Synadenium grantii* latex proteases in nematicidal activity on *Meloidogyne incognita* and *Panagrellus redivivus*. *Brazilian Journal of Biology*. 79(4):665-668. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.188129>

GÓMEZ-RODRÍGUEZ O, Pineda-Alegriá JA, Castañeda-Ramírez GS, González-Cortázar M, Sánchez JE, Aguilar-Marcelino L. 2022. Actividad nematicida in vitro de la fracción PdR-2 de *Pleurotus djamor* contra J2 *Meloidogyne enterolobii*. *Revista Mexicana de Fitopatología*. 40(2):254-262. <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.2202-2>

GONZÁLEZ-CORTÁZAR M, Sánchez JE, Huicochea-Medina M, Hernández-Velázquez VM, Mendoza-De-Gives P, Zamilpa A, López-Arellano ME, Pineda-Alegriá, JA, Aguilar-Marcelino L. 2021. *In vitro* and *in vivo* nematicide effect of extract fractions of *Pleurotus djamor* against *Haemonchus contortus*. *Journal of Medicinal Food*. 24(3):310-318. <https://doi.org/10.1089/jmf.2020.0054>

LAX P, Passone MA, Becerra AG, Sosa AL, Ciancio A, Finetti Sialer MM, Rosso LC. 2022. Sustainable strategies for management of the “false root-knot nematode” *Nacobbus* spp. *Frontiers in Plant Science*. 13:e1046315. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1046315>

MARQUES-FERREIRA J, Neres-Carreira D, Ribeiro-Braga F, de Freitas-Soares FE. 2019. First report of the nematicidal activity of *Flammulina velutipes*, its spent mushroom compost and metabolites. *3 Biotech*. 9:e410. <https://doi.org/10.1007/s13205-019-1951-x>

NJOM VS, Winks T, Diallo O, Lowe A, Behnke J, Dickman MJ, Duce I, Johnstone I, Buttler DJ. 2021. The effects of plant cysteine proteinases on the nematode cuticle. *Parasites & Vectors*. 14:e302. <https://doi.org/10.1186/S13071-021-04800-8>

OCAMPO-LÓPEZ J, Soto-Simental S, Ayala-Martínez M, Zepeda-Bastida A. 2021. Antibacterial activity of spent substrate of mushroom. In: AL-NAGGAR AMM (ed). *Cutting-edge Research in Agricultural Sciences Vol. 6*. BP International, India. Pp.136-147. eISBN: 978-93-90768-11-0. <https://doi.org/10.9734/bpi/cras/v6/7475D>

OCIMATI W, Were E, Tazuba AF, Dita M, Zheng SJ, Blomme G. 2021. Spent *Pleurotus ostreatus* substrate has potential for managing fusarium wilt of banana. *Journal of fungi*. 7(11):e946. <https://doi.org/10.3390/jof7110946>



PICA-GRANADOS Y. 2008. Ensayo de toxicidad con el nemátodo *Panagrellus redivivus*. En: Ramírez-Romero P, Mendoza-Cantú A, *Ensayos toxicológicos para la evaluación de sustancias químicas en agua y suelo*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología. Pp. 139-153.

<http://centro.paot.org.mx/index.php/tematico/agua>

PINEDA-ALEGRÍA JA, Sánchez J, González-Cortazar M, von Son-de Fernex E, González-Garduño R, Mendoza-de Gives P, Zamilpa A, Aguilar-Marcelino L. 2020. *In vitro* nematocidal activity of commercial fatty acids and β -sitosterol against *Haemonchus contortus*. *Journal of Helminthology*. 94:e135.

<https://doi.org/10.1017/S0022149X20000152>

RODRÍGUEZ-MORALES D, Lozano-Jiménez YY, Sánchez-Mora RM. 2021. *Caenorhabditis elegans* como modelo de infección para el estudio de antimicrobianos. *Nova*. 19(36):109-132. <https://doi.org/10.22490/24629448.5295>

SÁNCHEZ-SALGADO SF, Castañeda-Ramírez GS, Sánchez JE, Gómez-Rodríguez O. 2021. Actividad nematocida in vitro de tres cepas de hongos comestibles de *Pleurotus* spp. contra *Haemonchus contortus* (L3) y *Nacobbus aberrans* (J2). *Ibciencias*. 4(1):9-13. <https://www.revistas.unach.mx/index.php/ibciencias/article/view/224>

SOARES FEF, Braga FR, Araújo JV, Geniêr HLA, Gouveia AS, Queiroz JH. 2013. Nematicidal activity of three novel extracellular proteases of the nematophagous fungus *Monacrosporium sinense*. *Parasitology Research*. 112:1557-1565. <https://doi.org/10.1007/s00436-013-3304-8>

SRINIVASAN J, Dillman AR, Macchietto MG, Heikkinen L, Lakso M, Fracchia KM, Antoshechkin I, Mortazavi A, Wong G, Sternberg PW. 2013. The draft genome and transcriptome of *Panagrellus redivivus* are shaped by the harsh demands of a free-living lifestyle. *Genetics*. 193(4):1279-1295. <https://doi.org/10.1534/genetics.112.148809>

TINOCO RI, Silva-Marrufo O, Castañeda-Venegas JA, Sida-Arreola JP. 2019. Eficiencia de mezclas para el control de nematodos a base de aceites esenciales de orégano, canela y extractos hidroalcohólicos de gobernadora. *Revista de Ingeniería Biomédica y Biotecnología*. 3(8):23-28.

https://www.ecorfan.org/taiwan/rj_ingenieria_biomedica_viii.php

VAN BEZOOIJEN J. 2006. *Methods and Techniques for Nematology*. Wageningen, Netherlands: Wageningen University. Pp. 118.

VERA-MORALES M, Castañeda-Ruiz RF, Sosa D, Arias-Vega C, Quevedo A, Ratti MF. 2024. Compuestos bioactivos de bacterias y hongos en el control de nematodos fitopatógenos: mecanismos de acción, interacciones y aplicaciones. *Scientia Agropecuaria*. 15(1):143-157. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2024.011>



WILSON MJ, Kakouli-Duarte T. 2009. Nematodes as Environmental Indicators. Wallingford, The United Kingdom: CABI Publishing. Pp. 341. ISBN: 978-1-84593-385-2.

YIN C, Fan X, Fan Z, Shi D, Yao F, Gao H. 2019. Comparison of non-volatile and volatile flavor compounds in six *Pleurotus* mushrooms. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 99(4):1691-1699. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9358>

ZIED CD, Sánchez JE, Noble R, Pardo-Giménez A. 2020. Use of spent mushroom substrate in new mushroom crops to promote the transition towards a circular economy. *Agronomy*. 10(9): e1239. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091239>