



Abanico Boletín Técnico. Enero-Diciembre, 2025; 4:1-18.
Artículo Original. e2024-39.

Validación externa de la idoneidad relativa para estimar la distribución potencial de *Pinus lagunae*

External validation of relative suitability for estimating the potential distribution of *Pinus lagunae*

Flores-Garnica José*¹ , Reyes-Cárdenas Oscar**² , Flores-Rodríguez Ana¹ ,
Lomelí-Zavala Mónica¹ , Hernández-Martínez Luis³ , Orozco-Gutiérrez
Gabriela⁴ 

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional Pacífico Centro. Campo Experimental Centro Altos de Jalisco. Carretera Tepatitlán-Lagos de Moreno, Km 8 C.P. 47600, Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México. ²Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ingeniería. Dr. Manuel Nava No. 8, Zona Universitaria Poniente, C.P. 78290. San Luis Potosí, SLP, México. ³Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional Noroeste. Campo Experimental Todos Santos, Agricultura s/n, Col. Emiliano Zapata, C.P. 23070 La Paz, Baja California Sur, México. ⁴Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Tecomán, Colima, México. E. mails: flores.german@inifap.gob.mx, oscar.reyes@uaslp.mx, anaflores1386@gmail.com, monica.lomeli.zavala@gmail.com, hernandez.luis@inifap.gob.mx, orozco.gabriela@inifap.gob.mx. *Autor responsable: Flores-Garnica José. **Autor corresponsal: Reyes-Cárdenas Oscar.

RESUMEN

Pinus cembroides subsp. *lagunae* es una conífera endémica de la Sierra La Laguna, Baja California Sur, México, cuya área de distribución se ha reducido, considerándose como vulnerable. Por ello, es necesario implementar su restauración y fomento, lo que requiere conocer su distribución potencial, que puede determinarse con información de sus requerimientos ecológicos. Pero se tiene poca información al respecto, presentándose como alternativa el algoritmo Maxent. Aunque Maxent deriva parámetros para evaluar la precisión de los resultados, estos se basan solo en la información de los sitios usados. Debido a esto, se realizó una validación externa, comparando la distribución definida con Maxent (óptima, buena, regular, baja y sin potencial), y la distribución potencial determinada con base en los requerimientos de altitud y precipitación (DAP) de esta especie. La cartografía de Maxent, dentro del área de estudio, con mayor precisión (global 85.9%) y concordancia (60.6 de índice Kappa) resultó usando los valores sin transformación. Mientras que dentro de La Reserva de la Biosfera Sierra La Laguna la precisión global fue del 72.6% con una concordancia de 52.9 (índice Kappa). Se concluye que la distribución potencial determinada con Maxent fue similar a la definida con base en la altitud y precipitación.

Palabras clave: máxima entropía, Maxent, nicho ecológico, requerimientos ecológicos, matriz de confusión.

ABSTRACT

Pinus cembroides subsp. *lagunae* is a conifer endemic to the Sierra La Laguna, Baja California Sur, Mexico, whose range has been reduced to the degree of being considered vulnerable. Therefore, it is necessary to



implement its restoration and promotion, which requires knowing its potential distribution, which can be determined with information of its ecological requirements. But little information is available on this, with the Maxent algorithm being presented as an alternative. Although Maxent derives parameters to evaluate the accuracy of results, these are only based on information from the sites used. Because of this, an external validation was performed comparing the defined distribution with Maxent (optimal, good, regular, low, and no potential), and the potential distribution determined based on the altitude and precipitation requirements of this species. Maxent mapping within the study area with greater precision (overall 85.9%) and concordance (60.6 Kappa index) was performed using untransformed values. While within the Sierra La Laguna Biosphere Reserve, the overall accuracy was 72.6% with a concordance of 52.9 (Kappa index). It was concluded that Maxent's potential distribution was comparable to that determined based on altitude and precipitation.

Keywords: maximum entropy, Maxent, ecological niche, ecological requirements, confusion matrix.

INTRODUCCIÓN

Pinus cembroides subsp. *lagunae* (sinonimia *Pinus lagunae*) es una especie endémica de la Sierra La Laguna, en Baja California Sur, México (Breceda *et al.*, 2014), manifestando un aislamiento geográfico (Axelrod, 1958), y se considera a este sitio como una isla de vegetación (Talavera & Massieu, 2021). Además, esta especie se distribuye en áreas pequeñas asociadas con *Quercus devia* Goldman (Ffolliott *et al.*, 1992) en superficies mayores a 20,000 ha (INEGI, 2017). Sin embargo, actualmente se encuentra en condición de vulnerable como resultado de aprovechamientos maderables y la ocurrencia de incendios (Farjon, 2015), por lo que es necesario propiciar su recuperación y conservación, así como la de las poblaciones de especies asociadas (IUCN, 2019). Para esto, en principio, se debe conocer su distribución espacial, o potencial, lo cual sería sencillo si se conocieran sus requerimientos agroecológicos (Cartaya *et al.*, 2016), ya que la distribución de una especie, en ausencia de competidores, está condicionada a su desempeño fisiológico y a restricciones ambientales, que definen que esta se mantenga en un lugar determinado sin que emigre, lo cual se conoce como nicho ecológico (Maciel-Mata *et al.*, 2015). De esta forma, si se conoce la distribución espacial de los factores que definen el nicho (hábitat) de una especie, teóricamente es posible estimar su distribución potencial, siendo esto la base de los modelos geográficos de predicción (Palacios *et al.*, 2016).

Una herramienta que apoya el modelado de nicho ecológico y de distribución de especies es el algoritmo Maxent, basado en el concepto de máxima entropía (Hernández-Herrera *et al.*, 2019), y que ha resultado en predicciones precisas (Barrera *et al.*, 2020), al discriminar las variables más significativas de los sitios donde la especie de interés ha sido detectada. Aunque frecuentemente se usan modelos generados por Maxent para definir la distribución de especies (Garfias *et al.*, 2013; Cartaya *et al.*, 2016; Aceves-Rangel *et al.*, 2018), son pocos los trabajos orientados a validar sus resultados, más aún, estas validaciones se basan en análisis comparativos, pero usando la misma información



que se usa para el proceso de Maxent. De esta forma, las predicciones resultantes podrían considerarse incompletas, cuando no correspondan a todo el rango de distribución real de la especie, y que se define con base en la correspondencia de requerimientos ecológicos con variables ambientales relacionadas con la especie analizada (Palma-Ordaz & Delgadillo-Gutiérrez, 2014). De acuerdo con esto, se esperaría que la distribución definida con Maxent sea semejante a la que se puede definir en función de los requerimientos ecológicos de la especie de interés, lo cual implica un enfoque externo al proceso de Maxent. No obstante, no se tienen reportes de validaciones Maxent con el uso de información externa, por lo que el objetivo del presente estudio fue validar la cartografía de distribución de *P. lagunae* resultante de Maxent, tomando como referencia cartografía generada con un proceso externo. Para esto, se determinó con Maxent la probabilidad de ocurrencia de esta especie considerando cuatro transformaciones de los valores de salida. Mientras que en un proceso alternativo se basó en la distribución de los requerimientos ecológicos de *P. lagunae* con relación a la altitud y la precipitación. Los criterios de selección del mejor mapa fueron la mayor precisión y concordancia resultantes a partir de matrices de confusión.

MATERIAL Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio corresponde a la Reserva de la Biosfera de Sierra La Laguna (Figura 1), localizada en la parte más elevada del sur del estado de Baja California Sur, con una superficie de 112,437 ha (Breceda *et al.*, 2014) y una altitud de 2,090 m (Jiménez *et al.*, 2018), donde los suelos en su mayoría son originados de rocas intrusivas y granito, y son arenosos, con una capa delgada de hojarasca, con poco contenido de limo y arcilla (León-de la Luz & Domínguez-Cadena, 1989).

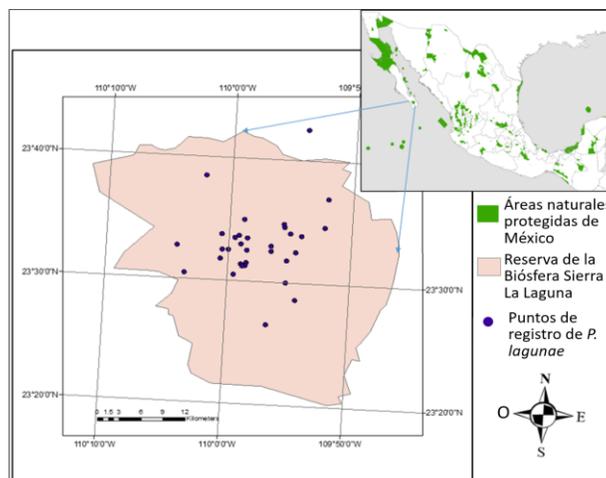




Figura 1. Ubicación de registros de ocurrencia de *Pinus lagunae* en la Reserva de la Biosfera Sierra La Laguna, ubicada en el estado de Baja California Sur (CONABIO, 2016; CONAFOR, 2015)

Requerimientos ecológicos de *Pinus lagunae*

Los requerimientos ambientales de *P. lagunae* se resumen en: **a) Precipitación**. Se ubica en áreas con más de 600 mm de lluvia (Farjon, 2015; Perry, 1991); y **b) Altitud** (m). El rango altitudinal reportado para esta especie es: 523-2050 (León-de la Luz & Domínguez-Cadena, 1989; Passini & Pinel, 1989; Perry, 1991; Ffolliott *et al.*, 1992; Biondi & Fessenden, 1999; Farjon, 2015; CONABIO, 2016).

Asimismo, *P. lagunae* se manifiesta en tres condiciones (Passini & Pinel, 1989): a) bosques de arbolado bajo y delgado de *P. lagunae* y *Quercus tuberculata* Liebm; b) bosques con arbolado alto y denso de *P. lagunae* y *Q. devia*; c) bosques altos y abiertos de *P. lagunae*. Por otra parte, *P. lagunae* se ubica en suelos ligeramente ácidos (pH varía de 5 a 7). Específicamente, *P. lagunae* ocurre en elevaciones entre los 1,600 y 2,050 m, asociándose con *Q. devia*, que es más abundante en la mayoría de las áreas (Passini & Pinel, 1989).

Registros de ocurrencia

Para determinar la distribución de *P. lagunae*, se utilizan datos de su hábitat, lo que en términos de modelaje se define como verdaderos positivos (presencia) y verdaderos negativos (ausencia) (Fielding & Bell, 1997). En el caso del proceso de Maxent, este se basa únicamente en los registros de presencia de la especie de interés. De acuerdo con esto, se utilizaron 141 puntos de registro de la presencia de *P. lagunae*, los cuales se obtuvieron de los registros correspondientes al Inventario Nacional Forestal y de Suelos (CONAFOR, 2015) y de CONABIO (2016).

Variables ambientales

Para definir el modelo de distribución de *P. lagunae* se emplearon 13 variables ambientales (Cuadro 1), cuya función es determinar restricciones para la distribución de esta especie, con base en lo cual se eligió la distribución de mayor entropía (Hernández-Herrera *et al.*, 2019). La importancia de cada variable se determinó con base en su importancia relativa, la cual se define con los criterios de porcentaje de contribución (PC) e importancia de permutación (IP), que son evaluados por Maxent (Phillips, 2010). Posteriormente, se prueban diferentes combinaciones de variables seleccionadas hasta tener la que resulte en la máxima entropía, con base en la cual se generó el mapa de probabilidad de ocurrencia de *P. lagunae*.



Cuadro 1. Variables usadas para modelar la distribución potencial de *P. lagunae* en la Sierra La Laguna, Baja California Sur

Grupo	Variable	Unidades	Resolución (tamaño de celda)	Fuente
Clima	Clima	Clases	100 m	CONABIO (2008)
	Precipitación anual	mm	100 m	CONABIO (2008)
	Isotermas	°C	100 m	CONABIO (2008)
	Temp. media anual	°C	100 m	CONABIO (2008)
	Temp. máxima promedio	°C	100 m	CONABIO (2008)
	Temp. mínima promedio	°C	100 m	CONABIO (2008)
	Rango humedad	Clases	100 m	CONABIO (2008)
Suelo	Cobertura de suelo	Clase	100 m	CONABIO (2008)
	Uso de suelo modificado	Grupo	100 m	CONABIO (2008)
	Vegetación Serie VI	Clases	100 m	INEGI (2017)
	Régimen de hum. del suelo	Clases	100 m	CONABIO (2008)
Modelo elevación	Exposición	grados	100 m	INEGI (2015)
	Altitud	m	100 m	INEGI (2015)

Para generar el modelo de predicción del potencial de ocurrencia de *P. lagunae* se empleó un proceso de validación cruzada con 10 repeticiones, donde se consideran: **a)** la distribución de una variable ambiental dada, definida por los registros que se tienen de la ocurrencia de la especie; y **b)** la distribución general de la misma variable ambiental restrictiva. Posteriormente, en la unión de estas dos distribuciones se establece un punto de corte, de esta forma, cuando se está sobre este punto, se apoya la ocurrencia de la especie (verdaderos positivos), y, por el contrario, cuando se está bajo se rechaza (falsos positivos) (Hanley & McNeil, 1982).

Para evaluar las variables se definen dos parámetros: 1) Porcentaje de contribución (PC), que se calcula durante el desarrollo del modelo a partir de los cambios en la ganancia; y, 2) Importancia de permutación (IP), que se calcula al cambiar los valores de cada variable en las ubicaciones de entrenamiento y fondo para luego volver a evaluar el modelo (Phillips, 2010).

Enseguida, el modelo se reevalúa en los datos permutados y la caída resultante en el área bajo la curva (AUC) de entrenamiento se presentan valores normalizados a porcentajes. Para definir estas gráficas se hace una prueba de *jackknife* para generar un conjunto de modelos, donde en cada paso se excluye una variable y se crea un modelo con las variables remanentes. Asimismo, se crea un modelo usando cada variable de forma aislada. Adicionalmente, se crea un modelo usando todas las variables.



Valores de idoneidad

Las predicciones de la distribución de *P. lagunae* se representaron cartográficamente en cuatro formatos de transformación de los valores de salida del modelo (Phillips *et al.*, 2017; Phillips, 2010): **a)** No procesado (NP), derivado directamente del modelo exponencial de Maxent; **b)** Acumulativo, porcentaje acumulado de la posibilidad de presencia; **c)** Valor logístico de los datos NP; y **d)** Log-log (cloglog), derivada de un proceso Poisson no homogéneo. La probabilidad de presencia de la especie de interés, derivada de cada una de estas transformaciones, estará supeditada al diseño de muestreo usado y número de sitios.

Validación interna

Como criterio de validación interna (Maxent) se empleó el concepto de AUC, método estándar para evaluar la precisión de una predicción (Barrera *et al.*, 2020). Considerando que, al validar los resultados, A= Verdadero positivo; B= Aleatorio negativo; C= Falso negativo; y D= Aleatorio positivo, Maxent calcula la sensibilidad y la especificidad de los modelos para todas las posibilidades obtenidas, donde sensibilidad= $A/(A+C)$ y especificidad= $D/(B+D)$. Con esto se calcula el AUC, donde el eje de las abscisas es igual a (1-especificidad), mientras que en el eje de las ordenadas se ubica los valores de sensibilidad (Phillips, 2010). Para definir el AUC, se estableció una muestra de datos para la validación de la predicción, utilizando el 25% de los sitios como prueba (Garfias *et al.*, 2013). Con base en esto, se generaron y compararon los valores del AUC de los puntos de entrenamiento y los puntos de prueba (Carrillo-Aguilar *et al.*, 2021).

Validación externa

La cartografía resultante con Maxent se validó en forma externa considerando la distribución de *P. lagunae* que se define con base en los requerimientos ecológicos que se reportan en la literatura (Austin *et al.*, 1996). Considerando esto, se generó un mapa en el que se delimitó el área de distribución potencial de *P. lagunae*, y se especificaron cuatro clases tomando en cuenta la variable más predominante. Este mapa se utilizó como referencia para la evaluación externa de los cuatro mapas de distribución de *P. lagunae* que se generaron en Maxent. Para esto se consideraron dos perspectivas de evaluación: 1) el área de distribución definida por el modelo de predicción, con 510 puntos de referencia; y, 2) el área dentro de la Reserva de la Biosfera Sierra La Laguna. Con base en esto, se consideraron 816 puntos de referencia. De esta forma, esta comparación se realizó a partir de una serie de matrices de confusión, que permiten determinar si la clase de posibilidad predicha con Maxent concuerda con la clase "real" (distribución determinada con requerimientos ecológicos), para lo cual se definieron la precisión global y el coeficiente kappa. Específicamente, el coeficiente Kappa determina en qué



porcentaje es mejor el resultado de la matriz, con lo que resultaría de aplicar un clasificador aleatorio que asignara al azar áreas de distribución potencial (Barrantes & Sandoval, 2016).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de contribución de las variables

La determinación de las variables más significativas para modelar la distribución de *P. lagunae*, así como su nivel de contribución al modelo de predicción, se presentan en el Cuadro 2. Los valores corresponden a promedios de las diez iteraciones realizadas.

Es importante considerar que el PC de cada variable está definido heurísticamente, implicando que depende de las variaciones de Maxent que se definieron al aplicar el programa. De esta forma, el rango de humedad fue la variable que contribuye con el 50% en la definición del modelo, seguido por la temperatura anual. Más aún, solo dos variables (Rango humedad y Temperatura media anual) contribuyen con el 63.6% del modelo, mientras que el resto de las variables contribuyen con menos del 10% cada una. Así mismo, debe considerarse que la contribución de las variables ambientales no debe entenderse necesariamente como la causa de la distribución de *P. lagunae*, sino que estas contribuyen a llegar a una buena separación entre las zonas idóneas y las zonas inadecuadas. Es decir, se asume que Maxent trabaja con información incompleta de las variables ambientales, y el número de sitios, por su número y distribución, no garantizan que se cubren todas las condiciones donde se distribuye la especie, por lo que Maxent selecciona la superficie de probabilidad de presencia que maximice su entropía. Esto implica que la contribución de las variables ambientales estará supeditada a que se abarque su mayor rango posible en la distribución y número de sitios, de esta forma se define un espectro más amplio de elección (alta entropía) para Maxent, es decir se tienen menos restricciones que si el rango de los valores de la variable fuera reducido.

La prueba *jackknife* muestra la importancia relativa de cada variable desde los siguientes parámetros (Figura 2): ganancia regularizada del entrenamiento, ganancia de la prueba y con relación a la AUC. En referencia a la ganancia regularizada del entrenamiento (Figura 2A), la variable con la más alta ganancia es la altitud, lo que implica que representa la información más útil para el modelo. Esta variable, mediante la prueba *jackknife*, aportó significativamente en la modelación de *Pinus HERRAE MARTÍNEZ*, en Jalisco (Ávila *et al.*, 2014). También, la altitud es la variable que, al omitirla, define la menor ganancia, lo que sugiere que tiene gran parte de información que no se presenta en las otras variables. De acuerdo con esto, debe considerarse a la altitud como una variable relevante cuando se requiera implementar estrategia de restauración o fomento de *Pinus lagunae*. La Figura 2B muestra la misma prueba de *jackknife*, utilizando la ganancia de prueba, donde se pueden inferir las mismas conclusiones respecto a la



altitud en relación con la gráfica anterior, sin embargo, tienen algunas variaciones como es el caso la variable que vegetación Serie VI, cuya contribución al modelo se incrementó. Por último, la gráfica que utiliza la AUC muestra un aumento en la contribución de todas las variables, a excepción de la exposición que en los tres casos se mantiene baja (Figura 2C).

Cuadro 2. Porcentaje de contribución (PC) de cada variable e importancia en la permutación (IP) de las variables ambientales

Variable	PC	IP
Intervalos de humedad	50.4	6.4
Temperatura media anual	13.2	31.6
Isotermas	9.1	0.3
Altitud	6.9	23.4
Cobertura de suelo	5.8	21.5
Régimen de humedad suelo	4.3	1.5
Precipitación anual	3	5.4
Temperatura mínima promedio	2.2	3.4
Temperatura máxima promedio	2	1.2
Clima	1.6	0.4
Uso de suelo modificado	1.4	4
Exposición	0.1	1
Vegetación Serie VI	0	0

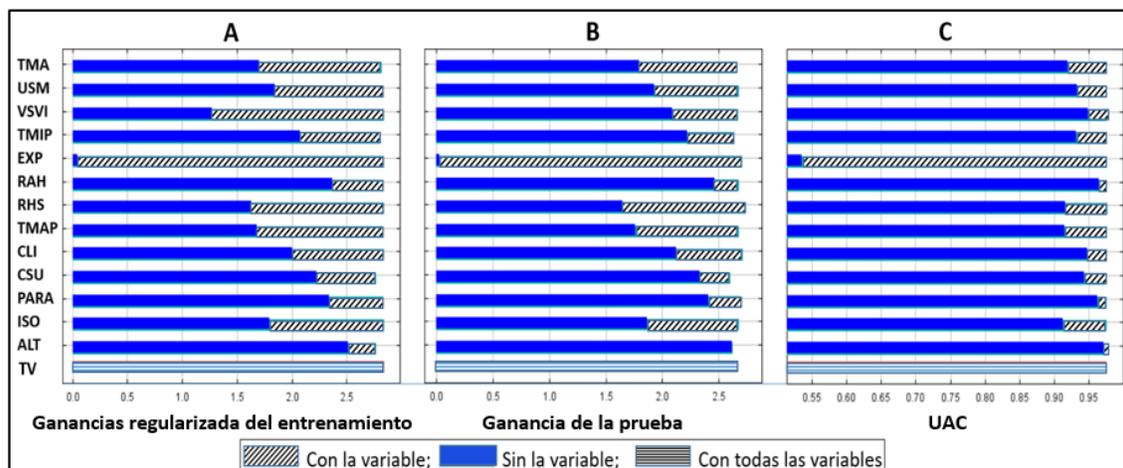


Figura 2. Comparación de la importancia de las variables ambientales, a través del método *jackknife* en relación a tres parámetros, en la determinación de la posibilidad de ocurrencia del *Pinus lagunae*: TMA= Temperatura media anual; USM= Uso de suelo modificado; VSVI= Vegetación Serie VI; TMIP= Temperatura mínima promedio; EXP= Exposición; RAH= Rango de humedad; RHS= Régimen de



humedad de suelo; **TMAP**= Temperatura máxima promedio; **CLI**= Clima; **CSU**= Cobertura de suelo; **PARA**= Precipitación anual; **ISO**= Isotermas; **ALT**= Altitud; **TV**= Todas las variables.

Acierto de la predicción o Valoración interna

Teóricamente se esperaría que el AUC de los datos de entrenamiento y de los datos de prueba fueran idénticos, definiendo un valor de AUC igual a 1, por lo que valores cercanos a 1 son resultado de un buen ajuste del modelo. En este estudio, se obtuvo una AUC media de 0.972, con una desviación estándar de 0.025 (Figura 3), por lo que se considera que el modelo ubica adecuadamente la ocurrencia de *P. lagunae*, es decir el valor de AUC indica que el modelo es mejor que el azar (Ovando-Hidalgo *et al.*, 2020). Estudios similares reportan, para especies de pino, valores de AUC entre 0.922 (*P. oocarpa*) y 0.982 (*P. pringlei*) (Aceves-Rangel *et al.*, 2018). Mientras que, para otras especies, como *Cedrela odorata*, se presentan valores de AUC de 0.926 (Hernández *et al.*, 2018). Con respecto a esto, se ha señalado que para una predicción razonable del modelo el valor AUC es mejor al encontrarse en un rango de 0.7 a 0.9 (Ibarra-Díaz *et al.*, 2016), considerándose un modelo muy bueno cuando el valor es mayor de 0.80 (Gutiérrez *et al.*, 2018).

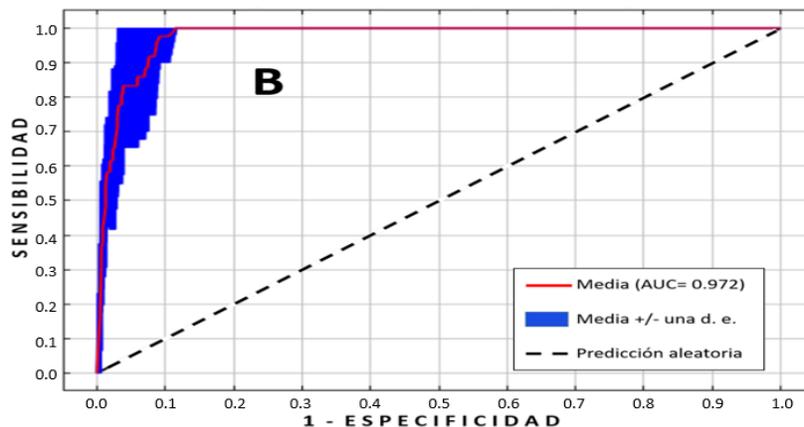


Figura 3. Área Bajo la Curva (AUC) resultante del análisis del modelo desarrollado en Maxent para determinar la probabilidad de ocurrencia de *P. lagunae*, con base en solo registros de presencia de la especie

Cartografía de distribución

Con base en el modelo de probabilidad de ocurrencia definido, se generaron los mapas de distribución potencial de *P. lagunae* (Figura 4), los cuales se presentan en los cuatro formatos de salida (Phillips *et al.*, 2017; Phillips, 2010). A excepción del mapa de valores no procesados (Figura 4A), en general el modelo predijo una distribución de *P. lagunae* en un área mayor que la distribución que resulta de la consideración de los parámetros de altitud y precipitación (Figura 5). Esto se aprecia más en las zonas norte, sur y oeste de la distribución, mientras que en la zona este tuvieron límites muy similares, aunque en



la porción noreste se ubica una diferencia en la distribución. En cambio, los mapas que se presentan en la Figura 4 muestran que, en todas las transformaciones, el mayor potencial de ocurrencia de esta especie se ubica aproximadamente en la parte centro de la Reserva de la Biósfera Sierra La Laguna. Es decir, donde se ubican las mayores altitudes, lo cual corrobora la influencia de esta variable en la distribución de la especie. Por otra parte, las transformaciones logísticas y del tipo clog-log resultaron en una distribución del potencial de ocurrencia prácticamente idéntico. Mientras que la transformación acumulativa reduce el mayor potencial de ocurrencia principalmente en una franja central (norte-sur) de la Reserva. Por otra parte, el modelo muestra una amplia distribución en el rango de altitud entre 1,100 y 1300 m, la cual rebasa el polígono de la Reserva. Asimismo, el modelo ubica áreas de distribución que se ubican en altitudes menores a las registradas para *P. lagunae* (523 msnm). En el Cuadro 3 se presentan las superficies resultantes para cada condición, para los mapas de altitud y de cada transformación.

Validación externa

Para validar los mapas resultantes del algoritmo Maxent (sin transformación, logístico, acumulativo y clog-log), se consideró como mapa base (control) de la distribución potencial para *P. lagunae* al mapa definido con base a los requerimientos ecológicos de esta especie. Para esto, cada mapa se clasificó en cuatro clases (óptimo, alto, regular y bajo), cuyos rangos se presentan en el Cuadro 4. En el caso del mapa base, se establecieron rangos de altitud, que fue la variable de mayor influencia en la determinación de la distribución de *P. lagunae*.

Área total de predicción

En referencia a la evaluación del área completa de distribución de *P. lagunae*, los resultados (Cuadro 5) muestran que el mapa con los valores no transformados fue el que obtuvo la mayor precisión global y el mayor índice Kappa.

Para determinar la precisión de la clasificación para cada clase de área potencial para la distribución de *P. lagunae*, mediante el método sin procesar los datos, que fue el que mostró mayor precisión global, se estableció la exactitud productora. Con ello, se calcularon los errores de omisión y de comisión (Sánchez, 2016). En el Cuadro 5, se observa la tendencia de que a mayor prioridad del área para *P. lagunae* es mayor el error en el mapa, tanto excluyendo píxeles en áreas donde se deberían incluir (omisión) como incluyendo píxeles en áreas equivocadas (comisión).

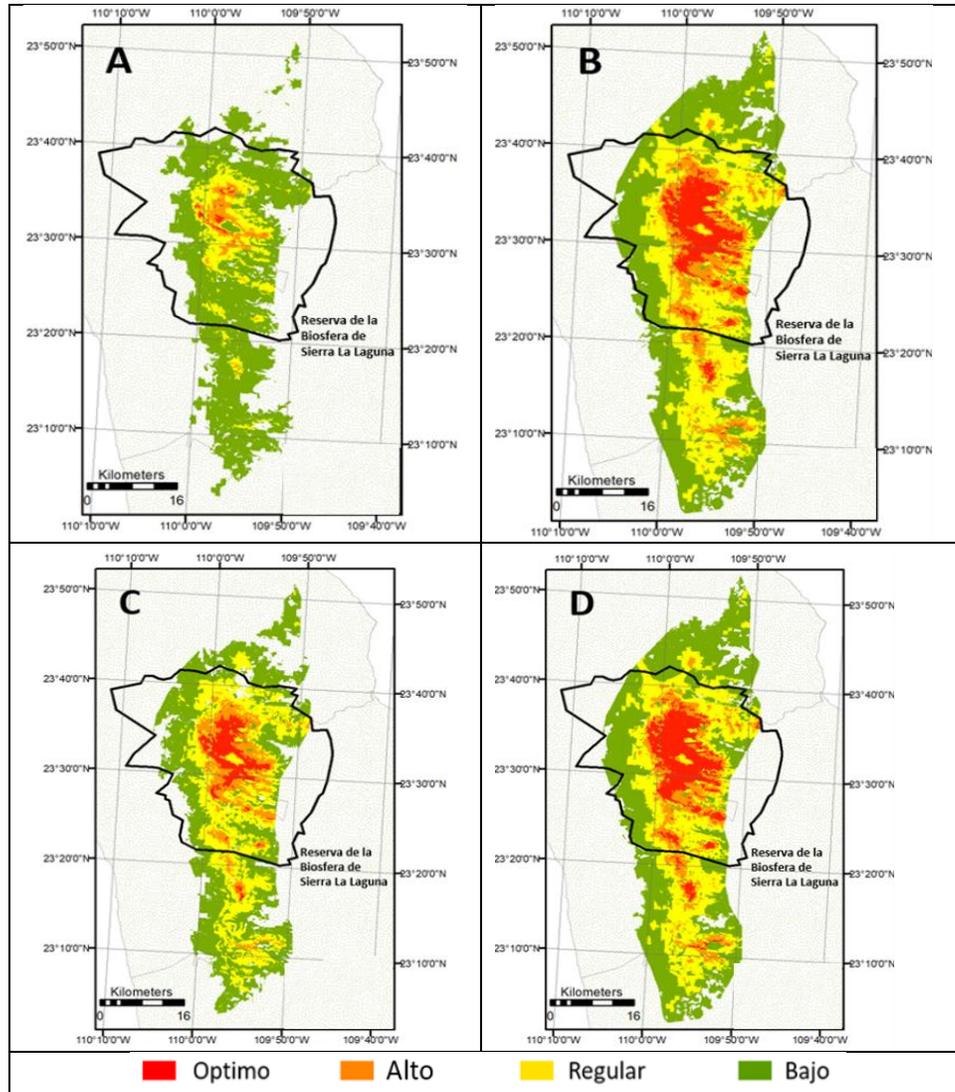


Figura 4. Modelo generado con Maxent para la distribución de *P. lagunae* empleando cuatro transformaciones para los valores de salida: A) No procesado; B) Logístico; C) Acumulativo; D) Clog-Log.

Por otra parte, se analizó la precisión para cada clase de áreas de prioridad para *P. lagunae* (Cuadro 6), observándose que el área de condición buena es la que presenta mayor error de omisión. Mientras que la categoría de regular muestra el mayor error de comisión, lo cual puede ser propiciado por el número (Aceves-Rangel *et al.*, 2018) y la ubicación de los sitios de referencia.



Cuadro 3. Superficies (ha) correspondientes a cada condición, para los mapas de altitud y de cada transformación

Condición	Altitud (msnm)	Sin transformación			
		Logístico	Acumulativo	Clog-Log	
Bajo	71,610	74,361	77,856	65,988	79,612
Medio	17,899	14,286	51,254	36,639	47,331
Alto	12,124	4,550	20,340	15,317	18,615
Óptimo	6,711	963	14,346	8,352	16,307

Cuadro 4. Intervalos de clasificación del mapa base (altitud) y de los mapas resultantes de Maxent (probabilidad), referentes a la distribución de *P. lagunae*

Condición	Altitud (m)	Sin transformación			
		Logístico	Acumulativo	Clog-Log	
Óptimo	1600-2000	0.0109-0.0339	0.5891-0.9507	66.275-100.000	0.7177-1.000
Alto	1350-1600	0.0051-0.0109	0.3654-0.5891	41.569-66.275	0.4353-0.7177
Regular	1150-1350	0.0019-0.0051	0.1977-0.3654	21.961-41.569	0.2275-0.4353
Bajo	500-1150	0.0004-0.0019	0.0635-0.1977	6.667-21.961	0.0707-0.2275

Cuadro 5. Estadísticos de comparación de la cartografía por Maxent con relación al mapa basado en los requerimientos ecológicos de *P. lagunae*

Estadístico	Área	Sin transfor.	Acumulativo	Logístico	Clog-Log
Precisión global (%)	Total	85.9	80.4	70.4	69.4
	Reserva	72.6	66.2	55.2	54.9
Índice Kappa	Total	60.6	52.9	35.5	34.1
	Reserva	52.9	47.0	33.2	32.7

Cuadro 6. Evaluación de la confiabilidad cartográfica desde la perspectiva de los errores del usuario (comisión) y del productor (omisión)

Condición	Área	Error de omisión	Error de comisión
Óptimo	Total	100%	0
	Reserva	77.1%	11.1%
Alto	Total	92.9%	66.7%
	Reserva	90.3%	73.9%
Regular	Total	73.1%	56.3%
	Reserva	79.7%	78.6%
Bajo	Total	35.6%	40.5%
	Reserva	36.9%	38.9%
Sin potencial	Total	1.8%	7.0%
	Reserva	3.1%	14.3%



Área de la Reserva

Se compararon los mapas considerando el área correspondiente a la Reserva de la Biosfera Sierra La Laguna, observándose resultados similares a la comparación de los mapas en el área total. De esta forma, los valores mayores de precisión global y del índice Kappa corresponden a los mapas de los métodos no procesados y el acumulativo. Cabe mencionar que el método logístico es recurrentemente utilizado para la generación de mapas de distribución de especies y se obtienen resultados precisos (Reynoso *et al.*, 2018), sin embargo, en el presente estudio, este método resultó en los valores más bajos, superado por el mapa del método clog-log, ubicándose las diferencias entre ambos mapas en los límites de la zona de estudio, sobre todo en la parte norte y sur, aunque estas se ubican fuera de los límites de la Reserva de La Biosfera Sierra La Laguna (Figura 5).

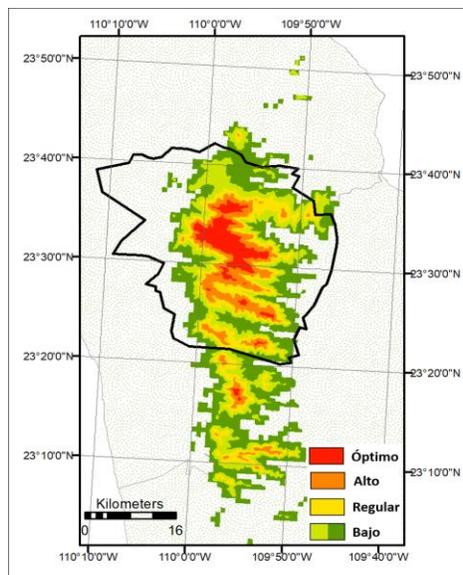


Figura 5. Área de distribución de *Pinus lagunae* con base en los requerimientos ecológicos, a) precipitación anual ≥ 600 mm; y b) intervalo altitudinal entre 523 - 2,000 m

CONCLUSIONES

Referente a la valoración interna, a partir del criterio de AUC se establece que el modelo generado ubica adecuadamente la ocurrencia de *P. lagunae*, donde las variables que definieron mejor su distribución espacial fueron la temperatura media anual, el rango de humedad y la altitud. Esta última variable también fue relevante en la definición de la distribución de esta especie que se definió al considerar los requerimientos ecológicos de *P. lagunae*. Esto implica que la altitud es la variable que debe considerarse



principalmente en la distribución espacial de esta especie. En lo correspondiente a la validación externa, aunque la cartografía resultante varió al implementar las transformaciones de salida, en general, fue similar al mapa generado con base a los requerimientos ecológicos de *P. lagunae*. En cuanto a la comparación de la cartografía derivada de los modelos Maxent, el método de salida con los valores sin transformación es el que muestra mayor precisión global y una mayor concordancia. Así mismo, la categoría de distribución potencial óptima fue la que mayormente se omitió, mientras que, en el área de la Reserva, la categoría de distribución potencial regular fue la más sobrestimada. Desde la perspectiva ecológica, los resultados obtenidos apoyan desde dos perspectivas a la distribución de esta especie: a) se define las áreas potencialmente óptimas, donde se puede apoyar la continuidad su endemismo; y b) se ubican áreas potenciales de distribución, para fines de restauración o fomento.

Finalmente, es importante considerar que los resultados están supeditados al número y distribución de sitios usados, así como por las variables usadas, por lo que, desde la perspectiva de Maxent, se pueden enfocar nuevos estudios considerando otras variables, como tipo de vegetación, pendiente, sequía etc., así como el uso de un mayor número y mejor distribución de sitios donde se tenga evidencia de la presencia de *P. lagunae*. Por otra parte, se requieren estudios para determinar los requerimientos ecológicos de esta especie considerando más variables, como tipo de suelo, temperatura media, temperatura máxima, período de estiaje, etc.

LITERATURA CITADA

ACEVES-RANGEL LD, Méndez-González J, García-Aranda MA, Nájera-Luna JA. 2018. Distribución potencial de 20 especies de pinos en México. *Agrociencia*. 52:1043-1057. <https://agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/1721>

AUSTIN GE, Thomas CJ, Houston DC, Thompson BA. 1996. Predicting the spatial distribution of buzzard *Buteo buteo* nesting areas using a geographical information system and remote sensing. *Journal of Applied Ecology*. 33(6):1541-1550. <https://doi.org/10.2307/2404792>

ÁVILA R, Villavicencio R, Ruiz JA. 2014. Distribución potencial de *Pinus herrerae* Martínez en el occidente del estado de Jalisco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 5(24):92-109. <https://cienciasforestales.inifap.gob.mx/index.php/forestales/article/view/322>

AXELROD DI. 1958. Evolution of the Madro-Tertiary geoflora. *The Botanical Review*. 24(7):433–509. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02872570>



BARRANTES O, Sandoval L. 2016. Uso/cobertura de la tierra en los cantones de Upala, Guatuso y Los Chiles en el año 2011. *Revista Geográfica de América Central*. 1(56):59-91. <https://doi.org/10.15359/rgac.1-56.3>

BARRERA R, González R, Treviño EJ, Vargas B, López R. 2020. Áreas potenciales para establecer Unidades Productoras de Germoplasma Forestal con dos variedades de *Pinus pseudostrobus* en México. *Bosque*. 41(3):277-287.
<http://revistas.uach.cl/index.php/bosque/article/view/6270>

BIONDI F, Fessenden JE. 1999. Radiocarbon analysis of *Pinus lagunae* tree rings: implications for tropical dendrochronology. *Radiocarbon*. 41(3):241-249.
<https://doi.org/10.1017/S0033822200057118>

BRECEDA A, Sosa J, Jiménez CL, Ortega-Rubio A. 2014. Conservación en la Reserva de la Biósfera Sierra la Laguna, Baja California Sur: logros y retos. *Investigación y Ciencia*. 60:78-84. <https://doi.org/10.33064/iycuaa2014603696>

CARRILLO-AGUILAR DM, Flores-Villegas MY, García-Ramírez P, Chávez-Simental JA, Domínguez-Calleros PA. 2021. Distribución potencial de insectos descortezadores de los géneros *Dendroctonus* e *Ips* en la Sierra Madre Occidental de Durango, México. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*. 29(84), e3240.
<https://doi.org/10.33064/iycuaa2021843240>

CARTAYA S, Anchundia C, Mantuano R. 2016. Distribución geográfica potencial de la especie *Cuniculus Paca* en el occidente de Ecuador. La Granja. *Revista de Ciencias de la Vida*. 24(2):134-154. <https://www.redalyc.org/journal/4760/476051632010/html/>

CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad), 2008. Portal de geoinformación. Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad. Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la Biodiversidad.
http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/usv/otras/usv731mgw.

CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad), 2016. Piñon de Baja California (*Pinus cembroides* subsp. *lagunae*). enciclovida.
<http://enciclovida.mx/especies/203179-pinus-cembroides-subsp-lagunae>.



CONAFOR (Comisión Nacional Forestal), 2015. Inventario Nacional Forestal y de Suelos 2009-2014. Baja California Sur. Sistema Nacional de Monitoreo Forestal. En: <https://snmf.cnf.gob.mx/datos-del-inventario/> .

Farjon A. 2015. *Pinus cembroides* subsp. *lagunae*. Threatened Conifers of the World <https://threatenedconifers.rbge.org.uk/conifers/pinus-cembroides-subsp.-lagunae>.

FFOLIOTT PF, Gottfried GJ, Bennett DA, Hernandez VM, Ortega-Rubio A, Hamre RH. 1992. Ecology and management of oak and associated woodlands: perspectives in the southwestern United States and northern Mexico. General Technical Report RM-218. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment. Station. Fort Collins, CO: U.S. Pp. 224. <https://doi.org/10.2737/RM-GTR-218>

FIELDING AH, Bell JF. 1997. A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. *Environmental Conservation*. 24(1):38-49. <https://doi.org/10.1017/S0376892997000088>

GARFIAS R, Castillo M, Toral M, Adasme C, Navarro R. 2013. Determinación de la distribución actual y potencial de bosque nativo mediante análisis espacial en SIG. Estudio de caso: Tipo Forestal Roble-Raulí-Coigüe en Chile. *Interciencia*. 38(8):577-584. <https://www.redalyc.org/pdf/339/33928557005.pdf>

GUTIÉRREZ O, Cámara R, Senciales JM, García LV. 2018. Modelos predictivos en Biogeografía: aplicación para la modelización de nichos ecológicos en Geografía Física. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*. 78:88–126. <https://doi.org/10.21138/bage.2395>

HANLEY JA, McNeil BJ. 1982. The meaning and use of the area under a receiver operating characteristic curve. *Radiology*. 143:29-36. <https://doi.org/10.1148/radiology.143.1.7063747>

HERNÁNDEZ J, Reynoso R, Hernández A, García X, Hernández E, Cob JV, Sumano D. 2018. Distribución histórica, actual y futura de *Cedrela odorata* en México. *Acta Botánica Mexicana*. 124, e1305. <https://doi.org/10.21829/abm124.2018.1305>



HERNÁNDEZ-HERRERA JA, Moreno-Reséndez A, Valenzuela-Núñez LM, Martínez-Salvador M. 2019. Modelación de la presencia de *Euphorbia antisyphilitica* Zucc mediante propiedades físicas y químicas del suelo. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*. 6(18):499-511. <https://doi.org/10.19136/era.a6n18.1910>

IBARRA-DÍAZ I, Lebgue-Keleng T, Viramontes-Olivas O, Reyes-Cortes I, Ortega-Gutierrez JA, Morales-Nieto C. 2016. Modelo de nicho fundamental para *Coryphantha chihuahuensis* (Cactaceae) en el estado de Chihuahua, México. *Ecología Aplicada*. 15(1):11-17. <https://doi.org/10.21704/rea.v15i1.578>.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), 2015. Topografía. México. <https://www.inegi.org.mx/temas/topografia/>

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), 2017. Guía para la interpretación de cartografía. Uso de suelo y vegetación serie VI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. Pp. 210. https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825092030.pdf

IUCN (International Union for Conservation of Nature), 2019. The species survival commission. International Union for Conservation of Nature. <https://www.iucn.org/theme/species/about/species-survival-commission>.

JIMÉNEZ ML, Palacios-Cardiel C, Maya-Morales J, Berrian JE. 2018. Nuevos registros de arañas (Arachnida: Araneae) para la Región del Cabo, península de Baja California, México. *Acta Zoológica Mexicana*. 34:1–13. <https://doi.org/10.21829/azm.2018.3412159>

LEÓN-DE la Luz JL, Domínguez-Cadena R. 1989. Flora of the Sierra de La Laguna, Baja California Sur, México. *Madroño*. 36(2):61-83. <https://www.jstor.org/stable/41424739>

MACIEL-MATA CA, Manríquez-Morán N, Octavio-Aguilar P, Sánchez-Rojas G. 2015. El área de distribución de las especies: revisión del concepto. *Acta Universitaria*. 25(2):3-19. <https://www.redalyc.org/pdf/416/41638006001.pdf>

OVANDO-HIDALGO N, Tun-Garrido J, Mendoza-González G, Parra-Tabla, V. 2020. Efecto del cambio climático en la distribución de especies clave en la vegetación de duna costera en la península de Yucatán, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. 91:1-17. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2020.91.2883>



PALACIOS A, Rodríguez R, Hernández M de la L, Jiménez E, Tirado D. 2016. Distribución potencial de *Prosopis laevigata* (Humb. et Bonpl. ex Willd) M. C. Johnston basada en un modelo de nicho ecológico. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 7(34):35-46.
<https://doi.org/10.29298/rmcf.v7i34.81>

PALMA-ORDAZ S, Delgadillo-Rodríguez J. 2014. Distribución potencial de ocho especies exóticas de carácter invasor en el estado de Baja California, México. *Botanical Sciences*. 92(4):587-597. <https://www.scielo.org.mx/pdf/bs/v92n4/v92n4a10.pdf>

PASSINI MF, Pinel N. 1989. Ecology and distribution of *Pinus lagunae* in the Sierra de la Laguna, Baja California Sur, México. *Madroño*. 36:84-92.
<https://www.jstor.org/stable/41424740>

PERRY JL. 1991. The pines of México and Central America. Portland, Oregon. Timber Press. Pp. 231.

PHILLIPS E. 2010. A brief tutorial on Maxent. *Lessons in Conservation*. 3:108-135.
<https://www.amnh.org/content/download/141371/2285439/file/a-brief-tutorial-on-maxent.pdf>

PHILLIPS SJ, Anderson RP, Dudík M, Schapire RE, Blair M. E. 2017. Opening the black box: an open-source release of Maxent. *Ecography*. 40:887–893.
<https://doi.org/10.1111/ecog.03049>

REYNOSO R, Pérez MJ, López W, Hernández J, Muñoz HJ, Cob JV, Reynoso MD. 2018. El nicho ecológico como herramienta para predecir áreas potenciales de dos especies de pino. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 9(48):47-70.
<https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i48.114>

SÁNCHEZ JM. 2016. Análisis de calidad cartográfica mediante el estudio de la matriz de confusión. *Pensamiento matemático*. 6(2):9-26. https://revista.giepm.com/wp-content/uploads/revista_impresa/vol_VI_num_2/inv_calidad_carto.pdf

TALAVERA I, Massieu YC. 2021. Conservación y sustentabilidad en la península de Baja California Sur: iniciativas comunitarias y políticas erráticas. *Horizontes Territoriales*. 1(1):1–27. <https://horizontesterritoriales.unach.mx/index.php/Revista/article/view/4>