



**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA**  
**FACULTAD DE RECURSOS NATURALES Y**  
**DEL AMBIENTE**

**Trabajo de Tesis**

**Predicción de la distribución potencial de escarabajo del género *Dendroctonus* utilizando máxima entropía para una estrategia de manejo forestal y sanidad en bosques de pino de Nueva Segovia**

**Autor**

**Ing. Claudio Joel González Espino**

**Asesor(es)**

**Dr. Fernando Mendoza Jara**

**Dr. Efraín Acuña Espinal**

Presentado a la consideración del honorable comité evaluador como requisito final para optar al grado de  
Máster en Ciencias

**Managua, Nicaragua**

**Agosto, 2023**

Este trabajo de graduación fue evaluado y aprobado por el honorable comité evaluador designado por la decanatura de la Facultad de Recursos Naturales y del Ambiente como requisito final para optar al título profesional de:

**MASTER EN CIENCIAS EN MANEJO Y CONSERVACION DE LOS  
RECURSOS NATURALES RENOVABLES**

Miembros del Comité Evaluador

---

Dr. Álvaro Noguera  
Presidente

MSc. Andrés López  
Secretario

---

MSc. Miguel Garmendia  
Vocal

Lugar y fecha: Managua, Nicaragua, 18/08/2023

## **DEDICATORIA**

A mi amado padre, Claudio Arcenio Calero (q.e.p.d.),

A ti papá, que siempre fuiste mi guía, mi apoyo y mi inspiración a lo largo de toda mi vida. Cada paso que he dado en el camino de la vida y en el profesional ha sido gracias a tu ejemplo de paciencia.

Tus sabias palabras y ejemplo de humildad me enseñaron que no hay obstáculo que no pueda ser superado, y que el conocimiento y la educación son herramientas poderosas para construir un futuro mejor.

En cada línea de esta tesis, siento el orgullo en tus ojos cuando me veías avanzar en mi formación. Cada logro que alcanzo es también un tributo a tu dedicación como padre y maestro.

Gracias por creer en mí cuando a veces dudaba de mí mismo, por celebrar mis triunfos y sostenerme en los momentos difíciles. Este logro académico es tuyo tanto como mío, porque sin tu apoyo incondicional, nada de esto habría sido posible.

Con todo mi cariño y gratitud,

Joel

## **AGRADECIMIENTO**

En este humilde espacio, deseo agradecer a Jehová (Salmo 83:18; TNM) por todas las bendiciones que ha dado a mi vida y por haberme permitido culminar este importante capítulo de mi formación académica. Su amor leal han sido mi guía y mi fortaleza en momentos de dificultad. Agradezco al Altísimo por todas las oportunidades que me ha brindado para crecer como investigador. Gracias a Él, he tenido el privilegio de contar con el apoyo de mi familia, amigos y profesores, quienes han sido instrumentos de Su amor en mi camino. Este logro es una muestra de Su generosidad y bondad inmerecida en mi vida.

De manera especial, quiero dedicar este agradecimiento a mi amada madre, Damaris Espino. Su amor, paciencia y aliento han sido el motor que me ha impulsado a seguir adelante. Gracias, mamá, por estar siempre presente, por escucharme y regañarme.

Quiero dedicar un agradecimiento especial a mi amada esposa, Gabriela, por su apoyo incondicional y amor durante todo el proceso de realización de esta tesis. A lo largo de este arduo camino académico, tu presencia ha sido mi mayor fortaleza y motivación. Gracias por estar siempre a mi lado, por brindarme tu comprensión y aliento cuando las presiones y los desafíos parecían abrumadores.

Mi más profundo agradecimiento a la Decanatura de la Facultad del Ambiente y los Recursos Naturales, por brindarme la oportunidad de llevar a cabo este estudio. Agradezco especialmente al Profesor Andrés López por sus palabras de aliento y confianza en mí, incluso cuando yo dudaba de mis propias capacidades, y por abrirme las puertas cuando más lo necesitaba lo que permitió culminar esta maestría. También quiero agradecer a mis compañeros de trabajo por su colaboración y amistad.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis asesores de tesis, Dr. Fernando Mendoza y Dr. Efraín Acuña, por su invaluable guía y paciencia a lo largo de todo este proceso de investigación.

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que han contribuido a la realización de esta tesis. A mis profesores, compañeros y amigos, gracias por su apoyo y colaboración en cada paso de mi maestría.

## INDICE DE CONTENIDO

SECCIÓN	PÁGINA
DEDICATORIA .....	i
AGRADECIMIENTO.....	ii
INDICE DE CONTENIDO.....	iii
INDICE DE CUADROS.....	v
INDICE DE FIGURAS.....	vi
INDICE DE ANEXOS.....	vii
RESUMEN.....	viii
ABSTRACT.....	ix
I. INTRODUCCIÓN .....	1
II. OBJETIVOS .....	3
2.1. General.....	3
2.2. Específicos .....	3
2.3. Preguntas de investigación.....	3
III. MARCO DE REFERENCIA .....	4
3.1. Concepto de área de distribución de las especies.....	4
3.2. Implicaciones de la distribución de una especie .....	4
3.3. Estimación del área de distribución de una especie .....	5
3.4. Modelos de distribución de especies.....	6
3.5. Criterios para la selección de un modelo de distribución de especies.....	8
3.6. Concepto de Entropía Máxima.....	10
3.7. Escarabajo descortezador .....	11
3.8. Características generales de escarabajos del género <i>Dendroctonus</i> .....	12
IV. MATERIALES Y MÉTODOS .....	17
4.1. Área de estudio.....	17
4.2. Descripción general del estudio .....	18
4.3. Fuente de datos.....	20
4.3.1. Creación de datos de presencia (variable dependiente).....	20
4.3.2. Creación de datos de ausencia de escarabajos.....	21
4.3.3. Datos explicativos (variables independientes) .....	22
4.3.3.1. Anomalía térmica .....	22
4.3.3.2. Bioclima .....	23

4.3.3.3.	Topografía .....	24
4.3.3.4.	Vegetación.....	24
4.3.4.	Análisis exploratorio .....	25
4.4.	Software Maxent .....	26
4.4.1.	Descripción general.....	26
4.4.2.	Requisitos de datos.....	27
4.4.3.	Parámetros del modelo .....	28
4.4.4.	Precisión del modelo .....	29
4.4.5.	Validación del modelo .....	30
4.4.6.	Mapeo de la probabilidad de escarabajo descortezador .....	32
4.5.	Recomendaciones para el diseño de una estrategia de manejo forestal adaptativo y saneamiento.....	33
V.	RESULTADOS Y DISCURSIÓN .....	34
5.1.	Variables ambientales utilizadas en el modelo de probabilidad.....	34
5.2.	Resultados del modelo de probabilidad de ocurrencia .....	37
5.2.1.	Curvas de respuesta .....	38
5.2.2.	Contribución relativa.....	39
5.2.3.	Métricas de evaluación del modelo .....	42
5.3.	Validación del modelo .....	45
5.4.	Mapas de probabilidad de escarabajos descortezador .....	47
5.5.	Limitación y trabajo futuro .....	49
5.6.	Recomendaciones para el diseño de estrategia de manejo forestal adaptativo y saneamiento.....	51
VI.	CONCLUSIONES .....	59
VII.	RECOMENDACIONES .....	60
VIII.	LITERATURA CITADA.....	61
IX.	ANEXOS.....	67

## INDICE DE CUADROS

CUADRO		PÁGINA
1	Clasificación de los métodos para modelar la distribución de las especies.	9
2	Variables ambientales (exploratorias) usadas para generar modelos de distribución de especies del género <i>Dendroctonus</i> en Nueva Segovia.	19
3	Matriz de confusión de presencia/pseudo-ausencia	32
4	Contribución relativa para cada variable ambiental utilizada en el modelo de probabilidad de escarabajos expresado como porcentaje (%).	35
5	Variables resultantes	37
6	Contribución relativa para cada variable ambiental utilizada en el modelo de probabilidad de escarabajos expresado como porcentaje (%)	40
7	Matriz de error para la validación del modelo de probabilidad de escarabajos descortezador utilizando datos de prueba independientes presencias/pseudo-ausencias (n=862)	37
8	Medidas de precisión para la validación del modelo de probabilidad escarabajos descortezador utilizando datos de prueba independientes presencias/pseudo-ausencias (n=862).	46
9	Área de clase de probabilidad de escarabajos descortezadores y porcentaje del área total de Nueva Segovia y del área con bosque de pino	47

## INDICE DE FIGURAS

FIGURA		PÁGINA
1	Ecuación para el cálculo del índice de diversidad de Shannon.	10
2	Vista dorsal de las 13 especies de <i>Dendroctonus</i> distribuidas en México y Centroamérica.	14
3	Flujo de trabajo de tesis.	17
4	Localización de los bosques de pino en el departamento de Nueva Segovia.	17
5	Puntos de presencia aleatorios extraídos de las áreas afectadas por escarabajo descortezador durante el periodo 1999-2019 en Nueva Segovia.	21
6	Ecuaciones utilizadas en la matriz de confusión para calcular medidas estadísticas de rendimiento.	32
7	Variables climáticas de mayor importancia en el modelo de acuerdo a la Prueba de Jackknife usando AUC.	36
8	Probabilidad prevista de ocurrencia de especies del género <i>Dendroctonus</i> en Nueva Segovia utilizando curvas de respuesta de Maxent..	34
9	Sensibilidad promedio versus especificidad del modelo obtenido al ejecutar el modelo de probabilidad de escarabajo descortezador.	44
10	Omisión promedio y área predicha para datos de ocurrencia de escarabajo descortezador	45
11	Mapa de probabilidad de ocurrencia de escarabajo descortezador utilizando 265 puntos de presencia aleatorios entre 1999 y 2019 (AUC = 0.866).	48
12	Mapa de amenaza de escarabajo descortezador derivado del mapa de probabilidad de escarabajo descortezador en Nueva Segovia (Figura 11)	48
13	Mapa de amenaza de escarabajo descortezador en bosques de pino de Nueva Segovia.	49

## INDICE DE ANEXOS

<b>ANEXO</b>		<b>PÁGINA</b>
1	Resultado del análisis de correlación utilizando el programa R Studio	70
2	Ilustración de corrida de modelo en el programa Maxent	71

## RESUMEN

Un tema de interés en los últimos años es la predicción de la distribución potencial de especie, especialmente las que provocan daños en los ecosistemas forestales, un ejemplo de esto son las plagas por escarabajos descortezadores. Este estudio evaluó la predicción de la distribución potencial de la especie de escarabajo descortezador del género *Dendroctonus* en Nueva Segovia utilizando máxima entropía, de manera específica, analizar las características del clima, topografía y vegetación que influyen en dicha distribución. Veintiséis variables ambientales se consideraron en la construcción del modelo de predicción para determinar qué factores indican mejor la susceptibilidad ambiental de *Dendroctonus*. Basados en el análisis de correlación, la contribución relativa de cada variable, los niveles de rendimiento y matriz de error se indicó que el modelo tuvo un buen poder discriminativo con un alto grado de precisión (AUC= 0.858) y con un acierto del 70% de las predicciones, considerándolo como un modelo de predicción razonable. Por último, se representó cartográficamente la probabilidad de escarabajos descortezador y sus posibles amenazas, con esto se logra proporcionar información valiosa para las actividades de ordenación forestal, manejo sostenible, zonificación ambiental y directrices para la prevención ante infestaciones por plagas de escarabajos descortezadores del pino. Se recomienda llevar a cabo una revisión exhaustiva de la literatura científica existente sobre la biología, ecología y distribución natural de los escarabajos descortezadores para asegurar resultados consistentes en investigaciones futuras y recolectar datos climáticos actualizados, ya que estos pueden influir en la correcta predicción de distribución potencial de los escarabajos descortezadores en bosques de pino.

**Palabras claves:** predicción, bosques, biogeografía, hábitat, vulnerabilidad, biodiversidad

## ABSTRACT

A topic of interest in recent years has been the prediction of the potential distribution of species, especially those that cause damage to forest ecosystems, such as bark beetle pests. This study evaluated the prediction of the potential distribution of the bark beetle species from the *Dendroctonus* genus in Nueva Segovia using maximum entropy. Specifically, it analyzed the climate, topography, and vegetation characteristics that influence this distribution. Twenty-six environmental variables were considered in the construction of the prediction model to determine which factors best indicate the environmental susceptibility of *Dendroctonus*. Based on the correlation analysis, the relative contribution of each variable, performance levels, and error matrix, it was indicated that the model had good discriminative power with a high degree of accuracy (AUC= 0.858) and a 70% prediction accuracy, considering it as a reasonable prediction model. Finally, the probability of bark beetle presence and its potential threats were mapped, providing valuable information for forest management activities, sustainable practices, environmental zoning, and guidelines for prevention against pine bark beetle infestations. It is recommended to conduct a comprehensive review of the existing scientific literature on the biology, ecology, and natural distribution of bark beetles to ensure consistent results in future research and to collect updated climatic data, as these can influence the accurate prediction of potential distribution of bark beetles in pine forests.

**Keywords:** prediction, forests, biogeography, habitat, vulnerability, biodiversity

## I. INTRODUCCIÓN

Nicaragua tiene aproximadamente 3.24 millones de hectáreas de cobertura forestal, lo que representa 25% de su territorio; de esa superficie, 12% corresponde a bosque de coníferas (Instituto Nacional Forestal [INAFOR], 2009). La función ecológica de los bosques naturales incluye la regulación del clima al actuar como sumideros de gases de efecto invernadero (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2018).

No obstante, la acumulación excesiva de estos gases en la atmósfera ha desencadenado un aumento de temperatura que ha comenzado a alterar de manera palpable el equilibrio climático, manifestándose en un incremento de 0.87 °C registrado en un periodo relativamente corto de tiempo, entre 2006 y 2015. Las proyecciones son preocupantes, ya que se estima que si esta tendencia se mantiene, la temperatura podría elevarse hasta 1.5 °C para el año 2040 (Allen et al., 2018). Este cambio climático no solo impacta en la temperatura, sino que también desencadena una serie de modificaciones en los patrones climáticos, con consecuencias potencialmente adversas para la ecología y la biodiversidad.

Además, la actividad humana ejerce una presión adicional sobre estos ecosistemas. La extracción de especies, la conversión de tierras para otros usos y los incendios forestales, entre otros factores, generan alteraciones en la composición y la estructura de los bosques, debilitando la salud de los árboles y, en consecuencia, reduciendo su capacidad reguladora y aumentando su vulnerabilidad frente a plagas forestales (Salinas et al., 2010).

En este contexto, los escarabajos descortezadores, que son una parte natural del ecosistema forestal (Wood, 1982), adquieren una relevancia particular. Si bien son componentes normales de los bosques, los cambios climáticos influyen en la frecuencia e intensidad de sus brotes (Pureswaran, Roques y Battisti, 2018).

Investigaciones apuntan a que especies como *Dendroctonus rufipennis* Kirby y *Dendroctonus ponderosae* Hopkins podrían experimentar un aumento poblacional en escenarios de calentamiento global (Bentz et al., 2010). A medida que las temperaturas aumentan, estos escarabajos podrían incrementar el número de generaciones anuales, expandir su área de distribución y cambiar sus hábitos (Logan y Powell, 2001; Régnière, 2009; Kocmánková et al., 2010).

Para abordar este desafío, los modelos de distribución de especies desempeñan un papel crucial. Estos modelos establecen relaciones entre las condiciones ambientales y la posible distribución geográfica de las especies (Guisan y Zimmermann, 2000). Entre estos modelos, Maxent ha demostrado ser especialmente robusto y preciso en la predicción de la idoneidad climática para las especies (Phillips, Dudík y Schapire, 2004).

A lo largo del tiempo, se ha producido un aumento significativo en el número de registros de presencia de diversas especies, lo que ha ampliado nuestro conocimiento sobre los límites de su distribución geográfica (Armendáriz, Torres, López, Villa y Zúñiga, 2012). Además, los algoritmos de modelación han mejorado y se han desarrollado nuevas superficies bioclimáticas y modelos de circulación general, lo que ha facilitado la generación de estudios más precisos sobre la distribución de especies (Cobos et al., 2019; Karger et al., 2017).

En este contexto, el enfoque del estudio se dirige a analizar los factores climáticos, topográficos y de vegetación que influyen en la presencia de los escarabajos descortezadores. Mediante el uso de técnicas de modelado espacial y análisis de datos geoespaciales, se generarán mapas de distribución potencial que permitan identificar las áreas más susceptibles a la plaga.

Estos resultados no solo proveerán información esencial para la toma de decisiones en la conservación y protección de los recursos forestales de Nueva Segovia, sino que también serán fundamentales para la planificación y aplicación de medidas preventivas y de mitigación que salvaguarden la salud de los ecosistemas forestales y la sostenibilidad de la región, en un contexto de cambio climático y otros desafíos ambientales.

En última instancia, el estudio busca proporcionar un enfoque basado en la evidencia científica para enfrentar los impactos de los escarabajos descortezadores y promover la gestión efectiva de estos valiosos recursos naturales.

## II. OBJETIVOS

### 2.1. General

Evaluar la predicción de la distribución potencial de escarabajo descortezador del género *Dendroctonus* mediante el método de Máxima Entropía, para la creación de pautas que orienten la formulación de una estrategia de manejo forestal y sanidad en los bosques de pino de Nueva Segovia.

### 2.2. Específicos

1. Analizar la influencia de variables ambientales que condicionan el modelamiento de la probabilidad de ocurrencia de escarabajo descortezador mediante métodos de correlación lineal, contribuciones porcentuales e importancia relativa.
2. Determinar la precisión y la validez de la predicción de la distribución potencial de escarabajo descortezador utilizando métricas de evaluación del programa MaxEnt.
3. Generar información sobre amenazas por ocurrencia de escarabajo descortezador en los bosques de pino de Nueva Segovia que permitan la generación de pautas que orienten la formulación de una estrategia de manejo y sanidad forestal.

### 2.3. Preguntas de investigación

En esta investigación se plantearon tres preguntas. En primer lugar, ¿cómo afectan las variables ambientales a la probabilidad de ocurrencia escarabajos descortezadores? En segundo lugar, ¿cuál es la distribución potencial de escarabajo descortezador? Tercero, ¿qué áreas se encuentran amenazas por escarabajos descortezadores en los bosques de pino de Nueva Segovia?

### **III. MARCO DE REFERENCIA**

#### **3.1. Concepto de área de distribución de las especies**

El área de distribución de las especies se refiere a la porción del espacio geográfico donde una especie está permanentemente presente y mantiene interacciones significativas con su entorno (Zunino & Palestrini, 1991). Esta definición engloba tanto la ubicación geográfica como la naturaleza continua de su presencia en el ecosistema. Aunque ocasionalmente se puedan encontrar registros únicos a cierta distancia de su área conocida, estos no deben considerarse parte de la distribución si su origen es antropogénico (Baldo, Borteiro, Brusquetti, García & Prigioni, 2008).

Aunque el área de distribución puede parecer un concepto concreto, en realidad implica procesos y patrones altamente complejos. Por ejemplo, todas las distribuciones experimentan contracciones y expansiones espaciales a lo largo del tiempo, una dinámica influenciada por factores biológicos, ecológicos y biogeográficos interconectados (Zunino & Zullini, 2003). Debido a esta complejidad, calcular con precisión el área de distribución de una especie resulta desafiante, ya que es un fenómeno dinámico y en constante cambio.

Además, los enfoques empleados para comprender el área de distribución producen estimaciones momentáneas que deben considerarse más como hipótesis que como una representación precisa de la realidad. Estos métodos han evolucionado desde enfoques subjetivos como la "mano alzada" o "a ojo" (Rapoport, 1975), hasta métodos cartográficos (Cartan, 1978) y areográficos (Rapoport, 1975), llegando a métodos basados en modelos probabilísticos de distribución de especies (Guisan & Zimmermann, 2000).

#### **3.2. Implicaciones de la distribución de una especie**

El cambio climático global, evidenciado por un aumento de aproximadamente 0.7 °C en la temperatura en el último siglo (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2007), puede ocasionalmente impactar el área de distribución de las especies, influyendo en su ubicación espacial (Holt, 1990; Parmesan, 1996; Pounds, Fogden & Campbell, 1999; Sinervo et al., 2010). Estos cambios, sin embargo, suelen ocurrir de manera gradual (Petitpierre et al., 2012).

Las posibles alteraciones inducidas por el cambio climático en el área de distribución se basan en los límites de tolerancia fisiológica de las especies, conocidos como amplitud de nicho (Broennimann et al., 2006). Así, especies con amplios nichos podrían ver reducida su distribución si las condiciones se vuelven raras, mientras que aquellas con nichos estrechos podrían expandirse si las condiciones se vuelven comunes (Vié, Hilton-Taylor & Stuart, 2009).

Algunas especies experimentan una expansión de su área de distribución debido a condiciones ambientales favorables, permitiéndoles colonizar áreas previamente no habitadas. Estas especies se dividen en dos grupos: las nativas que se expanden sin impactos adversos y las invasoras que dañan la biodiversidad, la economía y la salud comunitaria (Low, 2008).

En términos generales, ambos tipos de especies comparten algunas características: a) amplio rango de tolerancia climática, b) eficiencia en el uso de recursos, c) altas tasas reproductivas, d) maduración temprana, e) capacidad de dispersión eficaz y f) resistencia a condiciones extremas como fuego o congelación (Hellmann, Byers, Bierwagen & Dukes, 2008). Por ejemplo, el escarabajo descortezador *Dendroctonus ponderosae* se ha beneficiado del calentamiento global, afectando bosques de pino en América del Norte debido a temperaturas más elevadas (Logan & Powell, 2001).

### **3.3. Estimación del área de distribución de una especie**

En el estudio de las áreas de distribución de las especies, la elección del método es crucial. Los enfoques para delimitar su distribución han evolucionado considerablemente, incluyendo el desarrollo de modelos para investigar teorías ecológicas (Austin, 2002).

La principal dificultad radica en establecer los límites del área de distribución. Es crucial destacar que una nube de puntos en un mapa, que indica las ubicaciones donde se ha registrado una especie, no representa su verdadera área de distribución (Mota-Vargas & Rojas-Soto, 2012).

Inicialmente, la delimitación de áreas de distribución se basaba en mapas que trazaban polígonos alrededor de registros puntuales, creando mapas dicotómicos que indicaban la

presencia o ausencia de la especie (Rapoport, 1975; Zunino & Zullini, 2003). Métodos como la "mano alzada" o el "areográfico" eran comunes. En la actualidad, los avances tecnológicos y los sistemas de información geográfica, junto con bases de datos como el Global Biodiversity Information Facilities [GBIF], han permitido desarrollar métodos de modelado más detallados para la distribución de especies (Guisan & Thuiller, 2005).

### **3.4. Modelos de distribución de especies**

Los modelos de distribución de especies, también denominados modelos de nicho ecológico (Peterson, 2001), representan uno de los enfoques más contemporáneos para la delimitación de áreas de distribución de las especies (Mateo, Felicísimo & Muñoz, 2011).

Los Modelos de Distribución de Especies (MDE) son herramientas matemáticas y estadísticas que posibilitan la representación de información diagnóstica y predictiva. Estos modelos sintetizan las complejas interacciones entre especies y variables ambientales de manera comprensible, superando las limitaciones de otros enfoques (Mateo et al., 2011).

De manera general, los modelos de distribución de especies evalúan la adecuación del hábitat (nicho) para el desarrollo de poblaciones de una especie o comunidad. Estos modelos se fundamentan en observaciones de campo y variables ambientales predictoras. El enfoque basado en correlaciones se destaca por su practicidad y su independencia de datos fisiológicos, demográficos o ecológicos, ganando relevancia en la literatura científica (Lobo, 2015).

En términos generales, los modelos de distribución de especies representan gráficamente la idoneidad ambiental para una especie (Guisan & Zimmermann, 2000). Aunque existen diversos algoritmos para construir estos modelos, en su mayoría siguen un enfoque similar: utilizan registros de presencia/ausencia de la especie, junto con información climática o ambiental, para definir el área de distribución. Este proceso se basa en la información de registros existentes o en la relación entre los registros y las variables climáticas o ambientales, permitiendo prever áreas potenciales de distribución (Peterson, 2001).

Los modelos de distribución potencial se pueden dividir en dos grupos principales según los métodos de obtención de información. En primer lugar, están los modelos probabilísticos,

que emplean el muestreo sistemático de datos para inferir la probabilidad de ocurrencia de una especie en el espacio geográfico. Entre las técnicas utilizadas se encuentran los modelos de Montecarlo basados en Cadenas de Markov (Sargeant, Sovada, Slivinski & Johnson, 2005; Wu & Huffer, 1997). Por otro lado, están los modelos multivariados, que se basan en registros ocasionales de la especie. Según Mateo et al. (2011), estos métodos se subdividen en:

- i. Técnicas descriptivas: Estas técnicas se basan exclusivamente en datos de presencia junto con información geográfica o climática. Utilizan algoritmos matemáticos para su análisis. Algunos ejemplos notables de estas técnicas incluyen BIOCLIM (Busby, 1986), DOMAIN (Walker & Cocks, 1991) y Expectation Maximization (EM) (Ward, Hastie, Barry, Elith & Leathwick, 2008).
- ii. Técnicas discriminantes: Estas técnicas construyen modelos utilizando datos de presencia y ausencia de especies. Emplean algoritmos matemáticos para crear clasificadores que representan la idoneidad de un sitio para la presencia de una especie en función de la información climática o ambiental. Ejemplos de estas técnicas incluyen Classification and Regression Trees (CART) (Breiman, Friedman, Olshen & Stone, 1984), Canonical Correspondence Analysis (CCA) (Guisan, Weiss & Weiss, 1999), Artificial Neural Network (ANN) (Pearson, Dawson, Berry & Harrison, 2002), Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS) (Friedman, 1991), Support Vector Machines (SVM) (Vapnik, 1995) y MaxEnt (Phillips, Anderson & Schapire, 2006).
- iii. Técnicas mixtas: Estas técnicas utilizan tanto algoritmos descriptivos como discriminantes, y en algunos casos pueden generar sus propias pseudo-ausencias. Además, emplean enfoques iterativos para obtener un modelo de consenso. Entre las técnicas más empleadas de este tipo se encuentran Desktop-Genetic Algorithm for Rule-set Predictions (GARP) (Stockwell & Peters, 1999) y Open Modeller-Genetic Algorithm for Rule-set Predictions (OM-GARP) (Elith et al., 2006).

Uno de los desafíos al utilizar modelos multivariados para calcular el área de distribución de una especie basada en atributos ambientales es que en ocasiones la predicción resultante

(nicho fundamental) puede ser mayor o menor que la distribución real (nicho realizado). Algunos algoritmos tienden a sobreestimar los modelos, mientras que otros tienden a ajustarlos en exceso (Soberón & Peterson, 2005). Dada esta complejidad, se recomienda realizar verificaciones en el campo cuando se identifiquen áreas predichas con presencia de la especie pero sin registros cercanos. Esta validación en terreno mejora la interpretación en comparación con la simple generalización automática del modelo.

Estos diversos modelos de estimación han demostrado su utilidad en abordar cuestiones de conservación (Martínez Meyer, Peterson, Servín & Kiff, 2006), cambio climático (Anderson, 2013), biogeografía (Raxworthy et al., 2003) y salud pública (Haverkost, Gardner & Peterson, 2010) en contextos específicos.

### **3.5. Criterios para la selección de un modelo de distribución de especies**

Dentro de los procesos de construcción de un modelo de distribución de especies, es esencial realizar una revisión exhaustiva y pruebas de las variables predictoras ambientales seleccionadas. Este paso preliminar tiene como objetivo evaluar posibles correlaciones entre estas variables antes de proceder a la validación de la calidad de los datos de localización de la especie en cuestión.

Los modelos que se fundamentan únicamente en registros de presencia (como BIOCLIM, DOMAIN, GARP y MAXENT, entre otros) tienden a representar la distribución espacial del nicho ecológico fundamental de la especie. Este nicho se define por todas las condiciones ambientales que permiten la existencia de la especie. Por otro lado, los modelos basados en datos de presencia y ausencia (como GLM y GAM) proporcionan una aproximación más precisa de la distribución del nicho ecológico realizado. Este último se define como la porción del nicho fundamental en la cual la especie no se encuentra limitada por factores bióticos, tales como la competencia, la depredación, enfermedades o barreras naturales.

Para tomar decisiones informadas, es crucial comprender tanto el tipo de datos disponibles como el funcionamiento de los algoritmos de modelado (ver Cuadro 1). Si bien es recomendable evaluar el rendimiento de múltiples métodos, es fundamental proceder con precaución durante el proceso de evaluación (Elith et al., 2006; Pearson et al., 2006).

Se han realizado numerosos estudios que comparan el rendimiento de diversos algoritmos (Meynard & Quinn, 2007; Gritti et al., 2013). Hasta la fecha, no se ha identificado un algoritmo superior para todos los tipos de datos. Algunos muestran un mejor desempeño cuando la cantidad y calidad de los registros es limitada, mientras que otros destacan en situaciones donde la calidad de los datos es mayor y presentan mayor robustez.

Frecuentemente, la elección del método de modelado se basa en criterios que no están directamente relacionados con los datos, como modas, enfoques convencionales, creencias arraigadas o incluso limitaciones personales. A diferencia de las técnicas de laboratorio con protocolos y dosis estandarizados, la modelación de nichos y distribuciones no sigue una fórmula predefinida. La selección del método de modelado es una etapa crucial en el proceso de comprender o predecir las distribuciones óptimas de las especies.

Es importante abordar con precaución la interpretación de los modelos de distribución potencial, ya que las probabilidades señalan los lugares donde las condiciones ambientales son más propicias para las especies, pero no garantizan su presencia real.

El Cuadro 1 resume algunos algoritmos de modelado de distribución de especies, su enfoque ontogenético y el tipo de datos de entrada que utilizan:

Cuadro 1. Clasificación de los métodos para modelar la distribución de las especies.

<b>Algoritmo</b>	<b>Ontogenia</b>	<b>Tipo de datos de entrada</b>
Bioclim, Aquamaps, Envelope Score, SVM, Surface range	Envolturas ambientales	Sólo Presencia
Euclidiana, Mahalanobis, Manhattan, Chebishev	Distancias ambientales	Sólo Presencia
Regresiones Logit, GLM, GAM, MARS, CART	Regresiones y clasificaciones	Presencia/Ausencia
Redes Neuronales (ANN), BRT, Algoritmos genéticos, SVM	Inteligencia Artificial	Presencia/Ausencia
GARP	Algoritmos Genéticos	Presencia/Pseudo-Ausencia
ENFA, Climate Space Model (PCA),	Estadística multivariada:	Presencia/Entorno
Multiple Discriminant Analysis MAXENT	Estructura de varianzas Máxima Entropía	Presencia/Entorno

### 3.6. Concepto de Entropía Máxima

Basándose en el concepto fundamental presentado por Shannon en 1948, que deriva de la teoría de la información y evalúa la aleatoriedad de un fenómeno al medir su grado de incertidumbre, se introduce el concepto de entropía de la información, que guarda similitudes con la entropía física. Al considerar un conjunto de probabilidades, su cálculo se asemeja al índice de diversidad de Shannon (ver Figura 1), donde "pi" representa el número de individuos por especie (S):

$$(EC. 1) \quad H_{Shannon} = - \sum_{i=1}^S p_i \times \log_{base} (p_i)$$

Figura 1. Ecuación para el cálculo del índice de diversidad de Shannon.

Un software más ampliamente utilizado en la modelación de la distribución potencial de especies dentro del ámbito de los Sistemas de Información Geográfica es MAXENT. El principio o método de Máxima Entropía (MAXENT) representa un procedimiento sistemático y objetivo para generar distribuciones de probabilidad.

El modelo MAXENT se dedica a buscar la distribución de probabilidad de máxima entropía que se asemeje a la distribución uniforme, teniendo en cuenta las restricciones derivadas de la información disponible sobre la distribución observada de las especies y las condiciones ambientales en la región de estudio. La información disponible sobre la distribución objetivo se presenta como un conjunto de covariables denominadas "características", y se imponen restricciones en cada característica para que coincidan con los valores promedio de la muestra.

MAXENT utiliza exclusivamente registros de presencia de especies para modelar su distribución, donde los píxeles del área de estudio se transforman en el espacio en el que se establece la distribución de probabilidad. En este enfoque, los píxeles que representan las ubicaciones de las especies conocidas se convierten en puntos de muestreo, mientras que las características engloban las covariables relacionadas con el clima, la topografía, los suelos, la vegetación y otras variables ambientales.

MAXENT se configura exclusivamente utilizando registros de presencia de la especie. Estos puntos de ocurrencia se dividen en dos conjuntos: un conjunto de entrenamiento (que abarca el 75 % de los registros) y un conjunto de validación (que comprende el 25 % restante). En esencia, MAXENT estima y predice distribuciones que se ajusten a la información disponible, incluso si es incompleta, sobre las condiciones ambientales y las ubicaciones de ocurrencia de la especie.

Una ventaja destacada de la utilización de modelos de especies, incluyendo MAXENT y sus aplicaciones, radica en su capacidad para modelar escenarios futuros incluso cuando se dispone de datos parciales o incompletos. En otras palabras, con un conjunto de datos representativo, es posible realizar extrapolaciones y estimar información adicional. Como resultado de este análisis, se generan mapas predictivos que permiten visualizar la posible distribución de especies en el entorno actual o en un escenario futuro.

### **3.7. Escarabajo descortezador**

El término "escarabajo descortezador" abarca un amplio espectro taxonómico que engloba a todas las especies pertenecientes a la subfamilia Scolytinae (Curculionidae). Estos escarabajos se caracterizan por reproducirse en el interior de las plantas y alimentarse de diversos sustratos, que incluyen desde la corteza interna, médula de ramas y pequeños tallos, hasta el floema, semillas duras, frutos, peciolo de hojas caídas e incluso cactus (Knizek y Beaver, 2007).

A pesar de que muchas especies de estos escarabajos presentan una notable capacidad reproductiva, su relevancia económica es limitada debido a su hábito de reproducirse y alimentarse de tejidos vegetales ya dañados o en estado de descomposición (Wood, 1982; Knizek y Beaver, 2007). Únicamente un pequeño porcentaje de especies (< 1%), concentradas en géneros como *Conophthorus* Hopkins, *Dendroctonus* Erichson, *Hypothenemus* Ferrari, *Ips* De Geer, *Scolytus* Geoffroy y *Tomicus* Latreille, poseen una importancia económica significativa. Estas especies tienen la capacidad de colonizar y causar daños en árboles, plántulas y semillas vivas tanto en ecosistemas naturales como en cultivos comerciales (Raffa et al., 2008).

Debido a estas circunstancias, los escarabajos descortezadores han despertado un considerable interés a nivel mundial, especialmente aquellos que generan infestaciones recurrentes capaces de causar daños irreversibles en las comunidades vegetales. Estas infestaciones conllevan significativas pérdidas económicas para la industria forestal.

El género *Dendroctonus* destaca como uno de los descortezadores más agresivos en los bosques de pinos (Fam: Pinaceae) de América del Norte y Centro, y en menor medida en Europa y China, donde solo se encuentran dos especies nativas (Grégoire, 1988; Wang et al., 2010), además de una especie introducida desde Norteamérica que ha demostrado un comportamiento sumamente agresivo (Yan et al., 2005). Estos escarabajos colonizan y causan la muerte de numerosos árboles durante las infestaciones, afectando a especies de los géneros *Larix*, *Picea*, *Pseudotsuga* y *Pinus*. El comportamiento altamente agresivo de ciertos miembros del género *Dendroctonus* ha estimulado investigaciones en diversos aspectos biológicos, como lo demuestra la amplia cantidad de literatura científica publicada al respecto (Six y Bracewell, 2015).

### **3.8. Características generales de escarabajos del género *Dendroctonus***

Dentro de la subfamilia Scolytinae, *Dendroctonus* se distingue de otros géneros como *Hylurgus* Latreille, *Tomicus* Latreille (originarios de Europa y Asia), *Pachycotes* Sharp (presente en Australia y Nueva Zelanda), y *Hylurgonotus* Schedl (propio de Sudamérica) debido a características particulares que incluyen la presencia de un proceso epistomal, una maza antenal aplanada compuesta por cuatro antenómeros, y un funículo conformado por cinco antenómeros.

Se ha empleado el valor promedio de la longitud total del cuerpo para realizar una clasificación en tres grupos de las especies pertenecientes al género (Figura 2). El primer grupo abarca a las especies más pequeñas, en su mayoría correspondientes al complejo *D. frontalis* (*D. frontalis*, *D. mesoamericanus*, *D. mexicanus* y *D. vitei*), cuyos tamaños varían entre 2.4 mm y 4.0 mm. El segundo grupo engloba a especies de tamaño mediano, tales como *D. adjunctus*, *D. brevicomis*, *D. jeffreyi*, *D. parallelocolis* y *D. ponderosae*, con una longitud del cuerpo que oscila entre 4.5 mm y 5.8 mm. El tercer grupo incluye a especies de mayor tamaño, como *D. approximatus*, *D. pseudotsugae*, *D. rhizophagus* y *D. valens*, con longitudes corporales que van desde 7.0 mm hasta 7.3 mm.

Sin embargo, es importante destacar que este atributo exhibe una amplia variación tanto entre poblaciones como en términos geográficos, ya que está influenciado por factores como la cantidad y calidad del alimento, así como diversas variables ambientales. Debido a esta notable variabilidad, este rasgo no se considera recomendable para la identificación precisa de estas especies.

El color de los adultos está influenciado por el grado de maduración de los individuos y tiende a mostrar variaciones tanto a nivel intrapoblacional como geográfico. Los pre-imagos de todas las especies exhiben una coloración que va desde tonos cremas hasta un café claro, sin embargo, al alcanzar la madurez, esta coloración puede transformarse en tonos de café oscuro, café rojizo o negro (Figura 2). En algunas especies, como *D. approximatus*, *D. brevicomis* y *D. parallelcollis*, el color de los adultos maduros se mantiene uniforme en toda la estructura, abarcando desde la cabeza y el tórax hasta el abdomen y los élitros. En contraste, en otras especies como *D. frontalis*, *D. jeffreyi*, *D. mesoamericanus*, *D. mexicanus*, *D. ponderosa*, *D. pseudotsugae*, *D. rhizophagus*, *D. valens* y *D. vitei*, se observa una diferenciación en la tonalidad entre la cabeza y el pronoto en comparación con el abdomen y los élitros (Figura 2).

El cuerpo de los adultos presenta una serie de pubescencias o pelos que varían en longitud y grosor según su ubicación. Específicamente, las pubescencias en la región declive elitral muestran notables diferencias en cuanto a color, cantidad y tamaño entre las diversas especies. Estas pubescencias pueden ser categorizadas en función de su longitud relativa en: cortas (menores al ancho de una interestría), medianas (de dos a tres veces el ancho de una interestría) y largas (más de tres veces el ancho de una interestría).

Además, el cuerpo de los adultos está adornado con estructuras cuticulares que confieren relieve a la superficie de la cabeza, el pronoto y los élitros. Estas ornamentaciones pueden ser clasificadas en dos categorías según su relieve: alto y bajo. Las de alto relieve corresponden a elevaciones en la cutícula, mientras que las de bajo relieve se refieren a depresiones en la misma.

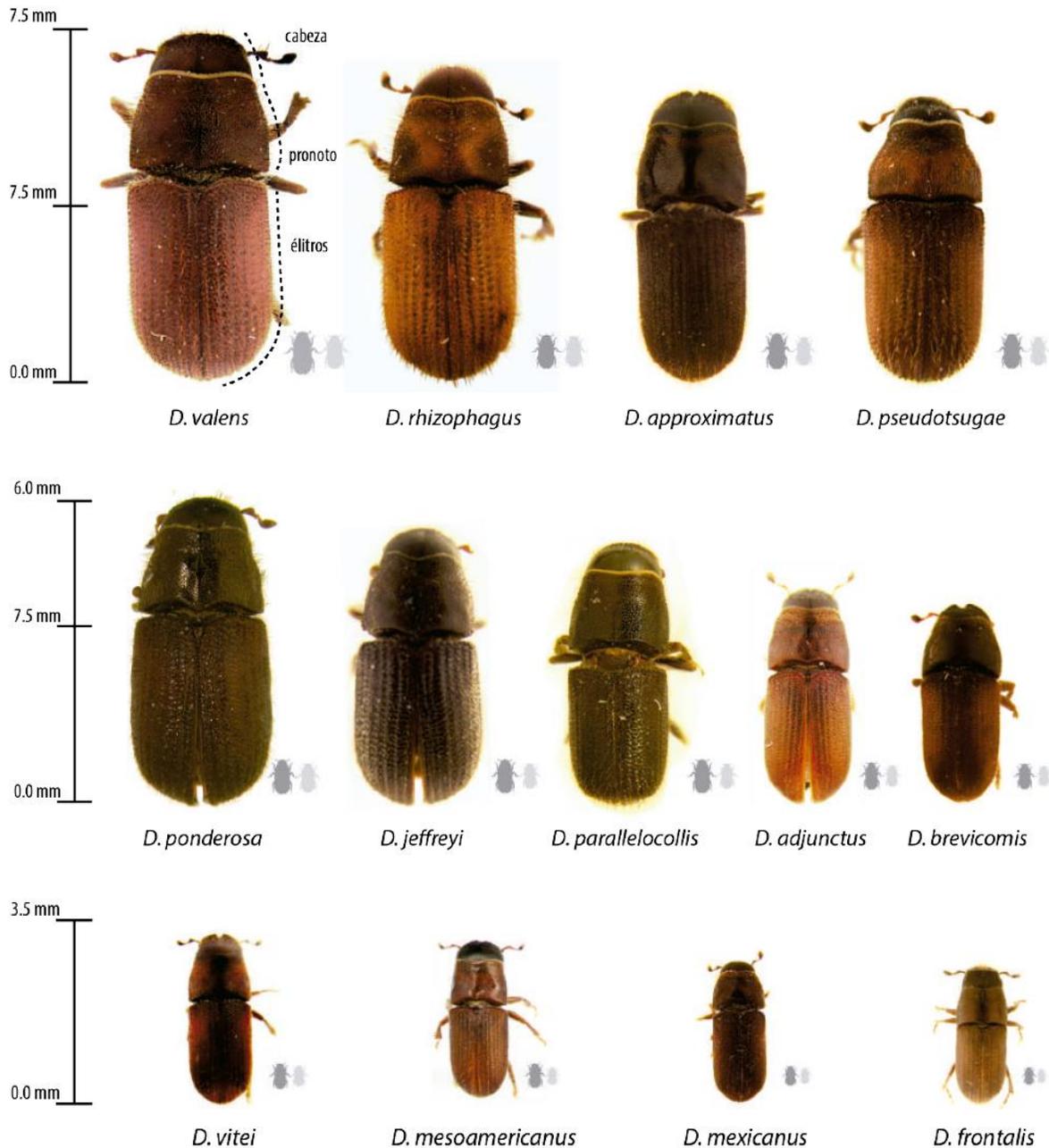


Figura 2. Vista dorsal de las 13 especies de *Dendroctonus* distribuidas en México y Centroamérica

### 3.9. Estudios relevantes sobre modelación de distribución de *Dendroctonus*

En los Estados Unidos, el desarrollo de modelos se ha centrado en especies como *D. ponderosae* (Régnière, 2009), *Dendroctonus frontalis* Zimmermann y *Dendroctonus valens* LeConte (Maldonado et al., 2015). En el contexto mexicano, se ha realizado un trabajo

significativo que empleó BIOCLIM para modelar la distribución actual de 12 especies de descortezadores, incluida *Dendroctonus mexicanus* Hopkins. Este estudio reveló que *Dendroctonus mexicanus* tiene la distribución más amplia en los bosques de México y coloniza hasta 20 especies de pinos (Salinas et al., 2010). Además, Sosa et al. (2018) llevaron a cabo un modelo de la distribución potencial de descortezadores a nivel de género, mientras que Mendoza, Salinas, Olivo y Zúñiga (2011) realizaron un análisis similar para *Dendroctonus rizophagus* Thomas & Bright en la Sierra Madre Occidental.

En un estudio reciente, Carrillo-Aguilar et al. (2021) investigó la distribución potencial de varias especies, incluyendo *Dendroctonus frontalis/mexicanus*, *D. valens*, *Ips pini*, *Ips lecontei* y otros insectos en la Sierra Madre Occidental de Durango, México. Para este propósito, utilizaron la herramienta MaxEnt (Máxima Entropía) y evaluaron la calidad de los modelos mediante el estadístico Área Bajo la Curva (AUC). Los resultados revelaron que los modelos generados eran razonables y adecuados según los valores de AUC obtenidos durante la validación.

En particular, *Dendroctonus frontalis/mexicanus* destacó con una idoneidad alta en una extensión aproximada de 118 mil hectáreas. Además, el estudio identificó que las variables más influyentes en el modelado de las especies analizadas estaban relacionadas con la temperatura.

En su investigación, Portillo y Elvir (2016) llevaron a cabo la modelación de la distribución potencial del gorgojo descortezador de pino en Honduras, considerando cuatro diferentes escenarios climáticos: clima caliente, clima frío, clima húmedo y frío, y clima normal. Los resultados obtenidos resaltan que los escenarios de clima caliente y frío ofrecen condiciones óptimas para la distribución potencial de esta plaga, mientras que los escenarios de clima húmedo y frío, así como el clima normal, restringen dicha distribución.

Un hallazgo relevante de su estudio es que existe una falta de información detallada sobre las interacciones ecológicas entre los gorgojos descortezadores y el ecosistema de pino. Esta carencia de conocimiento profundiza la brecha entre la comprensión actual y las estrategias efectivas para el manejo adecuado de la plaga en estos ecosistemas. En consecuencia, Portillo y Elvir (2016) enfatizan la necesidad de abordar esta deficiencia para avanzar hacia enfoques más eficaces en la gestión de esta plaga en el entorno de los bosques de pino.

### **3.10. Afectación histórica de *Dendroctonus* en Nicaragua**

Los primeros brotes documentados de esta plaga en Nicaragua se remontan al año 1964, cuando se registraron los primeros casos en la localidad de Yucul, ubicada en el Departamento de Matagalpa. A lo largo de los años, se han registrado varios brotes adicionales, incluyendo los años 1975, 1977, 1984-1985, 1991-1992 y 1999-2001. Entre estos períodos, el más notable en términos de incidencia fue el último, correspondiente a los años 1999-2001. Durante este lapso, los departamentos de Chinandega, Estelí, Jinotega, Madriz, Matagalpa y Nueva Segovia se vieron afectados, siendo este último el que experimentó las mayores consecuencias, con un total de 32,359 hectáreas afectadas.

En octubre de 1999, esta plaga experimentó un retorno activo al manifestarse sus primeros brotes en el municipio de Jalapa, concretamente en la comunidad de Teotecacinte, donde aproximadamente 30 hectáreas de pino resultaron afectadas. A pesar de la ausencia de una precisión exacta, los factores que desencadenaron este ataque agresivo de la plaga aún permanecen en el ámbito de la especulación. Se cree que una combinación de eventos como el fenómeno del Niño, la ocurrencia de incendios forestales, periodos de sequía prolongada, el impacto del huracán Mitch y prácticas inadecuadas en la gestión del bosque contribuyó a establecer las condiciones favorables para la propagación de esta plaga. Estas observaciones se derivan de datos proporcionados por INAFOR (2002).

Según estadísticas oficiales, el área impactada abarcó un total de 32,873.46 hectáreas (INAFOR, 2002). Dentro de estas extensiones, el municipio de Jalapa se posicionó como el más gravemente afectado, llegando a experimentar la pérdida del 80 % de sus bosques de pino.

Durante el periodo comprendido entre 1999 y 2003, los bosques de pino en esta región sufrieron un severo embate por parte de insectos descortezadores, siendo el descortezador *Dendroctonus frontalis* (Zimm) el principal protagonista, junto con otros insectos descortezadores asociados. Los estragos provocados por el ataque de estos insectos, sumados a las medidas de control físico implementadas en el bosque, resultaron en la eliminación de aproximadamente la mitad del área forestal en el departamento de Nueva Segovia, conllevando consigo pérdidas sustanciales (INAFOR, 2002).

#### IV. MATERIALES Y MÉTODOS

El propósito de esta investigación consistió en evaluar la distribución potencial de la probabilidad de infestación por escarabajo descortezador en los bosques de pino localizados en el departamento de Nueva Segovia. Con el fin de alcanzar este objetivo, se emplearon variables explicativas que abarcaron bioclima, anomalía térmica, topografía y vegetación. Además, se tomaron en cuenta registros de presencia de escarabajos como parte del análisis. Para lograr este propósito, se llevaron a cabo una serie de tareas clave, que incluyeron la recopilación de datos, la preparación de capas ambientales y registros de ocurrencias de escarabajos descortezadores, análisis exploratorios, el diseño y la ejecución del modelo de probabilidad de ocurrencias, así como el análisis de los resultados (véase Figura 3). En esta sección, se detallaron minuciosamente los métodos empleados y las fuentes de datos utilizadas para modelar la distribución de escarabajo descortezador.

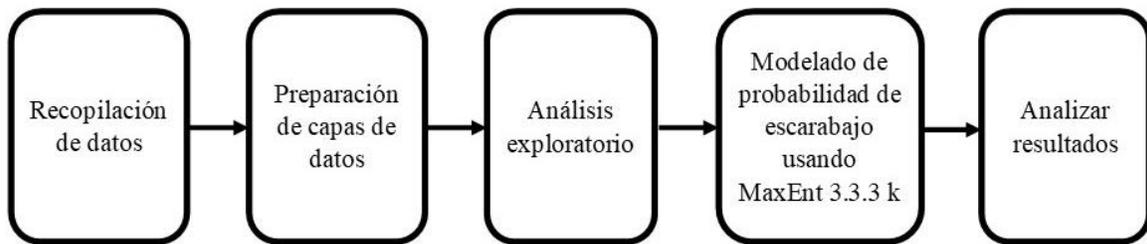


Figura 3. Flujo de trabajo de tesis.

##### 4.1. Área de estudio

El alcance del estudio se sitúa en el departamento de Nueva Segovia, al norte de Nicaragua, en la frontera con la República de Honduras. Nueva Segovia se extiende sobre un área de 3,450.05 km<sup>2</sup> y se encuentra enmarcada por las siguientes coordenadas extremas: al norte 86°0'51.34"W, 14°4'48.03"N; al este 85°44'57.28"W, 13°49'59.94"N; al oeste 86°47'2.16"W 13°39'40.82"N; al sur 85°54'40.88"W 13°27'45.27"N.

Según los datos proporcionados por el Atlas de Cobertura Forestal y Deforestación en Nicaragua (Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales [MARENA], 2018), en el año 2015, los bosques de pino ocupaban una superficie de 475.30 km<sup>2</sup> en Nueva Segovia (Figura 4).

Dentro de los bosques de pino de Nueva Segovia, se observa una predominancia de especies pertenecientes a los géneros *Pinus* y *Quercus*, especialmente en altitudes superiores a los 900 metros. Estas áreas se concentran principalmente en los municipios de Jalapa, San Fernando, Dipilto, Mozonte, El Jícaro y Macuelizo. Estos bosques se desarrollan en zonas con una temperatura anual promedio igual o superior a 20 °C y una precipitación anual que oscila entre 1,000 mm y 2,000 mm.



Figura 4. Localización de los bosques de pino en el departamento de Nueva Segovia.

#### 4.2. Descripción general del estudio

Con el propósito de modelar la distribución potencial de escarabajo descortezador en Nueva Segovia, se emplearon variables ambientales que abarcan bioclima (vinculado al clima y los seres vivos), anomalía térmica, topografía y vegetación (variables independientes), las cuales se correlacionaron con puntos georreferenciados o lugares con presencia del escarabajo descortezador (variable dependiente; referirse al Cuadro 2).

Mediante el software Maxent, se desarrolló un modelo de probabilidad para el escarabajo descortezador con el propósito de evaluar la relevancia de las variables ambientales y visualizar su potencial distribución. Específicamente, este modelo se basó en datos de

presencia de escarabajos recopilados durante un período de años específico (1999 a 2019) y utilizó un conjunto de variables seleccionadas después de un análisis exploratorio exhaustivo.

Para validar la distribución de la probabilidad de ocurrencia del escarabajo descortezador en Nueva Segovia, se generó un modelo adicional. Como se detalla en el Cuadro 2, se consideraron un total de veintiséis variables para la construcción del modelo de probabilidad del escarabajo descortezador en el área de estudio de Nueva Segovia.

Cuadro 2. Variables ambientales (exploratorias) usadas para generar modelos de distribución de especies de *Dendroctonus* en Nueva Segovia.

Nº	Categoría	Variable	Descripción
Bioclima			
1		Bio1	Temperatura media anual (°C)
2		Bio2	Rango de temperatura media diurna (°C)
3		Bio3	Isotermalidad (Bio2/Bio7) (*100)
4		Bio4	Estacionalidad de la temperatura (desviación estándar * 100)
5		Bio5	Temperatura máxima del mes más cálido (°C)
6		Bio6	Temperatura mínima del mes más frío (°C)
7		Bio7	Rango de temperatura anual (Bio5-Bio6, °C)
8		Bio8	Temperatura promedio del trimestre más lluvioso (°C)
9		Bio9	Temperatura promedio del trimestre más seco (°C)
10		Bio10	Temperatura promedio del trimestre más cálido (°C)
11		Bio11	Temperatura promedio del trimestre más frío (°C)
12		Bio12	Precipitación anual (mm)
13		Bio13	Precipitación del mes más lluvioso (mm)
14		Bio14	Precipitación del mes más seco (mm)
15		Bio15	Estacionalidad de la precipitación (Coeficiente de variación, %)
16		Bio16	Precipitación del trimestre más lluvioso (mm)
17		Bio17	Precipitación del trimestre más seco (mm)
18		Bio18	Precipitación del trimestre más cálido (mm)
19		Bio19	Precipitación del trimestre más frío (mm)
Anomalía térmica			
20		Firepoint	Densidad de puntos de calor
21		Firebrighth	Temperatura radiométrica o de brillo (°K)
22		Firepower	Potencia Radiativa del Fuego (MW)
Topografía			
23		Elev	Elevación sobre el nivel del mar (m)
24		Slope	Pendiente (°)
25		Aspect	Orientación de pendiente (°)
26	Vegetación	Dbasal	Densidad arbórea (área basal; m <sup>2</sup> h <sup>-1</sup> )

### **4.3. Fuente de datos**

En este estudio se utilizaron varias fuentes y tipos de datos. En concreto, para modelar la distribución de la probabilidad de escarabajo descortezador, el software Maxent requiere ubicaciones de presencia (variable dependiente) y variables ambientales (variables independientes). Como se detalla en esta sección y subsecciones posteriores, se utilizaron las áreas de afectación de brotes de escarabajos descortezadores durante el periodo de años de 1999 al 2019 como ubicaciones de presencia y variables bioclimáticas, térmicas, topográficas y vegetación.

#### **4.3.1. Creación de datos de presencia (variable dependiente)**

La modelización de la posible distribución de escarabajo descortezador en la región de Nueva Segovia requiere de datos de ocurrencias o sitios de presencia como punto de partida. En este estudio, estas ubicaciones de presencia se obtuvieron a partir de polígonos georreferenciados que representan las áreas afectadas durante el mayor brote de gorgojo descortezador del pino en Nicaragua, que tuvo lugar entre 1999 y 2003. Además, se incorporaron sitios específicos de afectación por gorgojos de pino que ocurrieron después de este período, es decir, entre 2007 y 2019.

La información detallada acerca de la ubicación geográfica de estos polígonos y puntos de afectación de escarabajo descortezador está contenida en la base de datos proporcionada por el Instituto Nacional Forestal (INAFOR). Estos datos, recopilados a través de monitoreos forestales realizados como parte del Inventario Nacional Forestal, constituyen una fuente valiosa para este estudio.

Empleando la funcionalidad *Create Random Points* en ArcMap, se generaron puntos de manera aleatoria y se distribuyeron en toda la extensión geográfica de Nueva Segovia. Luego, se aplicó la herramienta *Select by Location* para identificar aquellos puntos aleatorios que intersectan con los polígonos de áreas que fueron afectadas por el gorgojo descortezador durante el periodo 1999-2019.

Cada uno de estos puntos representa una ubicación donde se ha registrado la presencia de escarabajos en el pasado dentro del área afectada en el periodo mencionado. La Figura 5 muestra la disposición de estas ubicaciones aleatorias de ocurrencia de los escarabajos dentro de los polígonos que representan las zonas afectadas.

Mediante este procedimiento, se obtuvo un total de 265 puntos aleatorios que posteriormente fueron empleados en el proceso de modelización. Estos puntos representativos se utilizaron para elaborar un modelo que busca predecir la distribución potencial de la ocurrencia de escarabajo descortezador en Nueva Segovia.

Independientemente de las ubicaciones de presencia de ocurrencia de escarabajos generadas para el modelo, ubicaciones adicionales de presencia se generaron para la validación de modelos independientes fuera del software Maxent.

Específicamente, utilizando las mismas técnicas descritas anteriormente, se extrajeron 66 ubicaciones de presencia de ocurrencia de escarabajos dentro de los polígonos de área afectada para la validación del modelo de probabilidad de escarabajo descortezador.

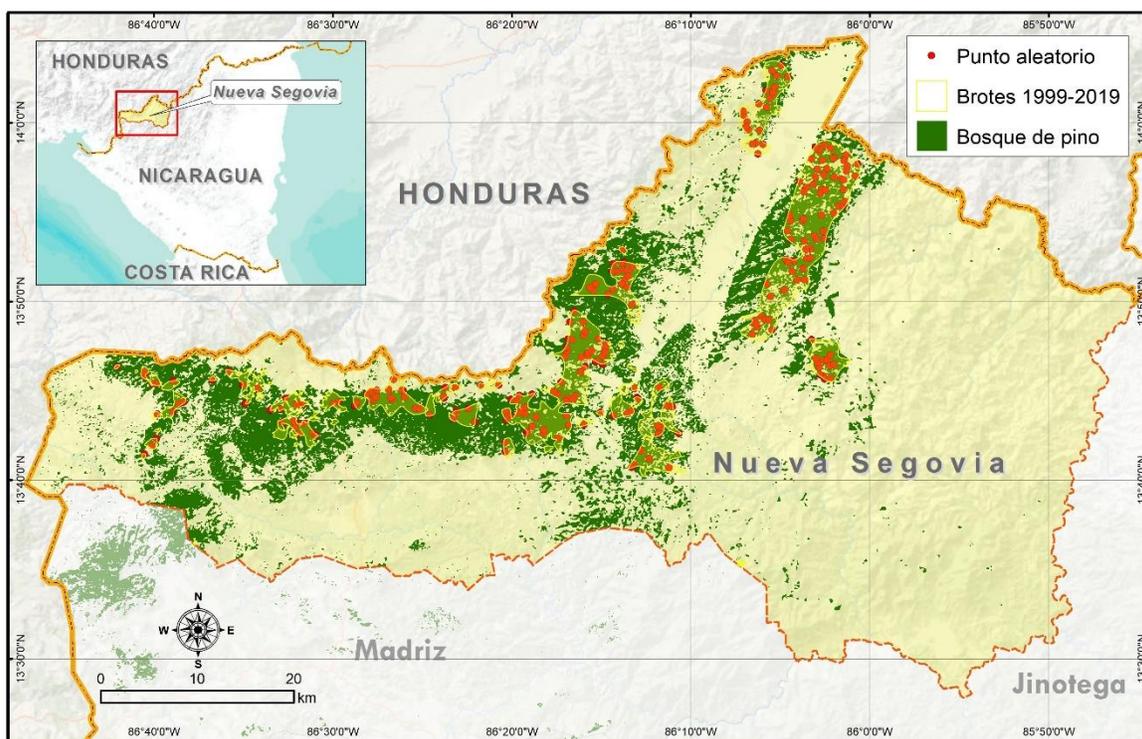


Figura 5. Puntos de presencia aleatorios extraídos de las áreas afectadas por escarabajo descortezador durante el periodo 1999-2019 en Nueva Segovia.

#### 4.3.2. Creación de datos de ausencia de escarabajos

Las pseudo-ausencias y las ubicaciones de fondo, aunque no se emplean en modelos de idoneidad de hábitats basados únicamente en presencia, desempeñan un papel crucial en la validación de dichos modelos. En este sentido, para validar un modelo de idoneidad de

hábitat para el escarabajo descortezador, se recurrió a la herramienta *Create Random Points* en ArcMap, que permitió distribuir de manera aleatoria puntos dentro de la extensión geográfica de Nueva Segovia.

Posteriormente, se utilizó la herramienta *Select by Location* para elegir puntos de presencia que intersectaran con polígonos correspondientes a áreas afectadas por el gorgojo del pino durante el período de 1999 a 2019. Tras la selección de los puntos de presencia, se aplicó la herramienta *Switch Selection* para nuevamente seleccionar ubicaciones de fondo en las que no se había detectado la presencia del escarabajo.

En total, se generaron 3,185 pseudo-ausencias, las cuales fueron utilizadas para ejecutar el modelo de probabilidad.

### **4.3.3. Datos explicativos (variables independientes)**

#### **4.3.3.1. Anomalía térmica**

Los puntos de calor registran anomalías térmicas relacionadas con la generación de incendios forestales, quemas en pastizales y en cultivos (Cruz-López et al., 2011). Los puntos son detectados mediante el empleo de bandas térmicas en una imagen de satélite, a partir de píxeles que cumplen con los umbrales establecidos dentro de un algoritmo y que muestran una temperatura elevada en comparación con sus vecinos.

Puntos de calor georreferenciados se pueden descargar en formato vectorial (\*.shp) del Sistema de Información sobre Incendios para la Gestión de Recursos (FIRMS) de la NASA que muestran datos de incendios activos prácticamente en tiempo real gracias a la observación satelital del Espectro Radiómetro de Imágenes de Resolución Moderada (MODIS) y del Conjunto de Radiómetros de Imágenes de Infrarrojos Visibles (VIIRS). MODIS trabaja con una resolución espacial de un píxel por cada kilómetro, mientras que cada píxel de VIIRS representa 375 metros.

Se eligió la fuente de datos de puntos de calor del sensor MODIS, abarcando el período comprendido entre el 1 de noviembre de 2000 y el 1 de noviembre de 2022. Posteriormente, se aplicó la herramienta *Clip* de ArcMap para extraer los puntos de interés que se superponían con el departamento de Nueva Segovia. En total, se obtuvieron 3,668 puntos georreferenciados que proporcionaron información sobre incendios y puntos críticos activos.

En relación a las anomalías térmicas, se generaron tres mapas de densidad utilizando el método de estimación de Kernel. Estos mapas abarcaron los siguientes aspectos: Puntos de Calor, Temperatura Radiométrica (expresada en grados Kelvin) y Potencia Radiativa del Fuego (expresada en megavatios). La ejecución de todos estos procesos se llevó a cabo utilizando el software ArcGIS, y se ajustó el tamaño del píxel a 914.31 metros para garantizar la uniformidad. La proyección cartográfica se basó en el sistema de coordenadas UTM con Datum WGS84.

Finalmente, se realizó un recorte de los resultados utilizando una máscara correspondiente a Nueva Segovia, y se procedió a convertir los archivos al formato ASCII (\*.asc) para incorporarlos en la generación del modelo de distribución.

#### **4.3.3.2. Bioclima**

Las variables bioclimáticas utilizadas en este estudio engloban aspectos como la temperatura máxima, la temperatura mínima y los promedios tanto de temperatura como de precipitación. Estas variables desempeñan un papel fundamental en la captura de las fluctuaciones climáticas. Además, estas métricas bioclimáticas logran abarcar las condiciones anuales, los promedios estacionales y las variaciones dentro del mismo año.

Para la modelización, se tomaron en consideración las variables bioclimáticas propuestas por Hijmans et al. (2005), las cuales constituyen una combinación de los datos promedio de temperatura y precipitación. Estos conjuntos de datos se obtuvieron de manera gratuita a través de la plataforma WorldClim versión 2.1 (<http://www.worldclim.org>). Dichos datos se presentan en forma de capas geográficas en un formato de ráster, con una resolución espacial de 30 segundos de arco, lo que equivale aproximadamente a 1 km<sup>2</sup>.

Con el fin de lograr la coherencia y uniformidad necesaria, todas las capas geográficas que contienen las variables bioclimáticas fueron homogeneizadas al formato de ráster con píxeles de 914.31 metros. Además, se realizó la conversión de estas capas al Datum WGS84 y se proyectaron en coordenadas UTM. Posteriormente, se llevó a cabo la conversión final al formato ASCII.

#### **4.3.3.3. Topografía**

La topografía desempeña un papel fundamental para entender cómo se distribuye espacialmente el escarabajo descortezador en un área determinada. Para abordar este aspecto, se obtuvieron datos del modelo de elevación digital (DEM) con una resolución de 30 segundos de arco (aproximadamente 1 km<sup>2</sup>) de la versión 2.1 del sitio web WorldClim. Este DEM global de 30 segundos se eligió específicamente porque su tamaño de celda coincidía con el utilizado para otras variables, es decir, 1 km por 1 km.

Antes de calcular las derivadas topográficas, como la pendiente y la orientación, se recortó el DEM de 30 segundos para que se ajustara al área de estudio. Esto se realizó mediante la herramienta *Extract by Mask*. En este proceso, se transformaron las coordenadas originales del DEM a la proyección métrica en WGS 1984. Luego, se asignó una resolución espacial de 914.31 m y se convirtieron los datos al formato ASCII. Para garantizar la calidad de los datos ráster de superficie, se empleó la herramienta *Fill* de ArcMap para eliminar pequeñas imperfecciones.

A partir del DEM rellenado, se derivaron dos medidas clave: la pendiente y la orientación. Utilizando las herramientas de Análisis Espacial de ArcMap (*Slope* y *Aspect*), se calculó la pendiente, que representa la relación entre la elevación y la distancia horizontal, expresada en grados. Esta medida proporciona información sobre la inclinación del terreno. La orientación, también conocida como aspecto, se expresa en grados positivos de 0 a 359.9, medidos en sentido horario desde el norte. La orientación refleja la dirección de la pendiente y tiene en cuenta factores como la calefacción solar, el clima y la humedad en la vegetación.

#### **4.3.3.4. Vegetación**

En relación a la vegetación, se creó un mapa de densidad arbórea mediante el cálculo del área basal (m<sup>2</sup> h<sup>-1</sup>). Los datos para este mapa se extrajeron de la base de datos del Inventario Nacional Forestal del INAFOR. Para la generación de este mapa, se aplicó el método de interpolación de la distancia ponderada (IDW) según lo propuesto por Chirinos y Mallqui en 2016.

Este mapa de densidad arbórea se estandarizó al formato ráster, con píxeles de dimensiones 914.31 m, utilizando el Datum WGS84 y coordenadas UTM. Posteriormente, se convirtieron al formato ASCII para su integración en Maxent.

Es importante destacar que el INAFOR lleva a cabo un monitoreo anual de las áreas afectadas por brotes de gorgojo descortezador en Nueva Segovia. Este seguimiento implica la recopilación de datos en unidades de muestreo (UM) dispuestas de manera sistemática dentro de las áreas que fueron impactadas por el gorgojo durante el período de 1999 a 2003, y en las zonas que actualmente cuentan con bosque natural de pino.

Cada unidad de muestreo (UM) tiene un punto central, que marca el inicio de la muestra. Desde este punto central, se realiza un recorrido de 50 metros en las cuatro direcciones cardinales: norte, sur, este y oeste. En cada unidad de muestreo se establecen 5 parcelas de forma circular, cada una con un radio de 7.98 metros (equivalente a 200 m<sup>2</sup> o 0.02 ha), lo que da como resultado un área efectiva de 0.1 ha. Dentro de cada parcela, se incluyen los estratos de brinzales y latizales en las mediciones realizadas.

#### **4.3.4. Análisis exploratorio**

Se evaluaron veintiséis variables con el propósito de modelar la distribución de la probabilidad de gorgojo descortezador en Nueva Segovia. Estos datos fueron sometidos a un análisis exploratorio para evaluar las posibles correlaciones entre las variables. Este enfoque se empleó con el objetivo de evitar la inclusión excesiva de variables, redundar en información y disminuir la precisión del modelo.

Para llevar a cabo esta tarea, se utilizó la herramienta *Extract Multi Values to Points* en ArcMap, con el fin de extraer los valores de las celdas correspondientes a las diversas variables y agruparlos en una capa geográfica de tipo punto, todo en una única operación. Los datos obtenidos de múltiples archivos ráster se incorporaron a la tabla de atributos de la capa vectorial que contenía los puntos de presencia de escarabajo. Tras este proceso, la tabla de atributos se exportó a un archivo de Microsoft Excel, guardado en formato CSV (valores separados por comas).

Para realizar el análisis de correlación, se importó el archivo con la base de datos al programa R Studio. Se utilizó un único comando, "chart.Correlation()", para generar gráficos de dispersión, calcular los coeficientes y evaluar su significancia estadística de manera conjunta. En este análisis, se empleó el coeficiente de correlación de Pearson (R) para establecer las relaciones entre las variables. Aquellas variables explicativas que no mostraron correlación significativa se retuvieron para su uso en el modelo de distribución potencial de escarabajo

( $R > 0.3$  y  $< 0.6$ ), mientras que aquellas con alta correlación ( $R > 0.6$ ) se excluyeron del modelo. Los resultados detallados de este análisis se encuentran en el Anexo 1.

Aunque se empleó un análisis de correlación para minimizar la redundancia en la modelación de la probabilidad del escarabajo descortezador, se llevó a cabo otro análisis detallado de las veintiséis variables. El propósito fue desarrollar un modelo que demostrara un rendimiento óptimo en términos de AUC al considerar menos variables, lo que implicó la eliminación de aquellas que no aportaban contribuciones significativas (0% de contribución). Luego, se procedió a realizar una segunda modelación utilizando únicamente las variables restantes para obtener resultados más precisos y efectivos.

Además, se utilizó la Prueba de Jackknife utilizando el valor AUC en los datos de prueba. Esta técnica permitió identificar las variables de mayor importancia para la predicción de la ocurrencia de escarabajo descortezador. Después de realizar una segunda estimación se generó un archivo de salida en formato ASCII para escarabajo.

#### **4.4. Software Maxent**

##### **4.4.1. Descripción general**

Los modelos estadísticos tienen la finalidad de anticipar el comportamiento de procesos aleatorios. Entre estos, el enfoque de Entropía Máxima (Maxent) destaca como una metodología sofisticada para modelar la distribución de probabilidad del hábitat de especies en un espacio ambiental de múltiples dimensiones, basándose únicamente en datos de presencia (Phillips et al. 2006).

El software MaxEnt estima una probabilidad objetivo al ajustar la distribución de máxima entropía a las variables ambientales (independientes) en cada ubicación de presencia de la especie (dependiente). Específicamente, Maxent relaciona los puntos de muestra con las variables ambientales de entrada y deduce los requisitos ambientales (es decir, la idoneidad) para esa especie (Phillips et al. 2006; Parisien et al. 2012).

La información obtenida se emplea para predecir la distribución de especies en áreas no muestreadas, utilizando variables explicativas conocidas. Esto da lugar a la creación de un mapa de idoneidad del hábitat que muestra probabilidades "logísticas", "acumulativas" y/o "brutas". En este mapa, cada celda representa valores que estiman de manera relativa, en vez de absoluta, la probabilidad de presencia en dicha celda de la cuadrícula. Es importante

señalar que el software parte del supuesto de que todos los puntos de muestra se recopilaron de manera imparcial con respecto a las condiciones ambientales o variables explicativas empleadas en el modelo (Phillips et al. 2006).

#### **4.4.2. Requisitos de datos**

Los modelos de probabilidad de ocurrencia de escarabajo se calcularon utilizando Maxent 3.3.4k, un software de libre acceso disponible en línea (Phillips et al. 2006; Elith et al. 2011). Para la generación de estos modelos, se utilizaron puntos de datos de presencia, los cuales fueron formateados en un archivo CSV (valores separados por comas) que contenía tres columnas: especie, longitud y latitud. Como se mencionó anteriormente, se seleccionaron 265 puntos aleatorios que se superponen con los polígonos que delimitan las áreas afectadas por el gorgojo descortezador del pino durante el período de 1999 a 2019.

Los datos de los puntos de presencia se transformaron a la proyección WGS 1984. Al realizar este proceso, se utilizó la herramienta *Calculate Geometry* en ArcMap para actualizar las coordenadas a latitud y longitud en las tablas de atributos de la capa de entrada. Luego, esta tabla de atributo actualizada se exportó a Excel mediante la herramienta *Table a Excel*. En Microsoft Excel, se llevaron a cabo las manipulaciones necesarias y se guardaron como archivos de texto delimitados por comas (formato CSV) para su posterior uso en Maxent.

De manera similar, Maxent requiere que todas las variables ambientales estén en formato de archivo ASCII (\*.asc) y que compartan la misma referencia geográfica, sistema de proyección, extensión geográfica y tamaño de celda para llevar a cabo el modelamiento.

En el entorno de ArcMap, se procedió a la preparación de las variables ambientales necesarias para la implementación del modelo Maxent. Se aprovecharon las herramientas disponibles en la caja de herramientas de Análisis Espacial para llevar a cabo este proceso. A continuación, se describen los pasos clave que se siguieron:

En primer lugar, se realizó el recorte de los conjuntos de datos ráster para ajustarlos a la extensión geográfica específica de Nueva Segovia. Esta tarea se llevó a cabo mediante la utilización de la herramienta *Extract by Mask*. En el proceso de generación de los archivos de salida resultantes, se prestaron especial atención a los ajustes de los parámetros requeridos. Se aseguró que la referencia geográfica, el sistema de proyección, la extensión geográfica y

el tamaño de celda de la cuadrícula fueran uniformes en todos los archivos, garantizando así la consistencia entre las variables ambientales.

En aras de lograr esta uniformidad, todas las variables ambientales se mantuvieron en la misma proyección. Además, se procedió a ajustar el tamaño de celda de la cuadrícula para que fuera aproximadamente de 1.0 km<sup>2</sup>, lo cual es equivalente a un tamaño de píxel de 914.31 metros. Este proceso de ajuste contribuyó de manera significativa a establecer una base homogénea y comparativa para todas las variables utilizadas en el modelo.

Las variables ambientales ajustadas se convirtieron en archivos ASCII y se organizaron en una carpeta denominada "Variables Ambientales". Esta carpeta fue cargada en la sección "Capas Ambientales" del software Maxent. Una vez que los datos de presencia de escarabajo descortezador y las variables ambientales fueron cargados en Maxent, se ajustaron los parámetros para el modelado.

#### **4.4.3. Parámetros del modelo**

Se procedió a ajustar tanto parámetros básicos como avanzados antes de poner en marcha el modelo. Para esto, se configuró el número de replicaciones en 15. Esta elección implica la ejecución de 15 modelos independientes, cuyos resultados se promedian posteriormente. La aplicación de esta característica, junto con la reserva de una fracción de los datos para las pruebas en Maxent, ofrece la oportunidad de evaluar la eficacia del modelo. Además, esta estrategia brinda un medio para cuantificar la variabilidad presente en el modelo. La configuración de porcentaje de prueba aleatoria, incorporada en Maxent, se empleó con el propósito de examinar el desempeño del modelo.

Se configuró la prueba aleatoria para representar el 25 por ciento de las ubicaciones con presencia, lo que habilitó la evaluación del rendimiento del modelo mediante una selección aleatoria de un cuarto de los puntos con presencia. Para la ejecución replicada, se optó por la opción "Submuestra". Esta elección para evaluar el desempeño del modelo se caracteriza por su imparcialidad, ya que no implica la utilización de datos de entrenamiento. Finalmente, se estableció un límite máximo de 3,185 puntos de fondo para el modelo.

En la pestaña Configuración avanzada, el número de iteraciones se estableció en 5000 (por defecto se establece en 500). Aumentar el número de iteraciones permite que el modelo tenga el tiempo adecuado para convergencia, reduciendo así la incertidumbre de sobre o sub

predecir las relaciones. Se implementó el umbral de presencia de entrenamiento del percentil 10 para las ejecuciones del modelo Maxent.

Sugerido por Phillips y Dudik (2008), el umbral del percentil 10<sup>th</sup> proporciona una estimación conservadora de la tolerancia de las especies a cada predictor. Los modelos se realizaron utilizando la función logística de los valores brutos de Maxent, o una función exponencial de los valores explicativos variables, porque proporcionan la estimación más cercana de la probabilidad de presencia de especies, dado el medio ambiente (Elith et al., 2006).

#### **4.4.4. Precisión del modelo**

Para estimar la precisión de los resultados, se emplearon diversos gráficos generados por Maxent. Estos gráficos permitieron evaluar métricas que fueron calculadas y promediadas a lo largo de las 15 réplicas del modelo. Dos métricas clave evaluadas son la fracción estimada del área adecuada para escarabajo descortezador y la omisión, la cual se miden en el umbral de ocurrencia de escarabajo. Este umbral se establece de manera que minimiza la suma de las medidas de error. La interpretación conjunta de estas estimaciones es esencial, ya que proporcionan una visión integral de la precisión del modelo en términos de la tasa esperada de falsos negativos para lograr una predicción adecuada (Parisien et al., 2012).

Otro gráfico de salida que se utiliza para evaluar el rendimiento del modelo es el Área bajo la Curva (AUC, por sus siglas en inglés). El gráfico AUC permite a los usuarios comparar el rendimiento entre distintos modelos. Un valor de AUC igual a 0.5 señala que el rendimiento del modelo no es el mejor, mientras que valores mayores a 0.7 y cercanos a 1 indica una predicción razonable o precisión perfecta (Peterson et al., 2011).

No obstante, es importante tener en cuenta que este estudio sigue un enfoque basado en datos de presencia únicamente, lo que implica que no se cuentan con datos de ausencia. Por esta razón, no es posible alcanzar un valor de AUC igual a 1.0, ya que la falta de datos de ausencia introduce limitaciones en la evaluación. En casos como este, el valor máximo alcanzable para el AUC es igual a 1 menos la mitad de "a", donde "a" representa la fracción del área de estudio (Nueva Segovia) que efectivamente cubre la especie en cuestión. Sin embargo, en la mayoría de los casos, esta fracción "a" es desconocida.

Para fines de este estudio, resulta apropiado considerar que "a" corresponde al porcentaje de píxeles en los que se ha observado la presencia del escarabajo, como establecen Parisien et al. (2012).

#### **4.4.5. Validación del modelo**

El modelo de probabilidad de ocurrencia de escarabajo descortezador se sometió a una validación mediante la utilización de conjuntos de datos independientes, que incluyeron tanto puntos de presencia como pseudo-ausencias. La validación se realizó a través del análisis de matrices de confusión, también denominadas matrices de error, y se evaluaron los valores del estadístico kappa de Cohen asociados a estas matrices.

El estadístico de kappa de Cohen se emplea para cuantificar el grado de concordancia entre dos evaluadores o "jueces", en términos de cómo asignan categorías o puntuaciones a un mismo objeto o tema. Esta medida de kappa se utiliza para evaluar la confiabilidad interevaluadores, es decir, hasta qué punto dos evaluadores concuerdan en sus evaluaciones.

En esencia, la validación del modelo involucra comparar las predicciones del modelo con los datos independientes de presencia y pseudo-ausencias. Las matrices de confusión proporcionan una visión detallada de las clasificaciones correctas e incorrectas realizadas por el modelo en comparación con los datos reales. La presencia del estadístico kappa de Cohen en este análisis contribuye a cuantificar la consistencia entre las predicciones del modelo y los datos de validación independientes.

Para validar el modelo de probabilidad de ocurrencia del escarabajo descortezador, se utilizó un único conjunto de datos compuesto por 66 puntos de presencia y 796 pseudo-ausencias. Este conjunto de datos se empleó para llevar a cabo la validación del modelo de probabilidad de escarabajo.

Mediante la herramienta *Extract Values to Points* dentro de la caja de herramientas de Análisis Espacial de ArcMap, se procedió a obtener los valores de píxel correspondientes a los resultados de idoneidad del hábitat generados por Maxent. Para ello, se utilizaron los puntos de prueba independientes, que consisten en registros de presencia y pseudo-ausencia. Estos puntos de prueba se utilizaron como referencia para extraer los valores de píxel de sus respectivas ubicaciones en los resultados de idoneidad del hábitat obtenidos mediante Maxent.

Luego de este proceso, el conjunto de datos resultante se exportó con el propósito de crear una hoja de cálculo que contuviera información tanto de presencia como de pseudo-ausencia. Esta hoja de cálculo incluyó los valores predichos por el software Maxent en forma de porcentajes. Para determinar la presencia o ausencia en las predicciones de salida de Maxent, se empleó el umbral de presencia basado en el percentil 10. Específicamente, los valores de píxeles por encima del percentil 10 de los datos de entrenamiento se interpretaron como indicativos de la presencia del escarabajo descortezador, mientras que los valores por debajo de este umbral se consideraron como indicativos de ausencia de este escarabajo.

Este proceso permitió obtener y comparar los valores predichos por Maxent con los datos de prueba independientes, estableciendo un umbral de presencia para determinar la presencia o ausencia de escarabajos descortezadores en función de los resultados de idoneidad del hábitat generados por el modelo.

La matriz de confusión, presentada en el Cuadro 3, proporciona un desglose del número de falsos positivos (FP), falsos negativos (FN), positivos verdaderos (TP) y negativos verdaderos (TN). Esta matriz compara las predicciones realizadas con las observaciones reales, lo que resulta en un porcentaje que representa las observaciones correctamente clasificadas (Powers, 2011). Además, la matriz de confusión es utilizada para calcular una serie de medidas estadísticas de rendimiento, como se muestra en la Figura 6. Estas medidas incluyen:

1. **Sensibilidad o Tasa de Verdaderos Positivos:** Esta medida evalúa la capacidad del modelo para identificar correctamente los casos positivos. En otras palabras, mide la proporción de verdaderos positivos con respecto al total de casos positivos.
2. **Especificidad o Tasa de Verdaderos Negativos:** La especificidad se refiere a la capacidad del modelo para identificar correctamente los casos negativos. Representa la proporción de verdaderos negativos con respecto al total de casos negativos.
3. **Precisión o Exactitud:** La precisión se refiere a la proporción de predicciones positivas realizadas por el modelo que son correctas en relación al total de predicciones positivas.
4. **Estadístico de Kappa:** El estadístico de kappa evalúa el grado de concordancia entre las predicciones del modelo y las observaciones reales, teniendo en cuenta la

posibilidad de que el acuerdo ocurra al azar. Proporciona una medida más robusta del rendimiento del modelo, teniendo en cuenta la proporción de acuerdos observados en comparación con el acuerdo esperado al azar.

El estadístico de kappa ajusta la precisión esperada debido al azar y se interpreta en diferentes categorías de la siguiente manera: de 0 a 0.2 se considera como un acuerdo leve, de 0.21 a 0.4 como un acuerdo regular, de 0.41 a 0.6 como un acuerdo moderado, de 0.61 a 0.8 como un acuerdo sustancial y de 0.81 a 1 como un acuerdo casi perfecto (Landis y Koch, 1977; Manel, William y Ormerod, 2001; Allouche, Tsoar y Kadmon, 2006).

Al validar los resultados óptimos del modelo de probabilidad de escarabajo descortezador utilizando medidas estadísticas de rendimiento, se procesaron los resultados logísticos de Maxent en ArcMap para visualizar y representar el hábitat adecuado.

Cuadro 3. Matriz de confusión de presencia/pseudo-ausencia

Predicho	Observados			Totales
	Presencia (+)	Verdadero Positivo (TP)	Ausencia (-)	
Presencia (+)	Verdadero Positivo (TP)	Falso positivo (FP)		TP+FP
Ausencia (-)	Falso negativo (FN)	Verdadero Negativo (TN)		FN+TN
Totales	TP+FN	FP+TN		Total

$$\text{Sensibilidad} = \frac{TP}{TP+FN}$$

$$\text{Especificidad} = \frac{TN}{FP+TN}$$

$$\text{Exactitud global} = \frac{TP+TN}{Total}$$

$$\text{Kappa} = \frac{(TP+TN/n) - (TP+FP)(TP+FN) + (FN+TN)(TN+FP)/n^2}{1 - (TP+FP)(TP+FN) + (FN+TN)(TN+FP)/n}$$

Figura 6. Ecuaciones utilizadas en la matriz de confusión para calcular medidas estadísticas de rendimiento

#### 4.4.6. Mapeo de la probabilidad de escarabajo descortezador

Al ejecutar y validar el modelo de probabilidad de escarabajo descortezador, los mapas resultantes de salida se adaptaron para su uso en ArcMap, a fin de representar con precisión las probabilidades de ocurrencia. Específicamente, los mapas logísticos generados por

MaxEnt se transformaron de formato ASCII a un formato de cuadrícula ráster de punto flotante mediante la herramienta de conversión *ASCII to Raster*.

Este resultado proporciona un modelo logístico con valores de probabilidad en un rango de 0 a 1, donde 0 indica píxeles que no representan hábitat adecuado (condiciones inadecuadas), mientras que valores cercanos a 1 indican una mayor probabilidad de presencia de escarabajo (condiciones óptimas) (Cruz-Cárdenas, Villaseñor, López-Mata, Martínez-Meyer y Ortiz, 2014).

Adicionalmente a los resultados logísticos de la probabilidad de escarabajos, se generó un mapa de riesgo derivado del modelo de probabilidad. En este sentido, se establecieron cuatro categorías de riesgo: moderado, alto, muy alto y extremo. Para determinar los límites de estas categorías, se utilizó el percentil 10 de los datos de entrenamiento como umbral principal para el riesgo moderado de escarabajos (0.327). Los límites para las categorías restantes de riesgo de ocurrencia de escarabajos fueron definidos como sigue: alto riesgo (0.327-0.40), muy alto riesgo (0.40-0.70) y riesgo extremo (0.70-1.0).

#### **4.5. Recomendaciones para el diseño de una estrategia de manejo forestal adaptativo y saneamiento**

La metodología consistió en llevar a cabo una búsqueda bibliográfica de diversos documentos a nivel regional y nacional. Estos documentos abordaban una variedad de temas relacionados con la gestión forestal, sanidad forestal, manejo de plagas, incendios forestales, participación local, transferencia de tecnología y capacitación, investigación-científica, detección y alerta temprana, prevención y control, marco legal y restauración forestal. Después, se procedió a sistematizar la información obtenida, lo que posibilitó un análisis en profundidad de los puntos esenciales de cada uno de los tópicos abordados.

Esta metodología proporcionó información crucial para la formulación de una estrategia de acción dirigida a mitigar el impacto del ataque del gorgojo descortezador de pino en Nueva Segovia. La estrategia se basa en enfoques de manejo forestal adaptativo y saneamiento. La recopilación y análisis de estos insumos permitieron identificar los aspectos más relevantes y necesarios para abordar eficazmente la problemática, asegurando una gestión sostenible de los bosques y una respuesta adecuada frente a esta amenaza.

## V. RESULTADOS Y DISCURSIÓN

La presente sección describe los resultados obtenidos mediante el enfoque metodológico descrito anteriormente, contemplando un área de estudio correspondiente a Nueva Segovia.

La aplicación de esta metodología es de gran relevancia tanto para el estudio de las especies del género *Dendroctonus* como para la formulación de estrategias de manejo forestal. Además, establece un sólido cimiento para la toma de decisiones en la gestión de las ocurrencias de escarabajos descortezadores, permitiendo una focalización precisa de los esfuerzos de control en las áreas de mayor riesgo. Asimismo, fomenta la implementación de vigilancia y monitoreo continuos para detectar de manera oportuna posibles brotes.

Tal como se abordó en la Sección IV, las ubicaciones de las áreas afectadas por escarabajo descortezador se vincularon con variables bioclimáticas, anomalías térmicas, topografía y vegetación para estimar la probabilidad de la presencia del escarabajo. De las 26 variables consideradas para la modelación, se identificó que 12 de ellas, son suficientes para explicar el modelo de probabilidad de escarabajo descortezador. Los resultados obtenidos, que incluyen el análisis exploratorio de las variables, curvas de respuesta, métricas de los modelos y mapas de idoneidad del hábitat, se detallan en esta sección.

### 5.1. Variables ambientales utilizadas en el modelo de probabilidad

Una vez realizado el análisis de correlación de las 26 variables ambientales, se encontró que existían variables altamente correlacionadas, entre ellas las variables bioclimáticas derivadas de la temperatura, así mismo las variables bioclimáticas derivadas de la precipitación, por otra parte, la elevación tuvo una correlación inversa muy alta con la temperatura; algunas variables mostraron una correlación muy baja. De este análisis se seleccionaron las variables con un coeficiente de correlación menor a 0.6 y mayor de 0.3, dando prioridad a las variables que tienen poca correlación, conforme a la caracterización realizada, se obtuvo un total de 12 variables (consulte el Anexo 1).

La contribución de cada una de las variables varía para la especie del género *Dendroctonus*. Sin embargo, las variables que mejor explican la distribución de la especie analizada son las derivadas de la temperatura. Se puede observar en el Cuadro 4, que para el escarabajo descortezador del pino la variable con mayor porcentaje de contribución es la Estacionalidad de la temperatura (Bio4).

Cuadro 4. Contribución relativa para cada variable ambiental utilizada en el modelo de probabilidad de escarabajos expresado como porcentaje (%).

<b>Variable</b>	<b>Contribución porcentual (%)</b>
Estacionalidad de la temperatura - Bio4	44.6
Potencia radiativa del fuego - Firepower	17.3
Densidad de puntos de calor - Firepoint	7.3
Temperatura radiométrica o de brillo - Firebrighth	4.5
Precipitación anual - Bio12	2.9
Rango de temperatura media diurna - Bio2	2.7
Pendiente - Slope	2.5
Isotermalidad - Bio3	1.8
Precipitación del trimestre más frío - Bio19	1.7
Orientación de pendiente - Aspect	1.5
Precipitación del mes más seco - Bio14	1.5
Temperatura promedio del trimestre más frío - Bio11	1.4
Precipitación del trimestre más seco - Bio17	1.3
Precipitación del trimestre más lluvioso - Bio16	1.2
Elevación sobre el nivel del mar - Elev	1.1
Rango de temperatura anual - Bio7	1.1
Temperatura máxima del mes más cálido - Bio5	0.9
Precipitación del trimestre más cálido - Bio18	0.8
Temperatura promedio del trimestre más lluvioso - Bio8	0.7
Precipitación del mes más lluvioso - Bio13	0.7
Densidad arbórea - Dbasal	0.6
Temperatura mínima del mes más frío - Bio6	0.5
Temperatura media anual - Bio1	0.5
Temperatura promedio del trimestre más seco – Bio9	0.4
Estacionalidad de la precipitación - Bio15	0.3
Temperatura promedio del trimestre más cálido – Bio10	0.3

De acuerdo con la prueba de Jackknife, la variable que aumenta la ganancia de los modelos para las especies del género *Dendroctonus* es la Estacionalidad de la temperatura (Bio4). La Figura 7 muestra los resultados de la prueba de Jackknife usando AUC. La variable ambiental con mayor importancia es Bio4, que por lo tanto parece tener la información más útil. Los valores mostrados son promedios sobre las 15 replicadas ejecutadas.

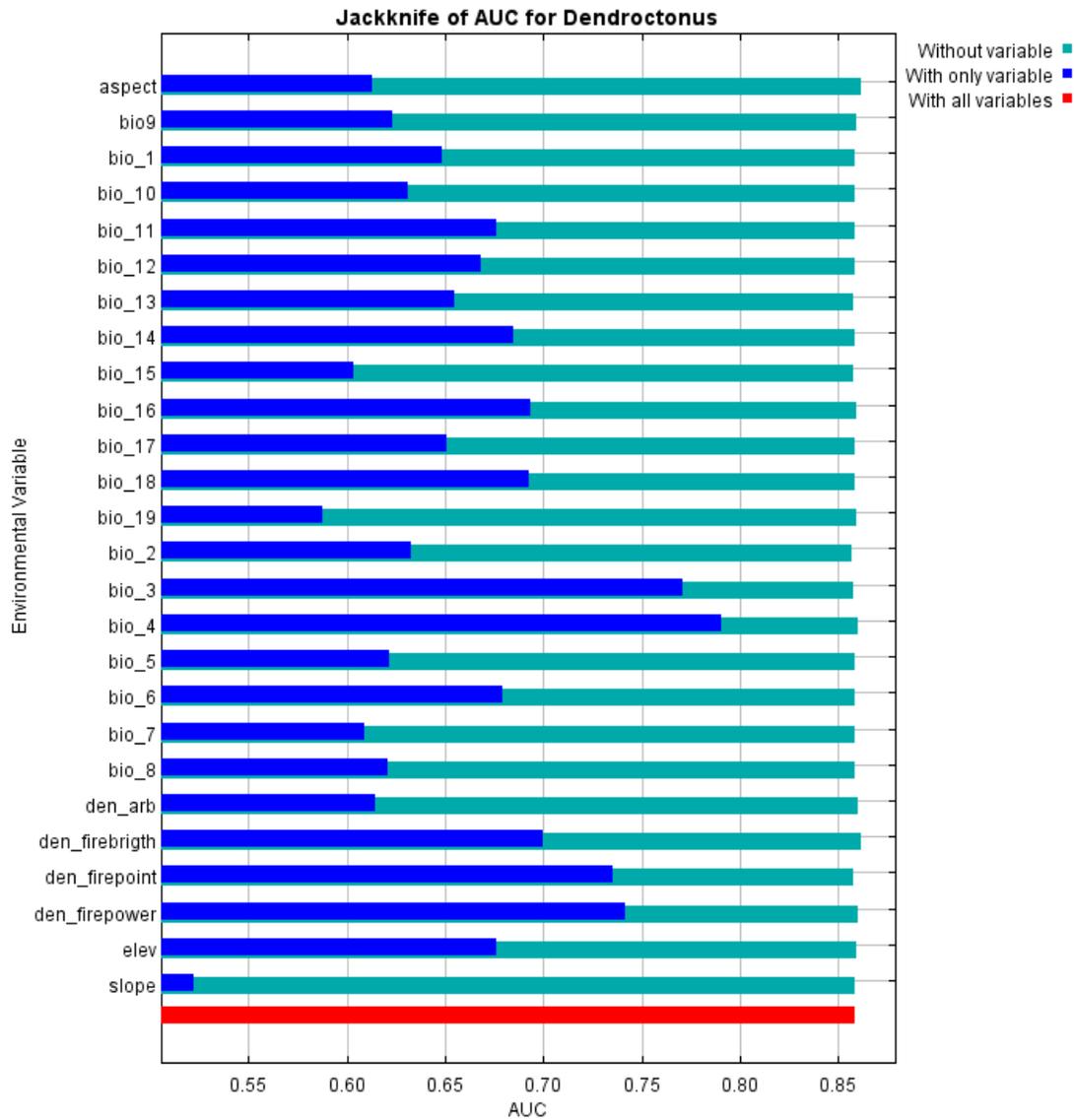


Figura 7. Variables climáticas de mayor importancia en el modelo de acuerdo a la Prueba de Jackknife usando AUC.

Es importante mencionar que la estacionalidad de la temperatura se refiere a la variación o cambios regulares que ocurren en la temperatura a lo largo de las diferentes estaciones del año. Es una medida que indica cuánto varía la temperatura promedio entre las diferentes estaciones, como invierno y verano.

En el contexto de un estudio de distribución de especies, la estacionalidad de la temperatura puede ser una variable relevante para comprender cómo los cambios estacionales afectan la presencia o actividad de una especie. Por ejemplo, ciertas especies pueden ser más activas o

preferir condiciones específicas durante ciertas estaciones debido a su adaptación biológica o necesidades ecológicas. En un modelo de distribución de especies, la estacionalidad de la temperatura puede influir en los patrones de hábitat, alimentación, reproducción y otros comportamientos de la especie, lo que a su vez afecta su distribución geográfica.

En líneas generales, las variables asociadas a la anomalía térmica, el bioclima y la topografía emergen como predictores significativos de la presencia de escarabajo. El análisis exploratorio redujo el conjunto original de variables a 12, las cuales se detallan en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Variables resultantes.

Nº	Categoría	Variable	Descripción
	Bioclima		
1		Bio3	Isotermalidad (Bio2/Bio7) (*100)
2		Bio4	Estacionalidad de la temperatura (desviación estándar * 100)
3		Bio6	Temperatura mínima del mes más frío (°C)
4		Bio11	Temperatura promedio del trimestre más frío (°C)
5		Bio12	Precipitación anual (mm)
6		Bio13	Precipitación del mes más lluvioso (mm)
7		Bio14	Precipitación del mes más seco (mm)
8		Bio19	Precipitación del trimestre más frío (mm)
	Anomalía térmica		
9		Firepoint	Densidad de puntos de calor
10		Firebrighth	Temperatura radiométrica o de brillo (°K)
11		Firepower	Potencia Radiativa del Fuego (MW)
	Topografía		
12		Elev	Elevación sobre el nivel del mar (m)

## 5.2. Resultados del modelo de probabilidad de ocurrencia

Se logró la generación de un modelo de probabilidad de ocurrencias de escarabajo descortezador para estimar la distribución potencial en todo el departamento de Nueva Segovia. Específicamente, se utilizaron como variables dependientes 265 puntos como ubicaciones aleatorias de presencia obtenidas de las áreas afectadas por gorgojo del pino entre 1999 y 2019 y se usaron 12 variables ambientales como variables independientes en el modelo.

### 5.2.1. Curvas de respuesta

Las relaciones entre la probabilidad de ocurrencia de escarabajo descortezado y las variables ambientales son variadas, como se evidencia en las curvas de respuesta de las 12 variables (Figura 8).

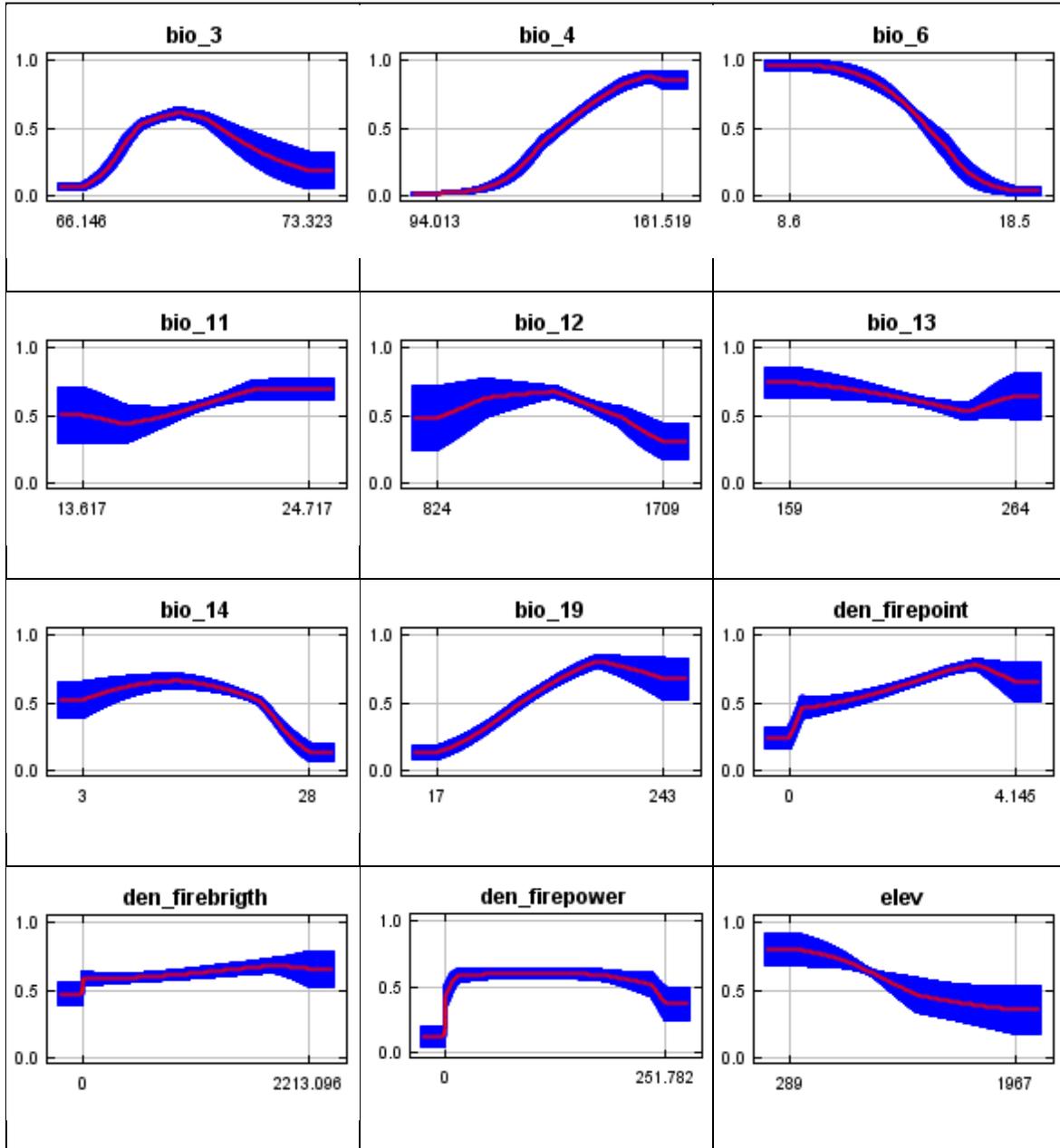


Figura 8. Probabilidad prevista de ocurrencia de especies del género *Dendroctonus* en Nueva Segovia utilizando curvas de respuesta de Maxent.

En la Figura 8, la línea roja indica los valores promedios de probabilidad del escarabajo descortezador, mientras que el sombreado azul representa la desviación estándar, calculada

a partir de 15 repeticiones ejecutadas. En las curvas de respuesta de Maxent, el eje horizontal generalmente muestra el rango de valores de la variable ambiental, mientras que en el eje vertical se representa la probabilidad de presencia de la especie. Estas curvas a menudo adoptan formas no lineales (por ejemplo, bio\_3) y proporcionan información valiosa sobre los umbrales o rangos específicos de valores ambientales que favorecen la ocurrencia de la especie.

Por ejemplo, si observamos la curva de respuesta de un escarabajo en relación con la elevación (elev), notaremos cómo la probabilidad de encontrar ese escarabajo disminuye a medida que la elevación aumenta. Por otro lado, al analizar la variación de la temperatura entre diferentes estaciones del año (bio\_4), veremos que a medida que esta variación aumenta, la probabilidad de ocurrencia del escarabajo también aumenta.

La mayoría de las respuestas de ocurrencia de escarabajo a las variables ambientales no son lineales, por lo que la probabilidad de ocurrencia se maximiza sobre valores intermedios, es decir, potencia radiativa del fuego (firepower), densidad de puntos de calor (firepoint), temperatura radiométrica o de brillo (firebright), precipitación anual (bio\_12), temperatura promedio del trimestre más frío (bio\_11) y precipitación del mes más lluvioso (bio\_13). Por otro lado, la curva de respuesta de estacionalidad de la temperatura (bio4) muestra una relación positiva entre estacionalidad de la temperatura y probabilidad de escarabajo descortezador.

Estas curvas de respuesta proporcionaron una visualización de cómo la probabilidad de que la especie esté presente cambia a medida que los valores de la variable ambiental cambian. En consecuencia, resultan útiles para comprender cómo las especies del género *Dendroctonus* reaccionan ante diversas condiciones ambientales y cómo dichas condiciones pueden afectar su distribución.

### **5.2.2. Contribución relativa**

Las variables bioclimáticas relacionadas con la temperatura son las que mejor explican la posible distribución del escarabajo descortezador. Por otro lado, la contribución de la precipitación anual (bio\_12) en el modelo de ocurrencia del escarabajo descortezador es leve, representando un 2.2% (Cuadro 6).

Dentro de estas variables, sobresale la estacionalidad de la temperatura (bio\_4) como la de mayor contribución (48.8%). Además, la potencia radiativa del fuego (den\_firepower) y los puntos de calor (den\_firepoint) también ejercen una influencia considerable en la probabilidad de ocurrencia del escarabajo descortezador (21.6% y 7.6%, respectivamente).

Cuadro 6. Contribución relativa para cada variable ambiental utilizada en el modelo de probabilidad de escarabajos expresado como porcentaje (%).

<b>Variable</b>	<b>Contribución porcentual</b>	<b>Importancia de la permutación</b>
bio_4	48.8	30.2
den_firepower	21.6	3.6
den_firepoint	7.6	6.7
bio_14	3.6	5.5
bio_3	3.5	4.9
den_firebrigth	3.4	1.5
bio_19	3.1	12.8
bio_12	2.2	3
bio_6	2.1	23.5
Elev	1.7	3.6
bio_11	1	2.5
bio_13	0.7	1.2

Los resultados de este estudio revelan una relación positiva entre la estacionalidad de la temperatura (calculada como la desviación estándar de la temperatura media mensual multiplicada por 100 en cada estación del año) y la probabilidad de ocurrencia de escarabajos. Esto implica que a medida que la variación de la temperatura entre diferentes estaciones del año aumenta, también lo hace el potencial de presencia de escarabajos descortezadores.

A pesar de que la precipitación del trimestre más frío (bio\_19) no haya sido uno de los contribuyentes más significativos en el modelo (3.1%), esta variable guarda una relación directa con la humedad y la energía en el ambiente. De hecho, es considerada un predictor clave en la distribución geográfica de los tipos de vegetación, según lo respaldado por investigaciones anteriores (Stephenson 1998; Parisián et al. 2012).

La conexión entre los escarabajos descortezadores y las precipitaciones del trimestre más frío parece seguir un patrón lineal, lo que significa que el aumento de la probabilidad de la presencia de escarabajos está directamente relacionado con el aumento de los valores de esta

variable. En otras palabras, a medida que la precipitación en el trimestre más frío aumenta, la probabilidad de que los escarabajos descortezadores estén presentes también se incrementa. Aunque su contribución puede no ser la más alta, su influencia en el hábitat y las condiciones ambientales sigue siendo significativa en la dinámica de estos insectos y en la distribución de su población en los bosques de pino.

En los ecosistemas forestales, la precipitación del trimestre más frío puede influir en la cantidad de humedad disponible en el suelo y en los sistemas hídricos durante los meses más fríos del año. Esta humedad puede tener un impacto en la supervivencia y reproducción de los escarabajos descortezadores, ya que estos insectos pueden ser sensibles a los niveles de humedad. Además, la precipitación del trimestre más frío también puede influir en la disponibilidad de recursos alimenticios para los escarabajos, como la humedad en la corteza de los árboles o la presencia de hongos u otros microorganismos que pueden servir como fuente de alimento.

De manera similar a los resultados obtenidos en este estudio, Portillo y Elvir (2016) llevaron a cabo una investigación en la que utilizaron un modelo de predicción para el gorgojo descortezador del pino en Honduras. En su análisis, incorporaron 19 variables bioclimáticas y observaron que la temperatura estacional (Bio4), la precipitación anual (Bio12), la precipitación del mes más lluvioso (Bio13), la precipitación del trimestre más lluvioso (Bio16) y la precipitación del trimestre más frío (Bio19) tuvieron la mayor influencia en el modelo. Estas variables representan combinaciones relacionadas con precipitación, humedad y frío.

A pesar de estos hallazgos, los investigadores concluyeron que el modelo presenta cierta incertidumbre debido a las variaciones inherentes en las condiciones climáticas normales.

En otro estudio relevante, Méndez et al. (2020) exploraron la distribución actual y potencial de *Dendroctonus mexicanus* Hopkins en escenarios de cambio climático. Identificaron las variables clave que conformaron el modelo de idoneidad para esta especie: la temperatura de los meses más cálidos (Bio10), la variación entre la temperatura máxima y mínima (Bio7) y la precipitación del trimestre más seco (Bio17).

Los resultados obtenidos por Méndez et al. (2020) indican que un aumento en la temperatura (1.6 °C - 2.0 °C para 2050) en las áreas actuales de distribución de *D. mexicanus* podría tener un impacto significativo en cómo se distribuye esta especie en el futuro. Es interesante notar que esta influencia persiste a pesar de que *D. mexicanus* posee un perfil bioclimático más diverso en comparación con otras especies.

Se ha identificado una sólida relación entre las variables ambientales vinculadas al clima y la distribución de los escarabajos descortezadores, lo que resalta la relevancia de incorporar factores bióticos en el análisis. Además, las proyecciones de cambio climático indican que la posible distribución futura de esta plaga podría experimentar modificaciones, incluyendo la expansión hacia zonas inexploradas o la reducción de áreas que actualmente se ven afectadas.

Si bien existe una interacción entre la probabilidad de ocurrencia de escarabajos y las variables climáticas, las características topográficas también desempeñan un papel indirecto en la creación de un hábitat adecuado y, en última instancia, en la presencia de escarabajos.

El relieve del terreno muestra notables variaciones en Nueva Segovia, y estas diferencias tienen un impacto significativo en la presencia de escarabajos. Aspectos como la pendiente, la altitud y la orientación fueron considerados y empleados como variables iniciales para el modelo, representando la topografía. En particular, la elevación ocupó el décimo lugar en importancia, contribuyendo al modelo con un 1.7%.

Los resultados de este estudio muestran que la elevación tienen una relación no lineal con la probabilidad de escarabajos descortezador. Por ejemplo, la probabilidad de escarabajos aumenta a medida que la elevación disminuye. Aunque la elevación no está directamente correlacionados con la ocurrencia de escarabajos, estos factores actúan como sustitutos de otros factores ambientales que inhiben y/o promueven la distribución potencial de escarabajos.

### **5.2.3. Métricas de evaluación del modelo**

Para evaluar la precisión de los resultados del modelo, el software Maxent realiza cálculos de métricas de evaluación que se representan en dos gráficos: la curva de omisión promedio frente al área predicha y la curva de sensibilidad frente a especificidad.

Estas métricas proporcionan una visión detallada de la capacidad del modelo para predecir la ocurrencia de escarabajos descortezadores y se reflejan en la Figura 9.

Los resultados de la evaluación del modelo muestran un rendimiento sólido en la predicción de la probabilidad de ocurrencia de escarabajos descortezadores. Específicamente, el área bajo la curva (AUC) obtenida para el modelo es alto (AUC = 0.866). Esto destaca la eficacia del modelo para diferenciar entre la presencia y ausencia de escarabajos basándose en las variables ambientales analizadas. Cuanto más cercano a 1 sea el valor del AUC, mejor es el rendimiento del modelo.

En la Figura 9, la línea roja representa el AUC promedio, mientras que el sombreado azul representa la desviación estándar promedio. En este caso, la desviación estándar promedio proporciona una medida de la variabilidad en los resultados obtenidos de las 15 réplicas ejecutadas utilizando puntos aleatorios. Un sombreado más amplio indica una mayor variabilidad en los resultados, mientras que un sombreado más estrecho sugiere una mayor consistencia en las predicciones del modelo.

La Figura 9 exhibe una línea roja elevada junto con un sombreado azul estrecho, lo cual denota que el modelo es sólido y las predicciones son consistentes.

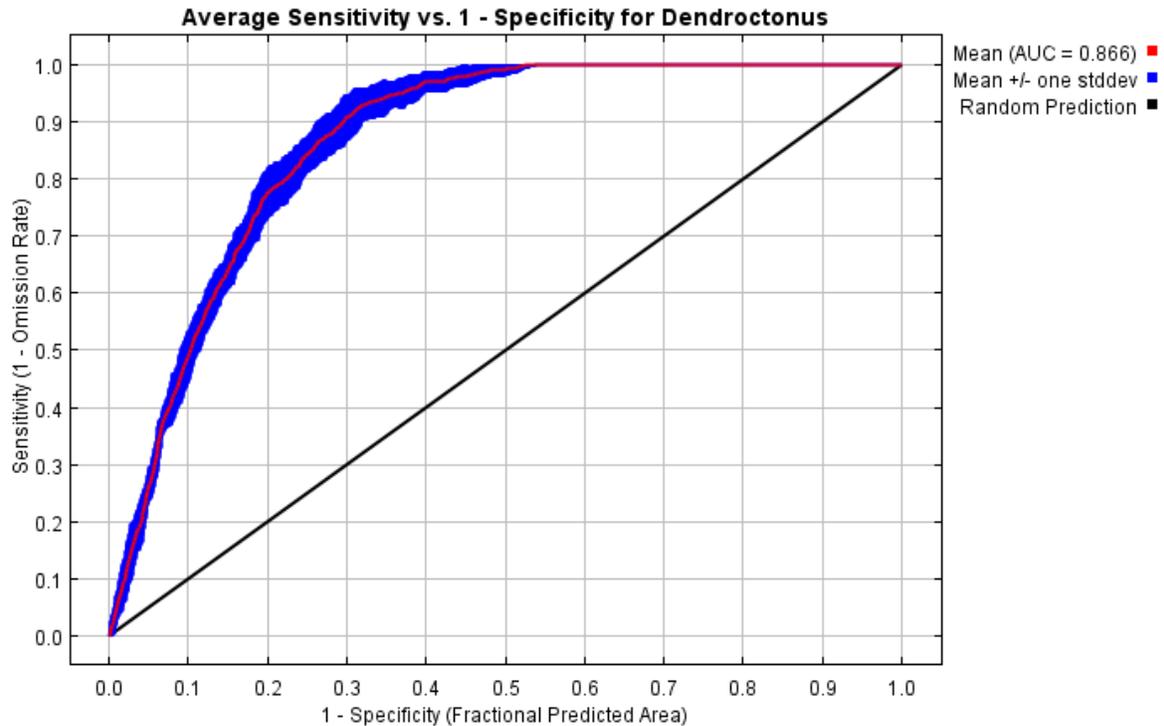


Figura 9. Sensibilidad promedio versus especificidad del modelo obtenido al ejecutar el modelo de probabilidad de escarabajo descortezador.

La Figura 10 presenta dos líneas clave: la línea negra, que refleja la cantidad de escarabajos predicha en varias áreas de Nueva Segovia según el modelo, y la línea verde, que representa la cantidad real de escarabajos observados en esos lugares. Además, la línea roja muestra la tasa promedio de omisión predicha por el modelo, indicando cuántas veces el modelo podría no detectar la presencia de escarabajos cuando realmente están presentes.

El sombreado azul que rodea la línea roja indica la variabilidad o incertidumbre en las predicciones del modelo. Un sombreado azul estrecho sugiere una menor variabilidad entre las repeticiones del modelo, lo que indica mayor consistencia en las predicciones. El sombreado naranja resalta la desviación estándar promedio de la omisión, proporcionando una medida de la variabilidad en las predicciones del modelo.

La cercanía entre la línea negra (omisión predicha) y la línea verde (omisión media en los datos de prueba) muestra que el modelo está haciendo predicciones precisas. En otras palabras, está calculando correctamente la ubicación de los escarabajos. También, como estas líneas están próximas, esto sugiere que el modelo es exacto en sus predicciones

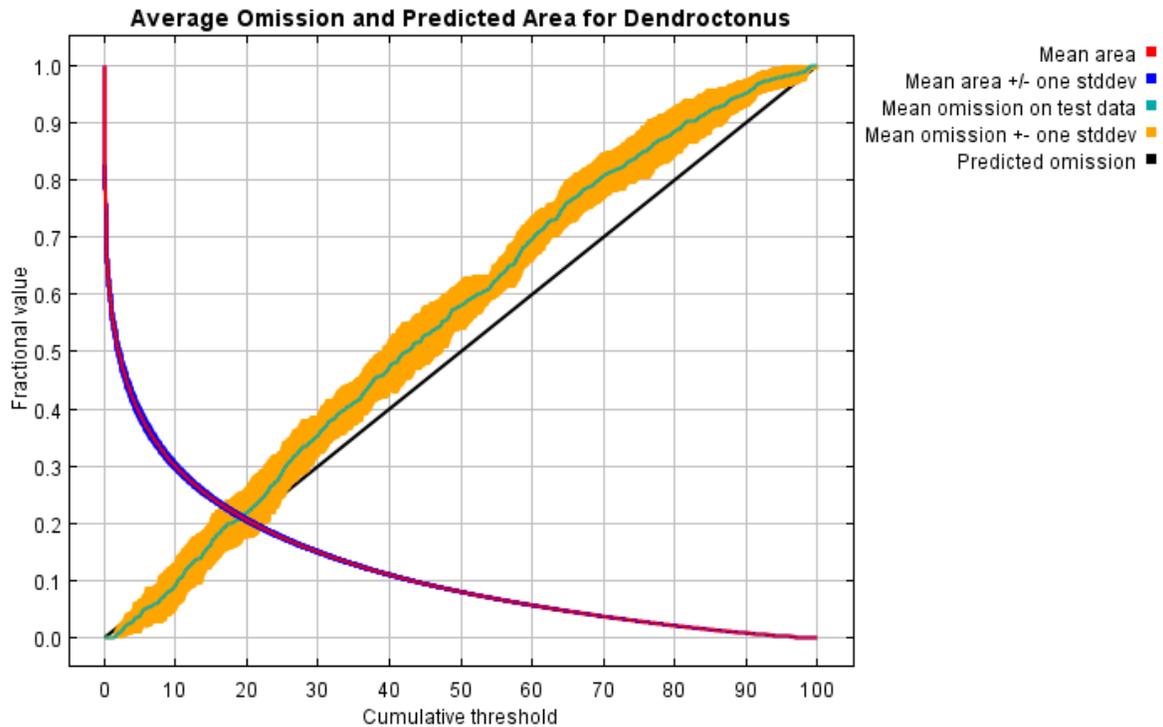


Figura 10. Omisión promedio y área predicha para datos de ocurrencia de escarabajo descortezador

Es relevante destacar que cuando la omisión predicha (representada por la línea negra) no se alinea con la omisión media en los datos de prueba (indicada por la línea verde), significa que las predicciones del modelo sobre la omisión no coinciden con lo que se observa en promedio en los datos de prueba. En otras palabras, el modelo podría estar subestimando o sobreestimando la omisión en comparación con lo que realmente se está observando en el terreno. Esta discrepancia entre la línea negra y la línea verde sugiere que el modelo podría estar teniendo cierta variabilidad en su capacidad para predecir la omisión.

### 5.3. Validación del modelo

Las medidas estadísticas de desempeño fueron obtenidas al utilizar el umbral promedio de entrenamiento, el cual se basó en el 10% de las iteraciones realizadas en el modelo de Maxent. Los resultados de la matriz de errores se presentan de manera resumida en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Matriz de error para la validación del modelo de probabilidad de escarabajos descortezador utilizando datos de prueba independientes presencias/pseudo-ausencias (n=862).

	<b>Grabados</b>		<b>Totales</b>	
	Presencia (+)	Ausencia (-)		
<b>Predicho</b>	Presencia (+)	58	250	308
	Ausencia (-)	8	546	554
	Totales	66	796	862

Como se resume en el Cuadro 8, la exactitud global del modelo de probabilidad de escarabajos descortezador fue de 0.700, lo que indica que el modelo predijo correctamente el 70.0% de los puntos de presencia y pseudo-ausencia que se incluyeron o excluyeron en el hábitat de escarabajo descortezador previsto.

Además, Maxent demostró un buen desempeño al predecir correctamente la presencia de escarabajos descortezadores en áreas donde se confirmó su presencia (sensibilidad = 88.0%). Sin embargo, su desempeño fue menor al predecir la ausencia de escarabajos descortezadores en áreas donde se generaron pseudo-ausencias (especificidad = 68.6%). Esto sugiere que el modelo tiene dificultades para distinguir de manera precisa entre el hábitat donde los escarabajos ocurren y el hábitat donde no ocurren, ya que tiende a sobreestimar la presencia de hábitat adecuado. El valor estadístico kappa indicó que el modelo de probabilidad de escarabajo descortezador mostró una concordancia sustancial con los datos de prueba (presencias y pseudo-ausencias).

Cuadro 8. Medidas de precisión para la validación del modelo de probabilidad de escarabajos descortezador utilizando datos de prueba independientes presencias/pseudo-ausencias (n=862).

<b>Medida</b>	<b>Valores</b>
Sensibilidad	0.880
Especificidad	0.686
Exactitud global	0.700
Kappa	0.210

Utilizando los resultados de la probabilidad de ocurrencia de escarabajo descortezador, es posible generar datos actualizados para crear mapas de amenazas que representen las zonas de riesgo de presencia de estos escarabajos (ver Figura 13).

#### 5.4. Mapas de probabilidad de escarabajos descortezador

La Figura 11 muestra los resultados obtenidos del modelo Maxent, los cuales ilustran la posible distribución de la probabilidad de escarabajo descortezador en Nueva Segovia. Las tonalidades más cálidas (como el rojo, naranja y amarillo) señalan áreas con una alta probabilidad de hábitat adecuado, mientras que las tonalidades más frías (como el azul) indican una probabilidad menor de encontrar un hábitat adecuado para los escarabajos.

Los resultados de este modelo (Figura 11) indican que el hábitat idóneo para la presencia del escarabajo se encuentra en áreas con elevaciones promedio que varían entre 500 y 1,600 metros sobre el nivel del mar. Asimismo, se observa que la temperatura media anual oscila entre 17 y 24 °C. Durante los meses más fríos, la temperatura mínima promedio se encuentra en el rango de 15 a 22 °C, mientras que en los meses más cálidos, la temperatura promedio varía entre 19 y 25 °C. Por último, la precipitación anual se ubica en un rango de 1,200 a 1,500 mm.

El mapa de probabilidad de escarabajo descortezador de la Figura 11 fue reclasificado en cuatro categorías de riesgo en la Figura 12. Basándonos en estas clasificaciones, alrededor del 80.19% del área total es categorizado como riesgo moderado, el 4.32% como alto riesgo, el 14.05% como muy alto riesgo, y solamente el 1.43% se clasifica como extremadamente alto riesgo de ocurrencia de escarabajos descortezadores (ver Cuadro 9).

Dentro de los bosques de pino, se observa un riesgo moderado en un 41.02%, mientras que un riesgo muy alto abarca un 44.54%. Esto sugiere que alrededor del 85% de las áreas con bosques de pino en Nueva Segovia están expuestas a un riesgo alto o muy alto debido a la amenaza del escarabajo descortezador del género *Dendroctonus*.

Cuadro 9. Área de clase de probabilidad de escarabajos descortezadores y porcentaje del área total de Nueva Segovia y del área con bosque de pino.

Clase de riesgo de escarabajo descortezador	Área total		Área bosque de pino	
	km <sup>2</sup>	Porcentaje (%)	km <sup>2</sup>	Porcentaje (%)
Moderado (0 – 0.327)	2,766.72	80.19	194.95	41.02
Alto (0.327 – 0.40)	149.00	4.32	42.40	8.92
Muy Alto (0.40 – 0.70)	484.85	14.05	211.67	44.54
Extremo (0.70 – 1.0)	49.48	1.43	26.27	5.53

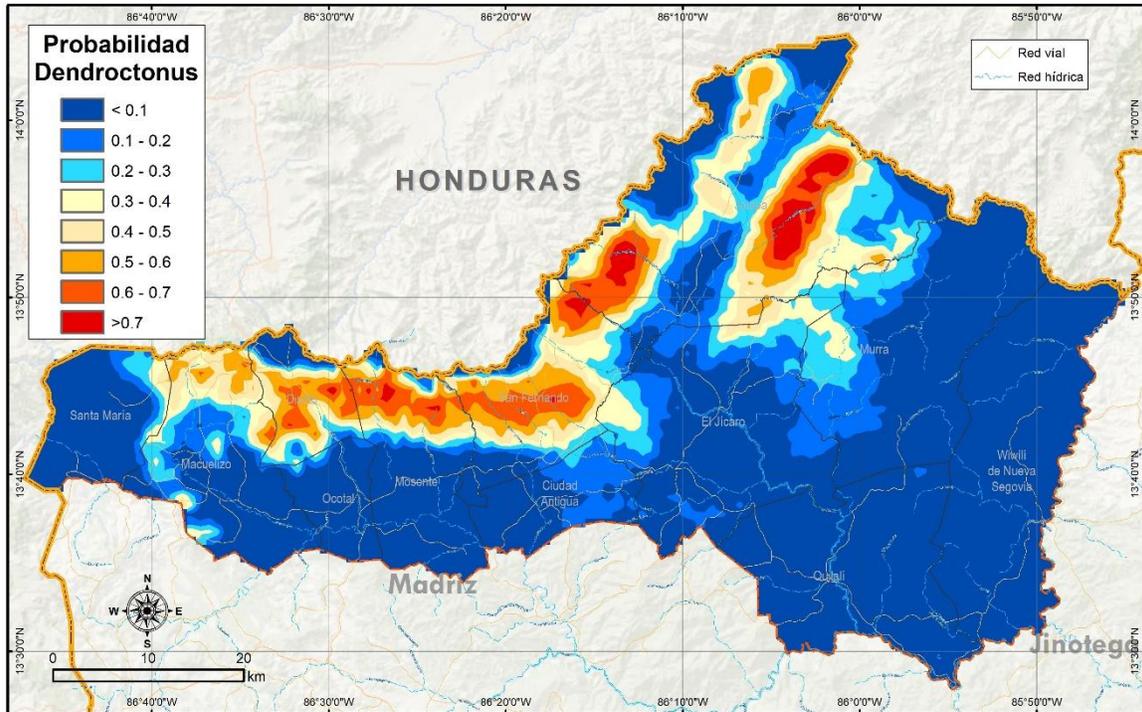


Figura 11. Mapa de probabilidad de ocurrencia de escarabajo descortezador utilizando 265 puntos de presencia aleatorios entre 1999 y 2019 (AUC = 0.866).

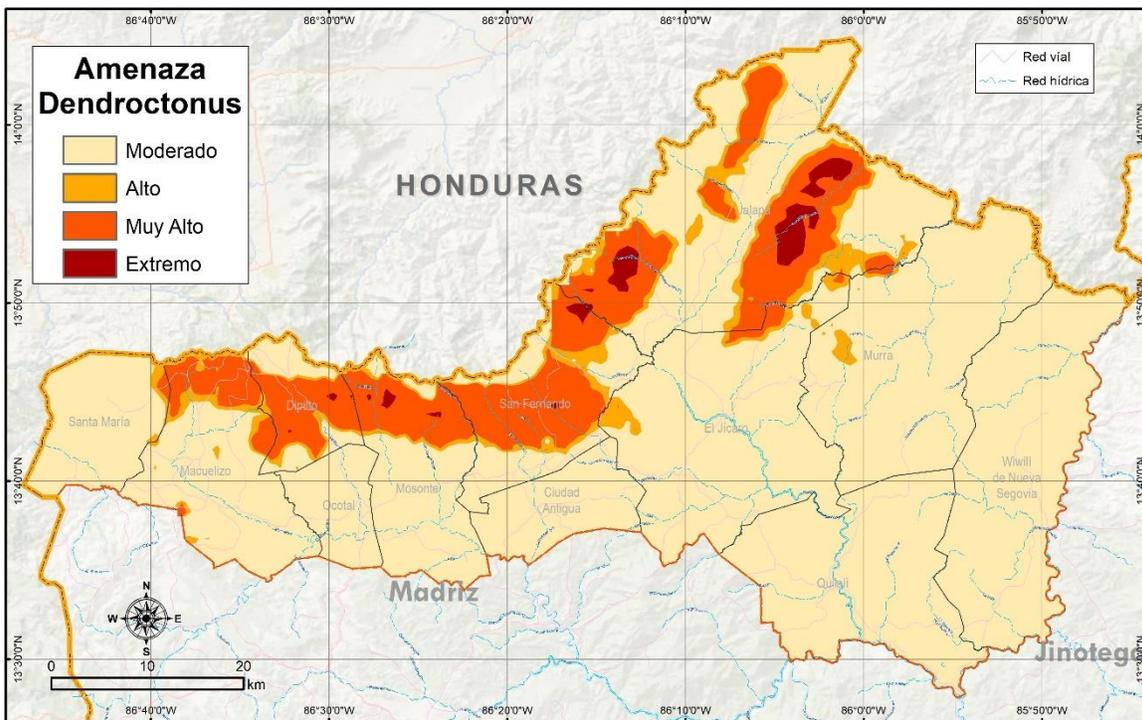


Figura 12. Mapa de amenaza de escarabajo descortezador derivado del mapa de probabilidad de escarabajo descortezador en Nueva Segovia (Figura 11).

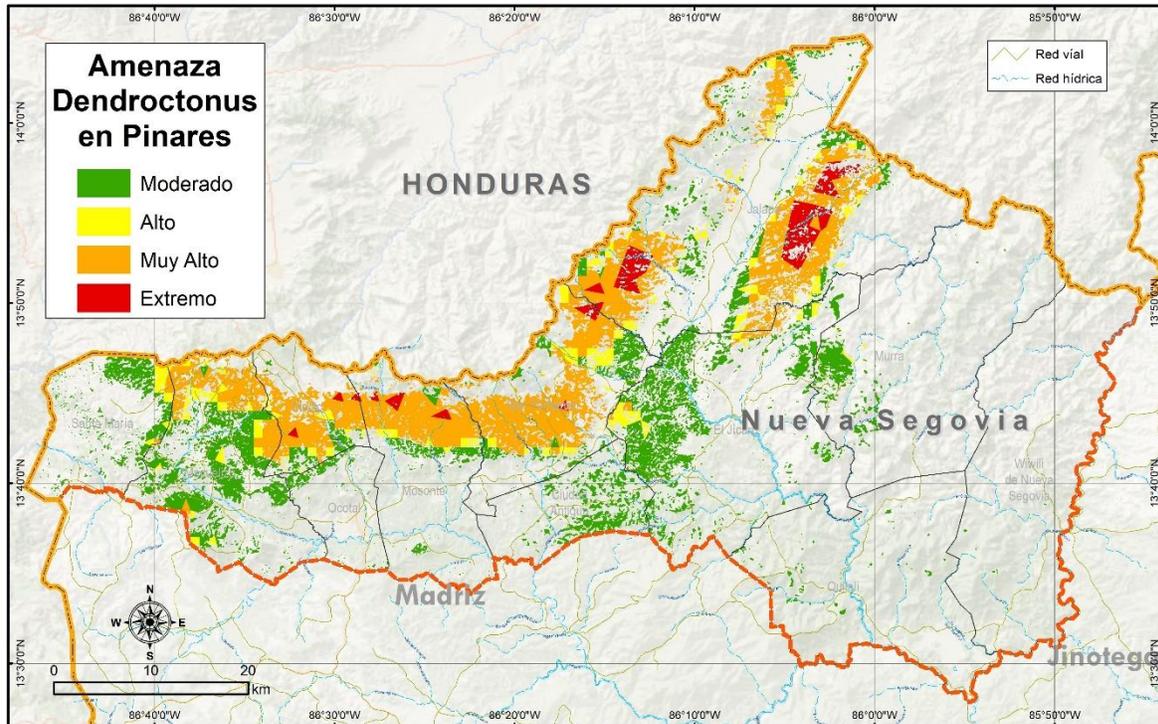


Figura 13. Mapa de amenaza de escarabajo descortezador en bosques de pino de Nueva Segovia.

El análisis de riesgo de escarabajos ha revelado áreas de alta vulnerabilidad, donde la combinación de factores climáticos y la presencia de árboles susceptibles podrían favorecer la propagación de los escarabajos descortezadores. Estos hallazgos destacan la necesidad de implementar medidas de control y prevención en estas regiones para evitar el establecimiento y la expansión de la plaga.

### 5.5. Limitación y trabajo futuro

A pesar de que los resultados del modelo lograron predecir con eficacia la distribución del escarabajo descortezador en Nueva Segovia, es importante considerar en futuros estudios la aplicación de técnicas adicionales de evaluación.

Este estudio tuvo como objetivo predecir la distribución potencial de los escarabajos en una escala cartográfica pequeña y no buscó modelar las variaciones dentro de las regiones. Sin embargo, dado que las condiciones pueden variar significativamente de una región a otra, es posible que se pierda el contexto espacial al modelar la probabilidad de ocurrencia de escarabajos en escalas cartográficas reducidas (Little et al. 2009; Parisien y Moritz, 2009;

Keeley y Sypard, 2015). En futuros trabajos, se recomienda ejecutar los modelos de probabilidad de escarabajos descortezadores generados en Maxent a nivel regional para evitar un ajuste excesivo del modelo, lo que, a su vez, podría mejorar la precisión de los resultados.

Además, en este estudio se emplearon variables topográficas (como elevación, pendiente y aspecto) derivadas de un Modelo Digital de Elevación (DEM) con una resolución de 30 segundos de arco. Sin embargo, debido a la resolución del conjunto de datos utilizado (1 km), es posible que se hayan presentado errores que generen cierta incertidumbre en el análisis. Estos errores en el DEM original pueden tener un impacto considerable en las variables de pendiente y aspecto, lo que a su vez podría influir en los resultados generales de este estudio (Holmes et al. 2000).

No obstante, se presume que los errores son mínimos en el contexto global del análisis, fundamentado en la precisión del modelo y las estadísticas de validación de datos obtenidas. Para reducir la incertidumbre en el análisis, sería relevante abordar estos errores en el conjunto de datos del DEM en futuros trabajos.

Basándonos en los resultados de este análisis, podemos afirmar que el software Maxent es una herramienta eficaz para modelar la distribución de probabilidad del escarabajo descortezador a nivel de especie en Nueva Segovia, siempre y cuando se disponga de datos de presencia y una identificación precisa de la especie bajo estudio.

Aunque los resultados de probabilidad no son una representación absoluta, ofrecen estimaciones relativas de la ocurrencia de escarabajos a lo largo de períodos prolongados (Krawchuk et al. 2009; Parisien y Moritz 2009; Parisién et al. 2012). Lo que es aún más relevante, estas estimaciones de probabilidad de escarabajos pueden proporcionar información invaluable para la gestión forestal, la evaluación de tierras y la planificación ante posibles desastres.

Es importante tener en cuenta que este estudio se basa en datos históricos y actuales, y que la dinámica de los escarabajos descortezadores puede verse afectada por otros factores como el manejo forestal, la presencia de depredadores naturales y la eficacia de las medidas de control implementadas

## **5.6. Recomendaciones para el diseño de estrategia de manejo forestal adaptativo y saneamiento**

Para diseñar una estrategia de manejo forestal adaptativo y saneamiento en respuesta al ataque de escarabajos descortezadores en los bosques de pino de Nueva Segovia, es esencial considerar una serie de documentos y fuentes de información fundamentales. A continuación, se enumeran la información que deben ser tomadas en cuenta:

### **1. Datos de Monitoreo y Evaluación:**

- Informes previos de monitoreo de los bosques afectados por el ataque de escarabajos descortezadores.
- Datos sobre la extensión del daño, la salud general del bosque y el impacto en la diversidad de especies.
- Datos sobre el grado de daño en términos de árboles infestados, mortalidad de árboles y pérdida de cobertura forestal.

### **2. Atlas de Cobertura Forestal y Deforestación en Nueva Segovia:**

- Datos actualizados sobre la distribución espacial de los bosques de pino en la región.
- Caracterización de los bosques de pino, incluyendo tipos de pino presentes, densidad del bosque, edades de los árboles y estructura del dosel.
- Información sobre la extensión de la cobertura forestal y cambios de uso de suelo a lo largo del tiempo.

### **3. Mapas Topográficos y Geoespaciales:**

- Mapas topográficos detallados que muestren la elevación, pendientes, orientación y otros aspectos relevantes del terreno.

### **4. Reglamentación y Normativas Forestales:**

- Leyes, regulaciones y políticas relacionadas con la gestión y conservación de los bosques en Nicaragua.

- Requisitos legales para la implementación de planes generales de manejo forestal y planes de saneamiento.

#### **5. Guías de Buenas Prácticas de Manejo Forestal:**

- Documentos que detallen las prácticas recomendadas para el manejo sostenible de bosques y la mitigación de plagas como los escarabajos descortezadores.
- Documentos con historial de manejo forestal anteriores, como técnicas de tala, regeneración y silvicultura.

#### **6. Estudios Científicos y Técnicos:**

- Investigaciones académicas y técnicas sobre la ecología y biología de los escarabajos descortezadores (ciclo de vida, comportamiento y hábitos de las especies de escarabajos), así como estrategias de manejo adaptativo.
- Estudios sobre factores que favorecen la proliferación de la plaga, como condiciones climáticas y tipos de árboles preferidos.
- Estado actual de salud de los bosques de pino y su resiliencia ante la plaga.
- Impacto de la plaga en la biodiversidad y composición de especies del bosque.
- Identificación de áreas y árboles más vulnerables a la plaga.

#### **7. Información Climática y Meteorológica:**

- Datos históricos y actuales sobre el clima en la región, incluyendo patrones de temperatura, precipitación y eventos climáticos extremos.
- Relación entre condiciones climáticas y la proliferación de la plaga.

#### **8. Datos de Presencia y Distribución de Escarabajos Descortezadores:**

- Registros de observaciones de escarabajos descortezadores, incluyendo especies, ubicaciones y momentos de mayor actividad.

#### **9. Reportes de Impacto Económico y Social:**

- Información sobre los impactos económicos y sociales del ataque de escarabajos descortezadores en la industria forestal y las comunidades locales.

### **10. Planes de Control y Manejo Previos:**

- Cualquier plan general de manejo forestal, experiencia o estrategia de manejo y control de escarabajos descortezadores previamente implementados en la región.
- Sistematización de lecciones aprendidas y resultados de estrategias de control anteriores.

### **11. Recursos Financieros Disponibles:**

- Información sobre el presupuesto y los recursos financieros disponibles para la implementación de la estrategia.

### **12. Participación de Comunidades Locales y Actores Claves:**

- Consultas con propietarios de tierras, comunidades locales, expertos en silvicultura y otros actores clave para comprender sus necesidades y perspectivas.

### **13. Capacidades y Recursos Humanos:**

- Evaluación de las capacidades del personal y expertos disponibles para llevar a cabo las actividades de manejo y saneamiento.

La elaboración de una estrategia de manejo forestal adaptativo y saneamiento surge como un logro en esta investigación. Este logro, fusiona la gestión sostenible de los recursos forestales con la aplicación de estrategias de saneamiento, con el propósito primordial de anticipar desafíos como plagas de escarabajos descortezadores. En las próximas líneas, se traza una guía de orientación general para el desarrollo de este diseño, delineando las pautas principales que guiarán a los tomadores de decisión de manera efectiva:

#### **1. Diagnóstico de la Situación Actual:**

- Realiza un diagnóstico detallado de la situación actual de los recursos forestales en el área de interés, incluyendo inventario de especies, salud de los árboles, diversidad biológica y condiciones ambientales.
- Comprende las características ecológicas y climáticas del área, así como las condiciones del suelo y los factores que podrían estar contribuyendo al brote de escarabajos.

- Realiza un análisis exhaustivo de la magnitud y gravedad del ataque de escarabajos descortezadores en los bosques de pino. Identifica las especies de escarabajos involucradas y su comportamiento.
- Evalúa los impactos económicos, sociales y ambientales de estas amenazas en los bosques y las comunidades locales.

## **2. Establecimiento de Objetivos y Metas:**

- Define claramente los objetivos y metas de la estrategia de manejo, como la recuperación de la salud del bosque, la prevención de futuros brotes y la mitigación de impactos económicos y sociales.
- Establece metas específicas, medibles, alcanzables, relevantes y limitadas en el tiempo, como reducir la tasa de mortalidad de los árboles afectados, aumentar la resistencia del bosque a futuros ataques y mantener la biodiversidad.
- Diseña un plan de acción que incluya estrategias específicas para el manejo sostenible de los recursos forestales y el control de plagas.
- Considera las mejores prácticas y enfoques basados en la ciencia para el manejo de recursos forestales y la sanidad forestal.

## **3. Selección de Métodos de Manejo y Saneamiento:**

- Identifica las especies de plagas presentes en la zona y comprende sus ciclos de vida, comportamientos y factores que influyen en su proliferación.
- Investiga y selecciona métodos efectivos de manejo forestal adaptativo que incluyan medidas preventivas, como la modificación de la estructura del bosque, la diversificación de especies, la poda selectiva, la regeneración natural y la promoción de la resiliencia del bosque.
- Determina métodos de saneamiento específicos, como la poda de árboles afectados, la remoción y destrucción de árboles infectados, el uso de tratamientos químicos selectivos y la introducción controlada de enemigos naturales de las plagas.

#### **4. Implementación y Monitoreo:**

- Establece un cronograma detallado para la implementación de las medidas de manejo y saneamiento. Considera las estaciones del año, las condiciones climáticas y los ciclos de vida de los escarabajos en la planificación operativa.
- Identifica los recursos necesarios, como personal, equipo, materiales y financiamiento, para llevar a cabo las acciones planificadas.
- Establece un sistema de monitoreo regular para evaluar la efectividad de las acciones implementadas. Realiza seguimiento de la salud de los árboles, la presencia de escarabajos y otros indicadores relevantes.
- Documenta los cambios observados en la salud de los árboles, la diversidad biológica y otros indicadores relevantes.
- Lleva a cabo las acciones de manejo y saneamiento de acuerdo con el plan establecido. Esto puede incluir la aplicación de tratamientos químicos, la poda de árboles infestados y la promoción de prácticas silviculturales adaptativas.

#### **5. Adaptación y Mejora Continua:**

- Con base en la retroalimentación del monitoreo, ajusta las estrategias de manejo y saneamiento para lograr un enfoque más efectivo y eficiente. Esto podría incluir la modificación de enfoques de manejo, la intensificación de medidas de saneamiento o la incorporación de nuevos métodos basados en los resultados observados.
- Promueve la capacitación y participación de las comunidades locales, propietarios de tierras y otras partes interesadas en la implementación de las medidas y la toma de decisiones.

#### **6. Participación, Comunicación y Educación:**

- Comunica de manera efectiva las acciones y resultados del manejo forestal adaptativo y saneamiento a las partes interesadas, incluyendo a las comunidades locales, autoridades gubernamentales y organizaciones involucradas en la gestión forestal.

- Promueve la educación y sensibilización sobre la importancia del manejo sostenible de los recursos forestales y la necesidad de medidas de saneamiento para garantizar la salud de los ecosistemas forestales.
- Fomenta la participación activa de las comunidades locales en la implementación y seguimiento de la estrategia, ya que su conocimiento y compromiso son fundamentales para el éxito.
- Involucra a las comunidades locales, propietarios de tierras con bosques, expertos en silvicultura y otros actores relevantes en el diseño y ejecución de la estrategia.
- Proporciona capacitación a las partes involucradas en la estrategia sobre las medidas de manejo, saneamiento y conservación forestal.

#### **7. Evaluación y Mejora Continua:**

- Realiza evaluaciones periódicas para medir el progreso hacia los objetivos establecidos y realizar mejoras adicionales en la estrategia de manejo forestal adaptativo y saneamiento.
- Considera la retroalimentación de las partes interesadas y la incorporación de avances científicos y tecnológicos en el proceso de toma de decisiones.

Al concluir la elaboración de la propuesta de estrategia de manejo forestal adaptativo y saneamiento en el contexto de esta investigación, es esencial tener en cuenta una serie de consideraciones finales que contribuirán a su implementación efectiva y al logro de los objetivos planteados. Estas consideraciones son fundamentales para garantizar la sostenibilidad y el éxito a largo plazo de la estrategia. A continuación, se presentan algunos puntos clave a considerar:

- a) Flexibilidad y adaptabilidad:** La estrategia debe ser flexible y capaz de adaptarse a cambios en el entorno, incluidas las variaciones climáticas y las dinámicas de la plaga. Mantener una mentalidad abierta a ajustes y mejoras continuas permitirá abordar eficazmente los desafíos en evolución.
- b) Integración de la gestión sostenible:** La estrategia debe estar arraigada en principios de gestión sostenible de los recursos forestales. Esto implica considerar no solo el control

de plagas, sino también la conservación del ecosistema, la biodiversidad y los servicios ecosistémicos que proporcionan los bosques.

- c) **Identificación de especies y hábitats clave:** Es esencial identificar las especies de escarabajos descortezadores específicas involucradas en el ataque y su relación con los hábitats. Esto permitirá desarrollar estrategias focalizadas en áreas de mayor riesgo y en las especies más afectadas.
- d) **Monitoreo y evaluación continua:** Establecer un sistema de monitoreo y evaluación constante es esencial para realizar un seguimiento de la efectividad de las acciones implementadas. La recolección de datos y la revisión periódica de los resultados permitirán tomar decisiones informadas y realizar mejoras según sea necesario.
- e) **Participación y colaboración:** Involucrar activamente a las comunidades locales, expertos en el campo y otras partes interesadas en la planificación y ejecución de la estrategia fortalecerá su impacto y legitimidad. La colaboración interinstitucional también puede generar recursos y apoyo adicionales.
- f) **Colaboración interinstitucional:** Fomentar la colaboración entre instituciones gubernamentales, organizaciones no gubernamentales, investigadores y otros actores relevantes es vital para la implementación exitosa de la estrategia. El intercambio de conocimientos y recursos puede enriquecer la planificación y ejecución de las acciones.
- g) **Capacitación continua:** Brindar capacitación constante a los involucrados en la implementación de la estrategia, desde trabajadores forestales hasta miembros de la comunidad, asegurará la correcta ejecución de las prácticas de manejo y saneamiento. La educación sobre la identificación de plagas, métodos de control y buenas prácticas debe ser continua.
- h) **Divulgación y comunicación:** La divulgación de los avances y resultados de la estrategia a nivel local, regional e incluso nacional puede aumentar la conciencia y el apoyo. La comunicación efectiva también es crucial para mantener la transparencia y la confianza entre todas las partes involucradas.
- i) **Evaluación de costos y beneficios:** Evaluar los costos y beneficios económicos, ambientales y sociales de la estrategia ayudará a priorizar acciones y asignar recursos de

manera eficiente. Una evaluación exhaustiva permitirá tomar decisiones informadas sobre la asignación de presupuesto y la distribución de esfuerzos.

- j) Adaptación a nuevas investigaciones:** Mantenerse al tanto de los avances en investigación y nuevas tecnologías en el campo de la gestión forestal y el control de plagas es esencial. Integrar hallazgos científicos y prácticas innovadoras en la estrategia puede mejorar su eficacia y resultados.
  
- k) Conservación de la biodiversidad:** Asegurarse de que las acciones de manejo y saneamiento sean compatibles con la conservación de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos es fundamental. Evitar impactos negativos en especies no objetivo y en los ecosistemas circundantes es esencial para mantener la salud general del bosque.

## VI. CONCLUSIONES

- La influencia de las variables ambientales c del género *Dendroctonus* y permite establecer probabilidades de ocurrencias en condiciones climáticas normales. Basado en los resultados del análisis de correlación de Pearson, la contribución relativa para cada variable y los niveles de rendimiento del modelo se observa múltiples factores en juego entre las ocurrencias de escarabajos y variables de tipo ambientales, biológicos y geográficos.
- Las métricas de evaluación preparadas por el software Maxent demostraron que el modelo de probabilidad funciona a un nivel alto y sólido. Los resultados se validaron utilizando medidas de desempeño. Estas medidas revelaron que el modelo funcionó con precisión. En general, los resultados del modelo de probabilidad se suman a la comprensión en la distribución de escarabajos descortezadores en todo el departamento de Nueva Segovia.
- La elaboración de mapas de amenazas contribuyen a la representación de áreas de riesgo de escarabajo descortezador, considerando cuatro categorías de riesgo: moderado, alto, muy alto y extremo. Esta información puede utilizarse para desarrollar nuevas y mejores estrategias de salud de los bosques de pino, como la ampliación o el establecimiento de nuevas áreas naturales protegidas.
- Las recomendaciones presentadas para la elaboración de una estrategia de manejo forestal adaptativo y saneamiento brindan una guía para abordar de manera efectiva los retos y las oportunidades que conlleva esta estrategia. Al integrar de manera consciente y proactiva estos elementos clave en la planificación y ejecución, se potencian significativamente las perspectivas de alcanzar el éxito en la reducción del impacto causado por los escarabajos descortezadores en los bosques de pino de Nueva Segovia. Esto resalta la importancia de la colaboración interdisciplinaria y la aplicación de conocimientos científicos en la búsqueda de soluciones prácticas y sostenibles.

## VII. RECOMENDACIONES

- Se recomienda simplificar el modelo que permita gran poder clasificatorio o predictivo que incluya pruebas de normalidad para valorar el uso de correlación de Pearson o una alternativa no paramétrica o transformación, estandarización de variables independiente, procedimientos de selección “por pasos”, evaluación de supuestos, aplicación de medidas correctivas, evaluación de la multicolinealidad, determinación de valores atípicos y su exclusión
- Recolectar datos climáticos históricos y actuales, así como datos geoespaciales (como imágenes de satélite y mapas topográficos), es esencial para comprender cómo el clima y el entorno geográfico pueden influir en la distribución de los escarabajos descortezadores.
- Considerar la presencia de especies hospedadoras en el análisis de la distribución potencial. Los escarabajos descortezadores dependen en gran medida de la disponibilidad de árboles hospedadores adecuados, por lo que es crucial incluir esta información en el estudio.
- Considerar escenarios de cambio climático para proyectar cómo podría alterarse la distribución potencial de los escarabajos descortezadores en el futuro. Esto ayudará a identificar áreas que podrían ser más vulnerables a medida que las condiciones climáticas cambian.
- Antes de realizar un estudio de distribución potencial, es fundamental llevar a cabo una revisión de la literatura científica existente sobre la biología, ecología y distribución de los escarabajos descortezadores. Esto proporcionará una base sólida para el diseño del estudio y asegurará que los resultados sean consistentes con la investigación previa.
- Verificar y validar los resultados del modelo mediante datos de campo y observaciones reales. Esto implica realizar muestreos en diferentes áreas para confirmar la presencia o ausencia de escarabajos descortezadores en función de las predicciones del modelo.

## VIII. LITERATURA CITADA

- Allouche, O., Tsoar, A., & Kadmon, R. (2006). *Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS)*. *Journal of Applied Ecology*, 43(6), 1223-1232. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2006.01214.x>
- Anderson, R. P. (2013). *A framework for using niche models to estimate impacts of climate change on species distributions*. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1297(1), 8-28. <https://doi.org/10.1111/nyas.12264>
- Armendáriz T., F., Torres B., V., López, M. F., Villa-Castillo, J., & Zúñiga, G. (2012). *New record and extension of the distribution range of the bark beetle *Dendroctonus rhizophagus* (Curculionidae: Scolytinae)*. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 83(3), 850–853. [doi: 10.22201/ib.20078706e.2012.3.1261](https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2012.3.1261)
- Austin, M. P. (2002). *Spatial prediction of species distribution: an interface between ecological theory and statistical modelling*. *Ecological Modelling*, 157(2-3), 101-118. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(02\)00205-3](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(02)00205-3)
- Bentz, B. J., Régnière, J., Fettig, C. J., Hansen, E. M., Hayes, J. L., Hicke, J. A., Kelsey, R. J., Negrón, J. F., & Seybold, S. J. (2010). *Climate change and bark beetles of the western United States and Canada: Direct and indirect effects*. *BioScience*, 60(8), 602–613. [doi: 10.1525/bio.2010.60.8.6](https://doi.org/10.1525/bio.2010.60.8.6)
- Breiman, L. (1984). *Classification and Regression Trees (1st ed.)*. Routledge. <https://doi.org/10.1201/9781315139470>
- Broennimann, O., Thuiller, W., Hughes, G. O., Midgley, G. F., Alkemade, J. R. M. & Guisan, A. (2006). *Do geographic distribution, niche property and life form explain plants' vulnerability to global change?*. *Global Change Biology*, 12(6), 1079-1093. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01157.x>
- Broennimann, O., Treier, U. A., Müller-Schärer, H., Thuiller, W., Peterson, A. T., & Guisan, A. (2006). *Evidence of climatic niche shift during biological invasion*. *Ecology Letters*, 10(8), 701-709. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2007.01060.x>
- Carrillo-Aguilar, D. M., Flores-Villegas, M. Y., García-Ramírez, P., Chávez-Simental, J.A., & Domínguez-Calleros, P. A. (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>
- Chirinos, Luis R, & Mallqui, Carmen G. (2016). *Comparación entre Interpoladores Espaciales en el Estudio de Distribución de Partículas Sedimentables Insolubles en la Cuenca Atmosférica de Lima y Callao*. *Información tecnológica*, 27(4), 111-120. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642016000400012>

- Cobos, M. E., Peterson, A. T., Barve, N., & Osorio O., L. (2019). *kuenm: An R package for detailed development of ecological niche models using Maxent*. PeerJ, 7, e6281. [doi: 10.7717/peerj.6281](https://doi.org/10.7717/peerj.6281)
- Cruz-Cárdenas, G., Villaseñor, J. L., López-Mata, L., Martínez-Meyer, E., & Ortiz, E. (2014). *Modelado de la distribución potencial de especies y el uso del análisis de componentes principales como variables predictoras*. Revista Mexicana de Biodiversidad, 85(3), 877-888. [DOI: 10.7550/rmb.36723](https://doi.org/10.7550/rmb.36723)
- Elith, J., Graham, C. H., Anderson R. P., Dudík, M., Ferrier S., Guisan, A., Hijmans, R. J., Huettmann, F., Leathwick F., R. Leathwick J., Lehmann, A., Li, J., Lohmann, L. G., Loiselle, B. A., Manion, G., Moritz, C., Nakamura, M., Nakazawa, Y., Overton, J. McC., Peterson, A. T., Phillips, S. J., Richardson, K., Scachetti-Pereira R., Schapire, R. E., Soberon J., Williams, S., Wisz, Mary S., & Zimmerman N. E. (2006). *Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data*. Ecography, 29(2), 129–151. [doi: 10.1111/j.2006.0906-7590.04596.x](https://doi.org/10.1111/j.2006.0906-7590.04596.x)
- Elith, J., Phillips, S. J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y. E., & Yates, C. J. (2011). *A statistical explanation of MaxEnt for ecologists*. Diversity and Distributions, 17(1), 43-57. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2010.00725.x>
- González-Gutiérrez, I., Mas-Causel, J. F., Morales-Manilla, L. M., & Ocegüera-Salazar, K. A. (2020). *Thematic accuracy of hotspots and wildfires in Michoacán, Mexico*. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, 26(1), 17-35. [doi: 10.5154/r.rchscfa.2019.01](https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2019.01).
- Guisan, A. & Thuiller, W. (2005). *Predicting species distribution: offering more than simple habitat models*. Ecology Letters, 8(9), 993-1009. [doi: 10.1111/j.1461-0248.2005.00792.x](https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00792.x).
- Guisan, A., & N. Zimmermann, E. (2000). *Predictive habitat distribution models in ecology*. Ecological Modelling, 135(2-3), 147–186. [doi: 10.1016/s0304-3800\(00\)00354-9](https://doi.org/10.1016/s0304-3800(00)00354-9)
- Guisan, A., & Thuiller, W. (2005). *Predicting species distribution: Offering more than simple habitat models*. Ecology Letters, 8(9), 993-1009. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00792.x>
- Guisan, A., Weiss, S. B., & Weiss, A. D. (1999). *GLM versus CCA spatial modeling of plant species distribution*. Plant Ecology, 143(1-2), 107-122. <https://doi.org/10.1023/A:1009841519580>
- Hellmann, J. J., Byers, J. E., Bierwagen, B. G., & Dukes, J. S. (2008). *Five potential consequences of climate change for invasive species*. Conservation Biology, 22(3), 534-543. [doi/10.1111/j.1523-1739.2008.00951.x](https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2008.00951.x)
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., & Jarvis, A. (2005). *Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas*. International Journal of Climatology, 25(15), 1965-1978. [doi: 10.1002/joc.1276](https://doi.org/10.1002/joc.1276)

- Instituto Nacional Forestal. (2002). *Acciones realizadas y efectos por el gorgojo descortezador (Dendroctonus frontalis Zimm) en el departamento de Nueva Segovia*. Informe Ejecutivo. P 3-10.
- Instituto Nacional Forestal. (2009). *Resultados del Inventario Nacional Forestal: Nicaragua 2007-2008*. Managua. 232 p. ISBN 978-99924-0-846-9. <https://cambioclimatico.ineter.gob.ni/bibliografia/Mitigacion%20del%20cambio%20Oclimatico/Informe%20Final%20inventario%20forestal.pdf>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2007). *Climate change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of working group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar4/wg1/>
- Karger, D. N., Conrad, O., Böhrner, J., Kawohl, T. Kreft, H., Soria-Auza, R. W., Zimmermann, N. E., Linder, H. P. & Kessler, M. (2017). *Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas*. Scientific Data, 4, 170122. doi: [10.1038/sdata.2017.122](https://doi.org/10.1038/sdata.2017.122)
- Keeley, J. E., & Sympard, A. D. (2015). *Independent lines of evidence for climate change adaptation suggest limited potential for range expansion of non-native grasses in California's coastal grasslands*. Diversity and Distributions, 21(10), 1209-1222. doi: [10.1111/ddi.12356](https://doi.org/10.1111/ddi.12356)
- Knizek, M., & Beaver, R. A. (2007). *Bark and ambrosia beetles of South America (Coleoptera: Scolytidae)*. In A. I. Cognato & R. J. Vandenberg (Eds.), *Bark and Wood Boring Insects in Living Trees in Europe, a Synthesis* (pp. 447-474). Springer. [https://www.monarthrum.info/pdf\\_assets/Wood%202007%20south%20america%20bookmarked.pdf](https://www.monarthrum.info/pdf_assets/Wood%202007%20south%20america%20bookmarked.pdf)
- Kocmánková E., Trnka, M., Eitzinger, J., Formayer, H., Dubrovský, M., Semerádová, D., Žalud, Z., Juroch, J., & Možný, M. (2010). *Estimating the impact of climate change on the occurrence of selected pests in the Central European region*. Climate Research, 44, 95–105. doi: [10.3354/cr00905](https://doi.org/10.3354/cr00905)
- Krawchuk, M. A., Cumming, S. G., & Flannigan, M. D. (2009). *Predicting future risk of spring frost damage in western Canadian forests: A landscape-level analysis*. Global Change Biology, 15(4), 782-792. doi: [10.1111/j.1365-2486.2008.01757.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01757.x)
- Little, J. M., Prior, L. D., & Williamson, G. J. (2009). *Scale-dependent variation in fire frequency in multi-aged resprouting mallee stands of southern Australia*. Austral Ecology, 34(7), 725-735. doi: [10.1111/j.1442-9993.2009.01965.x](https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.2009.01965.x)
- Lobo, J. (2015). *Los Bosques y la Biodiversidad frente al Cambio Climático: Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación en España*. Herrero, A. y M. Zavala, editores Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid. pp 407-417. <https://www.researchgate.net/profile/Lahcen->

[Taiqui/publication/303372671](https://www.researchgate.net/publication/303372671) LIBRO COMPLETO Los bosques y la biodiversidad frente al cambio climático/[links/573ef7b208aea45ee844ef64](https://www.researchgate.net/publication/303372671/links/573ef7b208aea45ee844ef64)/LIBRO-COMPLETO-Los-bosques-y-la-biodiversidad-frente-al-cambio-climatico.pdf

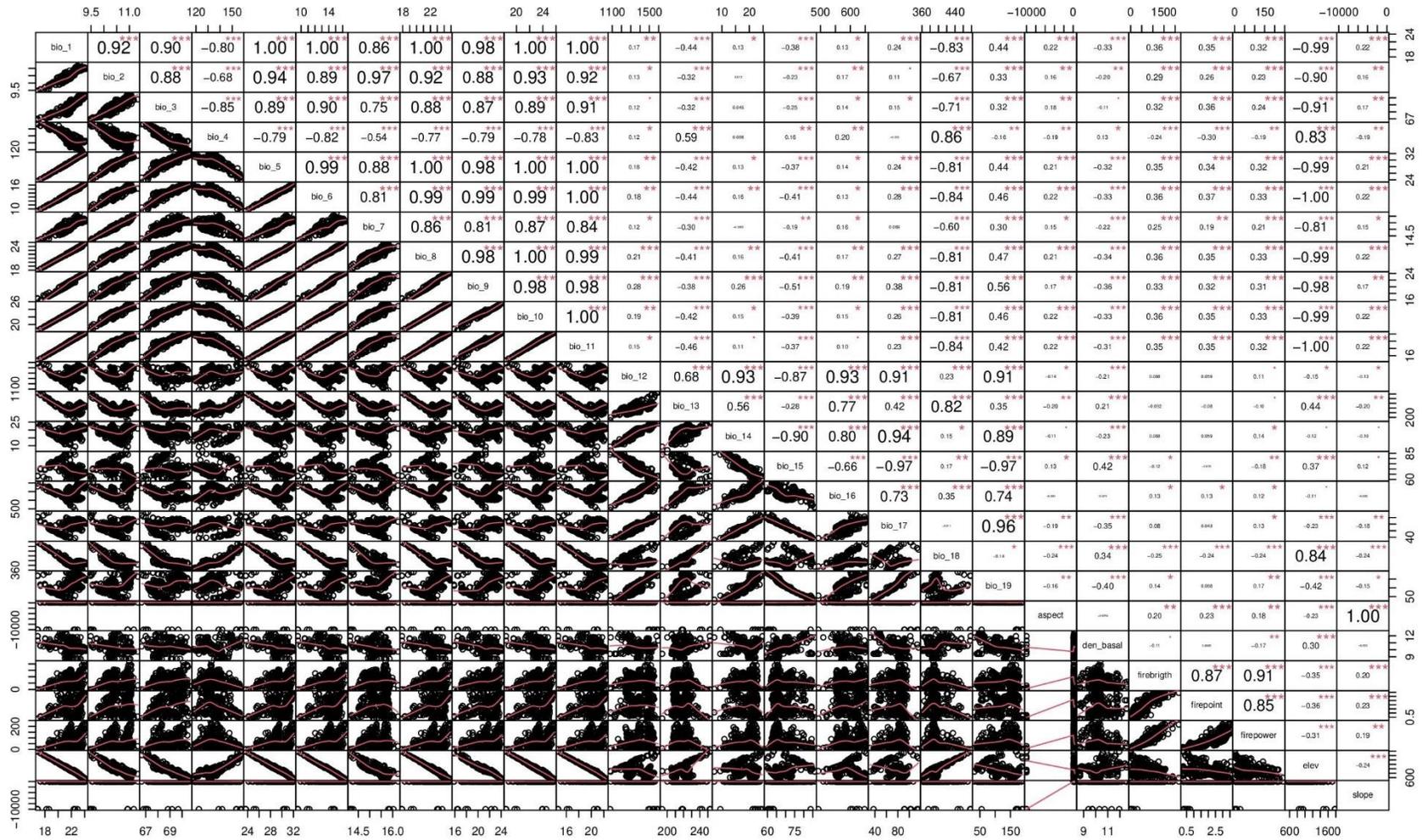
- Maldonado M., J. D., Cera C., J. I., Mendoza A., R. A., Sáenz L., A. A., Torres O., M. E., Bravo P., L. C., & Alotorre C. L., C. (2015). *Distribución potencial de Dendroctonus valens mediante modelos de máxima entropía: Estado de California, E.U.* Revista Lationomerica el Ambiente y las Ciencias, 6(12), 194–198. <https://www.researchgate.net/publication/302501463>
- Martínez Meyer, E., Peterson, A. T., Servín, J., & Kiff, L. F. (2006). *Ecological niche modeling and prioritizing areas for species reintroductions.* Conservation Biology, 20(6), 1764-1775. <https://assets.peregrinefund.org/docs/pdf/research-library/2006/2006-Martinez-Meyer-niche-modeleing.pdf>
- Mateo, G. R., Felicísimo, A. M. & Muñoz, J. (2011). *Modelos de distribución de las especies: una revisión sintética.* Revista Chilena de Historia Natural, 84(2), 217-240. <http://dx.doi.org/10.4067/S0716-078X2011000200008>
- Méndez, R. R., Luna, F. S., & García, A. B. (2020). *Exploración de la distribución actual y potencial de Dendroctonus mexicanus Hopkins en escenarios de cambio climático.* Revista de Ecología Aplicada, 25(3), 27-38. [doi:10.21704/rea.v25i3.2034](https://doi.org/10.21704/rea.v25i3.2034)
- Mendoza, Ma. G., Salinas M., Y., Olivo M., A., & Zúñiga, M. G. (2011). *Factors influencing the geographical distribution of Dendroctonus rhizophagus (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) in the Sierra Madre Occidental, Mexico.* Environmental Entomology, 40(3), 549–559. [doi: 10.1603/en10059](https://doi.org/10.1603/en10059)
- Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales (MARENA). (2018). *Atlas de Cobertura Forestal y Deforestación en Nicaragua.* <http://www.marena.gob.ni/Enderedd/wp-content/uploads/MemoriasOrganizados/Investigaciones/Atlas.pdf>
- Mota-Vargas, C. & Rojas-Soto, O. R. (2012). *Defining the geographic limits of species' distributions: Challenges in the effective delimitation of areas of endemism.* Revista Mexicana de Biodiversidad, 83(4), 1089-1098. [Doi: 10.1017/S0959270912000329](https://doi.org/10.1017/S0959270912000329)
- Mota-Vargas, C. & Rojas-Soto, O. R. (2012). *The importance of defining the geographic distribution of species for conservation: The case of the bearded wood-partridge.* Journal of Nature Conservation, 20(1), 10-17. [doi:10.1016/j.jnc.2011.07.002](https://doi.org/10.1016/j.jnc.2011.07.002).
- Parisien, M. A., & Moritz, M. A. (2009). *Environmental controls on the distribution of wildfire at multiple spatial scales.* Ecological Monographs, 79(1), 127-154. [doi:10.1890/08-0186.1](https://doi.org/10.1890/08-0186.1)
- Parisien, M. A., Moritz, M. A., & Batllori, E. (2012). *Maxent modeling for predicting suitable habitat for threatened and endangered tree Canacomyrca monticola in New Caledonia.* Journal of Ecology and Natural Environment, 4(11), 305-314. <https://doi.org/10.5897/JENE12.005>

- Pearson, R. G., Dawson, T. P., Berry, P. M., & Harrison, P. A. (2002). *SPECIES: a spatial evaluation of climate impact on the envelope of species*. *Ecological Modelling*, 154(3), 289-300. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(02\)00056-X](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(02)00056-X)
- Peterson, A. T. (2001). *Predicting species geographic distributions based on ecological niche modeling*. *The Condor*, 103(3), 599-605. <https://doi.org/10.1093/condor/103.3.599>
- Phillips, S. J., & Dudík, M. (2008). *Modeling of species distributions with Maxent: New extensions and a comprehensive evaluation*. *Ecography*, 31(2), 161-175. <https://doi.org/10.1111/j.0906-7590.2008.5203.x>
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). *Maximum entropy modeling of species geographic distributions*. *Ecological Modelling*, 190(3-4), 231-259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
- Portillo, E., & Elvir, R. A. (2016). *Modeling the potential distribution of pine bark beetles in Honduras: Implications for conservation of Pinus oocarpa, a unique pine species in a biodiversity hotspot*. *Forest Ecology and Management*, 361, 304-311.
- Pounds, J. A., Fogden, M. P. L. & Campbell, J. H. (1999). *Biological response to climate change on a tropical mountain*. *Nature*, 398, 611-615. <https://www.nature.com/articles/19297>
- Powers, D. M. W. (2011). *Evaluation: From precision, recall and F-measure to ROC, informedness, markedness and correlation*. *Journal of Machine Learning Technologies*, 2(1), 37-63. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2010.16061>
- Pureswaran, D. S., Roques, A., & Battisti, A. (2018). *Forest insects and climate change*. *Current Forestry Reports*, 4(2), 35–50. [doi: 10.1007/s40725-018-0075-6](https://doi.org/10.1007/s40725-018-0075-6)
- Raffa, K. F., Aukema, B. H., Bentz, B. J., Carroll, A. L., Hicke, J. A., Turner, M. G., & Romme, W. H. (2008). *Cross-scale drivers of natural disturbances prone to anthropogenic amplification: The dynamics of bark beetle eruptions*. *BioScience*, 58(6), 501-517. <https://doi.org/10.1641/B580607>
- Régnière, J. (2009). *Predicción de la distribución continental de insectos a partir de la fisiología de las especies*. *Unasylva*, 60, 37–42. <http://www.fao.org/3/i0670s/i0670s09.pdf>
- Salinas M., Y., Vargas M., C., Zúñiga, G., Victor J., Ager, A., & Hayes, J. L. (2010). *Atlas de distribución geográfica de los descortezadores del género Dendroctonus (Curculionidae: Scolytinae) en México*. México: Instituto Politécnico Nacional - Comisión Nacional Forestal. <https://cepanaf.edomex.gob.mx/sites/cepanaf.edomex.gob.mx/files/files/Monte%20Alto/Articulos%20Cientificos/Atlas%20distribucion%20geograficas%20dendroctonus.pdf>

- Salinas-Moreno, Y., Guadalupe Mendoza, M., Barrios, M. A., Cisneros, R., Macías-Sámamo, J., & Zúñiga, G. (2004). *Areography of the genus Dendroctonus (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) in Mexico*. *Journal of Biogeography*, 31(7), 1163-1177. doi: [10.1111/j.1365-2699.2004.01110.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2004.01110.x)
- Salinas-Moreno, Y., Vargas Mendoza, C. F., Zúñiga, G., Víctor, J., Ager, A., & Hayes, J. L. (2009). *Atlas de Distribución geográfica de los descortezadores del género Dendroctonus (Curculionidae: Scolytinae) en México*. México: Instituto Politécnico Nacional-Comisión Nacional Forestal.: <http://www.conafor.gob.mx/biblioteca/Atlas%20Distribucion%20Descortezador.pdf>
- Six, D. L., & Bracewell, R. R. (2015). *Ecological impacts of southern pine beetle and other bark beetles (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) in US forests*. *Forest Science*, 61(3), 524-539. <https://doi.org/10.5849/forsci.13-171>
- Soberón, J., & Peterson, A. T. (2005). *Interpretation of models of fundamental ecological niches and species' distributional areas*. *Biodiversity informatics*, 2, 1-10. <https://doi.org/10.17161/bi.v2i0.4>
- Sosa D., L., Méndez G., J., García A., M. A., Cambrón S., V., Villarreal Q., J. A., Ruiz G., C., & Montoya J., J. C. (2018). *Distribución potencial de barrenadores, defoliadores, descortezadores y muérdagos en bosques de coníferas de México*. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(47), 187–208. doi: [10.29298/rmcf.v9i47.159](https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i47.159)
- Vié, J. C., Hilton-Taylor, C. & Stuart, S. N. (2009). *Wildlife in a Changing World– An Analysis of the 2008 IUCN Red List of Threatened Species*. Switzerland: IUCN, Gland. <https://portals.iucn.org/library/efiles/documents/rl-2009-001.pdf>
- Wang, H. L., Ye, H., Wang, Z. H., & Wu, J. H. (2010). *The pine shoot beetle, Tomiscus piniperda (L.) (Coleoptera: Scolytidae), in China: A review*. *Forest Ecology and Management*, 259(8), 1455-1465. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.01.017>
- Waring, K. M., Reboletti, D. M., Mork, L. A., Huang, Chin-Hsun, Hofstetter R. W., Garcia, A. M., Fule, P. Z. & Davis, T. S. (2009). *Modeling the impacts of two bark beetle species under warming climate in the southwestern USA: Ecological and economic consequences*. *Environmental Management*, 44(4), 824–835. doi: [10.1007/s00267-009-9342-4](https://doi.org/10.1007/s00267-009-9342-4).
- Zunino, G. E., & Zullini, A. (2003). *The Rapoport effect and the range structure of some South American rodents*. *Ecography*, 26(3), 301-310.
- Zunino, M. & Zullini, A. (2003). *Biogeografía: la dimensión espacial de la evolución*. México: Fondo de Cultura Económica. <https://www.redalyc.org/pdf/402/40270117.pdf>

## IX. ANEXOS

Anexo 1. Resultado del análisis de correlación utilizando el programa R Studio



# Anexo 1. Ilustración de corrida de modelo en el programa Maxent

