



**COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE BOTÁNICA

**MODELADO DE LA DISTRIBUCIÓN ACTUAL Y  
FUTURA DE *Pinus hartwegii* Lindl. BAJO ESCENARIOS  
DE CAMBIO CLIMÁTICO EN MÉXICO**

**KARINA ORTEGA RIVERA**

**T E S I S**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL**

**PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRA EN CIENCIAS**

**MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO**

2021

La presente tesis, titulada: **Modelado de la distribución actual y futura de *Pinus hartwegii* Lindl. bajo escenarios de cambio climático en México**, realizada por la alumna **Karina Ortega Rivera**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS

BOTÁNICA

CONSEJO PARTICULAR



CONSEJERO

Dr. Lauro López Mata



ASESOR

Dra. Monserrat Vázquez Sánchez



ASESOR

Dr. Gustavo Cruz Cárdenas

**Montecillo, Texcoco, Estado de México, julio de 2021**

**MODELADO DE LA DISTRIBUCIÓN ACTUAL Y FUTURA DE *Pinus hartwegii*  
Lindl. BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN MÉXICO.**

Karina Ortega Rivera, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2021.

**RESUMEN**

Los modelos de distribución son herramientas que actualmente se utilizan en disciplinas teóricas y aplicadas para realizar estimaciones sobre la distribución potencial de las especies en diferente tiempo y bajo diversas condiciones ambientales. La distribución actual y futura de *Pinus hartwegii* Lindl. ha sido analizada a mayor detalle a partir de la última década. Los trabajos de investigación concuerdan en que la alteración en la temperatura y la precipitación serán los principales factores que afectarán la distribución de la especie a nivel local o nacional. En la generación de modelos de distribución la implementación de otras variables como las propiedades edáficas, modelos de elevación digital etc., han dado otra perspectiva sobre las propiedades que influyen en la distribución de las especies. Sin embargo, no en todos los estudios han sido tomadas en cuenta. De igual forma, la modelación con otros algoritmos ha sido poco explorada, lo que podría tener limitaciones en las predicciones. El objetivo del presente trabajo fue generar modelos de distribución para conocer los principales factores ambientales que influyen en la distribución de *P. hartwegii* así como sitios potenciales empleando escenarios actuales y futuros mediante la generación de bases de datos, análisis estadísticos a las variables ambientales climáticas, edáficas, de vegetación, elevación, registros de la especie, la implementación de diferentes algoritmos y la técnica de ensamblaje.

**Palabras clave:** Bosques templados, áreas de distribución, suelos, escenarios de cambio climático, ensamblaje, paquete MDE.

**MODELING OF THE CURRENT AND FUTURE DISTRIBUTION OF *Pinus hartwegii* Lindl. UNDER CLIMATE CHANGE SCENARIOS IN MEXICO.**

Karina Ortega Rivera, M.C.  
Colegio de Postgraduados, 2021.

**ABSTRACT**

Distribution models are tools that currently used in theoretical and applied disciplines to make estimates about the potential distribution of species at different times and under different environmental conditions. The current and future distribution of *Pinus hartwegii* Lindl. it has been analyzed in greater detail since the last decade. The research work agrees that the alteration in temperature and precipitation will be the main factors that will affect the distribution of the species at the local or national level. In the generation of distribution models, the implementation of other variables such as soil properties, digital elevation models, etc., have given another perspective on the properties that influence the distribution of species. However, not all studies have been considered. Similarly, modeling with other algorithms has been little explored, which could have limitations in predictions. The objective of this paper was to generate distribution models to know the main environmental factors that influence the distribution of *P. hartwegii* as well potential sites using current and future scenarios through the generation of databases, statistical analysis of the climatic, soil, vegetation, elevation environmental variables, species records, the implementation of different algorithms and the assembly technique.

**Keywords:** Temperate forests, distribution areas, soils, climate change scenarios, assembly, MDE package.

## AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) que me brindó el financiamiento para realizar mis estudios de Maestría en Ciencias.

Al Colegio de Postgraduados, por darme la oportunidad de ser parte de esta gran institución y brindarme nuevos conocimientos así como las facilidades para llevar a cabo mi proyecto de investigación.

A mi consejo particular, Dr. Lauro López Mata, Dra. Monserrat Vázquez Sánchez y Dr. Gustavo Cruz Cárdenas, quienes me brindaron la oportunidad y el apoyo en la realización de este proyecto de investigación, por la paciencia, los regaños y las valiosas aportaciones que me dieron.

A los ejidatarios del Monte Tláloc, por las facilidades otorgadas, el apoyo y la orientación que nos brindaron en algunas actividades durante las salidas a campo.

A mis compañeros de generación, Viole, Leo, Chris, Ceci, Oli y Xochitl, por la calidez, compañerismo, solidaridad y todos los momentos compartidos desde el primer día, sin duda alguna fuimos una gran generación a pesar de las vicisitudes que nos tocaron vivir.

A mi equipo de la UAM Lerma, Dr. Noe Flores Hernández, Dr. Heliot Zarza y Dr. Cuauhtémoc Chávez, por la ayuda, el entusiasmo, las ideas y motivación en esta etapa.

*Gracias, totales...*

## DEDICATORIA

A mis abuelitos †, Josefina Fonseca y José Isabel Ortega Martínez “Chabelo”: Abues, llegué a la meta, este logro es para ustedes... sé que algún día nos volveremos a encontrar.

Siéntanse orgullosos de su muchachita. Los llevaré en el corazón el resto de mi vida.

A mis papás, Tere Rivera y José Ortega y mis hermanos, Charly y Dany, por su amor incondicional y apoyarme desde el inicio en esta nueva aventura, por aguantar mis locuras, confiar en mí y sobre todo, motivarme a no desistir...

A mi abue Feli, a mis tíos, Toña, Paty, Lucy, Ady, Alex, José, Ernesto y Oswaldo a mis primos, Richy, Karla, Jorge, Yuz, Felipe, James, Dulce, Pao y Gustavo por la motivación, el ánimo y el apoyo en los momentos difíciles.

A mi mejor amiga Itzel Ayllón, por apoyarme y motivarme en mis sueños y locuras, por estar conmigo a pesar de la distancia, en las buenas y en las peores.

A mi familia texcocana, Viole Ruíz, Rodrigo González y mi adorado Sabino, por adoptarme cuando recién llegue, por todo el cariño y amistad que me han brindado, siempre estarán en mi corazón, bebés.

A mi Pepe grillo y compañero de engordación, Leo Hurtado, gracias por tu apoyo, por compartir tus conocimientos, por las risas, el bullying y tu cariño.

A las personas que fueron parte de mi vida durante todo este camino, Chris, Migue, Oli, Elideth, Celeste, Elsa, Valentina, Albert, Diego, Isaías, Joel, Xochilt, Abraham, Ada y Jair, por las vivencias, las risas, las lágrimas, el cariño, el apoyo y su amistad.

Al laboratorio de génesis de suelos, Miriam, Patrick, Moy, Arturo, Paco, Sandy, Carmina, Don Lino y Don Peter, por su cariño y amistad incondicional, tienen un pedazo de mi corazón.

*Los quiero siempre, Kari.*

## CONTENIDO

<b>RESUMEN .....</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>iv</b>
<b>LISTA DE CUADROS.....</b>	<b>ix</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>x</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>REVISIÓN DE LITERATURA .....</b>	<b>4</b>
<b>Nicho ecológico y modelos de distribución .....</b>	<b>4</b>
<b>Consideraciones en la realización de los MDE.....</b>	<b>6</b>
<b>Especie de estudio: <i>P. hartwegii</i> .....</b>	<b>10</b>
<b>Importancia ecológica y estado de conservación.....</b>	<b>11</b>
<b>Modelos de distribución para <i>P. hartwegii</i> .....</b>	<b>12</b>
<b>LITERATURA CITADA.....</b>	<b>14</b>
<b>CAPÍTULO I: DISTRIBUCIÓN ACTUAL Y BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO DE <i>Pinus hartwegii</i> Lindl. ....</b>	<b>20</b>
<b>1.1 RESUMEN.....</b>	<b>20</b>
<b>1.2 ABSTRACT.....</b>	<b>21</b>
<b>1.3 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>23</b>
<b>1.4 MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>25</b>
<b>Área de estudio.....</b>	<b>25</b>

Datos de presencia.....	27
Covariables ambientales actuales y futuras.....	28
Selección de predictores ambientales.....	29
Técnicas de modelación .....	30
Método bootstrap .....	30
Ensamblaje de predictores.....	31
Definición de áreas potenciales.....	31
<b>1.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>31</b>
<b>1.6 CONCLUSIONES.....</b>	<b>37</b>
<b>1.7 LITERATURA CITADA .....</b>	<b>40</b>
<b>CONCLUSIONES GENERALES.....</b>	<b>47</b>
<b>APÉNDICES .....</b>	<b>49</b>

## LISTA DE CUADROS

### CAPÍTULO I: DISTRIBUCIÓN ACTUAL Y BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO DE *Pinus hartwegii* Lindl.

<b>Cuadro I:</b> Variables ambientales de condiciones actuales para modelos de distribución de <i>P. hartwegii</i> .....	<b>49</b>
<b>Cuadro II:</b> Proporción de contribución y varianza acumulada por cada PCA .....	<b>51</b>
<b>Cuadro III:</b> Porcentajes de aportación de las variables ambientales con mayor contribución al modelo actual .....	<b>32</b>
<b>Cuadro IV:</b> Porcentajes de las variables ambientales con mayor contribución al modelo .....	<b>33</b>

## LISTA DE FIGURAS

### INTRODUCCIÓN GENERAL

**Figura 1:** Diagrama BAM ..... 9

### CAPÍTULO I: DISTRIBUCIÓN ACTUAL Y BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO DE *Pinus hartwegii* Lindl.

**Figura 1:** Provincias fisiográficas de México con proyección de los 2034 registros de *P. hartwegii* recopilados en las bases de datos..... 26

**Figura 2:** Registros obtenidos después de la prueba de autocorrelación empleados para generar los mapas de distribución potencial presente y futura ..... 28

**Figura 3:** Distribución potencial actual de *P. hartwegii* en México..... 35

**Figura 4:** Distribución potencial futura de *P. hartwegii* en México con RCPs 4.5 y 8.5 con periodo de tiempo de 2015-2039 y 2075-2099 ..... 36

## INTRODUCCIÓN GENERAL

En las últimas décadas, el desarrollo e implementación de herramientas para evaluar los cambios en la distribución de especies en determinado tiempo y espacio ha ido en aumento. Los modelos de nicho ecológico (MNE) y los modelos de distribución de especies (MDE), son métodos que permiten analizar y estimar los cambios en la distribución de especies empleando información climática, registros geográficos de la especie de estudio y de técnicas de modelación que emplean métodos estadísticos de clasificación, ensamblaje o con algoritmos específicos se generan predicciones sobre sitios que cumplen con las características ambientales idóneas para que las especies puedan cumplir sus ciclos de vida (Araujo y Guisan, 2006; Franklin, 2010; Soberon, Olvera y Peterson, 2017).

Recientemente se ha evaluado el efecto del cambio climático en muchas especies de mamíferos, aves, insectos así como diversos tipos vegetación y su flora. Los bosques de coníferas son uno de los tipos de vegetación que están en mayor riesgo, tanto por el cambio climático como por actividades antropogénicas como el pastoreo, la extracción de madera o musgo o los incendios forestales (Iglesias y Tivo 2006; Galicia et al., 2016; Varo-Rodríguez, 2018).

Derivado de estas acciones, hay especies que se ven aún más amenazadas como es el caso de *Pinus maximartinezii* Rzed, *P. culminicola* Andresen y Beaman, *P. greggii* Engelm. ex Parl. o *P. hartwegii* Lindl. de estas se ha reportado una reducción en sus poblaciones ya sea por el cambio en el uso de suelo, la extracción de semillas o los efectos del cambio climático (Ramírez-Herrera, Vargas-Hernández y López-Upton, 2005; Endara-Agramont et al., 2012; López-Mata, 2013; Manzanilla-Quiñones et al., 2019).

En especies como *P. hartwegii* se han realizado estudios para medir el impacto que el cambio climático tendrá sobre sus poblaciones, en la mayoría de las investigaciones se ha concluido que la especie es de las más amenazadas por el aumento en la temperatura y tenderá a reducir su tamaño poblacional tanto a nivel local como nacional (Arriaga y Gómez, 2004; Cruz-Cárdenas et al., 2016; Aceves-Rangel et al., 2018; Manzanilla-Quiñones et al., 2019; Alfaro-Ramírez et al., 2020).

Cabe mencionar que *P. hartwegii* es una especie de pino que se distribuye en el límite altitudinal arbóreo, se desarrolla en climas templados y tiene la capacidad de sobrevivir a temperaturas muy bajas de hasta -20 °C. La conformación arbórea de esta especie es importante pues de ellos se obtienen servicios ecosistémicos, como la captura de CO<sub>2</sub>, la retención de agua, el manejo de recursos no maderables como tierra negra, hongos comestibles, etc., así como actividades de recreación y resguardo de biodiversidad (Eguiluz, 1978; Musálem y Solís 2000; Ruíz-Pérez, Fernández y Sayer, 2007; Varo-Rodríguez, 2018). De acuerdo con la NOM-059 de SEMARNAT (2010) para que una especie sea catalogada en alguna categoría de riesgo la especie debe concentrarse en un ecosistema con gran diversidad o especies endémicas o en peligro, que sean necesarias para especies migratorias o bien, tener alguna importancia social, económica, cultural, científica o ser de importancia para llevar a cabo procesos biológicos. *P. hartwegii* actualmente no se encuentra bajo alguna categoría de riesgo tanto en la NOM-059 (SEMARNAT, 2010) como en la lista roja de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN 2021). Sin embargo, dado los usos que se le dan a la especie y las funciones que cumple en el ecosistema no deja de ser una especie con gran importancia ecológica y económica (Varo-Rodríguez, 2018; Tejeda-Landero et al., 2019).

Por lo anterior, generar estudios donde se analice el impacto del cambio climático con variables ambientales específicas permitirá identificar los factores principales que influyen en la distribución de la especie tanto en el presente como a futuro. Esta tesis tuvo como objetivo generar modelos de distribución potencial actual y futura de *P. hartwegii* para contribuir al conocimiento de los factores ambientales (clima, suelo, vegetación) que están contribuyendo en la distribución de la especie con datos exclusivamente para México.

## **HIPÓTESIS Y OBJETIVOS**

### **Hipótesis**

Dada la situación climática global actual donde se espera un aumento en la temperatura y la alteración en los patrones de precipitación, se estima que muchas especies de flora modificarán sus patrones de distribución.

El cambio climático impactará los bosques de *P. hartwegii* reduciendo su rango y extensión geográfica de distribución actual. Tanto la pérdida de hábitats, como la reducción de sus poblaciones y el incremento en su aislamiento podrían amenazar su viabilidad poblacional.

### **Objetivo general**

Analizar la dinámica de distribución potencial actual y futura de *P. hartwegii* con cambio climático a través de escenarios con diferentes concentraciones y periodos de tiempo.

### **Objetivos específicos**

- 1) Determinar áreas geográficas idóneas para la distribución de *P. hartwegii*.
- 2) Identificar los factores ambientales que intervienen en la dinámica de distribución bajo escenarios de cambio climático.

## REVISIÓN DE LITERATURA

### Nicho Ecológico y Modelos de Distribución

En 1917, Joseph Grinnell propuso que el “nicho” de los organismos se basaba en las condiciones ambientales pues estas limitaban su distribución. Años más tarde, Charles Elton propuso otra definición, tomó en cuenta el impacto de las especies sobre otras, y enfatizó que no solo importaba el área donde se encontraban las especies, también el papel que cada una de estas juega dentro del ecosistema es clave.

Sin embargo, fue hasta 1957 cuando George E. Hutchinson evaluó estas ideas y reconoció que ambas eran válidas y uniéndolas conformaban una dimensión del nicho que las especies utilizarían para subsistir dependiendo de sus requerimientos, concluyendo que el nicho es el espacio ecológico y geográfico donde las especies pueden existir.

El nicho ecológico se describe como “el hipervolumen de n-dimensiones”, las n dimensiones corresponden a los factores bióticos y abióticos con los que cualquier organismo se relaciona en un tiempo y espacio determinado (Peterson et al., 2001; Illoldi-Rangel y Escalante, 2008).

Partiendo del concepto de nicho se desglosan otros conceptos:

1) Nicho fundamental: Se refiere al área donde se pueden encontrar las condiciones ambientales (temperatura, precipitación, etc.) para que la especie pueda llevar a cabo su ciclo de vida (área invadible). Se estima a través de la reconstrucción de datos, tomando en cuenta la presencia de la especie, así como datos climáticos, topográficos, edáficos y ecológicos.

2) Nicho realizado: Es el sitio con las condiciones bióticas, abióticas y registros históricos de la especie, es decir, el “área ocupada” donde la especie puede ser observada o

recolectada (Soberón y Peterson, 2005; Soberón y Miller, 2009; Helaouët y Beaugrand, 2009; Soberón, Osorio-Olvera y Peterson, 2017).

Los primeros modelos de nicho ecológico (MNE) se realizaron en la década de los 70's, se basaban en modelos teóricos y buscaban asociar la distribución espacial de las especies con su nicho. En la década de los 80's comenzaron a generarse los primeros modelos globales donde se predecía la distribución de especies hasta ecosistemas. Años más tarde se desarrollaron los primeros modelos estadísticos (p. ej. BIOCLIM) que analizaban las relaciones entre especies y ambiente (Plissock y Fuentes-Castillo, 2011).

#### Modelos de distribución de especies

El avance tecnológico que se vio en la década de los 90's dio pauta a que se desarrollaran más herramientas que permitieran analizar la distribución espacial tanto de las especies como de los ecosistemas empleando diferentes métodos (Plissock y Fuentes-Castillo, 2011).

Los modelos de distribución de especies (MDE) se basan en el fundamento teórico del nicho ecológico, son modelos empíricos que emplean registros del taxón y variables ambientales. Los registros de las especies pueden ser solo de presencias, presencia-ausencia u observaciones de abundancia en campo (Guisan y Thuiller, 2005).

Los MDE son representaciones geográfico-ecológicas de espacios con características idóneas para que las especies puedan estar presentes. Son herramientas útiles que ayudan a comprender los cambios evolutivos de las especies y predecir la dinámica que estas podrían tener a futuro (Plissock y Fuentes-Castillo, 2011; Mateo, Felicísimo y Muñoz, 2011).

La diferencia entre los MNE y los MDE esta en que los primeros buscan la relación entre las condiciones abióticas y bióticas asociadas a las especies, mientras que los MDE buscan sitios potenciales en el espacio geográfico con las condiciones abióticas necesarias para la especie

pero fuera de las regiones colonizables (Peterson, 2006; Illoldi-Rangel y Escalante, 2008; Peterson y Soberon, 2012; Soberon et al., 2017).

Soberón y Peterson (2005) plantean cuatro factores que determinan la presencia de especies en un área:

- Condiciones abióticas, como el clima, el entorno físico, edáfico, los cuales limitarán fisiológicamente la capacidad de sobrevivencia de la especie.
- Factores bióticos, determinados por las interacciones de las especies y su entorno, dependiendo del tipo de interacción se verá afectada o beneficiada su distribución.
- Facilidad de dispersión y capacidad de colonización, factor clave para distinguir la distribución real de la potencial en la especie.
- Evolución de la especie, está en función de la capacidad de la especie para adaptarse a nuevas condiciones.

### **Consideraciones en la realización de los MDE**

Como se mencionó anteriormente, el desarrollo e implementación de nuevos métodos y técnicas para generar MDE's de manera más eficiente y en menor tiempo ha permitido generar predicciones más certeras. Guisan y Thuiller (2006), proponen seis pasos para la construcción de MDE:

1) Conceptualización, a su vez se divide en dos fases: *teoría* y *datos* (definir los objetivos, hipótesis, recopilación de información e identificar los sesgos que puede llegar a haber).

La segunda fase consiste en los *métodos de modelado*, es decir, identificar la mejor técnica para la elaboración de los MDE.

- 2) Preparación de datos.
- 3) Ajuste del modelo.
- 4) Evaluación del modelo,
- 5) Predicciones espaciales
- 6) Evaluación de aplicabilidad del modelo.

#### Técnicas de modelación

Otro aspecto importante para considerar son los métodos estadísticos, a continuación se enlistan algunas de las técnicas comúnmente utilizadas en la realización de los MDE.

a) Modelos estadísticos de regresión (Modelos Lineales Generalizados (GLM) y Modelos Aditivos Generalizados (GAM)), describen la relación entre las variables descriptivas y la presencia de las especies de manera estadística, son los más utilizados debido a la calidad en los modelos finales.

b) Métodos de clasificación (Random Forest (RF), Boosted regresión trees (BRT)), emplean una serie de reglas para clasificar las variables predictivas en clases y con ello generar los MDE. Pese a que los resultados son muy buenos por el método de clasificación que emplean su interpretación se vuelve muy compleja.

c) Métodos de “sobre” (BIOCLIM, ENFA) se basan en la combinación de rangos mínimos y máximos entre las variables y un espacio geográfico determinado. Esta técnica fue de las primeras en utilizarse y actualmente es de las que menos se ocupan por los sesgos de información que puede llegar a generar.

d) Métodos basados en algoritmos específicos (GARP, MaxEnt), esta técnica es de las más usadas actualmente por su practicidad y fácil interpretación de los resultados, en el caso

específico de MaxEnt, emplea un algoritmo de máxima entropía el cual genera modelos robustos aunque se tengan pocos registros de la especie.

e) Ensamblaje: También conocido como método de ensamble o combinados, es un método relativamente reciente que genera predicciones con menos deficiencias en las predicciones que los algoritmos por sí solos podrían generar, esto a través del cálculo y sumatoria de promedios de cada algoritmo. El ensamblaje emplea métodos de aprendizaje estadístico: regresión, clasificación y árboles de decisión (Franklin, 2010; Gil Martínez, 2018).

#### Selección de predictores ambientales

En estudios recientes, la implementación del análisis de componentes principales (PCA) en las variables ambientales se ha empleado como uno de los criterios para la generación de MDE, pues este método permite reducir el número de variables ambientales agrupándolas en componentes, lo que ayuda a emplear únicamente aquellos PCA con mayor contribución en la distribución de las especies (Cruz-Cárdenas et al., 2014; Aceves-Rangel et al., 2018; Alfaro-Ramírez et al., 2020).

#### Selección del espacio geográfico

Para evitar la extrapolación en las predicciones se ha recomendado delimitar los MNE y los MDE a sitios geográficos donde la especie ha sido registrada o aquellas que cumplen con las características bióticas y abióticas para que la especie pueda distribuirse (Cruz-Cárdenas et al., 2014).

Soberón et al., (2017), a través del diagrama BAM definieron al espacio geográfico (G) como una representación idealizada donde se van a localizar zonas con altas probabilidades de presencia de las especies y va a estar compuesto por distintas variables (figura 1).

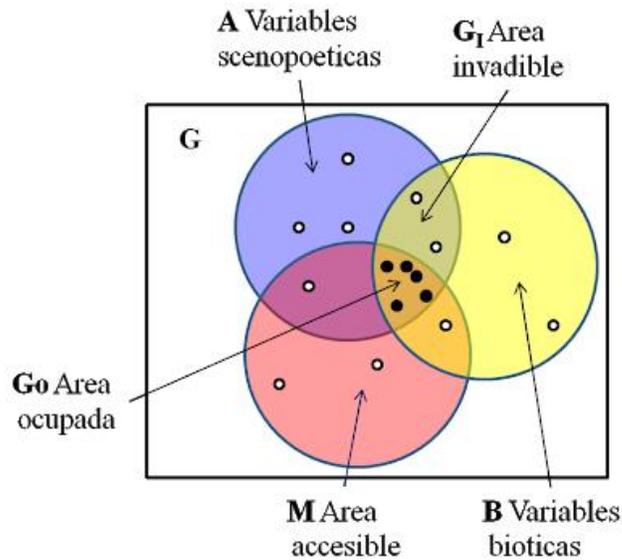


Figura 1: Diagrama BAM (Navarrete-Macedo, 2019)

La zona donde pueden encontrarse las condiciones ambientales (factores abióticos) que permitirán la sobrevivencia y reproducción de la especie se denominan por la letra A. La región B es el espacio donde la especie encontrará las condiciones bióticas. Al conjunto de sitios donde la especie ha sido registrada (origen, introducción a un nuevo sitio) lleva la literal M.

Las variables antes mencionadas darán lugar a dos importantes regiones, el área ocupada (G0) y el área invadible (G1). En el área de ocupación (G0), se intersectan las variables bióticas y abióticas que favorecen a la especie, en esta zona la especie puede ser recolectada. El área invadible (G1) es donde se encuentran las condiciones favorables, no obstante, la especie se ha mantenido fuera de ella debido a su capacidad de dispersión (Soberón et al., 2017).

Umbral de corte

A través de este parámetro se puede discernir los sitios con mayores probabilidades de encontrar a la especie de aquellos que no. Araujo y Guisan (2006) establecieron una

clasificación para evaluar las predicciones de los algoritmos a través del valor de AUC, valores  $\leq 0.80$  serían predicciones poco confiables, valores de 0.80 a 0.90 serían confiables y valores  $\geq 0.90$  sería predicciones muy confiables.

Pearson et al., (2007) mencionan que es importante generar estos valores limitantes para evitar extrapolación en las predicciones, este criterio también aplica a modelos generados con registros limitados.

Especie de estudio: *P. hartwegii* Lindl.

El pino de alta montaña, *P. hartwegii* Lindl. es un árbol de tronco recto de hasta 25-30 m de alto y diámetro a la altura del pecho (DAP) de hasta 80-100 cm. Es monopódico, libre de ramas hasta los 2/3 de su altura pero puede retener las bases de las ramas viejas. Tiene corteza gruesa, escamosa, profundamente fisurada, dividida en pequeñas a grandes placas cuadradas o irregulares; corteza externa café oscura a grisácea. Forma rodales monoespecíficos a los cuales se asocian pastizales de *Muhlenbergia macroura* (Kunth) Hitchc. y *Festuca toluensis* Kunth. Frecuentemente se encuentra atacada por plantas hemiparásitas de los géneros *Phoradendron* y *Arceuthobium*, y por descortezadores del género *Dendroctonus* (Musálem y Solís, 2000; González-Medind et al., 2010; Martínez-Salvador et al., 2015). El régimen de fuegos en los bosques de *P. hartwegii* se caracteriza por incendios frecuentes de baja intensidad. Rodríguez-Trejo (2001) menciona que, bajo la influencia de incendios superficiales y frecuentes, la dinámica de la regeneración se produce mediante el rebrote de árboles dañados. La dispersión de sus semillas es anemócora, y después de su germinación, el establecimiento de sus plántulas es exitosa en zonas y áreas sometidas a incendios superficiales. Se establece en los límites altitudinales arbóreos de México y Centroamérica.

En México, este tipo de pinares se localiza en estados como Coahuila, Chiapas, Chihuahua (Cerro Mohinora), Ciudad de México, Durango, Estado de México, Guerrero (Cerro Teotepec), Hidalgo, Jalisco (Nevado de Colima), Michoacán, Morelos, Nuevo León, Oaxaca, Puebla, Tamaulipas, Tlaxcala, Veracruz (Farjón y Styles, 1997; Eguiluz, 1978). Villaseñor en 2016 reportó que *P. hartwegii* también se distribuye en estados como Aguascalientes, Chihuahua, Durango, Guanajuato, Nayarit, San Luis Potosí y Zacatecas.

Este pino está adaptado a temperaturas bajas extremas, donde el clima es templado, subhúmedo, con lluvias deficientes en invierno. La precipitación oscila entre los 700 y 1800 mm, siendo junio y julio los meses más lluviosos y marzo el más seco. La temperatura media de este tipo de bosques es de 12°C, con temperaturas máximas de 38°C y mínimas de -20°C en los picos más altos durante el invierno.

Los suelos donde se desarrolla son ricos en materia orgánica, con pH ligeramente ácidos a neutros (de 5.2 a 6.9), texturas migajón-arenosas, y presencia de elementos químicos como el magnesio (Mg), calcio (Ca), potasio (K), nitrógeno (N) y fósforo (P) (Eguiluz, 1978; Perry, 1991; Farjón, 1996; Farjón y Styles, 1997; Musálem y Solís, 2000), clasificándose como andosoles; Estas características son de importancia en este tipo de bosques ya que determinan la capacidad de almacenamiento de carbono en el suelo (Galicia et al., 2016).

#### Importancia ecológica y estado de conservación

Los bosques de *P. hartwegii* proporcionan diversos servicios ecosistémicos, como regulación del ciclo hidrológico, culturales, al ser lugares de recreación, de provisión, ya que sus semillas son aprovechadas como alimento, y son uno de los principales sumideros de CO<sub>2</sub>. Cabe mencionar que su madera es utilizada para la fabricación de papel, celulosa, postes,

entre otros, lo que hace que esta especie se vuelva importante para la economía local (Musálem y Solís, 2000; Pérez et al., 2007; Hunter y Gibbs, 2007; Varo-Rodríguez, 2018; Tejeda-Landero et al., 2019; INECC, 2020).

Actualmente, la especie no se encuentra bajo algún estatus de conservación tanto a nivel nacional como internacional (SEMARNAT, 2010; IUCN, 2021), la mayoría de los sitios donde se distribuye están catalogados como Áreas de Protección de Flora y Fauna o Parques Nacionales. Sin embargo, esto no garantiza que la especie este exenta del manejo forestal u otros aprovechamientos en las comunidades donde se le encuentra (Varo-Ramírez, 2018; Tejeda-Landero et al., 2019).

Es bien sabido que *P. hartwegii* ha tolerado cambios ambientales a lo largo de su historia evolutiva. Sin embargo, es probable que el cambio constante en las temperaturas globales afecten la capacidad adaptativa y la agilidad de la especie para poder migrar a sitios con condiciones similares a las que se distribuye (Alfaro-Ramírez et al., 2020).

#### Modelos de distribución para *P. hartwegii*

Desde principios del siglo, se han realizado estudios para evaluar el efecto del cambio climático en especies de importancia ecológica o económica. Arriaga y Gómez (2004) encontraron que los bosques de coníferas y encinos son los tipos de vegetación más vulnerables al cambio climático, siendo los géneros *Pinus* y *Quercus* los más afectados. Los autores mencionan que las especies que sufrirán grandes pérdidas en sus áreas de distribución serían aquellas localizadas en climas fríos o semifríos y húmedos o subhúmedos, como es el caso de *P. hartwegii*, a quien le estimaron una reducción en su área de distribución del 41.5%.

Casi una década después, García-Martínez (2013) analizó la dinámica del bosque de *P. hartwegii* en el Nevado de Toluca a través de imágenes satelitales y muestreos en campo, concluyendo que ha habido un incremento en las temperaturas, no obstante, la especie ha generado adaptaciones a estos cambios.

Un año más tarde, Gutiérrez y Trejo (2014) estudiaron el efecto del cambio climático en un periodo de tiempo de 1950 al año 2000 en cinco especies arbóreas de los bosques templados en México: *P. ayacahuite* C. Ehrenb. ex Schltld., *P. hartwegii*, *Abies hickelii* Flous y Gaussen, *Quercus laurina* Bonpl. y *Q. ocoteifolia* Liebm, siendo *P. hartwegii* la especie con una reducción del 80% en su área de distribución.

A nivel local, Cruz-Cárdenas et al., (2016) evaluaron el impacto del cambio climático en la distribución potencial de 12 especies de la familia Pinaceae en Michoacán, tanto en la actualidad como a futuro. Encontraron que el incremento en la temperatura ocasionará disminución de las áreas de distribución idónea de más del 60% en especies como *P. hartwegii*, *P. leiophylla* Schiede ex Schltld. & Cham., *P. michoacana* Martínez y *P. teocote* Schltld. & Cham. Asimismo, los autores prevén que especies de distribuciones bajas comenzarán a ascender, ocasionando un desplazamiento en las especies con distribuciones por arriba de los 3500 msnm.

En años recientes y dado el incremento de los efectos del cambio climático, se ha tomado a *P. hartwegii* como objeto de estudio para analizar la distribución de la especie y los efectos que podría tener por los efectos del cambio climático. Aceves-Rangel et al., (2018), analizaron la distribución potencial de 20 especies de pino para todo México, encontrando que la distribución de muchas especies dependerá de la temperatura, para el caso específico de *P. hartwegii*, variables como la temperatura media del trimestre más caliente (BIO 10), la precipitación anual (BIO 12) y la altitud son las que más influirán en su distribución.

Reportaron que los estados con las condiciones idóneas para que la especie se distribuya son el Estado de México, Puebla y Ciudad de México.

Posteriormente Manzanilla-Quñones et al., 2019, analizaron la distribución actual y futura de *P. hartwegii* en la Faja Volcánica Transmexicana, los autores encontraron que las variables ambientales importantes para el escenario actual fueron la BIO1 (temperatura media anual), la BIO18 (precipitación del trimestre más cálido), la BIO12 (precipitación anual), el suelo y la vegetación, mientras que para el futuro las variables de importancia fueron la BIO1 (temperatura media anual), el suelo, la BIO19 (precipitación del trimestre más frío), la pendiente y la vegetación. En ambos escenarios, el incremento en la temperatura provocaría una reducción en el área de distribución de *P. hartwegii* desde un 11.7% hasta un 18.3%. Dentro de las zonas más afectadas a futuro destacan el Nevado de Toluca y el Pico de Orizaba. Sin embargo, en los MDE se muestra que el Parque Nacional Izta-Popo presentaría un aumento en la distribución de hasta un 37.4%.

Recientemente Alfaro-Ramírez et al. 2020, estudiaron la reducción de *P. hartwegii* con escenarios de cambio climático a futuro, así como la amplitud de nicho que la especie pueda tener. Todos los escenarios que emplearon mostraron reducción de la población de *P. hartwegii* siendo la variable de precipitación del trimestre más frío (BIO19) la principal limitante para la distribución de la especie. El modelo para el año 2050 con escenario optimista mostró una reducción parcial del área de distribución equivalente al 29.3%, mientras que en el escenario pesimista arrojó una reducción equivalente al 39.8%. Los modelos para el año 2070 mostraron mayor reducción, en el escenario optimista se ve una reducción del 42.5%, mientras que en el escenario drástico se observó una reducción del 68.8%.

Por lo anterior, los estudios que se generen para conocer los efectos del cambio climático sobre *P. hartwegii* son trascendentales, más aún si se toman en cuenta las condiciones ambientales específicas en las que se desarrolla la especie.

## LITERATURA CITADA

- Aceves-Rangel L. D, Méndez-González J, García-Aranda M.A. & Nájera-Luna, J. A. (2018). Distribución potencial de 20 especies de pinos en México. *Agrociencia*, 52, 1043-1057.
- Alfaro-Ramírez, F. U., Ramírez-Albores, J. E., Vargas-Hernández, J. J., Franco-Maass, S. & Pérez-Suárez, M. (2020). Potential reduction of Hartweg's Pine (*Pinus hartwegii* Lindl.) geographic distribution. *PLoS ONE*, 15(2), 1-18 DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0229178>
- Araujo, M. B. & Guisan, A. (2006). Five (or so) challenges for species distribution modelling. *Journal of biogeography*, 33(10), 1677-1688. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2006.01584.x>
- Arriaga, L. & Gómez, L. (2004). Posibles efectos del cambio climático en algunos componentes de la biodiversidad de México. En *Cambio climático: una visión desde México*. Ciudad de México. Instituto Nacional de Ecología, (pp. 253-263). ISBN: 968-817-704-0.
- Cruz-Cárdenas, G., López-Mata, L., Villaseñor, J. L. & Ortiz, E. (2014). Potential species distribution modeling and the use of principal component analysis as predictor variables. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85(1), 189-199. DOI: <https://doi.org/10.7550/rmb.36723>
- Cruz-Cárdenas, G., López-Mata, L., Silva, J. T., Bernal-Santana, N., Estrada-Godoy, F. & López-Sandoval, J. A. (2016). Potential distribution model of Pinaceae species under climate change scenarios in Michoacán. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 22(2), 135-148. DOI: <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2015.06.027>
- Eguiluz, T. (1978). Ensayo de integración de los conocimientos sobre el género *Pinus* en México. Tesis profesional para recibir el grado de Ing. Agrónomo especialista en Bosques. Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Bosques.
- Elton, S. Charles. (1927). *Animal Ecology*. Michigan University: Macmillan Company.

- Endara-Agramont, A. R., Franco-Maass, S., Nava Bernal, G., Valdez-Hernández, J. I. & Fredericksen, T. S. Effect of human disturbance on the structure and regeneration of forest in the Nevado de Toluca National Park, Mexico. (2012). *Journal of Forestry Research*, 23(1), 39-44. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11676-012-0226-8>
- Farjon, A. (1996). Biodiversity of *Pinus* (Pinaceae) in México: speciation and palaeoendemism. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 121, 365-384. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1095-8339.1996.tb00762.x>
- Farjón, A. & Styles, B.T., (1997). Flora Neotropica Monograph 75. *Pinus* (Pinaceae). New York. The New York Botanical Garden. ISBN: 0-89327-411-9
- Franklin, J. (2010). Mapeo de distribuciones de especies: inferencia espacial y predicción. Prensa de la Universidad de Cambridge. ISBN: 13 978-0-511-77006-7
- García-Martínez, M. F. (2013). Patrones de distribución de *Pinus hartwegii*, como posible estrategia de adaptación al cambio climático en el Parque Nacional Nevado de Toluca. Tesis para obtener el grado de Lic. En Geografía. Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Geografía.
- Galicia, L., Gamboa Cáceres, A. M, Cram, S., Chávez Vergara, B., Peña Ramírez, V., Saynes, V. & Siebe, C. (2016). Almacén y dinámica del carbono orgánico del suelo en bosques templados de México. *Terra Latinoamericana*, 34, 1–29.
- González-Medina, R. E., Equihua Martínez, A., Mendoza Briseño, M. A. & Cibrián Tovar, D. (2010). Relaciones entre descortezadores (COLEÓPTERA: SCOLYTIDAE) y vitalidad en bosques de *Pinus hartwegii* Lindl. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 1(2), 121-133.
- Guisan, A. & Thuiller W. (2005) Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters*, 8, 993-1009. DOI: <http://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00792.x>
- Guitérrez, E. & Trejo, I. (2014) Efecto del cambio climático en la distribución potencial de cinco especies arbóreas de bosque templado en México, *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85(1), 179–188. DOI: <https://doi.org/10.7550/rmb.37737>
- Grinnell J, (1917). The niche-relationships of the California Thrasher. *The Auk*, 34, 427–433. DOI: <https://doi.org/10.2307/4072271>
- Gil Martínez, C. (2018). Árboles de decisión y métodos de ensamble. RPubS.com. Recuperado el 01 de febrero de 2021, de [https://rpubs.com/Cristina\\_Gil/arboles\\_ensemble](https://rpubs.com/Cristina_Gil/arboles_ensemble)
- Helaouët, P. & Beaugrand, G. (2009). Physiology, ecological niches and species distribution. *Ecosystems*, 12(8), 1235-1245. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10021-009-9261-5>

- Hunter, M.L., Gibbs, J.P. (2007). *Fundamentals of Conservation Biology*, 3th ed. Blackwell Science, Inc. ISBN: 13:978-1-4051-3545-0
- Hutchinson, GE. (1957). Concluding remarks. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*, 22, 415- 422. DOI: <http://dx.doi.org/10.1101/SQB.1957.022.01.039>
- Iloldi-Rangel, P. & Escalante, T. (2008). De los modelos de nicho ecológico a las áreas de distribución geográfica. *Biogeografía*, 3, 7-12.
- Iglesias Andreu, L. G. & Tivo Fernández, Y. (2006). Caracterización morfométrica de la población de *Pinus hartwegii* Lindl. del Cofre de Perote, Veracruz, México. *Ra Ximhai: revista científica de sociedad, cultura y desarrollo sostenible*, 2(2), 449-468. DOI: <http://doi.org/10.35197/rx.02.02.2006.08.li>
- IUCN (The International Union for Conservation of Nature). (2021). The IUCN *Red List of Threatened Species*, version 2021-1. Recuperado el 04 de junio de 2021, de <https://www.iucnredlist.org/>
- INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). (2020). Unidad 1: Conceptos básicos sobre mitigación del cambio climático. En *Mitigación del Cambio Climático, cuaderno de trabajo para los participantes* (pp. 8-34). Ciudad de México.
- López-Mata, L. (2013). The impact of seed extraction on the population dynamics of *Pinus maximartinezii*. *Acta oecologica*, 49, 39-44. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actao.2013.02.010>
- Manzanilla-Quñones, U., Aguirre-Calderón, O. A., Jiménez-Pérez, J., Treviño-Garza, E. J. & Yerena-Yamallel, J. I. (2019). Distribución actual y futura del bosque subalpino de *Pinus hartwegii* Lindl en el Eje Neovolcánico Transversal. *Madera y Bosques*, 25, 1-16. DOI: <http://doi.org/10.21829/myb.2019.2521804>
- Mateo, R. G., Felicísimo, A. M. & Muñoz, J. (2011). Modelos de distribución de especies: Una revisión sintética. *Revista Chilena de Historia Natural*, 84, 217-240. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0716-078X2011000200008>
- Martínez-Salvador, M., Huendo, S. M., Collazo, I. V., Bautista, E. V., Nieto, C. R. M. & Guerrero, F. V. (2015). Efecto de *Arceuthobium vaginatum* (Willd.) Presl. subsp. *vaginatum* en *Pinus hartwegii* Lindl. en Colima. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 6(29), 44-55. DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v6i29.215>
- Musálem, M. A. & Solís, M. A. (2000). Monografía de *Pinus hartwegii*. SAGAR.INIFAP.CIRCE Campo Experimental Valle de México. Libro Técnico No. 3, Chapingo, Estado de México. (pp 96). ISBN: 968-800-482-0
- Navarrete-Macedo, C. E. (2019). Distribución potencial de especies forestales amenazadas y endémicas raras mediante modelos de nicho ecológico. Tesis para recibir el grado de

Ingeniero Forestal. Universidad Nacional Agraria La Molina, Facultad de Ciencias Forestales.

Pearson, R. G., Raxworthy, C. J., Nakamura, M. & Townsend Peterson, A. (2007). Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar. *Journal of biogeography*, 34(1), 102-117. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2006.01594.x>

Perry Jr, J. P. (1991). The pines of Mexico and central America. Timber Press, Inc. ISBN: 0-88192-174-2

Peterson, T. A., Sánchez-Codero, V., Soberón, J., Bartley, J., Buddemeier, R.W. & Navarro-Sigüenza. (2001). Effects of global climate change on geographic distributions of Mexican Cracidae. *Ecological Modelling*, 144(2001), 21-30. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(01\)00345-3](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(01)00345-3)

Peterson, A. T. (2006). Uses and requirements of ecological niche models and related distributional models. *Biodiversity Informatics*, 3, 59-72. DOI: <https://doi.org/10.17161/bi.v3i0.29>

Peterson, A. T. & Soberón, J. (2012). Species distribution modeling and ecological niche modeling: getting the concepts right. *Natureza y Conservação*, 10(2), 102-107. DOI: <http://doi.org/10.4322/natcon.2012.019>

Plissock, P. & Fuentes-Castillo, T. (2011). Modelación de la distribución de especies y ecosistemas en el tiempo y en el espacio: una revisión de las nuevas herramientas y enfoques disponibles. *Revista de Geografía Norte Grande*, 48, 61-79. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022011000100005>

Ramírez-Herrera, C., Vargas-Hernández, J. J. & López-Upton, J. (2005). Distribución y conservación de las poblaciones naturales de *Pinus greggii*. *Acta botánica mexicana*, 72, 1-16. DOI: <http://doi.org/10.21829/abm72.2005.997>

Rodríguez-Trejo, D. A. (2001). Ecología del fuego en el ecosistema de *Pinus hartwegii* Lindl. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 7(2): 145-151.

Ruíz Pérez, M., Fernández, C. G. & Sayer, J. A. (2007). Los servicios ambientales de los bosques. *Revista Ecosistemas*, 16(3), 80-89.

SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2010). Norma Oficial Mexicana Nom-059-Semarnat-2010, Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo. Diario Oficial de la Federación, 30 de diciembre de 2010, Segunda Sección, México.

Soberón, J. & Peterson, A. T. (2005). Interpretation of models of fundamental ecological niches and species distributional areas. *Biodiversity Informatics*, 2, 1–10. DOI: <https://doi.org/10.17161/bi.v2i0.4>

- Soberón, J. & Miller, C. P. (2009). Evolución de los nichos ecológicos. *Miscelánea Matemática*, 49, 83-99.
- Soberón, J., Osorio-Olvera, L. & Peterson, T. (2017) Diferencias conceptuales entre modelación de nichos y modelación de áreas de distribución, *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88(2), 437–441. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.03.011>
- Tejeda-Landero, V. M., Sánchez-Velásquez, L. R., Viveros-Viveros, H., Aparicio-Rentería, A. & Flores-Peredo, R. (2019). Formación de bancos de semillas y remoción de semillas de *Pinus hartwegii* (Pinaceae) a lo largo de un gradiente altitudinal en el Parque Nacional Cofre de Perote, Veracruz, México. *Botanical Sciences*, 97(4), 623-629. DOI: <https://doi.org/10.17129/botsci.2204>
- Varo Rodríguez, R. D. (2018). Estructura, fitodiversidad y aspectos de uso tradicional del bosque de *Pinus hartwegii* en dos subcuencas del Sistema Volcánico Transmexicano. Tesis para recibir el grado de M. en C. Agropecuarias y Recursos Naturales. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Villaseñor, J.L. (2016). Checklist of the native vascular plants of Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 87(2016), 559-902. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2016.06.017>

# CAPITULO I. DISTRIBUCIÓN ACTUAL Y BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO DE *Pinus hartwegii* LINDL.

## 1.1 RESUMEN

### **Antecedentes:**

La distribución restringida de *Pinus hartwegii* Lindl. la convierte en una de las especies más vulnerables al cambio climático. Los modelos de distribución generados hasta la fecha mencionan al clima como factor clave para la distribución de la especie.

### **Preguntas:**

Si se toman otras variables como índice de vegetación, modelos de elevación y propiedades edáficas específicas ¿La distribución actual de *P. hartwegii* será diferente a lo ya reportado? ¿Cómo será el rango de distribución natural de *P. hartwegii* bajo escenarios de cambio climático? ¿Se modificará, disminuyendo o incrementando su área de distribución?

### **Descripción de datos:**

Se revisaron 2034 registros de *P. hartwegii* obtenidos de herbarios del centro de México y bases de datos digitales para generar una base de datos con registros verificados geográficamente.

### **Área y años de estudio:**

Regiones fisiográficas de México. Periodo de estudio: 1950-2000, 2015-2039 y 2075-2099.

### **Métodos:**

Base de datos de *P. hartwegii* con registros de herbarios, fuentes digitales y campo. Modelos de distribución realizados en RStudio con 10 algoritmos e implementación de la técnica de ensamblaje.

**Resultados:**

Los modelos de distribución actual mostraron que hay propiedades específicas de los suelos de importancia en la distribución de la especie. Habrá reducciones en zonas como la Faja Volcánica Transmexicana, la Sierra Madre Oriental y la Sierra Sur. Sin embargo, en los modelos futuros la distribución de *P. hartwegii* se expandirá hacia la Sierra Madre Occidental.

**Conclusiones:**

El clima y el suelo juegan un papel importante en la distribución actual y futura de *P. hartwegii*.

**Palabras clave:** Modelos de distribución, propiedades del suelo, escenarios de cambio climático, ensamblaje, RStudio.

## 1.2 ABSTRACT

**Background:**

The restricted distribution of *Pinus hartwegii* Lindl. makes it one of the most vulnerable species to climate change. The distribution models generated mention climate as a key factor for the distribution of the species.

**Questions:**

If other variables such as vegetation index, elevation models and specific soil properties are taken, will the current distribution of *P. hartwegii* be different from what has already been reported?

What will the natural range of *P. hartwegii* look like under climate change scenarios? Will it be modified, decreased or increased in its range?

**Data Description:**

We reviewed 2034 records of *P. hartwegii* obtained from herbariums in central Mexico and digital databases to generate a database with geographically verified records.

**Area and years of study:**

Physiographic regions of Mexico and study period: 1950-2000, 2015-2039 and 2075-2099.

**Methods:**

*P. hartwegii* database with herbarium records, digital sources, and field. Distribution models made in RStudio with 10 algorithms and implementation of the assembly technique.

**Results:**

Current distribution models showed that soil-specific properties are important in the distribution of the species. There will be reductions in areas such as the Trans-Mexican Volcanic Belt, the Sierra Madre Oriental, and the Sierra Sur. However, in future models the distribution of *P. hartwegii* will expand into the Sierra Madre Occidental.

**Conclusions:**

Climate and soil play an important role in the current and future distribution of *P. hartwegii*.

**Keywords:**

Distribution areas, soil properties, climate change scenarios, assembly, RStudio

### 1.3 INTRODUCCIÓN

El modelado de la distribución actual y futura de especies mediante la combinación de registros geográficos de presencia de especies y variables ambientales son de interés en disciplinas teóricas y aplicadas (Guisan & Thuiller 2005, Elith & Leathwick 2009, Peterson *et al.* 2012). Estos modelos usan la asociación entre variables ambientales, presumiblemente de valor predictivo, y los registros de ocurrencia de las especies. Sus resultados identifican aquellas condiciones ambientales idóneas donde la especie podría persistir indefinidamente (Guisan & Thuiller 2005, Elith & Leathwick 2009, Peterson *et al.* 2012). Una gama amplia de algoritmos y métodos se han usado para predecir la distribución geográfica actual y futura de especies (Elith & Leathwick, 2009, Mateo *et al.* 2011, Peterson *et al.* 2012). La existencia de algoritmos que modelan estas relaciones, son conocidos como modelos de nicho ecológico (MNE) y de distribución de especies (MDE). La diferencia entre ambos radica en que los MNE proyectan la relación existente entre condiciones ambientales e interacciones biológicas asociadas a las especies particulares; mientras que los MDE proyectan áreas o regiones geográficas potencialmente idóneas para la ocurrencia y persistencia de las especies (Peterson *et al.* 2006, Illoldi-Rangel & Escalante 2008, Peterson & Soberón 2012, Soberon *et al.* 2017).

De acuerdo con Soberón & Peterson (2005) y Soberón *et al.* (2017), los modelos deben tener delimitado el espacio geográfico (G) el cual se define como una representación con altas probabilidades de presencia de las especies y se compone de un área ocupada (G0) en la que existen condiciones físicas y biológicas de presencia de las especies y un área invadible (G1) donde es probable encontrar las condiciones para la presencia de la especie.

En la actualidad existen numerosas técnicas, y algoritmos para modelar tanto la distribución actual y futura de las especies, como su nicho ecológico (Elith & Leathwick

2009, Peterson *et al.* 2012), hasta los más recientes, llamados ensambles de algoritmos (Franklin 2010, Gil-Martínez 2018). Los algoritmos individuales y los ensambles de éstos son técnicas correlativas que relacionan la presencia geográfica de las especies con variables ambientales, generalmente climáticas. La razón es sencillamente que el clima es ampliamente reconocido como un fuerte predictor de la distribución de especies, especialmente de las plantas. Estos modelos, generalmente no han tomado en cuenta otras variables ambientales, como las edáficas, las cuales podrían ser buen predictor para la distribución de las plantas (Cruz-Ruíz *et al.* 2012) por lo que permanecen sin probar su importancia. Sin embargo, recientemente se ha demostrado que la inclusión de variables edáficas, junto a las climáticas, influyen en las proyecciones del rango de distribución de las especies, especialmente bajo escenarios de cambio climático (Bertrand *et al.* 2012, Velazco *et al.* 2017, Hagger, *et al.* 2017). Estos trabajos se centran en un número reducido de especies arbóreas, por lo que es necesario valorar las variables edáficas en un mayor número de especies y de formas de crecimiento ya que, a la fecha, no es posible hacer generalizaciones.

Por otra parte, las evidencias actuales del cambio climático son atribuibles en gran medida a causas antropógenas (IPCC 2014). El cambio climático es un proceso que ocurre a escala global con expresiones muy heterogéneas a escalas regionales y locales. La velocidad actual del cambio climático antropogénicamente inducido es alarmante por sus efectos potenciales sobre los ecosistemas forestales (Loehle & LeBlanc 1996, McCarty 2001), y en particular sobre los bosques de alta montaña y las especies que lo componen. El impacto potencial del cambio climático sobre las especies arbóreas de alta montaña cuya distribución natural define y acota el límite altitudinal de distribución arbórea está escasamente documentado, y su distribución futura está lejos de ser completamente

comprendida. Dado que muchas otras especies coexisten en los márgenes altitudinales que demarcan su tolerancia ambiental, se piensa que las especies distribuidas dentro de estas zonas de transición altitudinal deberán ser particularmente sensibles al cambio climático. La comprensión de los impactos del cambio climático sobre los sistemas naturales de alta montaña requiere de la calibración de modelos que proyecten los cambios en el rango y amplitud de distribución de estas especies y comunidades bajo distintos escenarios de cambio climático.

Con base en estos conocimientos, se postulan las siguientes interrogantes: ¿El rango de distribución natural de *Pinus hartwegii* Lindl. se modificará, disminuyendo o incrementando?, ¿En qué medida, la distribución de *P. hartwegii* se verá modificada bajo escenarios de cambio climático?, y ¿Qué variables son las que están interviniendo en la distribución potencial de la especie?

Para ello, se establecieron como objetivos identificar áreas geográficas idóneas para la distribución actual de *P. hartwegii* e indagar en los factores ambientales que las definen así como explorar la dinámica de su distribución bajo escenarios de cambio climático.

#### **1.4 MATERIALES Y MÉTODOS**

**Área de estudio.** El pino de alta montaña (*P. hartwegii*) se distribuye desde los 2800 hasta los 4100 msnm en el límite arbóreo de las zonas montañosas de México y Centroamérica (Farjón & Styles 1997, Perry 1998). Esta adaptado a condiciones ambientales extremas, con climas templados, húmedos y muy fríos; los suelos son ricos en materia orgánica, con pH ligeramente ácidos a neutros (de 5.2 a 6.9), texturas migajón-arenosas, y presencia de elementos químicos como el magnesio (Mg), calcio (Ca), potasio (K), nitrógeno (N) y fósforo

(P) (Eguiluz 1978, Perry 1991, Farjón 1996, Farjón & Styles 1997, Musálem & Solís 2000), clasificándose como andosoles (Galicia *et al.* 2016).

Siguiendo las recomendaciones de Soberón *et al.* (2017), se delimitó el área geográfica para el modelado de la distribución de *P. hartwegii* a las regiones fisiográficas de México: las Sierras Madres Oriental (SMOr) y Occidental (SMO), la Faja Volcánica Transmexicana (FVT), la Sierra Sur (SS) y los Altos de Chiapas (Figura 1). Los límites altitudinales de estas Sierras fluctúan desde los 3,000 msnm en los Altos de Chiapas hasta los 5,452 msnm en la FVT (Ordoñez 1941).

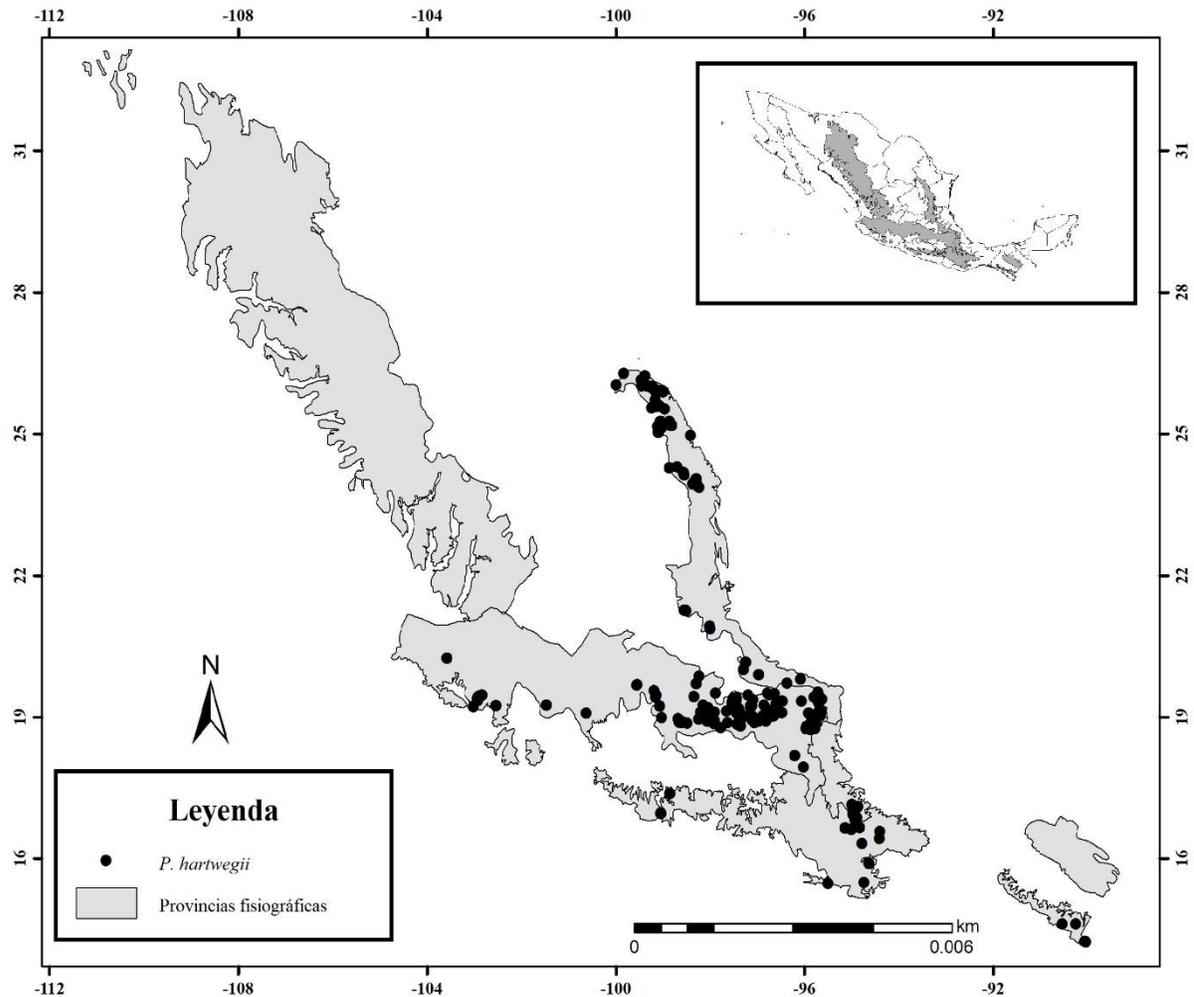


Figura 1: Provincias fisiográficas de México con proyección de los 2034 registros de *P. hartwegii* recopilados en las bases de datos.

**Datos de presencia.** Los registros de presencia de *P. hartwegii* se obtuvieron de dos fuentes principales 1) algunos de los principales herbarios de México: MEXU, ENCB, CHAP, JES, CHAPA y UAM-Iz. 2) de bases de datos digitales: GBIF (<https://www.gbif.org/>), Trópicos (<https://www.tropicos.org/home>), MEXU (<http://www.ib.unam.mx/botanica/herbario/>), REMIB (<http://www.conabio.gob.mx/remib/doctos/remibnodosdb.html>), CHAP (base de datos proporcionada por el herbario) y la Red de Herbarios del Noroeste de México (<https://herbanwmex.net/portal/>) y 3) registros propios tomados en campo con un GPS Garmin Map 64s.

Se recuperó un total de 2034 registros, de los cuales se eliminaron aquellos sin coordenadas geográficas, sin nombre del colector, ejemplares con errores de identificación, y los duplicados (Figura 2). después de este filtro, los registros remanentes fueron 341, los cuales contenían los parámetros mencionados. Con el propósito de evaluar la variación entre puntos cercanos y reducir la dependencia geográfica entre registros cercanos siguiendo a Liu *et al.* (2005) y a Cruz-Cárdenas *et al.* (2014a), se aplicó un análisis de semivariograma en RStudio. Con este análisis se evaluaron las variables ambientales empleando modelos teóricos Gausseanos y lineales, y a través del intervalo de confianza se realizó una cuadrícula de 1 km<sup>2</sup>, dicha cuadrícula contendría la información ambiental de las 35 variables. Se empleó la opción de puntos aleatorios en el sistema de información geográfica Qgis versión 3.14 (<https://www.qgis.org/es/site/>) para descartar los registros con distancias similares.

Finalmente el número total de registros localizados a distancias  $\geq 1\text{km}^2$  entre ellos fue de 26, los cuales fueron empleados para entrenar y validar los modelos de distribución actual y futura.

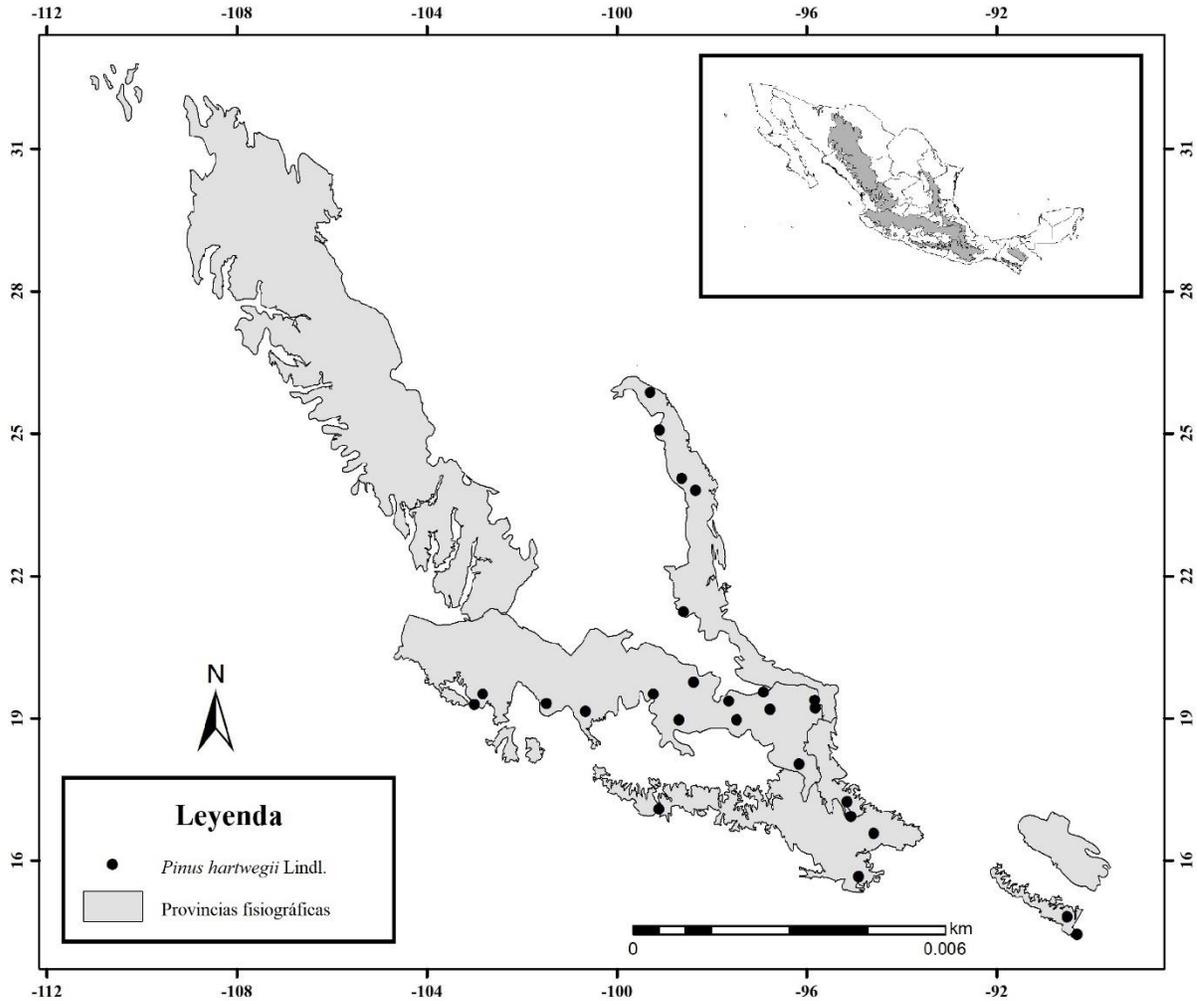


Figura 2: Registros obtenidos después de la prueba de autocorrelación empleados para generar los mapas de distribución potencial presente y futura.

**Covariables ambientales actuales y futuras.** Las capas ambientales empleadas en el modelado de la distribución de *P. hartwegii* se recuperaron del Centro de Ciencias de la

Atmosfera de la UNAM (<http://atlasclimatico.unam.mx/AECC/servmapas>). Se obtuvieron 19 capas climáticas actuales para México. A estas, se les añadieron: la evapotranspiración real anual (ETRA), evapotranspiración real de las estaciones lluviosas (mayo a octubre, ETRAH) y secas (noviembre a abril, ETRAS), generadas y cedidas por Cruz-Cárdenas *et al.* (2014c). Se incluyó un modelo digital de elevación (MDE) obtenido del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, 2010), y un índice normalizado diferencial de vegetación generado de imágenes del satélite MODIS para el año 2009 (Cruz-Cárdenas *et al.* 2014c). Finalmente, se consideró de importancia para la modelación la inclusión de algunas propiedades de los suelos: Ca, K, Mg, Na, carbono orgánico (CO), conductividad eléctrica (CE) y pH. Las capas de las propiedades de los suelos de México se obtuvieron del trabajo realizado por Cruz-Cárdenas *et al.* (2014a), las cuales se recortaron y acotaron para las provincias fisiográficas de México.

Las covariables ambientales futuras constaron de dos escenarios de emisión de gases de efecto invernadero (GEI) de trayectorias representativas de concentraciones (RCP) y dos periodos de tiempo, uno cercano (2015-2039) y otro lejano (2075-2099) (IPCC 2014). El primer escenario fue uno conservador (RCP 4.5  $\text{Wm}^{-2}$ ), donde las emisiones de GEI son relativamente bajas (538 ppm) con incrementos en temperatura de 1.1 a 2.6°C. El segundo escenario fue uno catastrófico (RCP 8.5  $\text{Wm}^{-2}$ ) donde las emisiones de GEI son altas (936 ppm) con incrementos en la temperatura de 2.6 a 4.5°C. En el cuadro 1 (apéndice 1) se enlistan todas las variables ambientales empleadas.

**Selección de predictores ambientales.** Para evitar redundancia en las variables ambientales y reducir sesgos en los modelos de distribución, se realizó un Análisis de Componentes Principales (PCA) donde se estandarizaron los valores originales y posteriormente a través

de la matriz de varianza-covarianza se eligieron los componentes que explicaron más del (95%) de la varianza original de los datos.

Este método se empleó para reducir la colinealidad entre las variables, y evitar sobreajustes en los modelos (Cruz-Cárdenas *et al.* 2014b; Cruz-Cárdenas *et al.* 2014c). De cada componente se seleccionaron aquellas variables cuyos valores absolutos de sus factores de carga fueron más elevados.

**Técnicas de modelación.** Se empleó el paquete SDM (Naimi & Araujo 2020) en el ambiente de programación RStudio versión 1.3 (Allaire 2009) el cual se compone por diversos algoritmos: biological relevance testing (BRT) (Zheng & Yu 2018), de integración climática (BIOCLIM y DOMAIN (Hijmans *et al.* 2020)), DISMO (Hijmans *et al.* 2020), flexible discriminant analysis (FDA) (Ramsay *et al.* 2020), generalized linear models (GLM) (Marschner & Donoghoe 2018), multivariate, adaptive regression spline (MARS) (Milborrow 2020), mixture discriminant analysis (MDA) (Hastie & Tibshirani 2020), multilayer perceptrón (MLP) (Kourentzes 2019), Random Forest (RF) (Breiman & Cutler 2018) y support vector machine (SVM) (Meyer 2020). El 70 % de datos (18 registros) se utilizaron para entrenamiento del modelo y el 30 % restante (7 registros) para validación.

**Método Bootstrap.** Para combinar y reducir los errores en los modelos generados de manera individual se aplicó el método Bootstrap, el cual toma de forma aleatoria y reemplaza el conjunto de datos de entrenamiento original, combinando de manera homogénea los diferentes tipos de algoritmos empleados en el ensamble (Cruz-Cárdenas *et al.* 2014 c, Chou *et al.* 2017). En los modelos de distribución se aplicó dicho método con 10 repeticiones para cada algoritmo y 10,000 backgrounds.

Los algoritmos seleccionados para realizar el ensamblaje se limitó a aquellos cuyas áreas bajo la curva ROC (AUC) tuvieran valores  $\geq 0.80$ . Con esta restricción se redujo el número de algoritmos empleados para generar los modelos de distribución actual y futura.

**Ensamblaje de predictores.** La técnica de ensamblaje permite compilar las predicciones generadas individualmente, por distintos algoritmos y generar un mapa final con mayor precisión. Esta técnica combina datos de diferentes extensiones en distintos espacios de cuadrícula. Los modelos de ensamble son robustos aun cuando el número de calibraciones del modelo es pequeño (Caubet *et al.* 2018, Gil-Martínez 2018).

**Definición de áreas potenciales.** Pearson *et al.* (2007) emplearon el método “umbral de presencia más bajo” para identificar el área mínima posible de hábitats idóneos para la distribución de las especies, con cero errores de omisión en los datos de entrenamiento. Siguiendo este criterio, se elaboró un cuadro con todos los valores obtenidos de las 10 repeticiones de cada algoritmo, de donde se obtuvieron los promedios y un promedio general de dichos valores. Valores  $\geq 0.114$  se considerarían como presencias y valores  $< 0.114$  se tomarían como ausencias.

Finalmente se generaron mapas binarios de presencia-ausencia.

## 1.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**Datos de presencia.** La figura 2 muestra los registros de presencia a distancias  $\geq 1\text{km}^2$ , resultante del análisis que disminuyó la autocorrelación espacial. Con estos 26 registros se generaron los modelos de distribución actual y futura.

**Selección de predictores ambientales.** Del PCA realizado a las 35 variables ambientales para el tiempo actual, únicamente se emplearon componentes que representaban el 95 % de la varianza (Cuadro 2, apéndice 2).

Las variables ambientales con mayor contribución a los modelos se seleccionaron a partir de las correlaciones  $\geq 10\%$ . Siendo los PCAs tres, seis y 10 los que tuvieron una correlación  $\geq 10\%$ , con el 12.3 %, 14.7 % y 16.2 % respectivamente.

Las variables más importantes dentro de estos tres componentes tuvieron relación con la variación de la temperatura a lo largo del año, así como propiedades específicas del suelo tales como la materia orgánica, el carbono orgánico, el sodio y el potasio (Cuadro 3).

Cuadro 3: Porcentajes de aportación de las variables ambientales con mayor contribución al modelo actual.

<b>Variable</b>	<b>PCA 3 (%)</b>	<b>PCA 6 (%)</b>	<b>PCA 10 (%)</b>
BIO2			14
BIO3	9		
BIO4	9		
BIO7	7		
MO		13	
CO		12	
Na		13	23
K			29

En los modelos futuros, se emplearon cinco componentes que explican el 95 % de la varianza acumulada contenida en las variables. Se aplicó el mismo criterio de correlación  $\geq 10\%$  para seleccionar los PCAs que permiten explicar los resultados del modelado. De estos, el PCA tres fue el más importante con un 12.3 % de aporte al modelado.

El cuadro 4 muestra las variables más importantes resultantes del modelado a futuro cercano y lejano, estas variables se relacionan con la oscilación de las temperaturas a lo largo del año (BIO3 y BIO4) y la precipitación en los trimestres más calientes y fríos (BIO18 y BIO19), las variables ambientales coincidieron en tres de los cuatro escenarios generados.

Cuadro: 4 Porcentajes de las variables ambientales con mayor contribución al modelo.

<b>Variable</b>	<b>Escenario 1 (%)</b> <b>RCP 4.5 (2015-</b> <b>2039)</b>	<b>Escenario 2 (%)</b> <b>RCP 4.5 (2075-</b> <b>2099)</b>	<b>Escenario 3 (%)</b> <b>RCP 8.5 (2015-</b> <b>2039)</b>	<b>Escenario 4 (%)</b> <b>RCP 8.5 (2075-</b> <b>2099)</b>
BIO3	10	10	11	10
BIO4	11	11	11	11
BIO18		9		
BIO19	10		10	9

**Modelos de distribución.** Una vez definidos los PCA se procedió a realizar el modelado de la distribución de *P. hartwegii*. La distribución actual se generó con 10 algoritmos iniciales: BIOCLIM, BRT, DOMAIN, FDA, GLM, MARS, MDA, MLP, RF y SVM.

Sin embargo, para mejorar la calidad y confiabilidad en el ensamble de predictores, se

tomaron en cuenta solo aquellos algoritmos con un valor de  $AUC \geq 0.80$ . Los algoritmos seleccionados con este criterio fueron: GLM, FDA, MDA, BRT, RF, MARS y MLP, cuyas AUC fueron de 0.89, 0.88, 0.88, 0.87, 0.86, 0.82 y 0.81 con una desviación estándar de 0.05, 0.06, 0.09, 0.05, 0.04, 0.92 y 0.08 respectivamente.

Siguiendo lo propuesto por Pearson *et al.* (2007) sobre la delimitación del umbral de corte más bajo, se obtuvo un valor de corte  $\geq 0.114$ . Empleando este valor, se transformaron los datos numéricos de continuos a binarios y posteriormente se generaron mapas de presencia/ausencia para mejorar el criterio de evaluación de idoneidad del hábitat para la especie.

En la figura 3 se muestra la distribución resultante de *P. hartwegii*. La superficie actual de presencia estimada fue de 6243 km<sup>2</sup>.

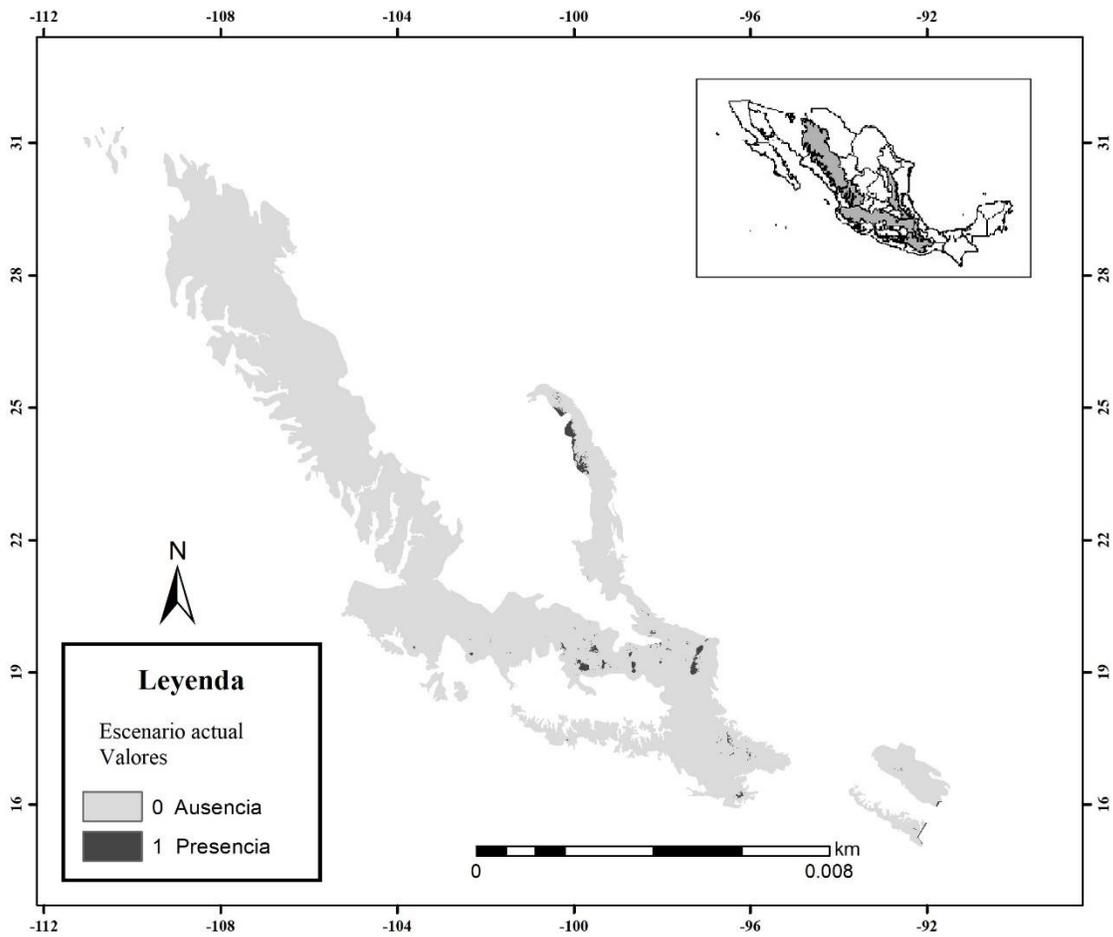


Figura 3: Distribución potencial actual de *P. hartwegii* en México.

**Modelos de distribución potencial futura.** Se generaron cuatro mapas de distribución potencial futura: dos para un escenario conservador y dos para un escenario catastrófico, ambos con futuro cercano y futuro lejano (Figura 4). Para el escenario conservador (RCP 4.5) y futuro cercano (2015-2039), los resultados muestran una ocupación de *P. hartwegii* sobre una superficie de 15,215 km<sup>2</sup> mientras que para el futuro lejano (2075-2099), la ocupación resultante fue de 11,609 km<sup>2</sup>. En cambio, para el escenario catastrófico (RCP 8.5)

y futuro cercano, la superficie de ocupación de *P. hartwegii* fue de 10,633 km<sup>2</sup> y la del futuro lejano de 11,609 km<sup>2</sup>.

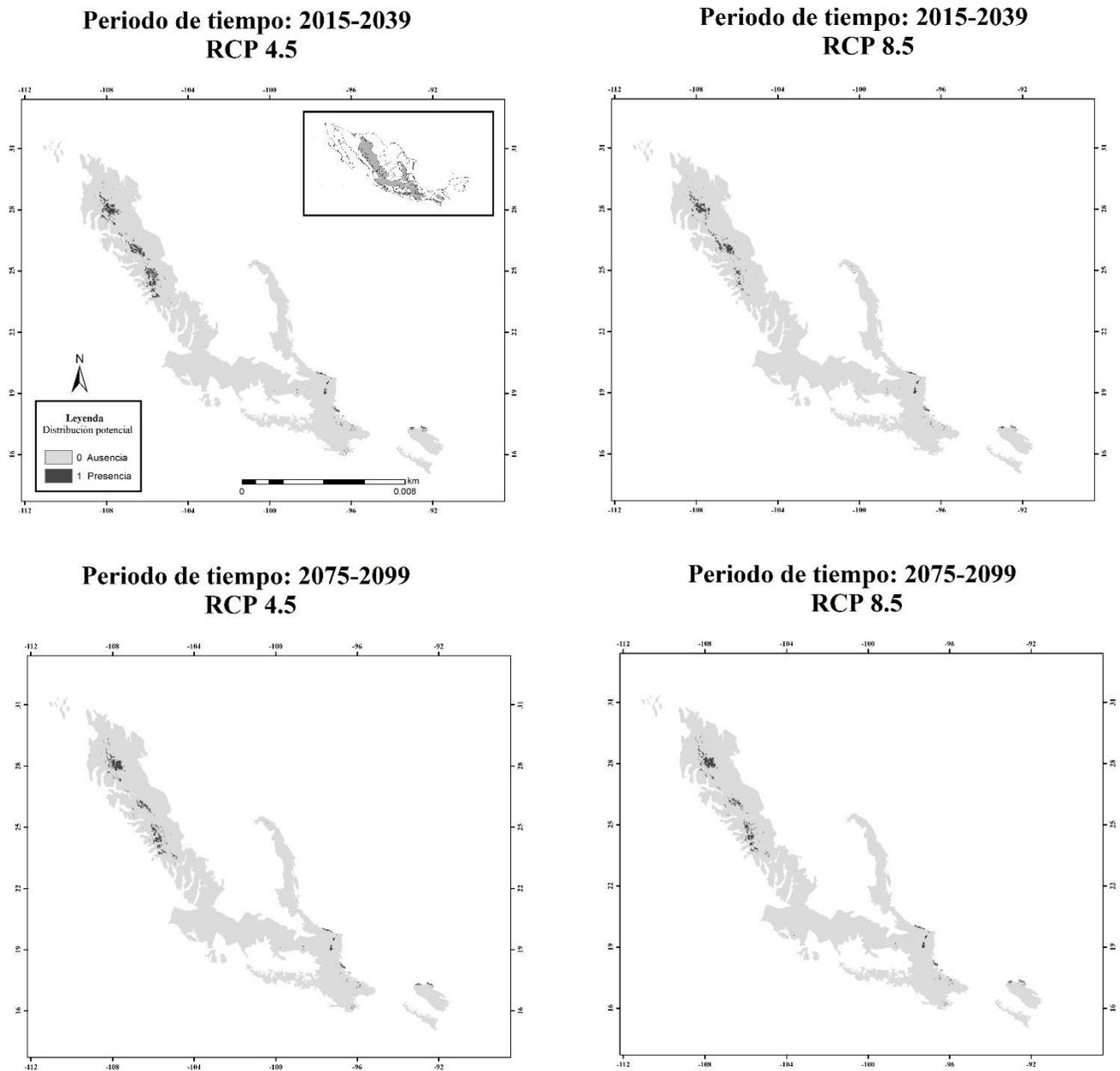


Figura 4: Distribución potencial futura de *P. hartwegii* en México con RCPs 4.5 y 8.5 con periodo de tiempo de 2015-2039 y 2075-2099.

Con base en estos resultados, se proyecta una reducción significativamente importante en la superficie ocupada por *P. hartwegii* principalmente en la Faja Volcánica Transmexicana. No obstante, los resultados proyectan incrementos en las superficies idóneas para la ocupación sobre las Sierra Madre Occidental y la Sierra Sur.

## 1.5 CONCLUSIONES

La implementación del ensamblaje de varios algoritmos para el modelado de la distribución de especies es un método relativamente reciente que evalúa de manera independiente las predicciones de cada algoritmo. La importancia del método de ensamblaje es que proporciona una visión conjunta del desempeño individual de los modelos basado en los valores de AUC. En esta investigación se implementaron algoritmos diferentes a los que generalmente se utilizan en los modelos de distribución de especies. De los 10 algoritmos implementados solo GLM, FDA, MDA, BRT, RF, MARS y MLP presentaron buenas idoneidades de hábitat para la especie, con valores de AUC superiores a 0.80.

Los trabajos reportados por Aceves-Rangel *et al.* (2018) y Manzanilla-Quiñones *et al.* (2019) se basaron únicamente en el algoritmo MaxEnt. Mientras que Alfaro-Ramírez *et al.* (2020) empleó una técnica similar a la del presente trabajo y sus proyecciones se basaron en cuatro algoritmos incluido MaxEnt.

Por otra parte, para determinar la presencia/ausencia de la especie es importante recordar los umbrales de corte, de la literatura reportada solo el trabajo de Alfaro-Ramírez *et al.* (2020) ha tomado en cuenta este criterio, estableciendo valores de 0 y 1.

En cuanto a las variables ambientales en la distribución actual de *P. hartwegii* están correlacionadas con la variabilidad de la temperatura (BIO2, BIO3, BIO4 y BIO7) y con algunas propiedades de los suelos (MO, CO, Na y K). Las variables climáticas coinciden con

algunas de las reportadas en trabajos anteriores. Sin embargo, en cuestión de los suelos únicamente se mencionan clasificaciones generales dejando fuera propiedades específicas (Manzanilla-Quñones *et al.* 2019; Alfaro-Ramírez *et al.* 2020).

La importancia ecológica de los suelos es trascendental debido a que sus propiedades aportan diversos nutrientes, facilitando la actividad biológica. Se ha documentado que las propiedades de los suelos donde se distribuye *P. hartwegii* son muy variables, por ejemplo, en el Nevado de Colima los suelos son pobres en Ca, K, P y Mn, pero ricos en Mg. En cambio en Zoquiapan, Estado de México, La Malinche y El Ajusco son ricos en Ca, Mg, Na, K, N y Al, pero bajos en P (Musálem & Solís 2000, Cruz-Ruíz *et al.* 2012, Varo-Ramírez 2018).

De las variables ambientales futuras más importantes que determinan la distribución de *P. hartwegii* se relacionan con la oscilación de la temperatura diaria a lo largo del año, y con la precipitación en los trimestres más cálidos y fríos del año.

Dichas variables difieren un poco con lo reportado por Aceves-Rangel *et al.* (2018), Manzanilla-Quñones *et al.* (2019) y Alfaro Ramírez *et al.* (2020), quienes mencionan que las variables BIO1, BIO10, BIO12, BIO18, altitud, suelo y vegetación serán determinantes en la distribución potencial de *P. hartwegii*.

Las proyecciones de Aceves-Rangel *et al.* (2018), Manzanilla-Quñones *et al.* (2019) y Alfaro-Ramírez *et al.* (2020) se generaron a partir de las interpolaciones climáticas de WorldClim. En ninguno de estos trabajos fueron tomados en cuenta variables de las propiedades de los suelos, ni otras consignadas en el presente trabajo (Cuadro 1).

Resulta evidente inferior que las diferencias entre este trabajo y los otros tres realizados con *P. hartwegii*, se deben al número, fuente de variables, tipo de variables y los algoritmos, métodos y técnicas de modelado empleados.

Los modelos generados en este trabajo indican que la distribución actual de *P. hartwegii* tiende a reducir sus áreas de ocupación, mediante extinciones locales en la Faja Volcánica Transmexicana, la Sierra Madre Oriental y las montañas altas de Oaxaca. Cruz-Cárdenas *et al.* (2016) señalan reducciones de hasta un 76 % en el estado de Michoacán. Otros autores reportan disminuciones de *P. hartwegii* en todo su ámbito de distribución en México de hasta un 69 % en 2070 (Arriaga & Gómez 2004, Aceves-Rangel *et al.* 2018, Manzanilla-Quñones *et al.* 2019, Alfaro-Ramírez *et al.* 2020).

En cambio, las proyecciones de los modelos futuros producidos en este trabajo muestran sobresalientemente que en la región centro y norte de la Sierra Madre Occidental existirán condiciones ambientales idóneas para que *P. hartwegii* expanda su distribución. En las montañas altas de una pequeña zona en los Altos de Chiapas habrá similarmente condiciones para la expansión de esta especie. La rápida ampliación del rango de distribución de *P. hartwegii* sobre la Sierra Madre Occidental equivale a una extensión del 69.6 % en el área de ocupación respecto a su distribución actual. Tal hallazgo difiere completamente de los análisis previamente reportados por Aceves-Rangel *et al.* (2018) y Alfaro-Ramírez *et al.* (2020). Estos autores mencionan que aunque existen altas posibilidades de localizar a *P. hartwegii* en la Sierra Madre Occidental, ellos proyectan reducciones de hasta un 68.8 % para el año 2070.

Las extinciones locales de la especie en zonas de la FVT, la SMO y parte de los altos de Chiapas tendrán repercusiones importantes, desconocidas, o poco exploradas durante los procesos de sucesión secundaria que propiciarán tales extinciones locales.

Por otra parte, la expansión de *P. hartwegii* sobre la SMO supone cambios efectivos en los procesos de dispersión, colonización y adaptabilidad de la especie a nuevos ambientes. Más aún, supone también, modificaciones activas de *P. hartwegii* a su propio ambiente, es decir, a la construcción de su nicho en los nuevos ambientes, su neo-nicho. Tal construcción del neo-nicho de *P. hartwegii* es explicable a la acción activa de las modificaciones en las condiciones ambientales que pueden influenciar las fuentes originales de selección (Laland *et al.* 2016).

Como ya se mencionó los resultados de este trabajo mostraron notables diferencias con aquellos modelos reportados en la literatura sobre el mismo tema (Arriaga & Gómez, 2004; Gómez-Mendoza *et al.* 2008; Cruz-Cárdenas *et al.* 2016; Aceves-Rangel *et al.* 2018; Manzanilla-Quiñones *et al.* 2019; Alfaro-Ramírez *et al.* 2020). Las capas ambientales empleadas proporcionan una perspectiva distinta y más amplia sobre los factores físicos que determinan la distribución y persistencia de *P. hartwegii*; las propiedades de los suelos junto con las fluctuaciones de las temperaturas, sus rasgos y estacionalidad, juegan un papel relevante y poco explorado en la distribución actual y futura de *P. hartwegii* en México.

## 1.6 AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada a la primera autora para la realización de este proyecto de Maestría en Ciencias en Botánica.

## 1.7 LITERATURA CITADA

- Aceves-Rangel L. D, Méndez-González J, García-Aranda M. A, Nájera-Luna J. A. 2018. Distribución potencial de 20 especies de pinos en México. *Agrociencia*, **52**, 1043–1057.
- Alfaro-Ramírez F. U, Ramírez-Albores J. E, Vargas-Hernández J. J, Franco-Maass S, Pérez-

- Suárez M. 2020. Potential reduction of Hartweg's Pine (*Pinus hartwegii* Lindl.) geographic distribution. *PLoS ONE*, **15**(2). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0229178>
- Allaire, J. J. 2009. *R Studio* (1.3). <https://rstudio.com/>
- Arriaga L, Gómez L. 2004. Posibles efectos del cambio climático en algunos componentes de la biodiversidad de México. En *Cambio Climático: una visión desde México*. **253–263**. Instituto Nacional de Ecología.
- Bertrand R., Perez V, Gégout J. C. 2012. Disregarding the edaphic dimension in species distribution models leads to the omission of crucial spatial information under climate change: The case of *Quercus pubescens* in France. *Global Change Biology*, **18**(8), 2648–2660. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02679.x>
- Breiman L, Cutler A. 2018. *Package "RandomForest"* (4.6-14). <https://cran.r-project.org/web/packages/randomForest/randomForest.pdf>
- Caubet M, Román Dobarco, M Arrouays, D Minasny B, Saby N. P. A. 2019. Merging country, continental and global predictions of soil texture: Lessons from ensemble modelling in France. *Geoderma*, **337**, 99–110. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.007>
- Centro de Ciencias de la Atmósfera Universidad Nacional Autónoma de México. 2019. *Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación*. Recuperado el 10 de septiembre de 2019, de <http://atlasclimatico.unam.mx/AECC/servmapas>
- Chou J. S, Ngo N. T, Chong W. K. 2017. The use of artificial intelligence combiners for modeling steel pitting risk and corrosion rate. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, **65**, 471–483. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2016.09.008>
- Cruz-Cárdenas, G, López-Mata L, Ortiz-Solorio C. A, Villaseñor J. L, Ortiz E., Silva J. T, Estrada-Godoy F. 2014a. Interpolation of mexican soil properties at a scale of 1:1,000,000. *Geoderma*, **213**, 29–35. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.07.014>
- Cruz-Cárdenas, G., López-Mata, L., Villaseñor, J. L. y Ortiz, E. (2014b). Potential species distribution modeling and the use of principal component analysis as predictor variables. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, **85**, 189–199. <https://doi.org/10.7550/rmb.36723>
- Cruz-Cárdenas G, Villaseñor J. L, López-Mata L, Martínez-Meyer E, Ortiz E. 2014c. Selección de predictores ambientales para el modelado de la distribución de especies en Maxent. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, **20**(2), 187–201. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2013.09.034>
- Cruz-Cárdenas G, López-Mata L, Silva J. T, Bernal-Santana N, Estrada-Godoy F, López-Sandoval J. A. 2016. Modelado de la distribución potencial de especies de Pinaceae bajo escenarios de cambio climático en Michoacán. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, **22**(2), 135–148. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2015.06.027>

- Cruz-Ruiz E., Cruz-Ruiz A, Aguilera-Gómez L. I, Norman-Mondragón H. T, Velázquez R. A, Nava-Bernal G, Reyes-Reyes B. G. 2012. *Efecto en las características edáficas de un bosque templado por el cambio de uso de suelo*. **30**, 189–197.
- Eguiluz Piedra, T. 1978. *Ensayo de integración de los conocimientos sobre el género Pinus en México*. [Tesis profesional] Universidad Autónoma Chapingo. <https://www.biodiversitylibrary.org/item/232803#page/1/mode/1up>
- Elith J, Leathwick J. R. 2009. Species distribution models: Ecological explanation and prediction across space and time. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, **40**, 677–697. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.110308.120159>
- Farjon A, Styles B. T. 1997. *Flora Neotropica Monograph 75. Pinus (Pinaceae)*.
- Farjon A. 1996. Biodiversity of Pinus (Pinaceae) in Mexico: Speciation and palaeoendemism. *Botanical Journal of the Linnean Society*, **121**, 365–384. <https://doi.org/10.1006/bojl.1996.0041>
- Franklin J. 2010. *Mapeo de distribuciones de especies: inferencia espacial y predicción*. Prensa de la Universidad de Cambridge.
- Galicia L, Gamboa Cáceres A. M, Cram S, Chávez Vergara B, Peña Ramírez V, Saynes V, Siebe C. 2016. Almacén y dinámica del carbono orgánico del suelo en bosques templados de México. *Terra Latinoamericana*, **34**, 1–29.
- Gil-Martínez C. 2018. *Árboles de decisión y métodos de ensemble*. [https://rpubs.com/Cristina\\_Gil/arboles\\_ensemble](https://rpubs.com/Cristina_Gil/arboles_ensemble)
- Global Biodiversity Information Facility. (2019). *Free and open access to biodiversity data*.
- Gómez-Mendoza L, Galicia L, Aguilar-Santelises R. 2008. Sensibilidad de grupos funcionales al cambio climático en la Sierra Norte De Oaxaca, México. *Investigaciones Geográficas*, **67**, 76–100.
- Guisan A, Thuiller W. 2005. Predicting species distribution: Offering more than simple habitat models. *Ecology Letters*, **8**, 993–1009. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00792.x>
- Hageer Y, Esperón-Rodríguez M, Baumgartner J. B, Beaumont L. J. 2017. Climate, soil or both? Which variables are better predictors of the distributions of Australian shrub species? *PeerJ*. <https://doi.org/10.7717/peerj.3446>
- Herbario de la Universidad de Sonora. 2019. *Red de Herbarios del Noroeste de México*. Recuperado el 6 de noviembre de 2019, de <https://herbanwmex.net/portal/index.php>
- Hijmans R, Phillips S, Leathwick J, Elith J. 2020. *Package “Dismo”*. (1.3-3). <https://cran.r-project.org/web/packages/dismo/dismo.pdf>
- Iloldi-Rangel P, Escalante T. 2008. De los modelos de nicho ecológico a las áreas de distribución geográfica. *Biogeografía*, **3**, 7–12.

- IPCC. 2014. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. En *Contribución de los Grupos de trabajo I,II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*.
- Kourentzes N. 2019. *Package 'nnfor'* (0.9.6). <https://cran.r-project.org/web/packages/nnfor/nnfor.pdf>
- Laland K, Matthews B, Feldman M. W. 2016. An introduction to niche construction theory. *Evolutionary Ecology*, **30**, 191–202. <https://doi.org/10.1007/s10682-016-9821-z>
- Liu C., Berry P. M, Dawson T. P, Pearson R. G. 2005. Selecting thresholds of occurrence in the prediction of species distributions. *Ecography*, **28**, 385–393. <https://doi.org/10.1111/j.0906-7590.2005.03957.x>
- Loehle C, LeBlanc D. 1996. Model-based assessments of climate change effects on forests: A critical review. En *Ecological Modelling*, **90**: 1, 1–31. Elsevier B.V. [https://doi.org/10.1016/0304-3800\(96\)83709-4](https://doi.org/10.1016/0304-3800(96)83709-4)
- Manzanilla-Quiñones U, Aguirre-Calderón Ó. A, Jiménez-Pérez J, Treviño-Garza E. J, Yereña-Yamallel J. I. 2020. Distribución actual y futura del bosque subalpino de *Pinus hartwegii* Lindl en el Eje Neovolcánico Transversal. *Madera y Bosques*, **25**(2). <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2521804>
- Marschner I. y Donoghoe M. W. 2018. *Package 'glm2'* (1.2.1). <https://cran.r-project.org/web/packages/glm2/glm2.pdf>
- Mateo R. G, Felicísimo Á. M, Muñoz, J. 2012. Modelos de distribución de especies y su potencialidad como recurso educativo interdisciplinar. *REDUCA (Biología)*, **5**(1), 137–153.
- McCarty J. P. 2011. Ecological Consequences of Climate Change: *Conservation Biology*, **15**(2), 320–331. <https://doi.org/10.1201/b11179-20>
- Meyer D, Dimitriadou E, Hornik K, Weingessel A, Leisch F, Chang C.-C, Lin C.-C. 2021. *Package 'e1071'* (1.7-7). <https://cran.r-project.org/web/packages/e1071/e1071.pdf>
- Milborrow S. 2020. *Package 'earth'* (5.3.0). <https://cran.r-project.org/web/packages/earth/earth.pdf>
- Missouri Botanical Garden. (2019). *Tropicos*. Recuperado el 3 de septiembre de 2019, de <https://www.tropicos.org/home>
- Musálem Santiago M. Á. Solís Pérez M. A. 2000. *Monografía de Pinus hartwegii - SIBE* (A. y P. C. de I. R. del C. C. E. del V. de M. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales (ed.)).
- Naimi B, Araujo M. B. 2020. *Package 'sdm'* (1.0-89). <https://cran.r-project.org/web/packages/sdm/sdm.pdf>

- Ordoñez E. 1941. Las provincias fisiográficas de México. *Revista Geográfica*, **1**, 133–181.
- Pearson R. G, Raxworthy C. J, Nakamura M, Peterson A. T. 2007. Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: A test case using cryptic geckos in Madagascar. *Journal of Biogeography*, **34**(1), 102–117. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2006.01594.x>
- Perry Jr, J. P. 1991. *The pines of Mexico and central America*. Timber Press, Inc.
- Peterson A. T. 2006. Uses and requirements of ecological niche models and related distributional models. *Biodiversity Informatics*, **3**, 59–72. <https://doi.org/10.17161/bi.v3i0.29>
- Peterson A. T, Soberón J. (2012). Species distribution modeling and ecological niche modeling: Getting the Concepts Right. *Natureza & Conservação*, **10**(2), 1–6. <https://doi.org/10.4322/natcon.2012.019>
- QGIS.org, 2020. QGIS Geographic Information System. QGIS Association. <http://www.qgis.org>
- Ramsay J. O, Graves S, Hooker G. 2020. *fda: Functional Data Analysis* (5.1.9). <https://cran.r-project.org/package=fda>
- Red Mundial de Información sobre Biodiversidad. (s/f). *Acceso a las bases de datos de los nodos*. Recuperado el 3 de septiembre de 2019, de <http://www.conabio.gob.mx/remib/doctos/remibnodosdb.html>
- Soberón J, Osorio-Olvera L, Peterson T. 2017. Diferencias conceptuales entre modelación de nichos y modelación de áreas de distribución. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, **88**, 437–441. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.03.011>
- Soberon 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>
- Trevor H, Robert T. 2020. *mda: Mixture and Flexible Discriminant Analysis* (0.5-2). <https://cran.r-project.org/web/packages/mda/index.html>.
- USGS. (2019). *U.S. Geological Survey*. Recuperado el 10 de septiembre de 2019, de <https://www.usgs.gov>
- Varo-Rodríguez R. D. 2018. *Estructura, fitodiversidad y aspectos de uso tradicional del bosque de Pinus hartwegii en dos subcuencas del Sistema Volcánico Transmexicano*. [Tesis de maestría] Universidad Autónoma del Estado de México. <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/99564>
- Velazco S. J. E, Galvão F, Villalobos F, Paulo De Marco J. 2017. Using worldwide edaphic data to model plant species niches: An assessment at a continental extent. *PLoS ONE*, **12**(10). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0186025>

Zeng L, Yu P. 2018. *Brt: Pruebas de relevancia biológica*. <https://cran.r-project.org/web/packages/brt/index.html>

## CONCLUSIONES GENERALES

La implementación de otros algoritmos y técnicas como el ensamblaje ha sido una buena estrategia para mejorar las predicciones en las especies, a pesar de ello, estos métodos han sido poco explorados en la actualidad.

En este trabajo de investigación, los modelos de distribución de especies generados para *P. hartwegii* mostraron diferencias con los modelos reportados en la literatura sobre la misma especie (Arriaga & Gómez, 2004; Gómez-Mendoza *et al.* 2008; Cruz-Cárdenas *et al.* 2016; Aceves-Rangel *et al.* 2018; Manzanilla-Quñones *et al.* 2019; Alfaro-Ramírez *et al.* 2020).

Las capas ambientales empleadas proporcionaron una perspectiva distinta y amplia sobre los factores físicoquímicos que pueden estar determinando la distribución y persistencia de *P. hartwegii*. En las proyecciones actuales, múltiples propiedades del suelo como el carbono orgánica, la materia orgánica, el Na o el K, jugaran un papel relevante en la distribución de la especie y dado lo vulnerables que son los suelos donde se distribuye *P. hartwegii* (andosoles), en un futuro las funciones de estos como la captura de carbono podría verse afectados por las variaciones en el cambio climático global.

Gran parte de las regiones donde actualmente se distribuye *P. hartwegii* se verán notablemente afectadas por las inestabilidad en las condiciones ambientales, al grado de proyectar extinciones locales de la especie, principalmente en la Faja Volcánica Transmexicana y la Sierra Madre Oriental. Sin embargo, se proyecta una expansión en la distribución de la especie a finales del siglo hacia la Sierra Madre Occidental.

Se sabe que *P. hartwegii* es una de las especies de coníferas que se ha adaptado de buena forma a los cambios ambientales durante millones de años, no obstante, el cambio en estas condiciones derivado de las actividades antropogénicas están provocando que muchas de las

especies adaptadas a condiciones específicas migren o esten en riesgo de extinguirse por el poco tiempo que tienen para adaptarse al cambio.

Este trabajo se conjunta a lo ya reportado en la literatura, complementando con otras variables como las propiedades edáficas los supuestos sobre las condiciones ambientales que influyen en la distribución de *P. hartwegii*, de igual forma, da otra perspectiva sobre las áreas potenciales donde se puede llegar a encontrar a la especie, ya que todos los trabajos reportados en la literatura mencionan reducciones de la especie de hasta un 69.9% en un futuro lejano, mientras que en los modelos reportados en este trabajo para un futuro lejano se reporta una expansión en la distribución de la especie.

## APÉNDICES

Cuadro 1: Variables ambientales de condiciones actuales para modelos de distribución de *P. hartwegii*.

Variable	Descripción
BIO1	Temperatura media anual
BIO2	Rango promedio de temperaturas diarias ( $T_{\max}-T_{\min}$ )
BIO3	Isotermalidad $(\text{bio2}/\text{bio7})\times 100$
BIO4	Estacionalidad de la temperatura (Desviación estándar $\times 100$ )
BIO5	Temperatura máxima del mes más cálido
BIO6	Temperatura mínima del mes más frío
BIO7	Rango anual de la temperatura ( $\text{bio5}-\text{bio6}$ )
BIO8	Temperatura media del trimestre más húmedo
BIO9	Temperatura media del trimestre más seco
BIO10	Temperatura media del trimestre más cálido
BIO11	Temperatura mínima del mes más frío
BIO12	Precipitación anual
BIO13	Precipitación del mes más húmedo
BIO14	Precipitación del mes más seco

BIO15	Estacionalidad de la precipitación
BIO16	Precipitación del trimestre más húmedo
BIO17	Precipitación del trimestre más seco
BIO18	Precipitación del trimestre más cálido
BIO19	Precipitación del trimestre más frío
ETRA	Evapotranspiración real anual
ETRAH	Evapotranspiración real temporada lluvias (mayo-oct)
ETRAS	Evapotranspiración real temporada secas (nov-abr)
Hum_mod	Índice diferencial de vegetación normalizada (meses húmedos, mayo-oct)
Seco_mod	Índice diferencial de vegetación normalizada (meses secos, nov-abr)
Ce	Conductividad eléctrica
CO	Carbono Orgánico
K	Potasio
Mg	Magnesio
MO	Materia Orgánica
Na	Sodio

pH	Potencial de Hidrógeno
Ca	Calcio
Slope	Pendiente
Flow	Escorrentía
MDE	Modelo Digital de Elevación

Cuadro 2: Proporción de contribución y varianza acumulada por cada PCA.

	<b>Comp. 1</b>	<b>Comp. 2</b>	<b>Comp. 3</b>	<b>Comp. 4</b>	<b>Comp. 5</b>	<b>Comp. 6</b>	<b>Comp. 7</b>
Prop. de varianza	0.339	0.175	0.124	0.081	0.047	0.044	0.031
Prop. acumulada	0.339	0.515	0.639	0.721	0.769	0.813	0.845
	<b>Comp. 8</b>	<b>Comp. 9</b>	<b>Comp. 10</b>	<b>Comp. 11</b>	<b>Comp. 12</b>	<b>Comp. 13</b>	<b>Comp. 14</b>
Prop. de varianza	0.028	0.022	0.018	0.016	0.012	0.010	0.009
Proporción acumulada	0.873	0.895	0.913	0.929	0.942	0.953	0.962
	<b>Comp. 15</b>	<b>Comp. 16</b>	<b>Comp. 17</b>	<b>Comp. 18</b>	<b>Comp. 19</b>	<b>Comp. 20</b>	<b>Comp. 21</b>

Prop. de varianza	0.008	0.006	0.005	0.004	0.003	0.002	0.002
Proporción acumulada	0.970	0.977	0.982	0.986	0.989	0.992	0.994
	<b>Comp.</b> <b>22</b>	<b>Comp.</b> <b>23</b>	<b>Comp.</b> <b>24</b>	<b>Comp.</b> <b>25</b>	<b>Comp.</b> <b>26</b>	<b>Comp.</b> <b>27</b>	<b>Comp.</b> <b>28</b>
Prop. de varianza	0.001	0.0009	0.0007	0.0007	0.0004	0.0003	0.0002
Proporción acumulada	0.996	0.997	0.997	0.998	0.998	0.999	0.999
	<b>Comp.</b> <b>29</b>	<b>Comp.</b> <b>30</b>	<b>Comp.</b> <b>31</b>	<b>Comp.</b> <b>32</b>	<b>Comp.</b> <b>33</b>	<b>Comp.</b> <b>34</b>	<b>Comp.</b> <b>35</b>
Prop. de varianza	0.0001	0.0001	8.21 e- 05	0.00005	2.752e- 05	5.606e- 06	3.127e- 16
Proporción acumulada	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	1.000	1.000