



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES IZTACALA

EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN  
CINCO PLANTAS ENDÉMICAS DE  
MÉXICO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
BIÓLOGA

P R E S E N T A

MARIA PAULA OLGUÍN PÉREZ

DIRECTORA DE TESIS

DRA. TANIA GARRIDO GARDUÑO



Facultad de Estudios Superiores  
**IZTACALA**

LOS REYES IZTACALA, TLALNEPANTLA, ESTADO DE MÉXICO, 2023



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **AGRADECIMIENTOS ACADÉMICOS**

A la Dra. Tania Garrido Garduño por la oportunidad y el apoyo para hacer este trabajo realidad. Le agradezco por compartir conmigo su experiencia y conocimiento, la admiro mucho.

A mi comité asesor por los aportes, asesorías y revisiones para realizar este trabajo: Dr. David Prieto Torres, Dr. Carlos Luna Aranguré, Dr. Oswaldo Téllez Valdés y Dra. Mayra Hernández Moreno. Les agradezco mucho su tiempo, conocimientos, revisiones y materiales que hicieron posible culminar este trabajo.

A mis profesoras y profesores que me dieron clase durante la licenciatura y me permitieron conocer lo bello de estudiar la vida.

A la Dra. Sofia Solórzano por permitirme cursar LIC V en su laboratorio y compartir conmigo sus conocimientos, así como a Delil Chincoya por enseñarme durante mi estancia.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y la Facultad de Estudios Superiores Iztacala por darme el lugar y las oportunidades para realizar mis estudios.

## **AGRADECIMIENTOS PERSONALES**

A mi mamá y Marisol, por apoyarme y acompañarme siempre, son mi gran motivación; mami gracias por creer en mis sueños, te debo todo. A Gabrielito, por ser mi hermano y compartir tanto conmigo, te extraño diario. A mi papá, por dejarme ser. A la otra parte de mi familia: Boris, Canito, Carmelo, Yuki, Shampoo, Yoongi y Janis por hacerme tan adorable compañía.

A mi tía Mari, Mitzi, Kaori y Erick, por dejarme estar con ustedes y creer en mí. A mi padrino por siempre estar al pendiente de mí, lo extraño mucho. Gracias Maribel y Mario, por siempre escucharme, aconsejarme y compartir las risas nada escandalosas.

A Marielita, por tu amor incondicional, no sabes lo afortunada que me siento de conocerte, tu apoyo me dio la confianza de escoger esta bella carrera, gracias por tu compañía en todos mis sueños. Y gracias a tu familia que desde siempre me adoptó: mamá Raquel, Vale y Mario. Al Maestro Saulo por hacerme voltear a ver la biología.

Agradezco a mis amigas y amigos de FESI, por haber llenado de grandes aventuras estos años. Arte, por las mejores experiencias de esta etapa, eres un sol ☀️. Bruno y Jos, por siempre andar conmigo, confiar en mí y crear tantas ideas juntos. Ruthsi y Steve por tanto amor, apoyo y compañía en los malos y buenos momentos; gracias, Leo Arami por existir, me emociona mucho verte crecer. Dianita, por ser mi primera amiga de FESI y aun coincidir, eres un verdadero arcoíris. Gracias Abril, Tania, Edhit, Isaac y Damian. Las y los admiro mucho, he aprendido mucho junto a ustedes.

A mis amigas de siempre que admiro tanto y me dan mucha fuerza: Val, Allis, Pame y Dalila.

A mis compañeras y compañeros de laboratorio, por ser tan amables y haberme ayudado tanto, les debo muchas, especialmente a Isa, Gen, Karen, Alexa, Arte y Daniel. Son muy talentosas y siempre aprendo algo nuevo con ustedes. Tania, jamás acabaría de devolverte todo el apoyo que me has dado, gracias por la confianza, admiro mucho la gran científica y mujer que eres. Me siento muy afortunada de haber estado en un laboratorio muy bonito.

A Bangtan por ser mis amigos más personales durante la pandemia y a Silvana Estrada por acompañarme en mis duelos, milagros y desastres.

Gracias al conocimiento libre. Y gracias a las mujeres y niñas que hacen ciencia.

## ÍNDICE

RESUMEN.....	1
INTRODUCCIÓN .....	2
Cambio Climático y su efecto en la biodiversidad .....	2
Modelos de Nicho Ecológico como herramienta de estudio ante el cambio climático .....	3
Las plantas ante el cambio climático .....	4
HIPÓTESIS .....	9
OBJETIVOS.....	9
MATERIAL Y MÉTODOS .....	10
Obtención de datos de presencia para las especies .....	10
Obtención de datos climáticos históricos y futuros .....	11
Obtención de datos del suelo .....	13
Modelos de nicho ecológico y distribución potencial .....	14
Análisis espaciales .....	16
RESULTADOS .....	18
DISCUSIÓN.....	34
CONCLUSIONES .....	38
REFERENCIAS .....	39
ANEXO 1 .....	48

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Variables bioclimáticas disponibles en el portal WorldClim, utilizadas para la realización de los modelos de distribución potencial actual y futuro en este trabajo. ....	12
<b>Tabla 2.</b> Variables del suelo disponibles en el portal SoilGrids utilizadas para la realización de los modelos de distribución potencial actual y futuro en este trabajo.....	14
<b>Tabla 3.</b> Variables climáticas y edáficas con mayor contribución en los modelos de distribución potencial de las cinco especies de plantas endémicas analizadas en este estudio. ....	18
<b>Tabla 4.</b> Datos utilizados en la reconstrucción de los modelos de distribución potencial actual y futuras de las cinco especies de plantas analizadas en este estudio. Se muestran los datos descargados y datos únicos, las variables climáticas, tipo de respuesta, multiplicadores de regularización (RM), resultado del ROC parcial, porcentaje de omisión y valor del umbral de omisión del 10% de cada modelo.....	20
<b>Tabla 5.</b> Proporción de cambio (%) en el área de distribución potencial de cada especie de planta analizada en este estudio. Se indica para cada escenario climático futuro (“optimista” y “pesimista”) bajo los supuestos de “dispersión” y “no dispersión” en tres ventanas de tiempo. Se muestra el área de distribución potencial presente y áreas estables para su comparación. ....	25

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Especies de plantas utilizadas en este estudio: A) <i>Penstemon campanulatus</i> , B) <i>Psittacanthus auriculatus</i> , C) <i>Salvia chamaedryoides</i> , D) <i>Salvia circinnata</i> y E) <i>Salvia mexicana</i> . Fotos obtenidas en: <a href="https://enciclovida.mx/">https://enciclovida.mx/</a> .....	8
<b>Figura 2.</b> Modelo de distribución potencial en escenario climático actual de <i>Penstemon campanulatus</i> . .....	19
<b>Figura 3.</b> Modelo de distribución potencial en escenario climático actual de <i>Psittacanthus auriculatus</i> .....	21
<b>Figura 4.</b> Modelo de distribución potencial en escenario climático actual de <i>Salvia chamaedryoides</i> .....	23
<b>Figura 5.</b> Modelo de distribución potencial en escenario climático actual de <i>Salvia circinnata</i> ..	24
<b>Figura 6.</b> Modelo de distribución potencial en escenario climático actual de <i>Salvia mexicana</i> ...	24
<b>Figura 7.</b> Distribución potencial de <i>Penstemon campanulatus</i> en dos escenarios climáticos futuros (“Optimista” vs. “Pesimista”) y tres ventanas de tiempo distintas en comparación con su distribución potencial actual, bajo el supuesto de “dispersión”. .....	26
<b>Figura 8.</b> Distribución potencial de <i>Psittacanthus auriculatus</i> en dos escenarios climáticos futuros (“Optimista” vs. “Pesimista”) y tres ventanas de tiempo distintas en comparación con su distribución potencial actual, bajo el supuesto de “dispersión”. .....	27
<b>Figura 9.</b> Distribución potencial de <i>Salvia chamaedryoides</i> en dos escenarios climáticos futuros (“Optimista” vs. “Pesimista”) y tres ventanas de tiempo distintas en comparación con su distribución actual del presente, bajo el supuesto de “dispersión”. .....	28
<b>Figura 10.</b> Distribución potencial de <i>Salvia circinnata</i> en dos escenarios climáticos futuros (“Optimista” vs. “Pesimista”) y tres ventanas de tiempo distintas en comparación con su distribución potencial actual, bajo el supuesto de “dispersión”. .....	29
<b>Figura 11.</b> Distribución potencial de <i>Salvia mexicana</i> en dos escenarios climáticos futuros (“Optimista” vs. “Pesimista”) y tres ventanas de tiempo distintas, en comparación con su distribución potencial actual, bajo el supuesto de “dispersión”. .....	30
<b>Figura 12.</b> Áreas estables de <i>Penstemon campanulatus</i> bajo los escenarios de cambio climático SSP245 y SSP585, en comparación con su distribución potencial actual. ....	31
<b>Figura 13.</b> Áreas estables de <i>Psittacanthus auriculatus</i> bajo los escenarios de cambio climático SSP245 y SSP585, en comparación con su distribución potencial actual. ....	31

<b>Figura 14.</b> Áreas de <i>Salvia chamaedryoides</i> bajo los escenarios de cambio climático SSP245 y SSP585, en comparación con su distribución potencial actual. ....	32
<b>Figura 15.</b> Áreas estables de <i>Salvia circinnata</i> bajo los escenarios de cambio climático SSP245 y SSP585, en comparación con su distribución potencial actual. ....	32
<b>Figura 16.</b> Áreas estables de <i>Salvia mexicana</i> bajo los escenarios de cambio climático SSP245 y SSP585, en comparación con su distribución potencial actual. ....	33
<b>Figura 17.</b> Distribución potencial de <i>Penstemon campanulatus</i> en dos escenarios climáticos futuros (“Optimista” vs. “Pesimista”) y tres ventanas de tiempo distintas, en comparación con su distribución potencial actual, bajo el supuesto de “no dispersión”. ....	48
<b>Figura 18.</b> Distribución potencial de <i>Psittacanthus auriculatus</i> en dos escenarios climáticos futuros (“Optimista” vs. “Pesimista”) y tres ventanas de tiempo distintas, en comparación con su distribución potencial actual, bajo el supuesto de “no dispersión”. ....	49
<b>Figura 19.</b> Distribución potencial de <i>Salvia chamaedryoides</i> en dos escenarios climáticos futuros (“Optimista” vs. “Pesimista”) y tres ventanas de tiempo distintas, en comparación con su distribución potencial actual, bajo el supuesto de “no dispersión”. ....	50
<b>Figura 20.</b> Distribución potencial de <i>Salvia circinnata</i> en dos escenarios climáticos futuros (“Optimista” vs. “Pesimista”) y tres ventanas de tiempo distintas, en comparación con su distribución potencial actual, bajo el supuesto de “no dispersión”. ....	51
<b>Figura 21.</b> Distribución potencial de <i>Salvia mexicana</i> en dos escenarios climáticos futuros (“Optimista” vs. “Pesimista”) y tres ventanas de tiempo distintas, en comparación con su distribución potencial actual, bajo el supuesto de “no dispersión”. ....	52

## RESUMEN

El cambio climático global está relacionado a diversos fenómenos meteorológicos y climáticos extremos en el mundo, por lo cual es considerado como una de las principales amenazas para la biodiversidad del planeta. Como consecuencia de este fenómeno global, se han observado cambios en los patrones de distribución de diversas especies como respuesta a las alteraciones ambientales, lo cual posiblemente conlleve a variaciones en los patrones de riqueza y diversidad de los ecosistemas.

A la fecha, el modelado de nicho ecológico y de distribución de especies son una herramienta útil para estimar el posible efecto del cambio climático en la distribución de los taxones, permitiendo analizar las potenciales dinámicas de respuesta de las especies ante estos escenarios. Esta información es importante para poder identificar los niveles de protección y riesgos de extinción de las especies, y de esta manera poder proponer estrategias de conservación más eficaces.

El objetivo de este trabajo fue analizar el potencial efecto del cambio climático en los patrones geográficos de distribución de cinco especies endémicas de México (*Penstemon campanulatus*, *Psittacanthus auriculatus*, *Salvia chamaedryoides*, *S. circinnata* y *S. mexicana*), consideradas como importante fuente de alimento para organismos polinizadores, y con importancia medicinal en algunas regiones del país. Se realizaron modelos actuales y de las ventanas de tiempo de 2040, 2060 y 2080, considerando dos escenarios de cambio climático (SSP245 Y SSP585) y dos supuestos de dispersión, además se obtuvieron los mapas de áreas estables a lo largo del tiempo para ambos escenarios.

En términos generales, los resultados muestran una reducción de las superficies de distribución potencial idónea (desde un 22.76 a un 90.05%) como la respuesta más probable para las especies dados los escenarios de cambio climático futuro. La especie que presentó un menor impacto de cambio (reducción) fue *S. circinnata* (56.32%), mientras *S. chamaedryoides* fue la de mayor proporción de pérdida de su distribución potencial (90.05%) bajo el escenario menos optimista. Los modelos permiten concluir que, aun considerando escenarios optimistas de cambio climático futuro, todas las especies de plantas analizadas presentan una reducción de la superficie de distribución potencial idónea, lo cual podría poner en riesgo de extinción a estas especies a lo largo del tiempo y así impactar a otras especies debido a las interacciones que mantienen.

## INTRODUCCIÓN

### **Cambio Climático y su efecto en la biodiversidad**

El cambio climático global (CCG) se refiere a un *cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables* (UN, 1992). En consecuencia, la temperatura global de la superficie ha ido aumentando más rápidamente desde 1970 que en cualquier otro periodo (IPCC, 2023). En la actualidad, el CCG se asocia a fenómenos meteorológicos y climáticos extremos a nivel global, así como a efectos adversos en la seguridad alimentaria e hídrica, lo cual ha dado paso a pérdidas y daños en la naturaleza, ya que a medida que aumentan los niveles del CCG, también aumentan los riesgos de la pérdida irreversible de la biodiversidad en los ecosistemas (IPCC, 2023), por esa razón se le ha considerado como una de las amenazas principales de la biodiversidad del planeta (Thomas *et al.*, 2004; Bellar *et al.*, 2012).

A la fecha se ha observado que las especies están respondiendo a estos cambios en el clima, modificando su distribución (Walther *et al.*, 2002; Parmesan y Yohe, 2003; Chen *et al.*, 2011; Bellar *et al.*, 2012), principalmente por la magnitud de las temperaturas extremas (IPCC, 2023). De hecho, se ha documentado que algunas especies (e.g. arañas, insectos, árboles) han sido capaces de desplazarse de su área de distribución ante estos cambios (Chen *et al.*, 2011; Matías, 2012). Lo cual ha generado una particular preocupación ya que aquellas especies que no sean capaces de poder dispersarse o de adaptarse a estos cambios ambientales, podrían extinguirse localmente y alterar los patrones de riqueza y diversidad (Thomas *et al.*, 2004; Berg *et al.*, 2010; Urban, 2015). Se prevé el CCG no solo cambie radicalmente la distribución de las especies, sino que también afecte las redes tróficas y el funcionamiento de los ecosistemas, provocando en el peor escenario la extinción de innumerables especies (Bellar *et al.*, 2012).

Los escenarios climáticos del futuro facilitan el análisis de los posibles futuros cambios climáticos, además de las vulnerabilidades, adaptaciones y estrategias de mitigación. A estos escenarios se les conoce como Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP, por sus siglas en inglés, Shared Socioeconomic Pathways). Las SSP se basan en 5 escenarios diferentes (Riahi *et al.*, 2017):

1. *SSP1 – Sostenibilidad*: En este escenario se considera que se toma el camino “verde”, es decir, que existen pocos retos para la mitigación y la adaptación, el mundo se desplaza en un camino más sostenible y hay una menor intensidad de consumo de recursos y energía.
2. *SSP2 – Mitad del camino*: Este escenario considera retos medios para la mitigación y la adaptación, el mundo sigue una trayectoria parecida a los patrones históricos, el desarrollo y crecimiento avanza de manera desigual entre países, pero en general disminuye un poco la intensidad del uso de recursos y energía.
3. *SSP3 – Rivalidad regional*: Este escenario considera grandes retos para la mitigación y la adaptación ya que los países se centran en alcanzar objetivos de seguridad energética y alimentaria dentro de sus propias regiones a expensas de un desarrollo global, mientras que el consumo es intenso en recursos y energía. Además, hay una fuerte degradación del medio ambiente por la escasa prioridad ambiental internacional.
4. *SSP4 – Desigualdad*: Este escenario considera pocos retos para la mitigación, pero muchos retos para la adaptación. Hay una gran desigualdad y estratificación entre países y dentro de ellos, los conflictos sociales son frecuentes, se invierte en combustibles intensivos de carbono, pero también en fuentes de energía bajas en carbono y las políticas medioambientales son locales, en torno a las zonas de renta media y alta.
5. *SSP5 – Desarrollo basado en combustibles fósiles*: Este escenario considera altos retos para la mitigación, bajos retos para la adaptación. Existe un gran desarrollo económico y social (como vía hacia el desarrollo sostenible), pero hay una explotación de abundantes recursos de combustibles fósiles y la adopción de estilos de vida con consumo intensivo en recursos y energía en todo el mundo. Los problemas medioambientales locales se gestionan con éxito y se confía en la capacidad de gestionar eficazmente los sistemas sociales y ecológicos.

### **Modelos de Nicho Ecológico como herramienta de estudio ante el cambio climático**

Conocer los factores que determinan el área de distribución geográfica de las especies es de gran importancia para poder predecir los futuros cambios en su distribución debido al cambio climático (Estrada *et al.*, 2015). Una herramienta que se ha utilizado para modelar el posible efecto del cambio climático en la distribución de las especies es el Modelado de Nicho Ecológico (MNE), que es ocupado para caracterizar y estimar las condiciones idóneas (espacio ecológico) de distribución (espacio geográfico) de las especies a diferentes escalas espaciales y temporales,

incluso bajo escenarios climáticos pasados y futuros (Soberón y Nakamura, 2009), a través de los Modelos de Distribución de Especies (MDE). Estos modelos se han convertido en una herramienta esencial para observar de manera espacial los posibles efectos del cambio climático en los ecosistemas naturales (Woodin *et al.*, 2013), ya que permiten evaluar los cambios en la idoneidad del hábitat a partir de datos sobre el paisaje y la presencia de especies (Laala *et al.*, 2021), así como identificar y definir cuáles son los factores ambientales condicionantes de la distribución de las especies (Guisan y Zimmermann 2000).

Para desarrollar estos modelos, un algoritmo que se ha utilizado ampliamente es Maxent (Phillips *et al.*, 2004), el cual trabaja bajo el principio de máxima entropía (es decir, la más dispersa o la más cercana a la uniforme) para conferir un valor de probabilidad a cada sitio de acuerdo con los niveles de idoneidad ambiental que presenten para la especie (Phillips *et al.*, 2006). Este algoritmo utiliza los datos de presencia de la especie, además de datos ambientales (Guisan y Zimmermann, 2000).

Este método es ampliamente utilizado debido a que es posible usarlo solamente con datos de presencia (Phillips *et al.*, 2006), lo que llega a ser verdaderamente útil debido a la falta de información sobre datos de ausencia. Además, se puede ejecutar con distintos tipos de datos ambientales (tanto datos discretos como continuos; Ortega-Huerta y Peterson, 2008), se permite cambiar distintos parámetros (Phillips y Dudík, 2008) y actualmente se puede someter a una evaluación para seleccionar los mejores parámetros para el modelo (Cobos *et al.*, 2019).

### **Las plantas ante el cambio climático**

Conocer cómo responden las especies ante estos escenarios puede ser de utilidad en distintos ámbitos de la conservación, principalmente porque nos permite identificar aquellas especies que se encuentran amenazadas de extinción y, así poder proponer estrategias de conservación eficaces (Murray *et al.*, 2014). Un ejemplo de esto es la propuesta del uso de seis especies de arbustos en proyectos de restauración en las zonas semi áridas de México debido a que son las especies que mantuvieron o incrementaron su distribución bajo un escenario de CCG (Gelviz-Gelvez *et al.*, 2015). También se han desarrollado trabajos para proponer áreas prioritarias de conservación, basadas en los modelos de distribución potencial bajo escenarios de CCG (Prieto-Torres *et al.*, 2016; Santos-Hernández *et al.*, 2021), como el realizado con 22 especies de bosque tropical en México, donde se observó que bajo dos escenarios de CCG la distribución potencial de las

especies se redujo y se desplazó hacia regiones con mayor elevación, dado esto, los autores propusieron áreas para la conservación del bosque tropical donde se espera que las condiciones climáticas prevalezcan (Santos-Hernández *et al.*, 2021). De igual manera, con esta herramienta se ha observado que las áreas protegidas del país posiblemente no serán efectivas para la conservación de las especies (Lira *et al.*, 2009b; Mendoza-González *et al.*, 2013; Ovando-Hidalgo *et al.*, 2020).

No obstante, es importante considerar que las áreas de distribución están determinadas por distintos factores, como puede ser su ciclo de vida (Lavergne *et al.*, 2004; Van der Verken *et al.*, 2007), su tolerancia ambiental (Woodward y Williams, 1987; Thompson *et al.*, 1999) o su capacidad de dispersión (Lester *et al.*, 2007). Es posible que el impacto del CCG afecte en una mayor medida a aquellas especies que su capacidad de dispersión sea reducida y, por lo tanto, no tengan la posibilidad de colonizar nuevos hábitats con facilidad (Berg *et al.*, 2010); por esta razón, los patrones de distribución que puedan presentar las plantas bajo escenarios de cambio climático van desde mantener su área de distribución a aumentarla o disminuirla. En el caso específico de las plantas endémicas, se he encontrado que su distribución (caso de plantas endémicas medicinales en China) está determinada por múltiples factores, como la estabilidad climática y la densidad poblacional (Feng *et al.*, 2022).

Se han encontrado diversas respuestas en especies con una distribución muy restringida, como el caso *Centaurea corymbosa* (especie endémica del mediterráneo), donde se observó que el aumento de temperatura y la disminución de la humedad tienen un impacto negativo en su ciclo de vida, además de que los fenómenos climáticos extremos aumentan su riesgo de extinción y disminuyen el tiempo de recuperación de la especie, asimismo concluyeron que un escenario cálido tiene un mayor impacto en la viabilidad de su población que un escenario seco (Belaid *et al.*, 2018). Otro caso es el de *Geum radiatum*, una hierba endémica de los Apalaches, en la que se encontró que en escenarios de menor humedad existe una reducción en el crecimiento de la población y que bajo escenarios futuros reduce la idoneidad ambiental de la especie; en el trabajo con *G. radiatum* concluyen que posiblemente los refugios climáticos que actualmente protegen a las especies endémicas de los cambios macroclimáticos extremos, podrían no ser capaces de hacerlo con el cambio climático previsto (Ulrey *et al.*, 2016). Con especies endémicas en islas, como *Dracaena draco* subsp. *caboverdeana*, *Phoenix atlantica* y *Sideroxylon marginatum*, se ha

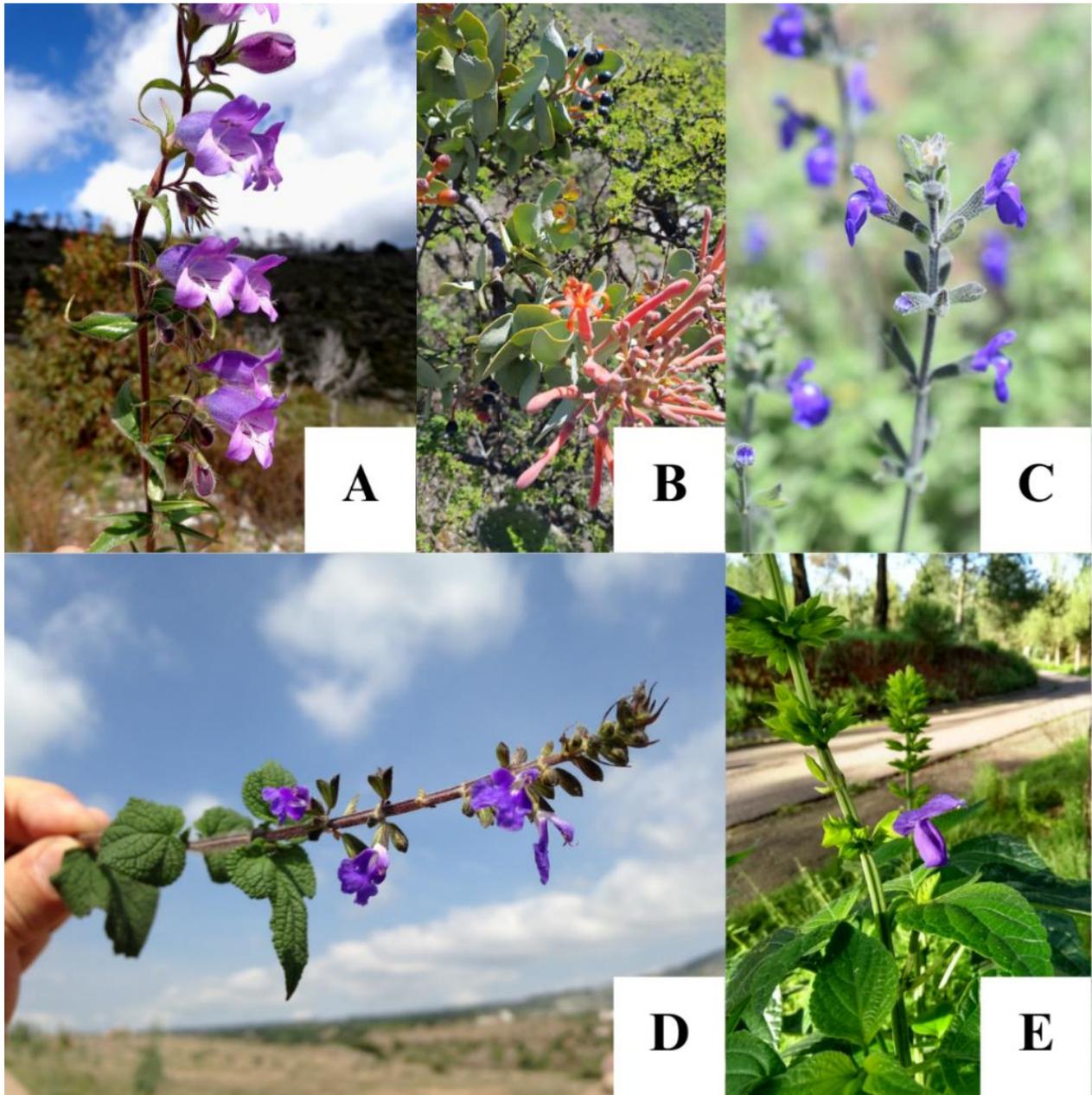
encontrado que, bajo escenarios climáticos futuros, dos de estas especies disminuirán su distribución, mientras que una de ellas (*P. atlantica*), la más adaptada a condiciones áridas, aumentará su distribución (Varela *et al.*, 2022). Estos trabajos muestran que las plantas endémicas podrían mostrar diversas respuestas ante el CCG, dependiendo de diversos factores, además de que su distribución podría aumentarse y no solamente reducirse o mantenerse debido a su ya restringida distribución.

En particular para este trabajo se han seleccionado cinco especies de plantas endémicas de México (Figura 1; Cornejo-Tenorio e Ibarra-Manríquez, 2011; Martínez-Gordillo *et al.*, 2013; Villaseñor, 2016; Zacarías-Correa *et al.*, 2019).

- *Penstemon campanulatus* (Cav.) Willd.: Es una herbácea perenne de 0.80-1.2 m, pertenece a la familia Plantaginaceae, tiene una inflorescencia color azul-violeta. Habita en bosques de coníferas, de encino y encino-pino, pastizales y matorrales derivados por la actividad humana. Crece en climas que van del templado subhúmedo al semifrío, principalmente en rocas de tipo basalto y andesita y suelos de tipo andosol. (Zacarías-Correa *et al.*, 2019).
- *Psittacanthus auriculatus* (Oliv.) Eichler: Es un muérdago, pertenece a la familia Loranthaceae, sus flores son de color rojo coral y es una especie hemiparásita (realiza fotosíntesis, pero depende del hospedero para obtener agua y minerales). Se une a su hospedero a través del haustorio, parasita comúnmente a los huizaches *Vachellia bilimekii*, *V. campeachiana*, *V. farnesiana*, *V. pennatula* y *V. schaffneri*. Se distribuye ampliamente en matorrales, selvas bajas caducifolias y encinares secos (Pérez-Crespo *et al.*, 2016; Ornelas, 2022).
- *Salvia chamaedryoides* Cav.: Es una herbácea perenne de 0.2 a 0.8 m, pertenece a la familia Lamiaceae, tiene flores azules. Habita en bosques de *Quercus* y *Juniperus*, pastizales y matorrales (Rzedowski y Rzedowski, 2001; Turner, 2013)
- *Salvia circinnata* Cav.: Es una herbácea perenne de 0.4 a 1.5 m, pertenece a la familia Lamiaceae, tiene flores azules o moradas. Habita en pastizales y matorrales, de preferencia en áreas perturbadas (Rzedowski y Rzedowski, 2001; Cornejo-Tenorio e Ibarra-Manríquez, 2011).

- *Salvia mexicana* L.: Es una herbácea perenne de 0.3 a 2 m, pertenece a la familia Lamiaceae, tiene flores azules o moradas. Habita en bosque de *Quercus*, bosque de *Pinus*, bosque de *Pinus-Quercus*, bosque de *Abies*, bosque mesófilo, matorral, pastizal y sitios perturbados (Rzedowski y Rzedowski, 2001; Cornejo-Tenorio e Ibarra-Manríquez, 2011).

Estas especies son de gran importancia local debido a que son utilizadas en la medicina tradicional por las comunidades indígenas por sus propiedades antimicrobianas (*S. chamaedryoides*, *P. campanulatus*), antinociceptivas (*S. circinnata*), antiinflamatorias (*S. circinnata*, *S. mexicana*) y antifúngicas (*P. campanulatus*). Igualmente son utilizadas como plantas ornamentales y alimento para animales (*P. auriculatus*; Lira *et al.*, 2009a; Zajdel *et al.*, 2012; Bisio *et al.*, 2017; Ornelas *et al.* 2018; Afonso *et al.*, 2019; Moreno-Pérez *et al.*, 2021; Sepúlveda-Cuellar *et al.*, 2021), además, se conoce que son especies polinizadas por colibríes (Azpeitia y Lara, 2006; Lara y Ornelas, 2008; Lara-Rodríguez *et al.*, 2012; Espino-Espino *et al.*, 2014; Cardona *et al.*, 2020), siendo importantes en la red trófica de las especies. Cuatro de estas especies de plantas tienen una amplia distribución sólo en México: *P. campanulatus* (presente en 24 estados del país), *S. mexicana* (23), *S. circinnata* (13) y *S. chamaedryoides* (12), mientras que *P. auriculatus* solo está presente en 2 estados del país (Martínez-Gordillo *et al.*, 2013; Villaseñor, 2016; Martínez-Gordillo *et al.*, 2017; Zacarías-Correa *et al.*, 2019). Dada esta importancia para el ser humano y su valor ecológico como especies endémicas de México, surge la motivación por este estudio, ya que es de gran interés estimar y entender el nicho ecológico que ocupan y que posiblemente ocupará ante el cambio climático, para así priorizar y concientizar la importancia y por lo tanto la conservación de estas especies de plantas.



**Figura 1.** Especies de plantas utilizadas en este estudio: A) *Penstemon campanulatus*, B) *Psittacanthus auriculatus*, C) *Salvia chamaedryoides*, D) *Salvia circinnata* y E) *Salvia mexicana*. Fotos obtenidas en: <https://enciclovida.mx/>

## **HIPÓTESIS**

Se espera que las especies de plantas con una distribución amplia en la actualidad presenten menos cambios ante los escenarios de Cambio Climático Global en comparación a aquellas que tienen una distribución restringida, debido a que probablemente las especies con amplia distribución tengan límites de tolerancia y capacidad de respuesta mayores, haciéndolas menos vulnerables, contrario a las especies con una distribución restringida.

## **OBJETIVOS**

### **General**

Analizar el potencial efecto del cambio climático global en el futuro (años 2040, 2060 y 2080) en los patrones de distribución de cinco especies endémicas de México (*Penstemon campanulatus*, *Psittacanthus auriculatus*, *Salvia chamaedryoides*, *S. circinnata* y *S. mexicana*) para así identificar la posible respuesta de estas plantas ante el cambio climático global.

### **Particulares**

1. Reconstruir los nichos ecológicos de cinco especies endémicas de México analizadas para así caracterizar sus patrones geográficos de distribución bajo escenarios climáticos actuales y futuros.
2. Estimar los impactos del cambio climático global en los patrones de distribución geográfica potencial de las cinco especies endémicas analizadas considerando dos escenarios distintos de Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP245 y SSP585) y de dispersión (dispersión limitada vs. no dispersión) para así evaluar los riesgos de extinción y amenaza de las especies a largo plazo.
3. Identificar áreas estables para cada una de las cinco especies de plantas endémicas de México para así considerar posibles áreas de conservación a largo plazo.

## MATERIAL Y MÉTODOS

### Obtención de datos de presencia para las especies

Para las cinco especies de plantas endémicas se realizaron descargas de los datos de presencia disponibles en el portal de *Global Biodiversity Information Facility* (GBIF; <https://www.gbif.org/>): *P. campanulatus* (<https://doi.org/10.15468/dl.5rb8vu>), *P. auriculatus* (<https://doi.org/10.15468/dl.x9hehr>), *S. chamaedryoides* (<https://doi.org/10.15468/dl.nv2zsb>), *S. circinnata* (<https://doi.org/10.15468/dl.3cnuay>) y *S. mexicana* (<https://doi.org/10.15468/dl.nuhjge>). GBIF es un portal de acceso abierto a datos de presencia sobre todos los tipos de vida en la Tierra, alimentada por una red colaborativa internacional (GBIF.org, 2023). Para la descarga individual de cada una de las especies se consultó la nomenclatura aceptada y las sinonimias en el portal de *Plants of the World Online* (POWO; <https://powo.science.kew.org/>) con el fin de descargar todos los registros históricos de presencia que se encontraran bajo el nombre de las sinonimias y la nomenclatura aceptada hasta el momento para cada especie. El portal de POWO pone a disposición del público datos digitalizados de la flora mundial recopilados por colaboración internacional y es posible consultar en ella la distribución, sinonimias, publicaciones, imágenes, además de otros datos de las especies de la flora del mundo (Crowe *et al.*, 2017).

Debido a que los datos descargados para cada una de las especies no se pueden verificar directamente se realizó una limpieza y depuración de los datos de presencia para reducir el error que pudiera existir de la digitalización de los datos (Maldonado *et al.*, 2015). Para la limpieza y depuración de datos se realizó un filtrado temporal, espacial y ambiental (Prieto-Torres *et al.*, 2020), consistió en: 1) eliminar aquellos datos que no contaran con coordenadas, año y localidad de colecta; 2) separar los datos en dos bases distintas, una de ellas corresponde a los datos de presencia registrados para antes del año 2001 y la otra para los datos de presencia registrados para el año 2001 y años posteriores (debido a que solo se cuenta con datos climáticos para los años anteriores al 2001); 3) eliminar aquellos datos que no corresponden a los rangos geográficos conocidos de las especies (consultadas en la distribución que proporciona el portal de POWO y en la literatura); 4) descartar datos duplicados, además de aquellos que se encontraran a una separación menor a 1 km<sup>2</sup>, conservando sólo un registro; y 5) seleccionar los datos de presencia registrados para después del 2001 que sí se usarán para el modelo valorados con un filtrado

espacial y ambiental. Esta limpieza se realizó usando la librería *dplyr* (Wickham *et al.*, 2023) en el software estadístico RStudio (Posit team, 2022).

### **Obtención de datos climáticos históricos y futuros**

La información ambiental utilizada para la elaboración de los modelos se obtuvo del portal de WorldClim (<https://www.worldclim.org/data/index.html>). Para las capas de datos climáticos históricos se descargó la Versión 2 (Fick y Hijmans, 2017) que corresponde a 19 variables bioclimáticas (Tabla 1), que son el promedio en datos de precipitación y temperatura para los años de 1970-2000. Posteriormente, se realizó una selección de variables para evitar la correlación entre ellas y que esto no afectara el desarrollo de los modelos, ya que se ha observado que la colinealidad de las variables puede dificultar la caracterización adecuada del nicho ecológico de las especies (Anderson *et al.*, 2003; Cobos *et al.*, 2019). Se armaron tres grupos de variables distintos utilizando: 1) Correlación de Pearson ( $r < 0.8$ ) y un Factor de Inflación de Varianza ( $VIF < 10$ ) usando las librerías *corrplot* (Wei y Simko, 2021) y *usdm* (Naimi *et al.*, 2014) en el software RStudio; 2) Análisis de Componentes Principales (PCA), para la obtención de un conjunto de cinco variables que explican aproximadamente el 93% de la varianza total de las variables climáticas (e.g. Dupin *et al.*, 2011; Hanspach *et al.*, 2011); y 3) Correlación de Pearson ( $r < 0.85$ ) usando la librería de *ntbox* (Osorio *et al.*, 2020) en el software RStudio. Cada grupo de variables se evaluó para la selección del set a usar para la realización de los modelos con la librería *kuenm* (Cobos *et al.*, 2019) en RStudio.

Los datos climáticos futuros igualmente se descargaron del portal de WorldClim, estos corresponden a las proyecciones climáticas del *Coupled Model Intercomparison Project 6* (CMIP6); de estos se seleccionaron 3 Modelos Climáticos Globales (GCMs, por sus siglas en inglés, Global Climate Model): BCC-CSM2MR (Beijing Climate Center Climate System Model; Wu *et al.*, 2018), CanESM5 (Canadian Earth System Model; Swart *et al.*, 2019b) y MIROC6 (Model for Interdisciplinary Research on Climate; Shiogama *et al.*, 2019). La selección de los GCMs se realizó considerando que: 1) BCC\_CSM estima la concentración atmosférica de CO<sub>2</sub>, siendo un modelo del ciclo clima-carbono, esto toma relevancia debido a que la concentración global de CO<sub>2</sub> atmosférico está estrechamente correlacionada con el fenómeno de El Niño/Oscilación del Sur (ENSO; Wu, *et al.*, 2013); 2) CanESM5 tiene una gran estabilidad en las simulaciones a largo plazo, además considera condiciones atmosféricas y oceánicas (incluyendo

el ENSO), el hielo marino y ciclos de carbono terrestre y oceánico (Swart *et al.*, 2019a); 3) MIROC6 toma en cuenta condiciones observadas en el océano, el hielo marino y la atmósfera, además predice bien a más allá de un año la variabilidad tropical en la estratosfera y también considera las predicciones del fenómeno del ENSO (Kataoka *et al.*, 2020).

**Tabla 1.** Variables bioclimáticas disponibles en el portal WorldClim, utilizadas para la realización de los modelos de distribución potencial actual y futuro en este trabajo.

<b>Variable bioclimática</b>	<b>Clave</b>	<b>Unidades</b>
Temperatura media anual	BIO 1	°C
Rango de temperatura diurna (media mensual (temperatura máxima – temperatura mínima))	BIO 2	°C
Isotermalidad (BIO2/BIO7) x 100	BIO 3	-
Estacionalidad en la temperatura (desviación estándar x 100)	BIO 4	-
Temperatura máxima del mes más cálido	BIO 5	°C
Temperatura mínima del mes más frío	BIO 6	°C
Rango anual de temperatura (BIO5-BIO6)	BIO 7	°C
Temperatura media del trimestre más lluvioso	BIO 8	°C
Temperatura media del trimestre más seco	BIO 9	°C
Temperatura media del trimestre más cálido	BIO 10	°C
Temperatura media del trimestre más frío	BIO 11	°C
Precipitación anual	BIO 12	mm
Precipitación del mes más lluvioso	BIO 13	mm
Precipitación del mes más seco	BIO 14	mm
Estacionalidad en la precipitación (coeficiente de variación)	BIO 15	-
Precipitación del trimestre más lluvioso	BIO 16	mm
Precipitación del trimestre más seco	BIO 17	mm
Precipitación del trimestre más cálido	BIO 18	mm
Precipitación del trimestre más frío	BIO 19	mm

La importancia de que los GCMs tomen en cuenta los efectos del ENSO radica en que es un fenómeno atmosférico caracterizado por anomalías en la temperatura de zonas tropicales del Océano Pacífico Tropical (Ecuatorial), por lo cual, se relaciona con los cambios en los patrones

de viento y precipitaciones en regiones tropicales y de latitud media (Blanco-Macías *et al.*, 2020; Bojórquez-Serrano *et al.*, 2020), que corresponde al área donde se distribuyen las plantas de este estudio.

De las cuatro Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSPs, por sus siglas en inglés), se seleccionaron dos: SSP245 y SSP585; esta selección tuvo la intención de posteriormente comparar dos escenarios climáticos futuros contrastantes, teniendo uno “optimista” y uno “pesimista”, para las concentraciones de gases de efecto invernadero de 4.5 W/m<sup>2</sup> y 8.5 W/m<sup>2</sup> para el 2100, respectivamente (Van Vuuren *et al.* 2011). Estos datos climáticos futuros se descargaron para tres ventanas de tiempo: 2040, 2060 y 2080, con una resolución de 30 segundos (~1km<sup>2</sup>).

### **Obtención de datos del suelo**

Además de las variables climáticas, se realizó una descarga de ocho variables de datos del suelo, con la intención de obtener una mejor caracterización de nicho ecológico de cada una de las especies, considerando la gran relevancia que tienen las características del suelo para las plantas, ya que se ha reportado que los datos edáficos son predictores aún más importantes que los climáticos para la distribución de las plantas (Figueiredo *et al.*, 2018). Las variables del suelo se descargaron del portal SoilGrids (<https://soilgrids.org/>; Hengl *et al.*, 2017) en una resolución de 250m<sup>2</sup>; las variables seleccionadas corresponden a propiedades físicas y químicas del suelo (Tabla 2) y se obtuvieron a profundidades de 15 cm y 30 cm. Las variables del suelo a profundidad de 15 cm se utilizaron para las cuatro especies de plantas herbáceas de este estudio (*P. campanulatus*, *S. chamaedryoides*, *S. circinnata* y *S. mexicana*), que se establecen en suelos someros (Reyes-Santiago *et al.*, 2021), mientras que las variables a profundidad de 30 cm se utilizaron para la especie de *P. auriculatus* ya que esta especie es hemiparásita y se consideró la profundidad en la que se establecen algunas de las especies hospedadoras (Vázquez-Yanes *et al.*, 1999; Reyes-Santiago *et al.*, 2021).

Las variables descargadas se utilizaron tanto en los modelos actuales como para los futuros debido a que se contempló el supuesto de que estas variables se mantienen en el tiempo, además de que debido a la resolución disponible en el portal de SoilGrids no es la misma que las variables bioclimáticas, se cambió la resolución de las variables de suelo usando la librería *raster* (Hijmans, 2022) en RStudio. La técnica de remuestreo que se utilizó para este cambio fue

bilineal, el cual calcula el nuevo valor de la celda al promediar los valores de los cuatro píxeles más cercanos, se seleccionó esta técnica debido a que es adecuado para valores continuos.

**Tabla 2.** Variables del suelo disponibles en el portal SoilGrids utilizadas para la realización de los modelos de distribución potencial actual y futuro en este trabajo.

<b>Variable edáfica</b>	<b>Clave</b>	<b>Unidades</b>
Densidad aparente	BLDFIE	kg/dm <sup>3</sup>
Contenido de arcilla	CLYPPT	g/100g (%)
Fragmentos gruesos	CRFVOL	cm <sup>3</sup> /100cm <sup>3</sup> (vol%)
Arena	SNDPPT	g/100g (%)
Salinidad	SLTPPT	g/100g (%)
Capacidad de intercambio catiónico (en pH 7)	CECSOL	cmol/kg
Carbón orgánico en el suelo	ORCDRC	kg/m <sup>3</sup>
pH del agua	PHIHOX	pH

### **Modelos de nicho ecológico y distribución potencial**

Para la realización de los modelos se determinó el área de accesibilidad de las especies, conocida como “M” (Soberón y Peterson, 2005), la cual se usó como un área de entrenamiento para los modelos de cada una de las plantas (Barve *et al.*, 2011). Para el diseño de la “M” de cada una de las especies se usó el software QGIS (<https://www.qgis.org/es/site/>) en donde se visualizaron los datos de presencia y se seleccionaron las áreas de intercepción con dos capas: 1) Ecosistemas terrestres (Olson *et al.*, 2001) y 2) Provincias Biogeográficas del Neotrópico (Morrone *et al.*, 2014), debido a que ambas capas pueden tener el potencial de definir barreras históricas, ecológicas y geográficas (e.g. Ortega-Andrade *et al.*, 2015; Atauchi *et al.*, 2020; Prieto-Torres *et al.*, 2020). Posterior a la determinación de la “M” para cada una de las especies, esta se utilizó para recortar las capas de las variables bioclimáticas y del suelo usando la librería *raster* en RStudio.

Para la elaboración de los modelos se utilizó la librería *kuenm* (Cobos *et al.*, 2019) en RStudio. Esta librería nos permitió evaluar los modelos candidatos y seleccionar aquel mejor modelo. *Kuenm* utiliza el algoritmo de Máxima Entropía para el desarrollo de los modelos (Maxent; Phillips *et al.*, 2006), el cual genera un mapa de valores de idoneidad ambiental que van

desde el 0 (no idóneo) a 1 (idóneo) para identificar las áreas de idoneidad ambiental que favorezca a la distribución potencial de la especie. Este mapa se genera debido a que este algoritmo realiza relaciones matemáticas a través de la búsqueda de probabilidad de distribución de la especie a partir de la información ambiental y los registros de presencia de la especie (Philips *et al.*, 2006). Se usó Maxent como algoritmo ya que se ha reportado que posee un alto rendimiento predictivo al construir los modelos con solo datos de presencia de las especies (Elith *et al.*, 2011), además de que es un algoritmo que permite realizar una evaluación y selección de los mejores parámetros de modelado a través de la librería *kuenm*.

La librería *kuenm* realiza un protocolo de calibración, selección y creación del mejor modelo considerando su significancia estadística, su poder predictivo y la complejidad del modelo (Cobos *et al.*, 2019). Para ello, en primer lugar, se usó el 75% de los datos de presencia como datos para el entrenamiento del modelo y el otro 25% restante se usó para la evaluación. Se consideraron tres conjuntos de variables ambientales (las seleccionadas con VIF, PCA y Pearson de 0.85), 31 tipos de respuesta del modelo (de las combinaciones de los tipos: l = linear, q = quadratic, p = product, t = threshold y h = hinge. "l", "q", "p", "t", "h", "lq", "lp", "lt", "lh", "qp", "qt", "qh", "pt", "ph", "th", "lqp", "lqt", "lqh", "lpt", "lph", "lth", "qpt", "qph", "qth", "pth", "lqpt", "lqph", "lqth", "lpth", "qpth", and "lqpth") y 20 valores de multiplicadores de regularización (RM, por sus siglas en inglés, Regularization Multipliers; 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 6, 8, 10). Con estas configuraciones, usando la librería *kuenm* se realizó la creación de los modelos candidatos para posteriormente realizar la selección de la mejor combinación, esta selección se basó en la prueba estadística de ROC parcial, el criterio de información de Akaike (AICc) y la tasa de omisión del 5%.

Posterior a la selección de la mejor configuración, se realizaron los modelos finales con el ajuste de 500 iteraciones con 10 réplicas cada uno y se proyectó a los escenarios climáticos futuros permitiendo la extrapolación y el clampling, esto debido a que permite identificar posibles condiciones de hábitats nuevos basados en los valores extremos de las variables que podrían considerarse adecuadas para la especie en los escenarios climáticos futuros y estas áreas ambientalmente distintas se sujetan a los niveles presentados en la periferia del área de entrenamiento en el espacio ambiental (Elith *et al.*, 2011; Peterson *et al.*, 2018; Simoes *et al.*,

2020). Finalmente, el modelo resultante se evaluó estadísticamente considerando la prueba ROC parcial y los valores menores de AICc, realizado igualmente con la librería *kuenm*.

De los modelos resultantes para cada especie, se seleccionaron los valores de la mediana de las 10 réplicas, para resumir las predicciones de cada modelo resultante para cada escenario climático analizado. Estos valores se usaron para posteriormente generar mapas binarios de “presencia” vs “ausencia”; para cada una de las especies y para cada uno de los escenarios climáticos se usó un umbral de omisión del 10%, este umbral minimiza los errores de comisión al rechazar el 10% de los registros de presencia con los valores más bajos de idoneidad (Peterson *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2013). Los mapas finales de distribución potencial en el futuro se obtuvieron de la superposición de los mapas binarios de cada GCM, donde se consideró como área de presencia los pixeles donde al menos dos de los GCM coincidieran (Prieto-Torres *et al.*, 2020).

### **Análisis espaciales**

Posterior a la identificación de las áreas de idoneidad climática para cada especie y en cada escenario climático del presente y futuro se realizaron los análisis espaciales. Para esto se consideraron dos supuestos de dispersión: “no dispersión” y “dispersión” (Peterson *et al.*, 2002; Atauchi *et al.*, 2020). El supuesto de “dispersión” asume que las especies podrán dispersarse a través de su área de accesibilidad (M) pudiendo colonizar nuevas áreas consideradas como idóneas en el futuro, pero no en la actualidad, mientras que el supuesto de “no dispersión” asume que las especies no podrán dispersarse y sólo habitarán las zonas de su distribución potencial actual que siguen siendo idóneas en el futuro (Peterson *et al.*, 2002; Atauchi *et al.*, 2020).

Para evaluar el efecto del CCG en la distribución potencial de las especies se obtuvo el conteo de pixeles de “presencia” de los mapas binarios del presente y futuros usando la librería *raster* en RStudio. Posteriormente, se calculó la proporción de cambio al realizar la resta entre el conteo de “presencia” de la distribución potencial presente y la distribución potencial en los escenarios. En este sentido, se consideró como ganancia cuando el número de pixeles predichos como idóneos para el futuro fueron mayores que el número de pixeles predichos como idóneos para el presente, y en los casos contrarios se consideró como pérdida (Thuiller *et al.*, 2005 y Prieto-Torres *et al.*, 2020). Además, como un segundo análisis, se crearon los mapas de las áreas estables de cada especie, que se obtuvieron de la superposición de los mapas binarios de la distribución potencial del presente y todos los escenarios futuros. Un área se consideró como

estable únicamente cuando todos los modelos (presente, 2040, 2060 y 2080) coincidieran en la predicción (Thuiller *et al.*, 2005). De la misma manera, se realizó el conteo de píxeles de “área estable” usando la librería *raster* en RStudio para comparar la extensión de distribución potencial presente de cada especie con la extensión de área estable.

## RESULTADOS

Se obtuvieron 7,277 datos de presencia en total para las cinco especies analizadas en este trabajo (Tabla 4), siendo *S. mexicana* la de mayor número de presencias (3165) y *P. auriculatus* con el menor número (112). Posterior a la limpieza, se obtuvo un total de 2,098 datos de presencia únicos, que son los que se usaron para la elaboración de los modelos de cada una de las especies de plantas (Tabla 4). Los modelos obtenidos mostraron altos valores en la prueba de ROC parcial (promedio de 1.63), estos valores indican que los modelos fueron estadísticamente mejores que el azar, por lo que reconstruyen adecuadamente las condiciones de nicho ecológico de las especies; con respecto a las tasas de omisión, estas van desde 0% a 17%. Las variables climáticas y edáficas que contribuyeron en mayor medida a los modelos de cada especie se muestran en la Tabla 3. Para cada especie, el conjunto de ajustes (variables climáticas utilizadas, los tipos de respuesta y los multiplicadores de regularización) con los que se reconstruyó el modelo se encuentra detallado en la tabla 4.

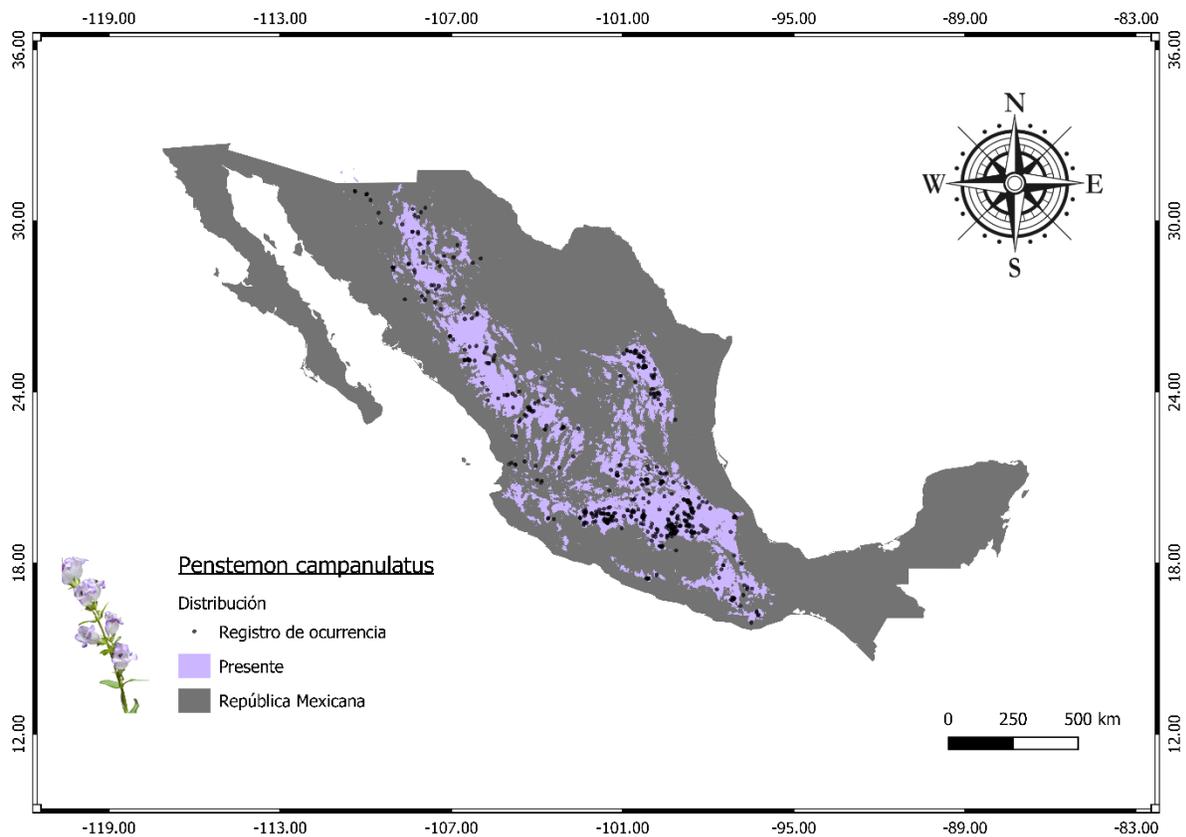
**Tabla 3.** Variables climáticas y edáficas con mayor contribución en los modelos de distribución potencial de las cinco especies de plantas endémicas analizadas en este estudio.

<b>Especie</b>	<b>Variables con mayor contribución en los modelos*</b>
<i>Penstemon campanulatus</i>	BIO8 (71%), BLDFIE (8.1%), SLTPPT (5.6%) y PHIHOX (3.2%)
<i>Psittacanthus auriculatus</i>	PC2 (33.6%), PHIHOX (22.2%), PC1(20.7%) y PC5 (12.7%)
<i>Salvia chamaedryoides</i>	BIO9 (31.2%), BIO15 (18.1%), BIO1 (16.4%), BIO7 (6,7%) y ORCDRC (5.1%).
<i>Salvia circinnata</i>	BIO8 (46.1%), BIO 18 (17.4%), BIO4 (14.2%), BIO3(3.6%) y PHIHOX (3.4%)
<i>Salvia mexicana</i>	BIO4 (35.6%), BIO1 (23.5%), BIO6 (10.5%), SLTPPT (6.2%) y BLDFIE (5.9%)

\***BIO1:** Temperatura media anual, **BIO3:** Isotermalidad, **BIO4:** Estacionalidad en la temperatura, **BIO6:** Temperatura mínima del mes más frío, **BIO7:** Rango anual de temperatura, **BIO8:** Temperatura media del trimestre más lluvioso, **BIO9:** Temperatura media del trimestre más seco, **BIO15:** Estacionalidad en la precipitación, **BIO18:** Precipitación del trimestre más cálido, **BLDFIE:** Densidad aparente, **SLTPPT:** Salinidad, **ORCDRC:** Carbón orgánico en el suelo, **PHIHOX:** pH del agua, **PC:** Componente principal.

En los resultados de los modelos de distribución potencial del presente se obtuvo que la especie con una distribución más amplia es *P. campanulatus* con 407,157 km<sup>2</sup> y la especie con la distribución potencial más restringida fue *P. auriculatus* con 16,552 km<sup>2</sup>.

El modelo actual de *P. campanulatus* (Figura 2) mostró una distribución potencial al presente en 24 de los 32 estados de la República Mexicana: Aguascalientes, Chihuahua, Ciudad de México, Coahuila, Colima, Durango, Estado de México, Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, Michoacán, Morelos, Nayarit, Nuevo León, Oaxaca, Puebla, Querétaro, San Luis Potosí, Sinaloa, Sonora, Tamaulipas, Tlaxcala, Veracruz y Zacatecas.



**Figura 2.** Modelo de distribución potencial en escenario climático actual de *Penstemon campanulatus*.

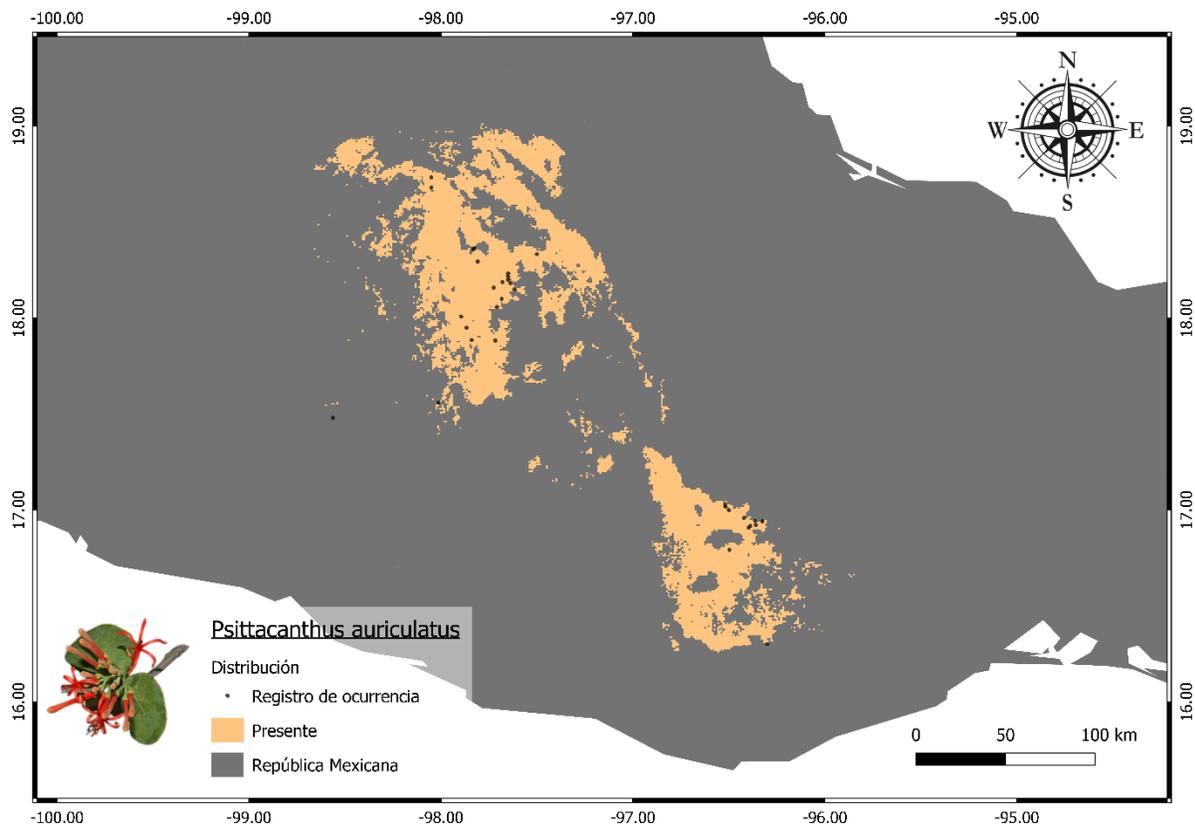
**Tabla 4.** Datos utilizados en la reconstrucción de los modelos de distribución potencial actual y futuras de las cinco especies de plantas analizadas en este estudio. Se muestran los datos descargados y datos únicos, las variables climáticas, tipo de respuesta, multiplicadores de regularización (RM), resultado del ROC parcial, porcentaje de omisión y valor del umbral de omisión del 10% de cada modelo.

Familia	Especie	Presencias descargadas (datos únicos)	VARIABLES climáticas utilizadas en el modelo*	Tipo de respuesta utilizado	RM	ROC parcial modelo	Porcentaje de omisión	Valor del umbral
Plantaginaceae	<i>Penstemon campanulatus</i>	2202 (532)	BIO2, BIO3, BIO8, BIO9, BIO12, BIO14, BIO15, BIO18, BIO19	lq	0.2	1.544327	0.1052632	0.169
Loranthaceae	<i>Psittacanthus auriculatus</i>	112 (32)	PC1, PC2, PC3, PC4, PC5	lt	2	1.892269	0	0.404
	<i>Salvia chamaedryoides</i>	524 (139)	BIO1, BIO2, BIO3, BIO4, BIO6, BIO7, BIO12, BIO14, BIO15, BIO18	lth	3.5	1.606168	0.1428571	0.195
Lamiaceae	<i>Salvia circinnata</i>	1274 (385)	BIO2, BIO3, BIO4, BIO8, BIO14, BIO15, BIO16, BIO18, BIO19	lq	0.2	1.497471	0.1354167	0.175
	<i>Salvia mexicana</i>	3165 (1006)	BIO1, BIO2, BIO3, BIO4, BIO12, BIO14, BIO15, BIO18, BIO19	qpth	1.6	1.633755	0.1785714	0.3

\*Nota: además de las variables mencionadas en la tabla, a todos los modelos de cada especie se le añadieron las ocho variables edáficas descritas en la Tabla 2.

En cambio, *P. auriculatus* (Figura 3) mostró una distribución potencial actual en únicamente 3 de los 32 estados de la República Mexicana: Guerrero, Oaxaca, Puebla. En el caso de las especies de la familia Lamiaceae, se obtuvo que la especie con mayor distribución potencial para el presente fue *S. circinnata* con 193,569 km<sup>2</sup>, seguida de *Salvia mexicana* con 185,045 km<sup>2</sup> y por último *S. chamaedryoides* con 125,546 km<sup>2</sup>.

Por otra parte, *S. chamaedryoides* (Figura 4) mostró una distribución potencial al presente en 19 de los 32 estados de la República Mexicana: Aguascalientes, Ciudad de México, Coahuila, Durango, Estado de México, Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, Michoacán, Morelos, Nuevo León, Oaxaca, Puebla, Querétaro, San Luis Potosí, Tamaulipas, Tlaxcala, Veracruz y Zacatecas.



**Figura 3.** Modelo de distribución potencial en escenario climático actual de *Psittacanthus auriculatus*.

La planta *S. circinnata* (Figura 5) mostró una distribución potencial al presente en 18 de los 32 estados de la República Mexicana: Aguascalientes, Chiapas, Ciudad de México, Colima, Estado de México, Guanajuato, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, Michoacán, Morelos, Oaxaca, Puebla,

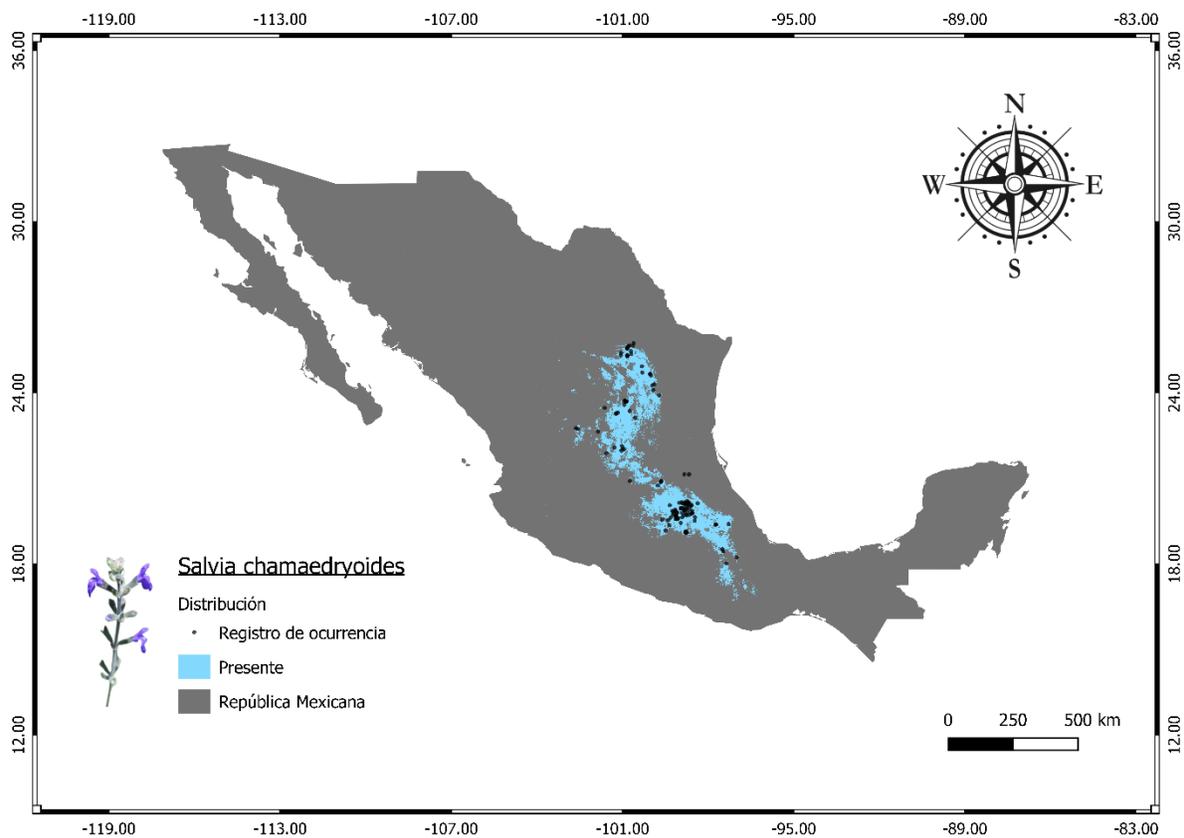
Querétaro, San Luis Potosí, Tamaulipas, Veracruz y Zacatecas. Por último, la especie *S. mexicana* (Figura 6) mostró una distribución potencial al presente en 24 de los 32 estados de la República Mexicana: Aguascalientes, Chiapas, Ciudad de México, Coahuila, Colima, Durango, Estado de México, Guanajuato, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, Michoacán, Morelos, Nayarit, Nuevo León, Oaxaca, Puebla, Querétaro, San Luis Potosí, Sinaloa, Tamaulipas, Tlaxcala, Veracruz y Zacatecas.

Con respecto a la distribución potencial del futuro, se obtuvo la distribución en km<sup>2</sup> de ambos escenarios (“optimista” y “pesimista”), considerando los supuestos de “dispersión” (Figuras 7-11) y “no dispersión” ([Anexo 1](#)) para tres ventanas de tiempo (2040, 2060, 2080), para finalmente mostrar la proporción de cambio (%) de cada distribución potencial con respecto a la presente que se indica en la tabla 5. La especie que presentó una menor proporción de cambio ante los escenarios climáticos futuros fue *S. circinnata*, teniendo un promedio de 35.31% de proporción de pérdida, mientras que la planta *S. chamaedryoides* fue la especie con mayor proporción de cambios en el futuro, mostrando un promedio de 67.8% de proporción de pérdida. Mientras que *P. campanulatus* obtuvo un promedio de 47.91% de proporción de pérdida; *P. auriculatus* un 45% y *S. mexicana* un 37.05%.

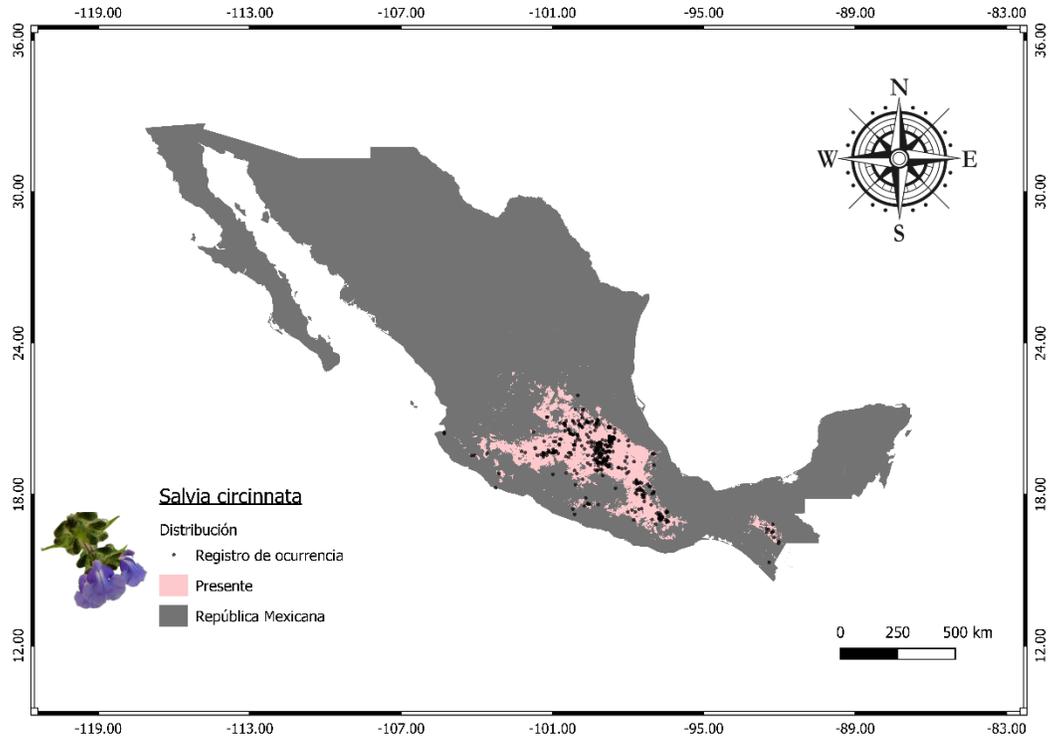
Las cinco especies presentan una mayor pérdida bajo el escenario “pesimista” a comparación con el “optimista”, además de una mayor pérdida bajo el supuesto de “no dispersión” en comparación con el de “dispersión”. La proporción de cambio entre ambos supuestos no dista por más de 5.99% (Tabla 5), a excepción de la especie *P. auriculatus*, donde el cambio entre ambos supuestos fue más elevado (11.33-17.34%, Tabla 5). Y en el caso de los escenarios climáticos utilizados en este trabajo, el cambio entre ambos si llegó a diferenciar hasta un 20.33% (Tabla 5) en la distribución potencial (el caso de *Penstemon campanulatus* al año 2080 en ambos supuestos).

Con respecto a las áreas geográficas donde se observa mayormente la reducción de la distribución potencial de *P. campanulatus* (Figura 7), destaca la distribución que encontramos en Guanajuato y San Luis Potosí, donde se encuentra la vegetación de matorral-pastizal (INEGI, 2021). En la reducción de la distribución potencial de *P. auriculatus* (Figura 8), resalta la distribución que encontramos en el centro de Oaxaca y la parte oeste de Puebla, donde se encuentra principalmente la vegetación de bosque seco (INEGI, 2021). En el caso de la reducción

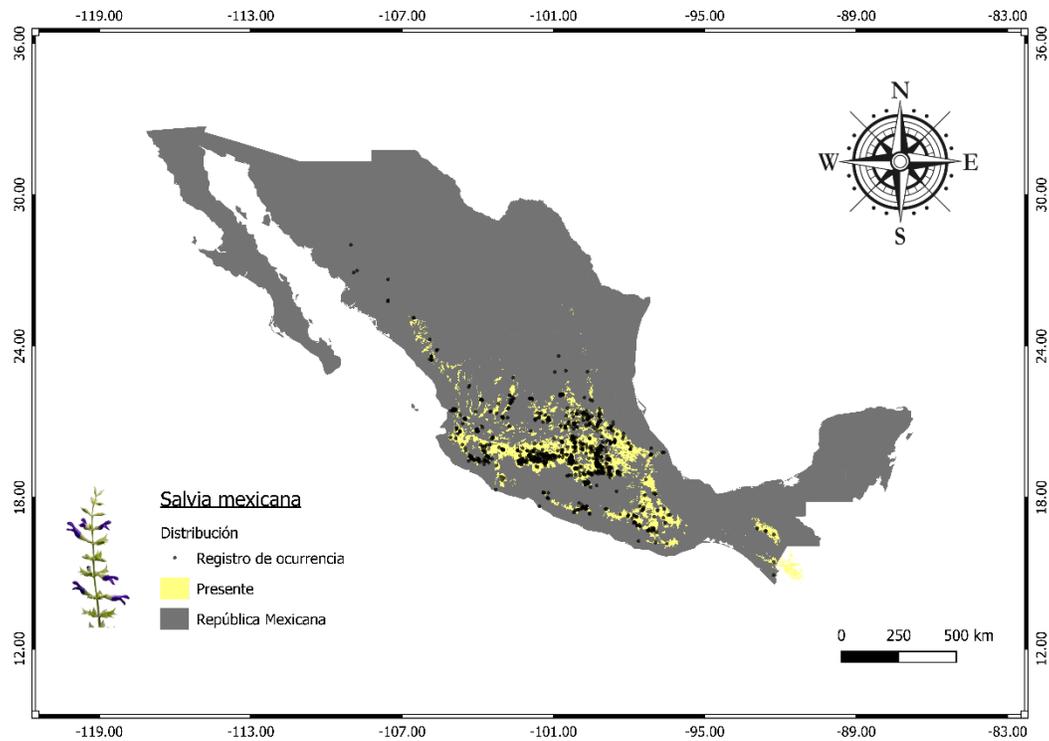
de la distribución potencial de *S. chamaedryoides* (Figura 9), se distingue la distribución que encontramos en San Luis Potosí, Guanajuato y Querétaro, donde se encuentra principalmente la vegetación de matorrales y pastizales también (INEGI, 2021). En *S. circinnata*, la reducción de la distribución potencial (Figura 10) destaca en la que encontramos en Guanajuato y sur de San Luis Potosí, donde se encuentra principalmente la vegetación de matorrales y pastizales (INEGI, 2021). Finalmente, en la reducción de la distribución potencial de *S. mexicana* (Figura 11), se hace notar la distribución que encontramos en la periferia de Jalisco y Michoacán, donde se encuentra principalmente la vegetación de pino-encino (INEGI, 2021).



**Figura 4.** Modelo de distribución potencial en escenario climático actual de *Salvia chamaedryoides*.



**Figura 5.** Modelo de distribución potencial en escenario climático actual de *Salvia circinnata*.



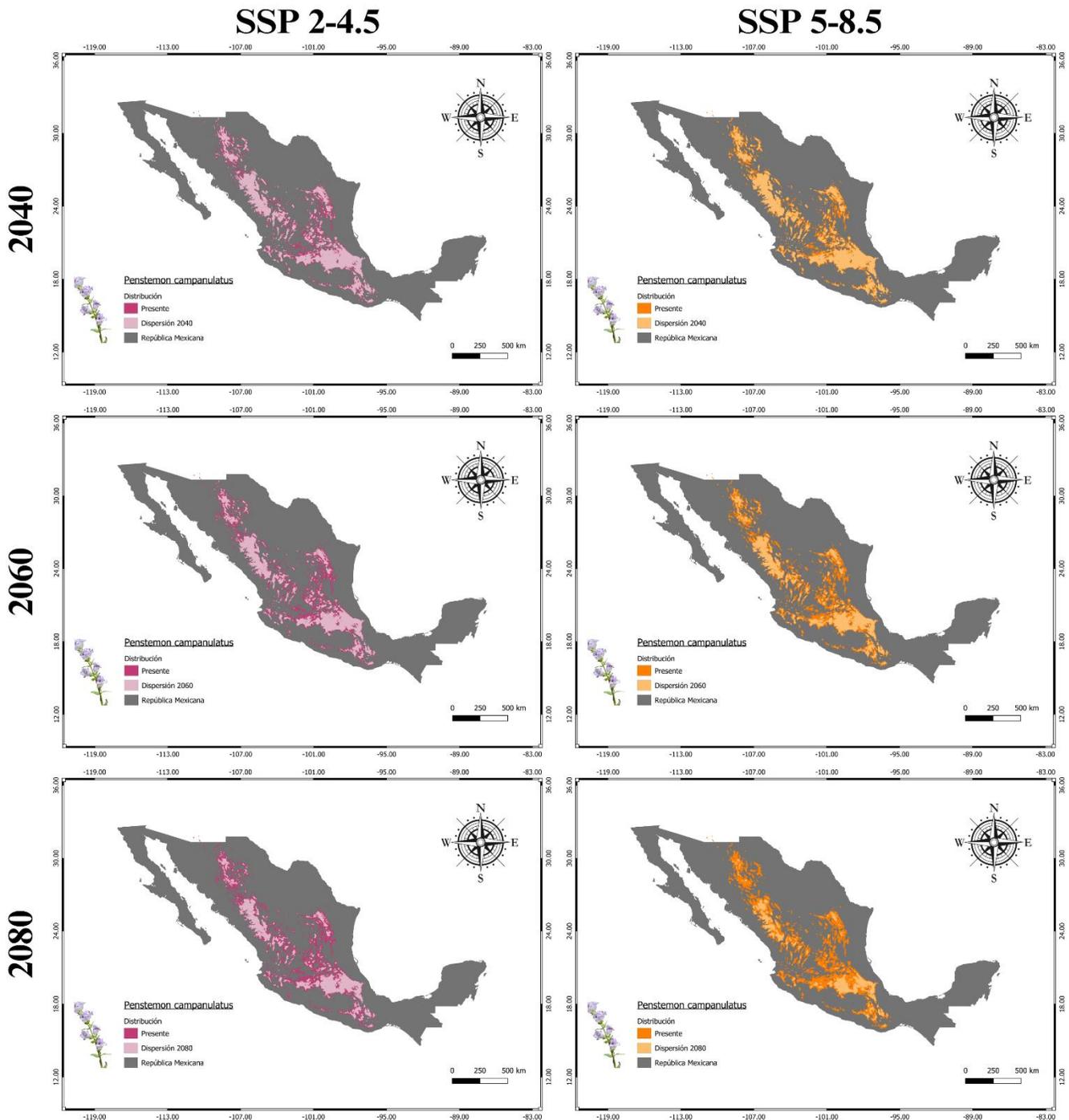
**Figura 6.** Modelo de distribución potencial en escenario climático actual de *Salvia mexicana*.

**Tabla 5.** Proporción de cambio (%) en el área de distribución potencial de cada especie de planta analizada en este estudio. Se indica para cada escenario climático futuro (“optimista” y “pesimista”) bajo los supuestos de “dispersión” y “no dispersión” en tres ventanas de tiempo. Se muestra el área de distribución potencial presente y áreas estables para su comparación.

Especie	<i>Penstemon campanulatus</i>	<i>Psittacanthus auriculatus</i>	<i>Salvia chamaedryoides</i>	<i>Salvia circinnata</i>	<i>Salvia mexicana</i>
Área de distribución potencial actual (km <sup>2</sup> )	407,157	16,552	125,546	193,569	185,045
<b>SPP245 “optimista”</b>					
Área estable (km <sup>2</sup> )	232,232	8,972	44,246	131,694	124,680
<i>Dispersión*</i>					
2040	-31.33	-31.45	-48.78	-23.03	-22.76
2060	-42.88	-36.58	-63.52	-31.27	-30.73
2080	-52.75	-41.08	-74.84	-37.11	-36.61
<i>No dispersión*</i>					
2040	-31.37	-42.00	-51.30	-24.99	-26.90
2060	-42.89	-52.73	-65.97	-33.31	-36.13
2080	-52.75	-58.42	-76.62	-39.46	-42.60
<b>SSP585 “pesimista”</b>					
Área estable (km <sup>2</sup> )	189,104	7,645	32,714	119,286	110,619
<i>Dispersión*</i>					
2040	-33.88	-30.70	-52.20	-23.08	-22.86
2060	-53.52	-38.58	-71.93	-36.81	-37.22
2080	-73.08	-48.62	-89.47	-53.87	-56.52
<i>No dispersión*</i>					
2040	-33.91	-42.90	-54.76	-25.23	-27.40
2060	-53.52	-56.99	-74.14	-39.23	-43.13
2080	-73.08	-59.95	-90.05	-56.32	-61.75

\*Nota: Los números negativos (-) significan la proporción de pérdida (%) con respecto a la distribución potencial actual. El supuesto de “dispersión” considera que la especie puede desplazarse de su distribución potencial actual en el futuro, mientras que la “no dispersión” toma en cuenta que la especie solamente se puede mantener dentro de su distribución potencial actual.

# Dispersión

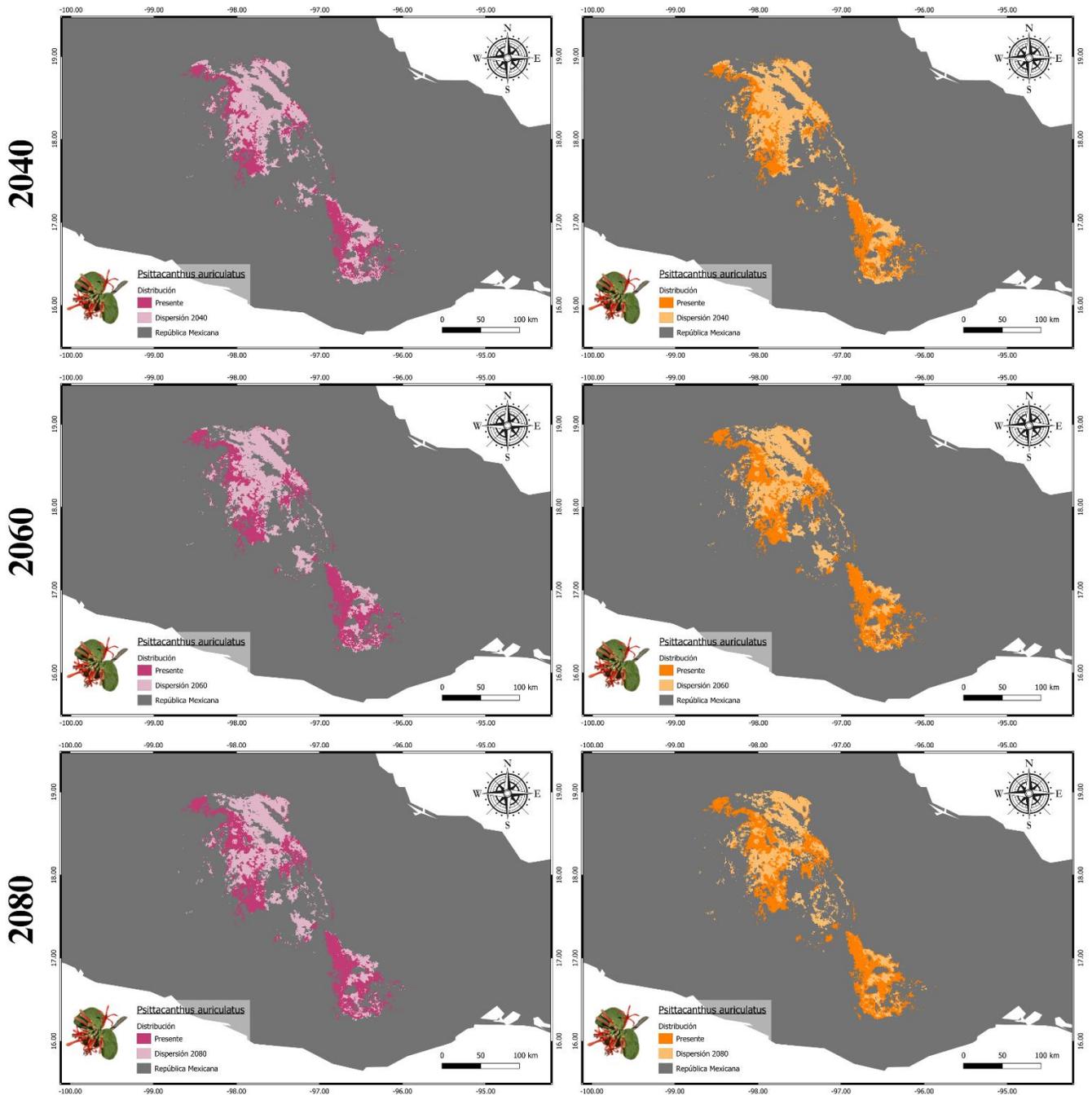


**Figura 7.** Distribución potencial de *Penstemon campanulatus* en dos escenarios climáticos futuros (“Optimista” vs. “Pesimista”) y tres ventanas de tiempo distintas en comparación con su distribución potencial actual, bajo el supuesto de “dispersión”.

# Dispersión

## SSP 2-4.5

## SSP 5-8.5

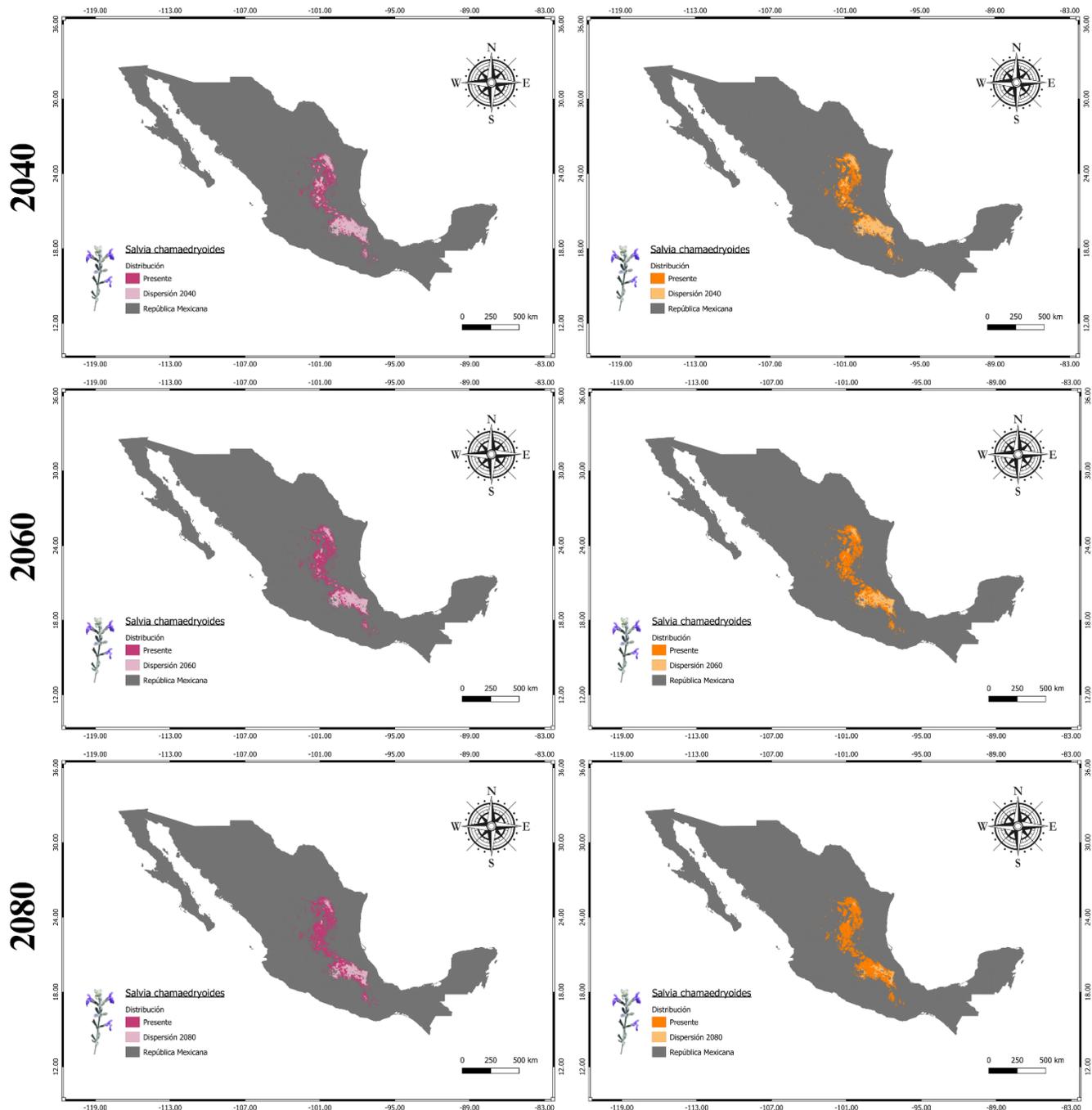


**Figura 8.** Distribución potencial de *Psittacanthus auriculatus* en dos escenarios climáticos futuros (“Optimista” vs. “Pesimista”) y tres ventanas de tiempo distintas en comparación con su distribución potencial actual, bajo el supuesto de “dispersión”.

# Dispersión

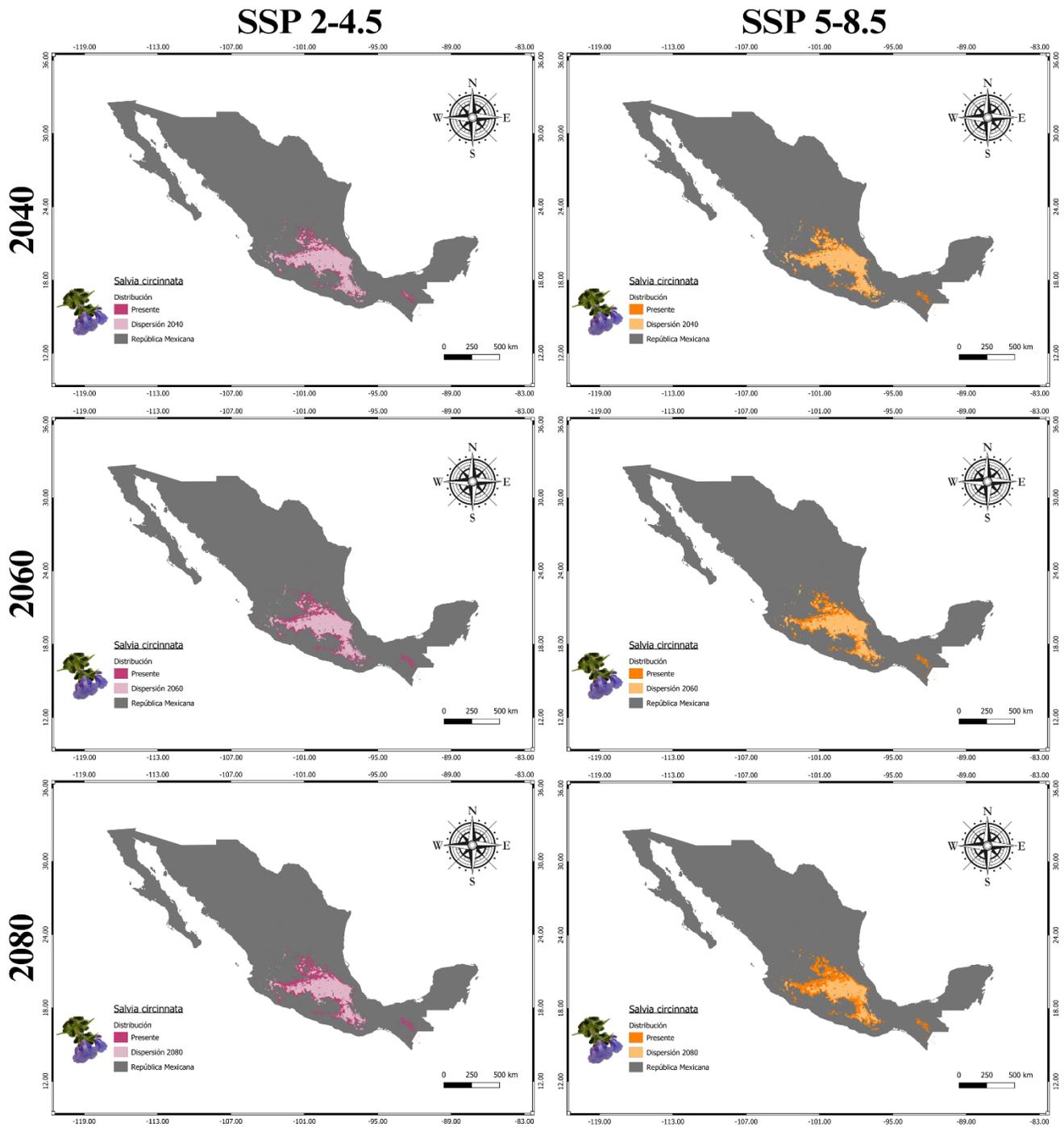
## SSP 2-4.5

## SSP 5-8.5



**Figura 9.** Distribución potencial de *Salvia chamaedryoides* en dos escenarios climáticos futuros (“Optimista” vs. “Pesimista”) y tres ventanas de tiempo distintas en comparación con su distribución actual del presente, bajo el supuesto de “dispersión”.

# Dispersión



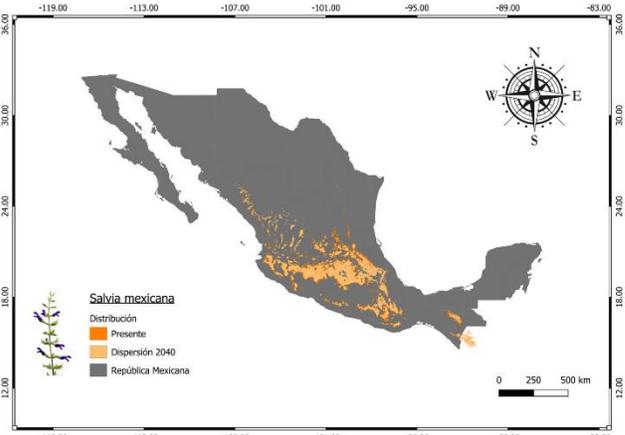
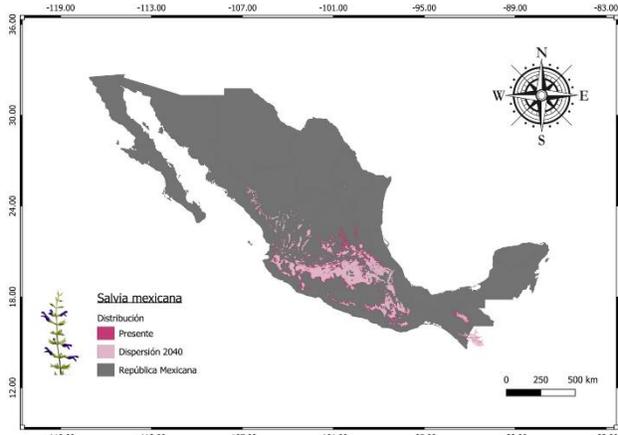
**Figura 10.** Distribución potencial de *Salvia circinnata* en dos escenarios climáticos futuros (“Optimista” vs. “Pesimista”) y tres ventanas de tiempo distintas en comparación con su distribución potencial actual, bajo el supuesto de “dispersión”.

# Dispersión

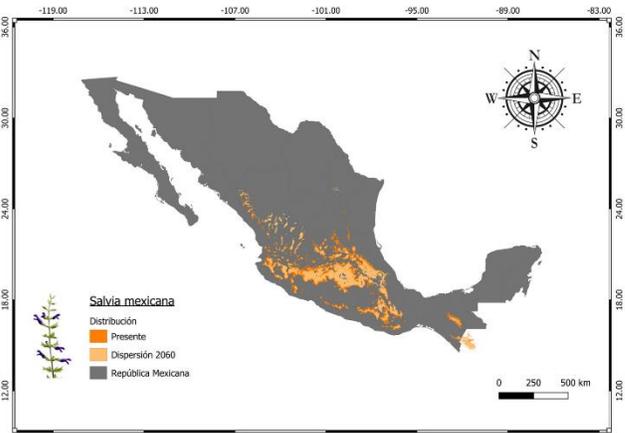
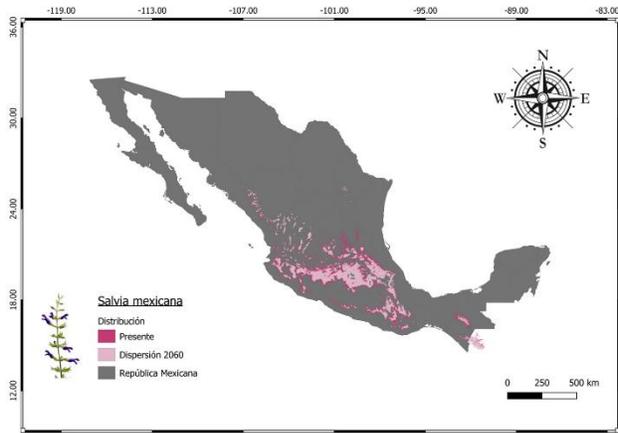
## SSP 2-4.5

## SSP 5-8.5

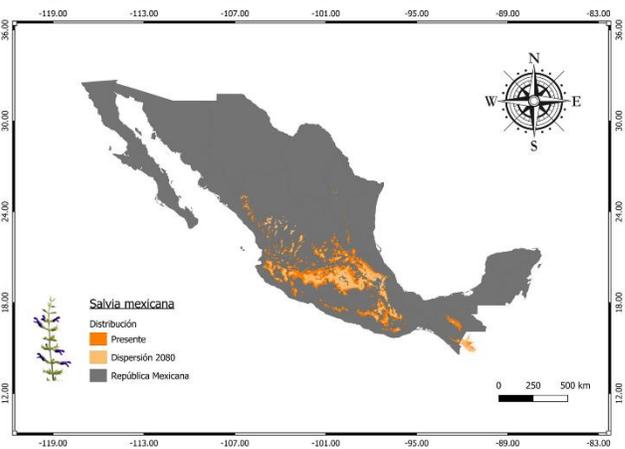
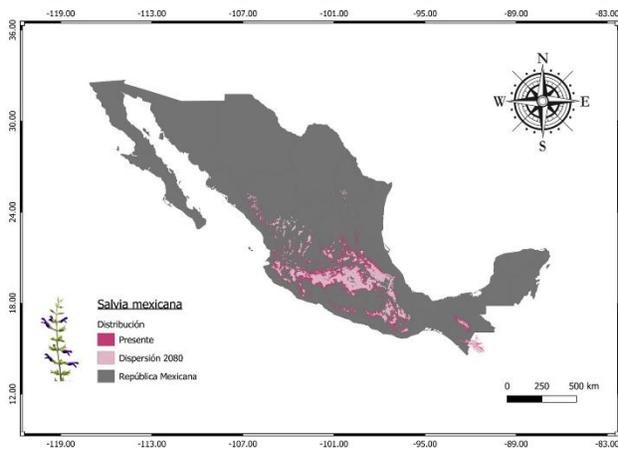
2040



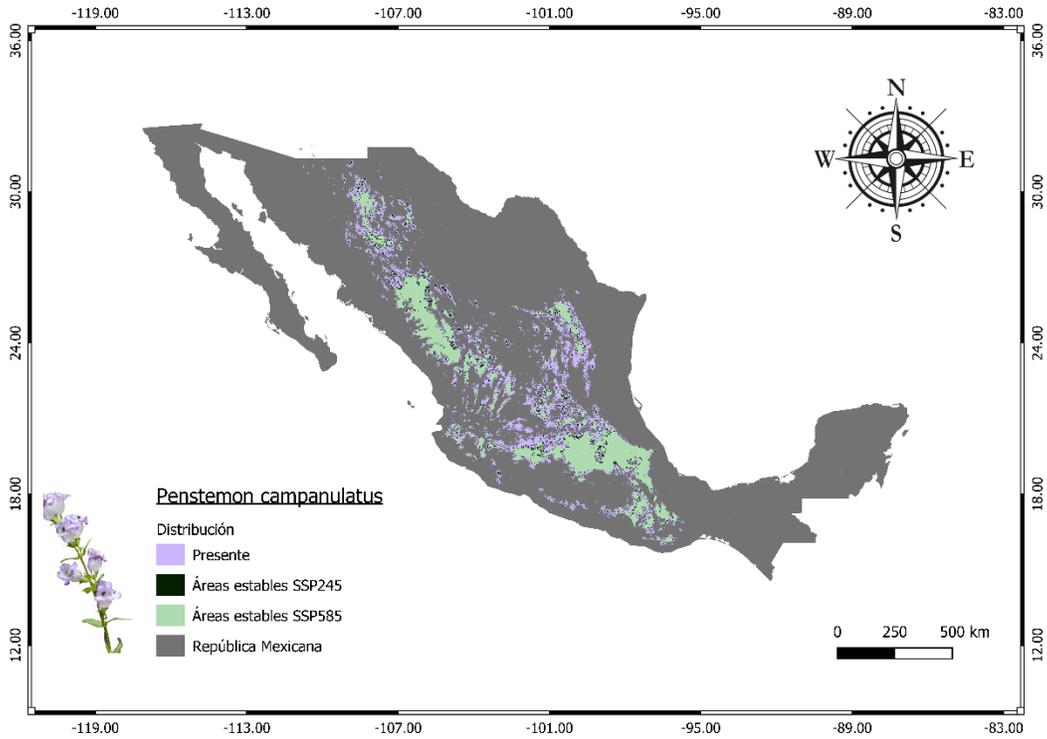
2060



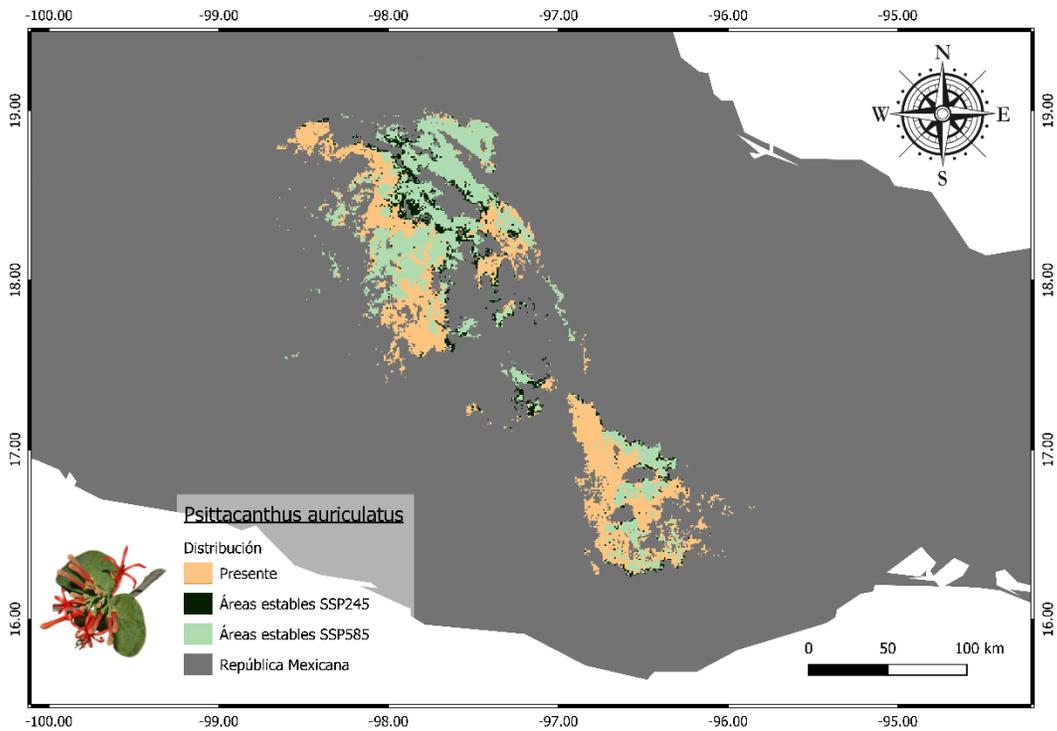
2080



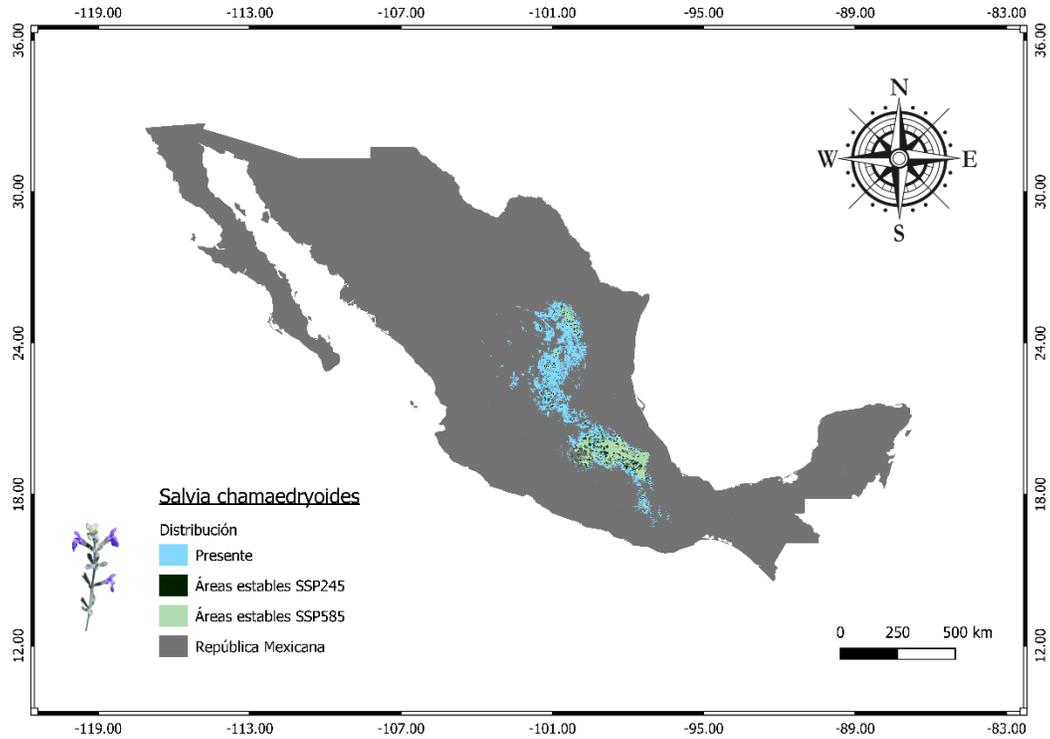
**Figura 11.** Distribución potencial de *Salvia mexicana* en dos escenarios climáticos futuros (“Optimista” vs. “Pesimista”) y tres ventanas de tiempo distintas, en comparación con su distribución potencial actual, bajo el supuesto de “dispersión”.



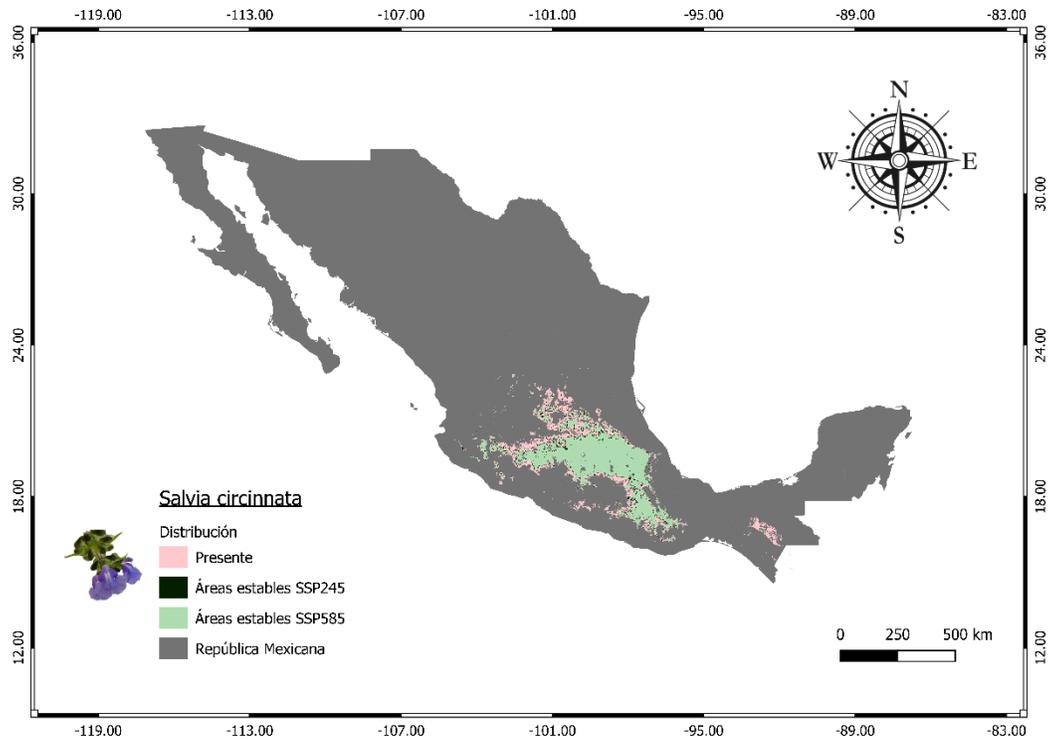
**Figura 12.** Áreas estables de *Penstemon campanulatus* bajo los escenarios de cambio climático SSP245 y SSP585, en comparación con su distribución potencial actual.



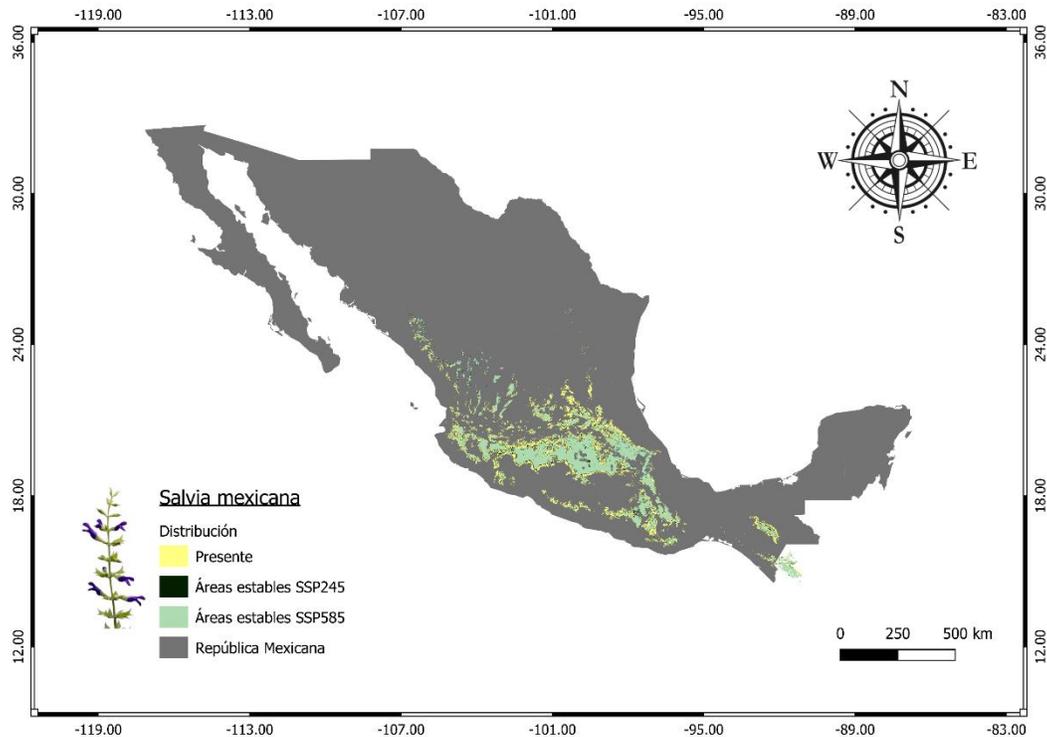
**Figura 13.** Áreas estables de *Psittacanthus auriculatus* bajo los escenarios de cambio climático SSP245 y SSP585, en comparación con su distribución potencial actual.



**Figura 14.** Áreas de *Salvia chamaedryoides* bajo los escenarios de cambio climático SSP245 y SSP585, en comparación con su distribución potencial actual.



**Figura 15.** Áreas estables de *Salvia circinnata* bajo los escenarios de cambio climático SSP245 y SSP585, en comparación con su distribución potencial actual.



**Figura 16.** Áreas estables de *Salvia mexicana* bajo los escenarios de cambio climático SSP245 y SSP585, en comparación con su distribución potencial actual.

Tal como se detalla en la tabla 5, *S. circinnata* fue la especie con mayor porcentaje de área estable con respecto a su área potencial actual, teniendo el 68.03% de área estable bajo el escenario “optimista” y 61.62% bajo el escenario “pesimista”. Y *S. chamaedryoides* fue la especie con menos representación de su distribución potencial actual en área estable, teniendo el 35.24% de área estable bajo el escenario SSP245 y el 26.05% bajo el escenario SSP585.

Para el resto de las especies, quedaron en el siguiente orden (de menor a mayor): *S. mexicana* con el 67.37% y 59.77%; *P. auriculatus* con 54.20% y 46.18%; y *P. campanulatus* con el 57.03% y 46.44%, bajo los escenarios SSP245 y SSP585 respectivamente.

Estas áreas estables para dichas especies se ubicaron principalmente en la Faja Volcánica Transmexicana (FVT) y la Sierra Madre Occidental (según las provincias biogeográficas propuestas por Morrone *et al.*, 2017).

## DISCUSIÓN

### *Penstemon campanulatus*

Esta especie tuvo la mayor distribución potencial actual de este estudio (407,157 km<sup>2</sup>), esto puede deberse a que se le puede encontrar en diversos tipos de vegetación, que van desde los bosques de coníferas, de encino y encino-pino, incluso en pastizales y matorrales de áreas degradadas por actividad humana (Zacarías-Correa *et al.*, 2019), así también, el tipo de suelo, ya que a esta especie la podemos ubicar en rocas de tipo basalto y andesita (Zacarías-Correa *et al.*, 2019), los cuales se encuentran a lo largo de la Sierra Madre Occidental debido a la actividad volcánica del pasado y actual (Barrera, 2002). Además de que se ha documentado que especies pertenecientes al género *Penstemon* tienen cierta resistencia a la sequía, debido a que pueden modificar su morfología y fisiología ante el estrés hídrico (Chen *et al.*, 2023; Zollinger *et al.*, 2006), lo cual puede favorecer el establecimiento de estas especies en diversas áreas con condiciones adversas.

Sin embargo, las áreas en las que se pudo observar una mayor pérdida en su distribución potencial futura de esta especie (Figura 7) fueron aquellas donde la vegetación predominante son los pastizales y matorrales, los cuales están caracterizados por encontrarse en zonas áridas (CONABIO, 2008); esto posiblemente se deba a que estos tipos de vegetación enfrenten condiciones de mayor temperatura y menor precipitación ocasionados por el CCG (Trejo *et al.*, 2007), y por lo tanto, dichas áreas ya no sean idóneas para esta especie en el futuro, según lo que se conoce en la actualidad sobre los rangos climáticos de *P. campanulatus*. Una manera de conocer a mayor profundidad la capacidad de esta especie y de otras del género *Penstemon* podría ser a través de los experimentos relacionado a su tolerancia a estrés climático.

Así también, la prevalencia de distribución potencial de esta especie (Figura 12) se encuentra en donde predomina la vegetación de encino-pino, esto probablemente pueda explicarse con el cambio altitudinal de la vegetación arbórea que está sucediendo ante el CCG (Matías, 2012), lo cual potencialmente permitiría que *P. campanulatus* pueda igualmente migrar y conservar ciertas áreas de distribución en altitudes mayores, ya que esta especie es posible encontrarla dentro de un amplio rango altitudinal de 1200-3500 m (Zacarías-Correa *et al.*, 2019), como la que presenta la vegetación de los bosques templados (2000-3400 m; CONABIO, 2021).

### *Psittacanthus auriculatus*

Los pocos registros de presencia disponibles en las bases de datos (112) y datos únicos (32) de *P. auriculatus*, junto con su restringida distribución potencial modelada para el presente (16,552 km<sup>2</sup>) puede deberse a que esta especie está altamente determinada por su hospedero, sus polinizadores, sus dispersores de semilla y por su nicho climático (Lira-Noriega y Peterson, 2014; López de Buen y Ornelas, 2002; Ramírez-Barahona *et al.*, 2017), por lo cual, el conjunto de todos estos factores podría estar manteniendo la distribución endémica de *P. auriculatus* en los estados de Oaxaca y Puebla.

De la misma manera que *P. campanulatus*, esta especie pierde área de distribución potencial hacia el futuro en las zonas donde predominan en la actualidad los matorrales y pastizales, que puede asociarse a que esta vegetación potencialmente enfrente condiciones de mayor temperatura y menor precipitación ocasionados por el CCG (Trejo *et al.*, 2007), lo cual no permita la idoneidad ambiental para este muérdago, y en su caso particular, debido a la especificidad que tiene con su hospedero (árboles del género *Vachellia*; Infante *et al.*, 2016), polinizadores como *Cynanthus latirostris*, *Saucerottia beryllina* y *Leucolia violiceps* (Infante *et al.*, 2016; Pérez-Crespo *et al.*, 2016) y dispersores como *Tyrannus vociferans*, *Ptilogonys cinereus* e *Icterus cucullatus* (Infante *et al.*, 2016), la distribución de estas especies con las que interactúa, al verse afectada quizá también determine una menor distribución para *P. auriculatus*.

Además de la reducción en las zonas con vegetación de matorrales y pastizales, se observa que las zonas estables para esta especie se encuentran en las regiones donde se encuentra el bosque seco, este tipo de vegetación se prevé que en escenarios futuros aumente su superficie (Villers-Ruiz y Trejo-Vázquez, 2000), por lo cual podría beneficiar en la persistencia de la distribución de *P. auriculatus*.

La única Área Natural Protegida en la que se encuentra la distribución potencial actual y futura de este muérdago es en la Reserva de la Biosfera Tehuacán-Cuicatlán, la cual ha presentado un alta en la tasa de transformación de su territorio (Velasco, 2009), lo que de la misma manera podría afectar en la distribución de *P. auriculatus*, además de las potenciales afectaciones en las especies con las que interacciona esta planta.

### ***Salvia chamaedryoides***

En el caso de esta especie, su distribución potencial presente se encontró en las zonas donde predomina la vegetación de pastizales y matorrales, tipo de vegetación que enfrentará condiciones de mayor temperatura y menor precipitación ocasionados por el CCG (Trejo *et al.*, 2007). El género *Salvia* se ha reportado tolerante a las sequías (Nemali y van Iersel, 2005; Niu y Rodríguez, 2005; Keck *et al.*, 2014), por lo tanto, la pérdida observada en su distribución potencial del futuro pueda deberse a otros factores como su rango altitudinal, ya que va de 2300 a 2800 msnm (Reyes-Santiago *et al.*, 2021) lo cual posiblemente podría limitar su distribución.

Por otro lado, de las cinco especies de plantas analizadas en este trabajo, *S. chamaedryoides* fue la que tuvo una proporción de pérdida mayor (>90%), en el escenario pesimista y no dispersión al año 2080; esto toma relevancia debido a que se considera una planta pionera y cumple un papel relevante en la sucesión ecológica al actuar como planta nodriza, además de que se ha reportado como una especie melífera siendo principal alimento para aves e insectos como abejas, abejorros y polillas (Reyes-Santiago *et al.*, 2021), por lo tanto, en caso de que la distribución de esta planta se reduzca tan drásticamente como se observó en los modelos (Tabla 5) puede afectar también las comunidades con las que interactúa (Sargent y Ackerly, 2008).

### ***Salvia circinnata***

Esta fue la segunda especie con mayor distribución potencial en el presente de las cinco especies analizadas en este trabajo (Tabla 5), y dicha distribución está ubicada en los tipos de vegetación de pastizales y matorrales, así como en pino-encino. La preferencia de esta especie en las vegetaciones de pastizales y matorrales podría afectar en su distribución futura debido a que como se ha ido mencionando, en estos tipos de vegetación se considera un aumento de temperatura y reducción de la precipitación en escenarios futuros (Trejo *et al.*, 2007), lo cual, en caso de no lograr adaptarse según sus tolerancias climáticas, podría perderse en este tipo de vegetación y solo conservarse en la de pino-encino

Sin embargo, también se observó que *S. circinnata* fue la especie con la menor proporción de pérdida (Tabla 5) conservando ~40% en el escenario más catastrófico del futuro utilizado en este trabajo (SSP585 y el supuesto de “no dispersión”), esto podría deberse a que esta especie

tiene una preferencia a las áreas perturbadas (Cornejo-Tenorio e Ibarra-Manríquez, 2011; Rzedowski y Rzedowski, 2001), y esto le permita mantener de mejor manera su distribución a comparación de otras especies.

Con respecto a su área de distribución que presenta estabilidad (Figura 15), se observa que se conserva aquella área que se ubica sobre la región de la Faja Volcánica Transmexicana (FVT), esto podría explicarse con el hecho de que esta región es heterogénea y presenta diversos perfiles climáticos (Suárez-Mota *et al.*, 2013, 2014), lo cual podría estar funcionando como factor para las áreas de estabilidad de esta especie, como también de las otras cuatro plantas analizadas en este trabajo, ya que todas las especies presentan parte de su distribución en esta región.

### *Salvia mexicana*

Por último, esta fue la especie de la que se encontraron más registros de presencias (Tabla 4), sin embargo, su modelo de distribución potencial actual la posiciona como la tercera especie con mayor extensión de área (Tabla 5), su amplia distribución se debe a que está presente en diferentes tipos de vegetación primaria, así como en sitios perturbados (Cornejo-Tenorio e Ibarra-Manríquez, 2011; Rzedowski y Rzedowski, 2001). A pesar de su amplia distribución esta se encuentra restringida a ciertas áreas, posiblemente a su tolerancia a cierto rango altitudinal (2250 – 3000 msnm; Reyes-Santiago *et al.*, 2021), lo que posiblemente no le permita desplazarse más allá de este. De acuerdo con los modelos de distribución potencial del futuro para *S. mexicana*, se observó una pérdida importante en el estado de Chiapas, debido que esta área al parecer se encuentra separada del resto de su distribución.

Aunque es una de las especies que conserva mayormente como área de estabilidad su área de distribución potencial actual, es importante mencionar que la pérdida de la distribución de esta especie puede conllevar distintas consecuencias ecológicas debido a que tiene una amplia interacción con polinizadores como abejas y colibríes (Dieringer *et al.*, 1991; Chávez-Alonso, 1999; Arizmendi *et al.*, 2008)

De manera general se observó un patrón de disminución en las áreas de distribución de *P. campanulatus*, *P. auriculatus*, *S. chamaedryoides*, *S. circinnata* y *S. mexicana* ocasionados por los cambios en el clima calculados con los escenarios de CCG utilizados en este trabajo, lo cual puede conllevar distintas implicaciones ecológicas debido a las interacciones que mantienen estas

plantas con otras plantas y con la fauna, incluida su relación con el humano, ya que este también se beneficia de diversas maneras de estas plantas por ser algunas importantes plantas melíferas, ornamentales y medicinales.

## CONCLUSIONES

- Los escenarios de CCG utilizados en este trabajo mostraron los posibles cambios en la distribución potencial actual de *Penstemon campanulatus*, *Psittacanthus auriculatus*, *Salvia chamaedryoides*, *Salvia circinnata* y *Salvia mexicana* en el futuro. De hecho, aun considerando escenarios “optimistas” en los modelos de cambio climático, todas las especies de plantas analizadas mostraron tendencia a posibles reducciones de sus áreas idóneas de distribución geográfica, lo cual podría poner en riesgo de extinción a estas especies a lo largo del tiempo.
- La distribución potencial futura de las especies de plantas analizadas en este trabajo no depende de si su distribución actual es restringida o amplia.
- Las especies de plantas que no se distribuyen únicamente en vegetaciones con poca precipitación y altas temperaturas como bosques secos, matorrales y pastizales, y a consecuencia, no se encuentren adaptadas a ese clima, es posible que pierdan sus poblaciones en estas zonas por los cambios del CCG.
- Las áreas estables de las especies resultaron representar aproximadamente la mitad de la distribución potencial actual bajo el escenario “optimista”, a excepción de *S. chamaedryoides*, lo cual podría indicar el riesgo al que se encuentran expuestas estas especies ante el cambio climático a través del tiempo.

## REFERENCIAS

- Afonso, A. F., Pereira, O. R., Fernandes, Â., Calheta, R. C., Silva, A. M., Ferreira, I. C., y Cardoso, S. M. (2019). Phytochemical composition and bioactive effects of *Salvia africana*, *Salvia officinalis* 'Icterina' and *Salvia mexicana* aqueous extracts. *Molecules*, 24(23), 4327.
- Anderson, R. P., Lew, D., y Peterson, A. T. (2003). Evaluating predictive models of species' distributions: criteria for selecting optimal models. *Ecological modelling*, 162(3), 211-232.
- Arizmendi, M. C., López-Saut, E., Monterrubio-Solís, C., Juárez, L., Flores-Moreno, I., & Rodríguez-Flores, C. (2008). Efecto de la presencia de bebederos artificiales sobre la diversidad y abundancia de los colibríes y el éxito reproductivo de dos especies de plantas en un parque suburbano de la Ciudad de México. *Ornitología neotropical*, 19, 491-500.
- Atauchi, P. J., Auca-Chutas, C., Ferro, G., y Prieto-Torres, D. A. (2020). Present and future potential distribution of the endangered *Anairetes alpinus* (Passeriformes: Tyrannidae) under global climate change scenarios. *Journal of Ornithology*.
- Azpeitia, F., y Lara, C. (2006). Reproductive biology and pollination of the parasitic plant *Psittacanthus calyculatus* (Loranthaceae) in central México. *The Journal of the Torrey Botanical Society*, 133(3), 429-438.
- Barrera, R. O. (2002). Consideraciones geomorfológicas sobre la Sierra Madre Occidental en el norte de Jalisco, México. *Investigaciones geográficas*, (48), 44-75.
- Barve, N., Barve, V., Jiménez-Valverde, A., Lira-Noriega, A., Maher, S. P., Peterson, A. T., Soberón, J., y Villalobos, F. (2011). The crucial role of the accessible area in ecological niche modeling and species distribution modeling. *Ecological modelling*, 222(11), 1810-1819.
- Belaid, A. H., Maurice, S., Freville, H., Carbonell, D., y Imbert, E. (2018). Predicting population viability of the narrow endemic Mediterranean plant *Centaurea corymbosa* under climate change. *Biological Conservation*, 223, 19-33.
- Bellard, C., Bertelsmeier, C., Leadley, P., Thuiller, W. y Courchamp, F. (2012). Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology letters*, 15(4), 365-377.
- Berg, M. P., Kiers, E. T., Driessen, G., Van Der Heijden, M., Kooi, B. W., Kuenen, F., Liefting, M., Verhoef, H. y Ellers, J. (2010). Adapt or disperse: understanding species persistence in a changing world. *Global Change Biology*, 16(2), 587-598.
- Bisio, A., De Mieri, M., Milella, L., Schito, A., Parricchi, A., Alfei, S., Virginola, L., Hamburger, M. y De Tommasi, N. (2017). Antibacterial and hypoglycemic diterpenoids from *Salvia chamaedryoides*. *Journal of natural products*, 80(2), 503-514.
- Blanco-Macías, F., Magallanes-Quintanar, R., Márquez-Madrid, M., Cerano-Paredes, J., Martínez-Salvador, M., y Valdez-Cepeda, R. D. (2020). Relationship between El Niño Southern Oscillation and Mexico's orange yield anomalies. *Terra Latinoamericana*, 38(4), 827-832.
- Bojórquez-Serrano, J. I., Vidal-Martínez, V. A., Álvarez-Bravo, A., y Coutiño-Estrada, B. (2020). Influence of 'El Niño, Southern Oscillation' on the yield of rainfed corn in Nayarit. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 11(6), 1413-1421.

- Cardona, J., Lara, C., y Ornelas, J. F. (2020). Pollinator divergence and pollination isolation between hybrids with different floral color and morphology in two sympatric *Penstemon* species. *Scientific reports*, 10(1), 1-17.
- Chavez-Alonso, C. L. A. (1999). Ecología de polinización de *Salvia mexicana* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio de la Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales de Información de la Universidad Nacional Autónoma de México [https://repositorio.unam.mx/contenidos/ecologia-de-polinizacion-de-salvia-mexicana-441830?c=pR8Vq4&d=false&q=:\\*:\\*&i=1&v=1&t=search\\_0&as=0](https://repositorio.unam.mx/contenidos/ecologia-de-polinizacion-de-salvia-mexicana-441830?c=pR8Vq4&d=false&q=:*:*&i=1&v=1&t=search_0&as=0)
- Chen, I. C., Hill, J. K., Ohlemüller, R., Roy, D. B. y Thomas, C. D. (2011). Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming. *Science*, 333(6045), 1024-1026.
- Chen, J. J., Sun, Y., Kopp, K., Oki, L. R., Jones, S. B., y Hips, L. (2023). Physiological and Canopy Temperature Responses to Drought of Four *Penstemon* Species. *HortScience*, 58(5), 539-549.
- Cobos, M. E., Peterson, A. T., Barve, N., y Osorio-Olvera, L. (2019). kuenm: an R package for detailed development of ecological niche models using Maxent. *PeerJ*, 7, e6281.
- CONABIO. (2008). *Capital natural de México, Vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México
- CONABIO. (2021). *Ecosistemas de México. Bosques templados*. <https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/bosqueTemplado>
- Cornejo-Tenorio, G., e Ibarra-Manríquez, G. (2011). Diversidad y distribución del género *Salvia* (Lamiaceae) en Michoacán, México. *Revista mexicana de biodiversidad*, 82(4), 1279-1296.
- Crowe, J., Sims, I., Turner, R., Borg, D., y Iacona, J. (2017). POWO puts botanical knowledge online. Key Royal Botanic Gardens. <https://www.kew.org/read-and-watch/plant-knowledge-online>
- Dieringer, G., Ramamoorthy, T. P., y Lezama, P. T. (1991). Floral visitors and their behavior to sympatric *Salvia* species (Lamiaceae) in Mexico. *Acta Botanica Mexicana*, (13), 75-83.
- Dupin, M., Reynaud, P., Jarošík, V., Baker, R., Brunel, S., Eyre, D., Pergl, J., y Makowski, D. (2011). Effects of the training dataset characteristics on the performance of nine species distribution models: application to *Diabrotica virgifera virgifera*. *PloS one*, 6(6), e20957.
- Elith, J., Phillips, S. J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y. E., y Yates, C. J. (2011). A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and distributions*, 17(1), 43-57.
- Espino-Espino, J., Rosas, F., y Cuevas-García, E. (2014). Variación temporal de visitantes florales en dos especies simpátricas de *Salvia* con floración simultánea y síndrome de polinización contrastante. *Revista mexicana de biodiversidad*, 85(1), 161-166.
- Estrada, A., Meireles, C., Morales-Castilla, I., Poschlod, P., Vieites, D., Araújo, M. B., y Early, R. (2015). Species' intrinsic traits inform their range limitations and vulnerability under environmental change. *Global Ecology and Biogeography*, 24(7), 849-858.
- Feng, G., Xiong, Y. J., Wei, H. Y., Li, Y., y Mao, L. F. (2022). Endemic medicinal plant distribution correlated with stable climate, precipitation, and cultural diversity. *Plant Diversity*.

- Fick, S. E., y Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International journal of climatology*, 37(12), 4302-4315.
- Figueiredo, F. O., Zuquim, G., Tuomisto, H., Moulatlet, G. M., Balslev, H., y Costa, F. R. (2018). Beyond climate control on species range: The importance of soil data to predict distribution of Amazonian plant species. *Journal of Biogeography*, 45(1), 190-200.
- GBIF.org (2023), ¿Qué es GBIF? Disponible en: <https://www.gbif.org/es/what-is-gbif> [8 de junio de 2023].
- Gelviz-Gelvez, S. M., Pavón, N. P., Illoldi-Rangel, P., y Ballesteros-Barrera, C. (2015). Ecological niche modeling under climate change to select shrubs for ecological restoration in Central Mexico. *Ecological Engineering*, 74, 302-309.
- Guisan, A., y Zimmermann, N. E. (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological modelling*, 135(2-3), 147-186.
- Hanspach, J., Kühn, I., Schweiger, O., Pompe, S., y Klotz, S. (2011). Geographical patterns in prediction errors of species distribution models. *Global Ecology and Biogeography*, 20(5), 779-788.
- Hengl, T., Mendes de Jesus, J., Heuvelink, G.B.M., Ruiperez Gonzalez, M., Kilibarda, M., Blagotić, A., Shangguan, W., Wright, M. N., Geng, X., Bauer-Marschallinger, B., Guevara, M. A., Vargas, R., MacMillan, R. A., Batjes, N. H., Leenars, J. G. B., Ribeiro, E., Wheeler, I., Mantel, S. y Kemoen, B. (2017). SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *PLoS ONE*. 12(2): e0169748. doi:10.1371/journal.pone.0169748
- Hijmans, R. J. (2022). raster: Geographic Data Analysis and Modeling. R package version 3.6-11. <https://CRAN.R-project.org/package=raster>
- INEGI. (Instituto Nacional de Estadística y Geografía; 2021). Conjunto de datos vectoriales de la Carta de Vegetación Primaria. Escala 1:1 000 000, 2003. INEGI. Marco Geoestadístico Nacional.
- Infante, S. D., Lara, C., Arizmendi, M. C., Eguiarte, L. E., y Ornelas, J. F. (2016). Reproductive ecology and isolation of *Psittacanthus calyculatus* and *P. auriculatus* mistletoes (Loranthaceae). *PeerJ*, 4, e2491.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2023). Synthesis Report Of The IPCC Sixth Assessment Report (AR6). *United Nations*.
- Kataoka, T., Tatebe, H., Koyama, H., Mochizuki, T., Ogochi, K., Naoe, H., Imada, Y., Shiogama, H., Komoto, M., y Watanabe, M. (2020). Seasonal to decadal predictions with MIROC6: Description and basic evaluation. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12(12), e2019MS002035.
- Keck, C., Snyder, S., Gotcher, M., Schroeder, J., Schnelle, M., y Moss, J. (2014). *Drought-tolerant plant selections for Oklahoma*. Oklahoma Cooperative Extension Service.
- Laala, A., Alatou, D., y Adimi, A. (2021). Predicting potential habitat suitability of *Quercus suber* L. in Algeria under climate change scenarios. *African Journal of Ecology*, 59(4), 976-987.
- Lara, C., y Ornelas, J. F. (2008). Pollination ecology of *Penstemon roseus* (Plantaginaceae), an endemic perennial shifted toward hummingbird specialization? *Plant Systematics and Evolution*, 271(3), 223-237.

- Lara-Rodríguez, N. Z., Díaz-Valenzuela, R., Martínez-García, V., Mauricio-López, E., Anaíd-Díaz, S., Valle, O. I., Fisher-de León, A. D., Lara, C. y Ortiz-Pulido, R. (2012). Redes de interacción colibrí-planta del centro-este de México. *Revista mexicana de biodiversidad*, 83(2), 569-577.
- Lavergne, S., Thompson, J. D., Garnier, E., y Debussche, M. (2004). The biology and ecology of narrow endemic and widespread plants: a comparative study of trait variation in 20 congeneric pairs. *Oikos*, 107(3), 505-518.
- Lester, S. E., Ruttenberg, B. I., Gaines, S. D., y Kinlan, B. P. (2007). The relationship between dispersal ability and geographic range size. *Ecology Letters*, 10(8), 745-758.
- Lira, R., Casas, A., Rosas-López, R., Paredes-Flores, M., Pérez-Negrón, E., Rangel-Landa, S., Solís, L., Torres, I., y Dávila, P. (2009a). Traditional knowledge and useful plant richness in the Tehuacán-Cuicatlán Valley, Mexico. *Economic Botany*, 63(3), 271-287.
- Lira, R., Téllez, O., y Dávila, P. (2009b). The effects of climate change on the geographic distribution of Mexican wild relatives of domesticated Cucurbitaceae. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 56(5), 691-703.
- Lira-Noriega, A., y Peterson, A. T. (2014). Range-wide ecological niche comparisons of parasite, hosts and dispersers in a vector-borne plant parasite system. *Journal of biogeography*, 41(9), 1664-1673.
- Liu, C., White, M., y Newell, G. (2013). Selecting thresholds for the prediction of species occurrence with presence-only data. *Journal of biogeography*, 40(4), 778-789.
- López de Buen, L., y Ornelas, J. F. (2002). Host compatibility of the cloud forest mistletoe *Psittacanthus schiedeianus* (Loranthaceae) in central Veracruz, Mexico. *American Journal of Botany*, 89(1), 95-102.
- Maldonado, C., Molina, C. I., Zizka, A., Persson, C., Taylor, C. M., Albán, J., Chilquillo, E., Rønsted, N. y Antonelli, A. (2015). Estimating species diversity and distribution in the era of Big Data: to what extent can we trust public databases? *Global Ecology and Biogeography*, 24(8), 973-984.
- Martínez-Gordillo, M., Bedolla-García, B., Cornejo-Tenorio, G., Fragoso-Martínez, I., García-Peña, M. R., González-Gallegos, J. G., Lara-Cabrera, S. I. y Zamudio, S. (2017). Lamiaceae de México. *Botanical Sciences*, 95(4), 780-806.
- Martínez-Gordillo, M., Fragoso-Martínez, I., García-Peña, M. R., y Montiel, O. (2013). Géneros de Lamiaceae de México, diversidad y endemismo. *Revista mexicana de biodiversidad*, 84(1), 30-86.
- Matías, L. (2012). Cambios en los límites de distribución de especies arbóreas como consecuencia de las variaciones climáticas. *Ecosistemas*, 21(3), 91-96.
- Mendoza-González, G., Martínez, M. L., Rojas-Soto, O. R., Vázquez, G., y Gallego-Fernández, J. B. (2013). Ecological niche modeling of coastal dune plants and future potential distribution in response to climate change and sea level rise. *Global Change Biology*, 19(8), 2524-2535.
- Moreno-Pérez, F., Hernández-León, A., Valled-Dorado, M. G., Cano-Martínez, A., Narváez-González, F., Aguirre-Hernández, E., Salgado-Ceballos, H. y González-Trujano, M. E. (2021). Neo-clerodane diterpenic influence in the antinociceptive and anti-inflammatory properties of *Salvia circinnata* Cav. *Journal of Ethnopharmacology*, 268, 113550.
- Morrone, J. J. (2014). Biogeographical regionalization of the Neotropical region. *Zootaxa*, 3782(1), 1-110.

- Morrone, J. J., Escalante, T., y Rodríguez-Tapia, G. (2017). Mexican biogeographic provinces: Map and shapefiles. *Zootaxa*, 4277(2), 277-279.
- Murray, K. A., Verde Arregoitia, L. D., Davidson, A., Di Marco, M., y Di Fonzo, M. M. (2014). Threat to the point: improving the value of comparative extinction risk analysis for conservation action. *Global Change Biology*, 20(2), 483-494.
- Naimi, B., Hamm, N., Groen, T. A., Skidmore, A. K., y Toxopeus, A. G. (2014). “Where is positional uncertainty a problem for species distribution modelling.” *Ecography*, 37, 191-203.
- Nemali, K. S., y van Iersel, M. W. (2005). Water Requirements and Drought Tolerance of Bedding Plants, *HortScience HortSci*, 40(4), 1115D-1115
- Niu, G., y Rodríguez, D. S. (2005). (452) Growth Responses of *Salvia greggii* and *Dalea frutescens* to Drought Stress, *HortScience HortSci*, 40(4), 1036A-1036.
- Olson, D. M., Dinerstein, E., Wikramanayake, E. D., Burgess, N. D., Powell, G. V., Underwood, E. C., D’amico, J. A., Itoua, I., Strand, H. E., Morrison, J. C., Loucks, C. J., Allnutt, T. F., Ricketts, T. H., Kura, Y., Lamoreux, J. F., Wettengel, W. W., Hedao, P., y Kassem, K. R. (2001). Terrestrial Ecoregions of the World: A New Map of Life on Earth A new global map of terrestrial ecoregions provides an innovative tool for conserving biodiversity. *BioScience*, 51(11), 933-938.
- Ornelas, J. F. (2022). Los muérdagos *Psittacanthus*... oh no, ¡ciencia básica! *Eco-Lógico*, año 3, volumen 3, No. 2, <https://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/ct-menu-item-25/2022-07-04-13-11-59/2022-07-04-13-25-56/eco-logico#:~:text=ECO%2DL%C3%93GICO&text=El%20INECOL%20desarrolla%20investigaci%C3%B3n%20sobre,sustentable%20de%20los%20recursos%20naturales>
- Ornelas, J. F., Gándara, E., Vásquez-Aguilar, A. A., Ramírez-Barahona, S., Ortiz-Rodríguez, A. E., González, C., Mejía Saules, M. T., y Ruiz-Sánchez, E. (2016). A mistletoe tale: postglacial invasion of *Psittacanthus schiedeana* (Loranthaceae) to Mesoamerican cloud forests revealed by molecular data and species distribution modeling. *BMC Evolutionary Biology*, 16, 1-20.
- Ornelas, J. F., Licona-Vera, Y., y Vásquez-Aguilar, A. A. (2018). Genetic differentiation and fragmentation in response to climate change of the narrow endemic *Psittacanthus auriculatus*. *Tropical Conservation Science*, 11.
- Ortega-Andrade, H. M., Prieto-Torres, D. A., Gómez-Lora, I., y Lizcano, D. J. (2015). Ecological and geographical analysis of the distribution of the mountain tapir (*Tapirus pinchaque*) in Ecuador: importance of protected areas in future scenarios of global warming. *PloS one*, 10(3), e0121137.
- Ortega-Huerta, M. A., y Peterson, A. T. (2008). Modeling ecological niches and predicting geographic distributions: a test of six presence-only methods. *Revista mexicana de Biodiversidad*, 79(1), 205-216.
- Osorio-Olvera, L., Lira-Noriega, A., Soberón, J., Peterson, A., Falconi, M., Contreras-Díaz, R., Martínez-Meyer, E., Barve, V., y Barve, N. (2020). ntbox: An r package with graphical user interface for modelling and evaluating multidimensional ecological niches. *Methods in Ecology and Evolution*, 2020 (noviembre 2019), 1199–1206.
- Ovando-Hidalgo, N., Tun-Garrido, J., Mendoza-González, G., y Parra-Tabla, V. (2020). Efecto del cambio climático en la distribución de especies clave en la vegetación de duna costera en la península de Yucatán, México. *Revista mexicana de biodiversidad*, 91.

Parmesan, C. y Yohe, G. (2003). A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 421(6918), 37-42.

Pérez-Crespo, M. J., Ornelas, J. F., Martén-Rodríguez, S., González-Rodríguez, A., y Lara, C. (2016). Reproductive biology and nectar production of the Mexican endemic *Psittacanthus auriculatus* (L oranthaceae), a hummingbird-pollinated mistletoe. *Plant Biology*, 18(1), 73-83.

Peterson, A. T., Cobos, M. E., y Jiménez-García, D. (2018). Major challenges for correlational ecological niche model projections to future climate conditions. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1429(1), 66-77.

Peterson, A. T., Ortega-Huerta, M. A., Bartley, J., Sánchez-Cordero, V., Soberón, J., Buddemeier, R. H., y Stockwell, D. R. (2002). Future projections for Mexican faunas under global climate change scenarios. *Nature*, 416(6881), 626-629.

Peterson, A. T., Soberón, J., Pearson, R. G., Anderson, R. P., Martinez-Meyer, E., Nakamura, M., y Araújo, M. B. (2011). *Ecological niche and geographic distributions*. Princeton, New Jersey: Monographs in Population Biology, Princeton University Press.

Phillips, S. J., Anderson, R. P., y Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological modelling*, 190(3-4), 231-259.

Phillips, S. J., Dudík, M., y Schapire, R. E. (2004). A maximum entropy approach to species distribution modeling. In *Proceedings of the twenty-first international conference on Machine learning* (p. 83).

Phillips, S. J., y Dudík, M. (2008). Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 31(2), 161-175.

Posit team (2022). RStudio: Integrated Development Environment for R. Posit Software, PBC, Boston, MA. <http://www.posit.co/>.

Prieto-Torres, D. A., Lira-Noriega, A., y Navarro-Sigüenza, A. G. (2020). Climate change promotes species loss and uneven modification of richness patterns in the avifauna associated to Neotropical seasonally dry forests. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 18(1), 19-30.

Prieto-Torres, D. A., Navarro-Sigüenza, A. G., Santiago-Alarcon, D., y Rojas-Soto, O. R. (2016). Response of the endangered tropical dry forests to climate change and the role of Mexican Protected Areas for their conservation. *Global change biology*, 22(1), 364-379.

Ramírez-Barahona, S., González, C., González-Rodríguez, A., y Ornelas, J. F. (2017). The influence of climatic niche preferences on the population genetic structure of a mistletoe species complex. *New Phytologist*, 214(4), 1751-1761.

Reyes-Santiago, J., Islas-Luna, M. A., y Hernández-Castro, N. (2021). *Catálogo de especies nativas. Viveros Yecapixtla y Nezahualcóyotl*. Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de la Ciudad de México.

Riahi, K., Van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvén, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Crespo Cuaresma, J., Samir, K. C. Leimbach, M., Jiang, L., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., Ebi, K., Hasegawa, T., Havlik, P., Humpenöder, F., Aleluia Da Silva, L., Smith, S., Stehfest, E., Bosetti, V., Eom, J., Gernaat, D., Masui, T., Rogelj, J., Strefle, J., Drouet, L., Krey, V., Luderer, G., Harmsen, M., Takashi, K., Baumstark, L., Doelman, J. C., Kainuma, M., Klimont, Z., Marangoni, G., Lotze-Campen, H., Obersteiner, M., Tabeau, A. y Tavoni, M.

(2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global environmental change*, 42, 153-168.

Rzedowski, G. C. D., y Rzedowski, J. (2001). *Flora fanerogámica del Valle de México*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.

Santos-Hernández, A. F., Monterroso-Rivas, A. I., Granados-Sánchez, D., Villanueva-Morales, A., y Santacruz-Carrillo, M. (2021). Projections for Mexico's tropical rainforests considering ecological niche and climate change. *Forests*, 12(2), 119.

Sargent, R. D., y Ackerly, D. D. (2008). Plant–pollinator interactions and the assembly of plant communities. *Trends in Ecology & Evolution*, 23(3), 123-130.

Sepúlveda-Cuellar, L., Duque-Ortiz, A., Yáñez-Espinosa, L., Calzada, F., Bautista, E., Pastor-Palacios, G., Bedolla, B., Flores-Rivas, J., Badano, E. y Douterlungne, D. (2021). Phylogenetic and Chemical Analyses of the Medicinal Plant *Salvia circinnata*: an Approach to Understand Metabolomics Differences. *Revista Brasileira de Farmacognosia*, 31(5), 676-688.

Shiogama, H., Abe, M. y Tatebe, H. (2019). *MIROC MIROC6 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP*. Earth System Grid Federation.

Simoes, M., Romero-Alvarez, D., Nuñez-Penichet, C., Jiménez, L., y Cobos, M. E. (2020). General theory and good practices in ecological niche modeling: a basic guide. *Biodiversity Informatics*, 15(2), 67-68.

Soberón, J., y Nakamura, M. (2009). Niches and distributional areas: Concepts, methods, and assumptions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(SUPPL. 2), 19644–19650.

Soberón, J., y Peterson, A. T. (2005). Interpretation of models of fundamental ecological niches and species' distributional areas. *Biodiversity informatics*, 2 (January), 1-10.

Suárez-Mota, M. E., Téllez-Valdés, O., Lira-Saade, R., y Villaseñor, J. L. (2013). Una regionalización de la Faja Volcánica Transmexicana con base en su riqueza florística. *Botanical Sciences*, 91(1), 93-105.

Suárez-Mota, M. E., Téllez-Valdés, O., y Meyer, E. M. (2014). Dominios climáticos de las áreas naturales protegidas del eje volcánico transversal de México. *GeoFocus. International Review of Geographical Information Science and Technology*, (14), 120-143.

Swart, N. C., Cole, J. N., Kharin, V. V., Lazare, M., Scinocca, J. F., Gillett, N. P., Anstey, J., Arora, V., Christian, J. R., Hanna, S., Jiao, Y., Lee, W. G., Majaess, F., Saenko, O. A., Seiler, C., Seinen, C., Shao, A., Sigmond, M., Solheim, L., von Salsen, K., Yang, D., y Winter, B. (2019a). The Canadian earth system model version 5 (CanESM5. 0.3). *Geoscientific Model Development*, 12(11), 4823-4873.

Swart, N. C., Cole, J.N.S., Kharin, V. V., Lazare, M., Scinocca, J. F., Gillett, N. P., Anstey, J., Arora, V., Christian, J. R., Jiao, Y., Lee, W. G., Majaess, F., Saenko, O. A., Seiler, C., Seinen, C., Shao, A., Solheim, L., von Salzen, K., Yang, D., Winter, B. y Sigmond, M. (2019b). *CCCma CanESM5 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP*. Earth System Grid Federation.

Thomas, C. D., Cameron, A., Green, R. E., Bakkenes, M., Beaumont, L. J., Collingham, Y. C., Erasmus, B. F. N., Ferreira de Siqueira, M., Grainger, A., Lee, H., Hughes, L., Huntley, B., van Jaarsveld, A. S., Midgley, G. F., Miles, L., Ortega-Huerta, M. A., Peterson, A. T., Phillips, O. y Williams, S. E. (2004). Extinction risk from climate change. *Nature*, 427(6970), 145-148.

Thompson, K., Gaston, K. J., y Band, S. R. (1999). Range size, dispersal and niche breadth in the herbaceous flora of central England. *Journal of Ecology*, 87(1), 150-155.

Thuiller, W., Lavorel, S., y Araújo, M. B. (2005). Niche properties and geographical extent as predictors of species sensitivity to climate change. *Global ecology and biogeography*, 14(4), 347-357.

Trejo, I., Hernández, J., y Villers, L. (2007). Afectación de las comunidades vegetales de México ante el cambio climático. *XI Encuentro de Geógrafos de América*.

Turner, B. L. (2013). Taxonomic overview of the Mexican species of *Salvia* sect. *Flocculosae* (Lamiaceae). *Phyton*, 36, 1-11.

Ulrey, C., Quintana-Ascencio, P. F., Kauffman, G., Smith, A. B., y Menges, E. S. (2016). Life at the top: Long-term demography, microclimatic refugia, and responses to climate change for a high-elevation southern Appalachian endemic plant. *Biological Conservation*, 200, 80-92.

UN (United Nations). (1992). *Convención marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Naciones Unidas.

Urban, M. C. (2015). *Accelerating extinction risk from climate change*. *Science*, 348(6234), 571–573. doi:10.1126/science.aaa4984

Van der Veken, S., Bellemare, J., Verheyen, K., y Hermy, M. (2007). Life-history traits are correlated with geographical distribution patterns of western European forest herb species. *Journal of Biogeography*, 34(10), 1723-1735.

Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G. C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J. F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S. J. y Rose, S. K. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic change*, 109, 5-31.

Varela, D., Romeiras, M. M., y Silva, L. (2022). Implications of climate change on the distribution and conservation of Cabo Verde endemic trees. *Global Ecology and Conservation*, 34, e02025.

Villaseñor, J. L. (2016). Checklist of the native vascular plants of Mexico. *Revista mexicana de biodiversidad*, 87(3), 559-902.

Vázquez-Yanes, C., Batis Muñoz, A. I., Alcocer Silva, M. I., Gual Díaz, M., y Sánchez Dirzo, C. (1999). *Árboles y arbustos potencialmente valiosos para la restauración ecológica y la reforestación*. Reporte técnico del proyecto J084. CONABIO - Instituto de Ecología, UNAM.

Velasco, B. P. (2009). Reserva de la Biosfera Tehuacan-Cuicatlán. En Estimación y Actualización de la Tasa de Transformación del Hábitat de las Áreas Naturales Protegidas SINAP I y SINAP II del FANP. CONTRATO No. 017-08-002. [https://simec.conanp.gob.mx/TTH/Tehuacan/Tehuacan\\_TTH\\_2000\\_2008.pdf](https://simec.conanp.gob.mx/TTH/Tehuacan/Tehuacan_TTH_2000_2008.pdf)

Villers-Ruiz, L., y Trejo-Vázquez, I. (2000). El cambio climático y la vegetación en México. *México: Una Visión Hacia El Siglo XXI El Cambio Climático En México*, Universidad Nacional Autónoma de México, México, CDMX, 57-66.

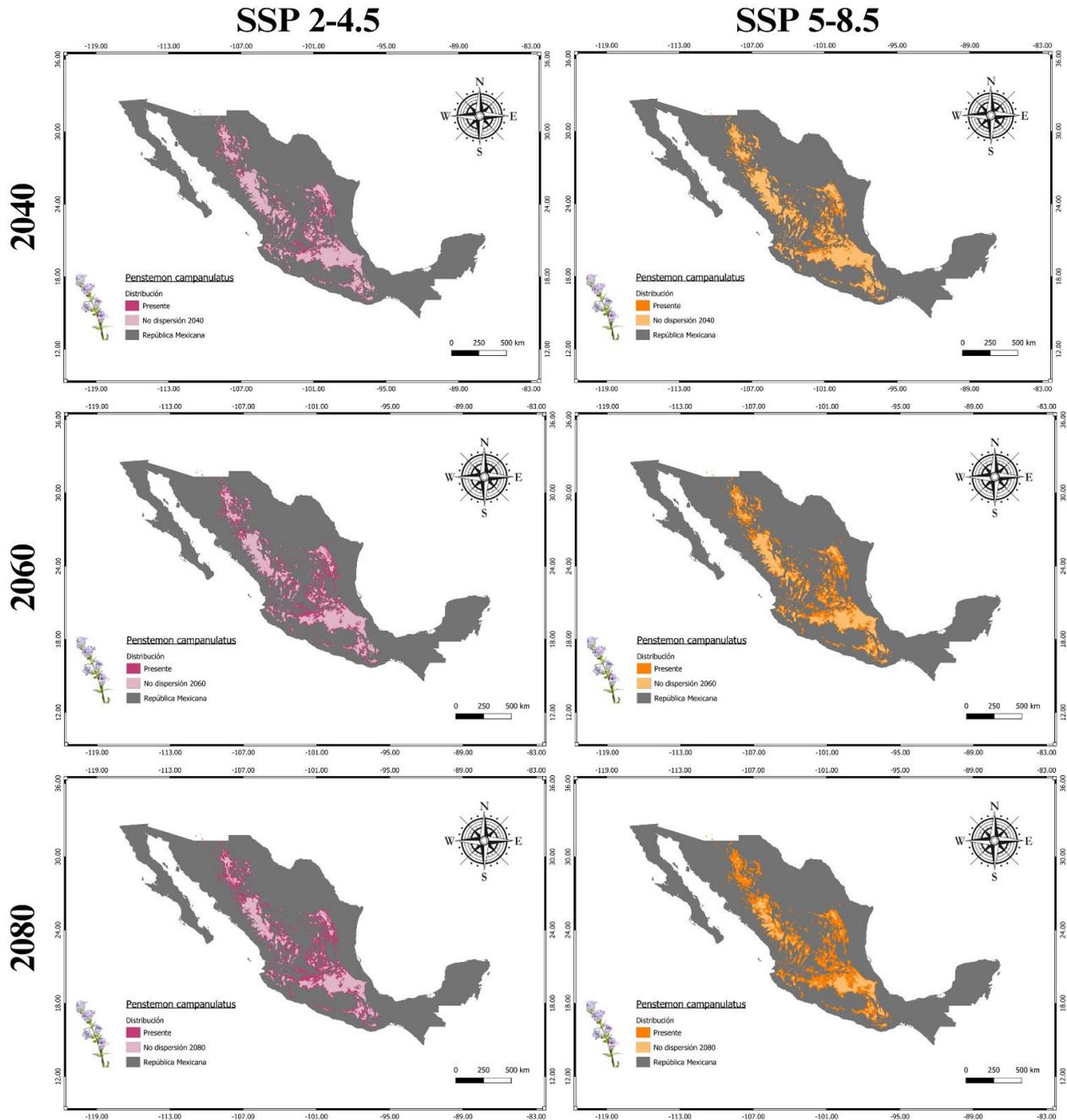
Walther, G. R., Post, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, C., Beebee, T. J., Frometin, J. C., Hoegh-Guldberg, O. y Bairlein, F. (2002). Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 416(6879), 389-395.

- Wei, T. y Simko, V. (2021). R package 'corrplot': Visualization of a Correlation Matrix (Version 0.92). <https://github.com/taiyun/corrplot>
- Wickham, H., François, R., Henry, L., Müller, K. y Vaughan, D. (2023). *dplyr: A Grammar of Data Manipulation*. <https://dplyr.tidyverse.org>, <https://github.com/tidyverse/dplyr>.
- Woodin, S. A., Hilbish, T. J., Helmuth, B., Jones, S. J., y Wethey, D. S. (2013). Climate change, species distribution models, and physiological performance metrics: predicting when biogeographic models are likely to fail. *Ecology and Evolution*, 3(10), 3334-3346.
- Woodward, F. I., y Williams, B. G. (1987). Climate and plant distribution at global and local scales. *Vegetatio*, 69(1), 189-197.
- Wu, T., Chu, M., Dong, M., Fang, Y., Jie, W., Li, J., Li, W., Liu, Q., Shi, X., Xin, X., Yan, J., Zhang, F., Zhang, J., Zhang, L. y Zhang, Y. (2018). *BCC BCC-CSM2MR model output prepared for CMIP6 CMIP piControl*. Earth System Grid Federation. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.3016>
- Wu, T., Li, W., Ji, J., Xin, X., Li, L., Wang, Z., Zhang, Y., Li, J., Zhang, F., Wei, M., Shi, X., Wu, F., Zhang, L., Chu, M., Jie, W., Liu, Y., Wang, F., Liu, X., Li, Q., Dong, M., Liang, X., Gao, Y., y Zhang, J. (2013). Global carbon budgets simulated by the Beijing Climate Center Climate System Model for the last century. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(10), 4326-4347.
- Zacarías-Correa, A. G., Guzmán-Díaz, S., y Pérez-Calix, E. (2019). Taxonomía, distribución geográfica y ecológica del género *Penstemon* (Plantaginaceae) en la Faja Volcánica Transmexicana, México. *Acta botánica mexicana*, (126).
- Zajdel, S. M., Graikou, K., Głowniak, K., y Chinou, I. (2012). Chemical analysis of *Penstemon campanulatus* (Cav.) Willd. -Antimicrobial activities. *Fitoterapia*, 83(2), 373-376.
- Zollinger, N., Kjellgren, R., Cerny-Koenig, T., Kopp, K., y Koenig, R. (2006). Drought responses of six ornamental herbaceous perennials. *Scientia Horticulturae*, 109(3), 267-274.
-

## ANEXO 1

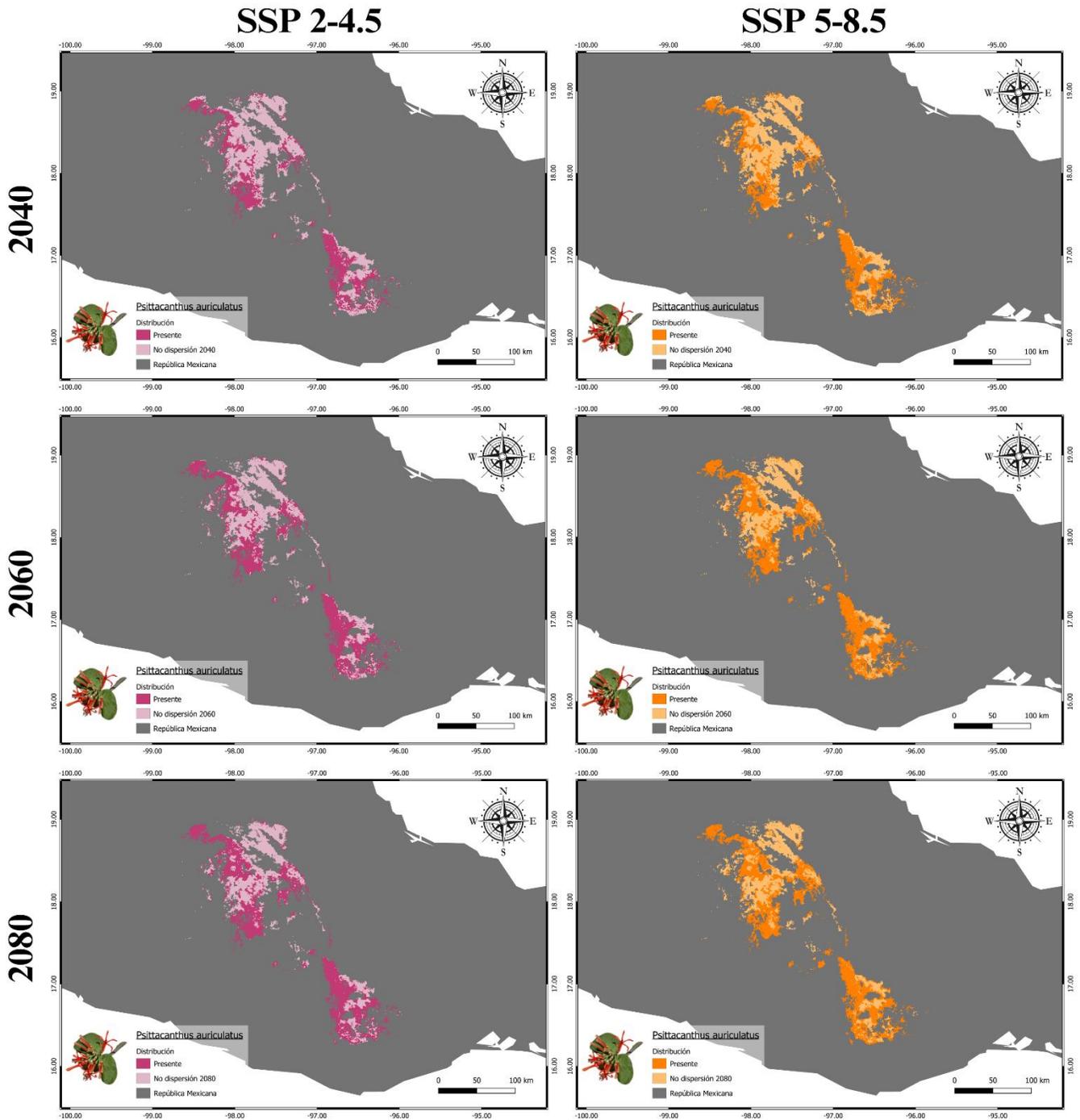
Modelos de distribución potencial bajo escenarios climáticos futuros y el supuesto de “no dispersión” de las especies

### No dispersión



**Figura 17.** Distribución potencial de *Penstemon campanulatus* en dos escenarios climáticos futuros (“Optimista” vs. “Pesimista”) y tres ventanas de tiempo distintas, en comparación con su distribución potencial actual, bajo el supuesto de “no dispersión”.

# No dispersión



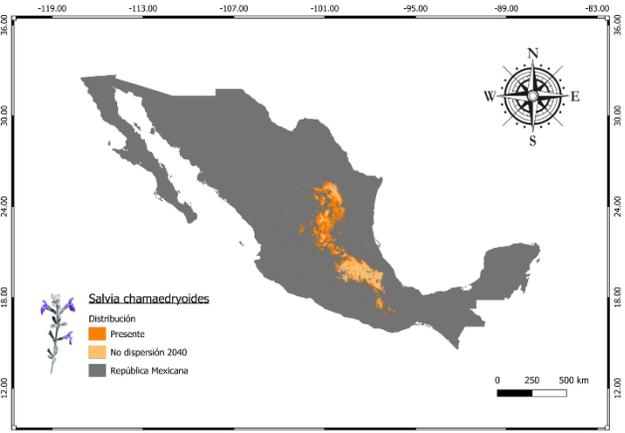
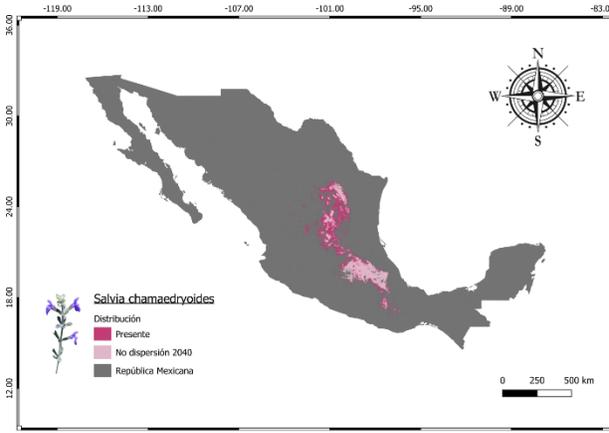
**Figura 18.** Distribución potencial de *Psittacanthus auriculatus* en dos escenarios climáticos futuros (“Optimista” vs. “Pesimista”) y tres ventanas de tiempo distintas, en comparación con su distribución potencial actual, bajo el supuesto de “no dispersión”.

# No dispersión

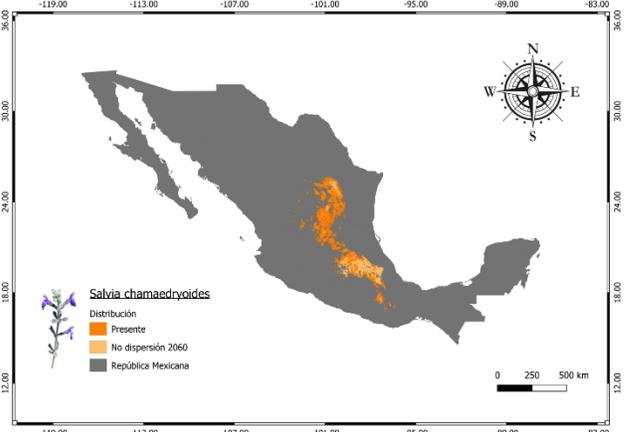
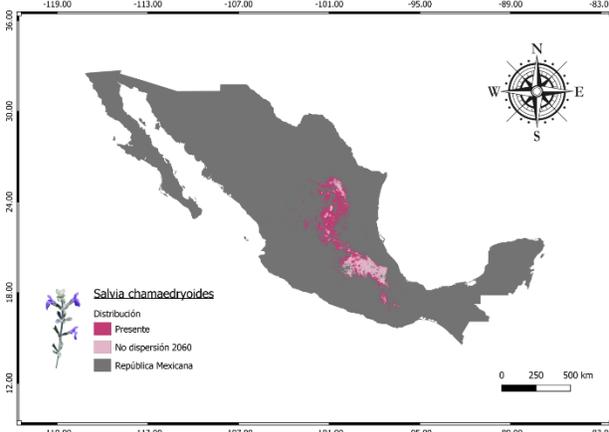
## SSP 2-4.5

## SSP 5-8.5

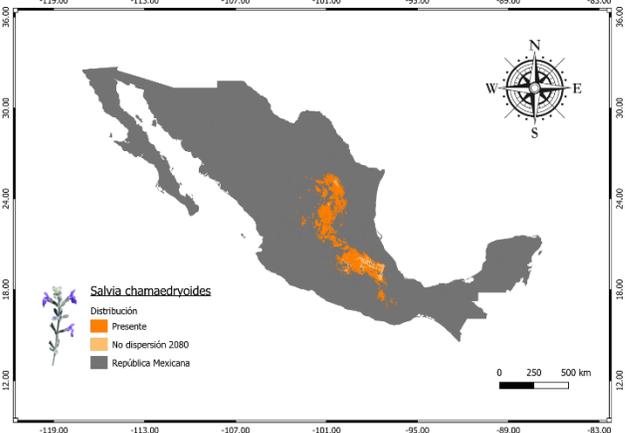
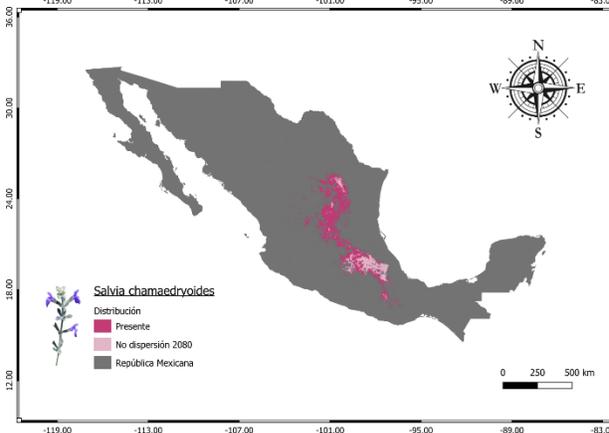
2040



2060



2080



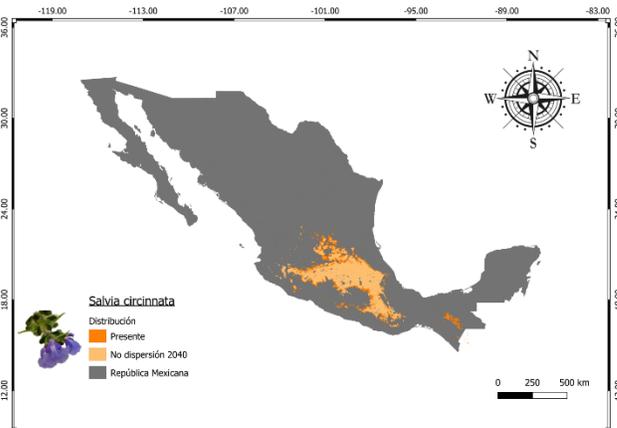
**Figura 19.** Distribución potencial de *Salvia chamaedryoides* en dos escenarios climáticos futuros (“Optimista” vs. “Pesimista”) y tres ventanas de tiempo distintas, en comparación con su distribución potencial actual, bajo el supuesto de “no dispersión”.

# No dispersión

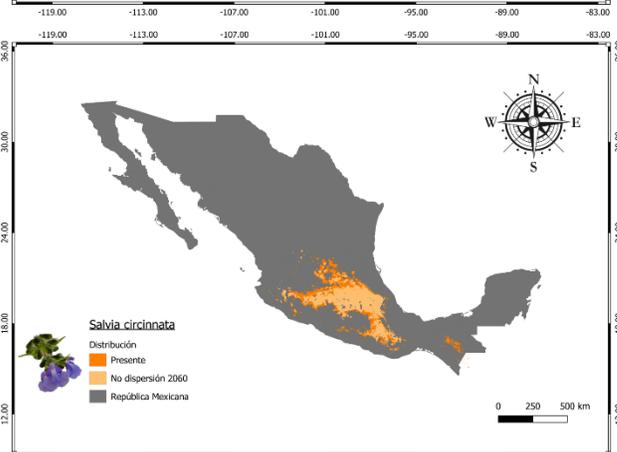
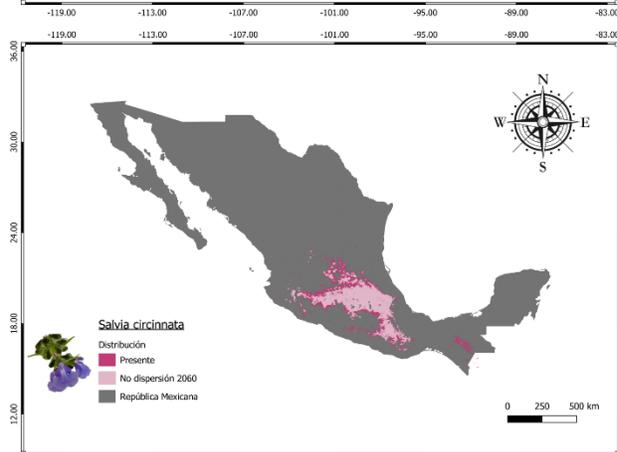
## SSP 2-4.5

## SSP 5-8.5

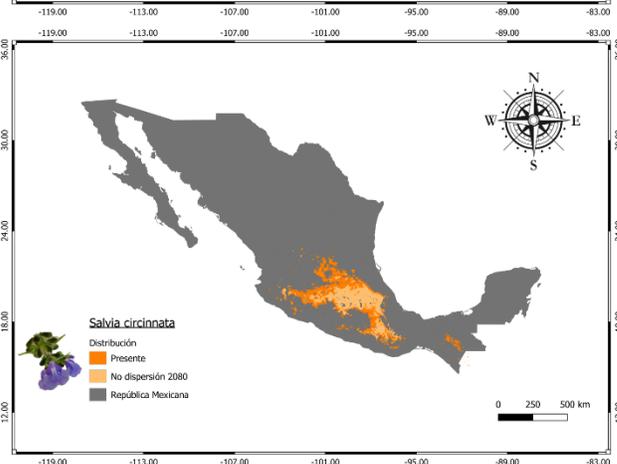
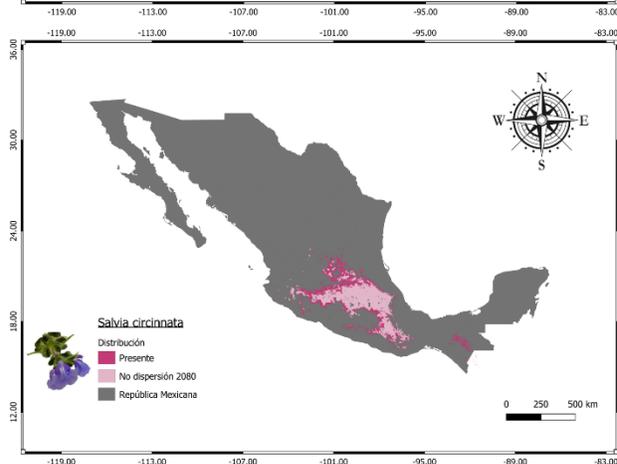
### 2040



### 2060



### 2080

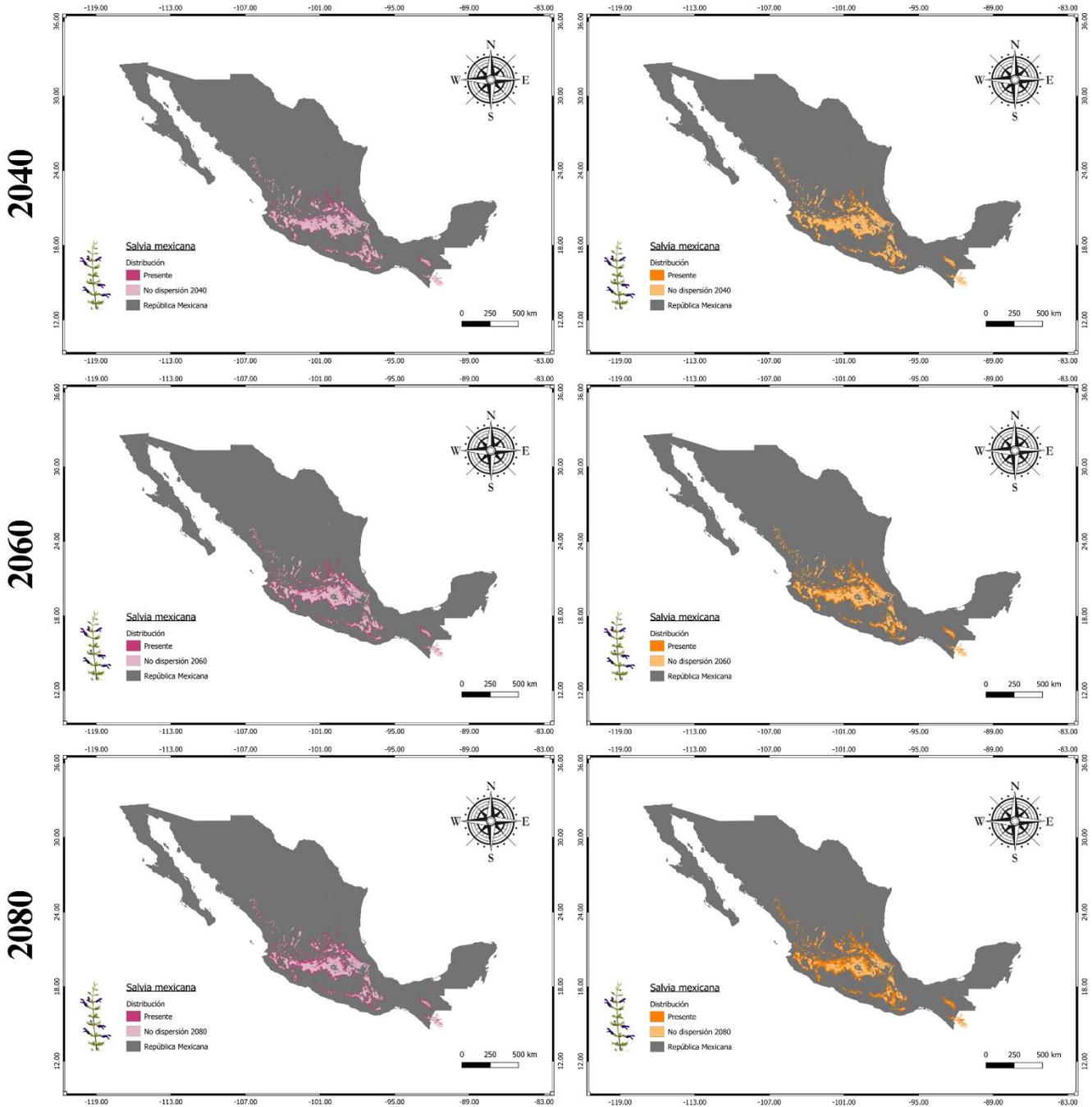


**Figura 20.** Distribución potencial de *Salvia circinnata* en dos escenarios climáticos futuros (“Optimista” vs. “Pesimista”) y tres ventanas de tiempo distintas, en comparación con su distribución potencial actual, bajo el supuesto de “no dispersión”.

# No dispersión

## SSP 2-4.5

## SSP 5-8.5



**Figura 21.** Distribución potencial de *Salvia mexicana* en dos escenarios climáticos futuros (“Optimista” vs. “Pesimista”) y tres ventanas de tiempo distintas, en comparación con su distribución potencial actual, bajo el supuesto de “no dispersión”.