



# Universidad Autónoma de Tlaxcala

---

---

## Posgrado en Ciencias Biológicas

Variación de la distribución potencial de especies focales en la  
región oriental de la Faja Volcánica Transmexicana en los últimos  
70 años

# TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE  
MAESTRO (A) EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

P r e s e n t a

**Frida Ximena Garnica Martínez**

**Directoras de tesis**

Dra. Itzel Arias del Razo

Dra. Yendi E. Navarro Noya

Tlaxcala, Tlax.

Enero, 2022





# Universidad Autónoma de Tlaxcala

---

---

## Posgrado en Ciencias Biológicas

Variación de la distribución potencial de especies focales en la  
región oriental de la Faja Volcánica Transmexicana en los últimos  
70 años

# TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE  
**MAESTRO (A) EN CIENCIAS BIOLÓGICAS**

P r e s e n t a

**Frida Ximena Garnica Martínez**

### Comité tutorial

Dr. Aníbal Díaz de la Vega Pérez

Dr. Enrique Martínez -Meyer

Dra. Araxi Urrutia Odobachian

Tlaxcala, Tlax.

Enero, 2022

## Financiamiento

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca para llevar a cabo mis estudios de maestría (No. 1001839).

Este proyecto contó con financiamiento otorgado por el Fondo Sectorial de Investigación SRE-CONACYT, dentro del proyecto "Análisis de la conectividad funcional entre los Parques Nacionales La Malinche e Iztaccíhuatl-Popocatepetl e identificación de áreas prioritarias para la conservación" (Proyecto No. 286794).



**COORDINACIÓN MAESTRÍA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE TLAXCALA  
P R E S E N T E**

Los abajo firmantes, miembros del jurado evaluador del proyecto de tesis que **Frida Ximena Garnica Martínez** realiza para la obtención del grado de **Maestra en Ciencias Biológicas**, expresamos que, habiendo revisado la versión final del documento de tesis, damos la aprobación para que ésta sea impresa y defendida en el examen correspondiente. El título que llevará es **“Variación de la distribución potencial de especies focales en la región oriental de la Faja Volcánica Transmexicana en los últimos 70 años”**.

Sin otro particular, aprovechamos para enviarle un cordial saludo.

A T E N T A M E N T E  
TLAXCALA, TLAX., ENERO 19 DE 2022

DR. ENRIQUE MARTÍNEZ MEYER

DRA. ITZEL ARIAS DEL RAZO

DR. ANÍBAL HELIOS DÍAZ DE LA VEGA PÉREZ

DRA. BÁRBARA CRUZ SALAZAR

DR. JOSÉ VÍCTOR PERALTA MOCTEZUMA



**Universidad  
Autónoma de  
Tlaxcala**

CENTRO TLAXCALA DE BIOLOGÍA DE LA CONDUCTA  
Coordinación de la División de Ciencias Biológicas  
Secretaría de Investigación Científica y Posgrado

**Asunto:** Análisis de similitud de tesis

**COMITÉ ACADÉMICO  
POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS**

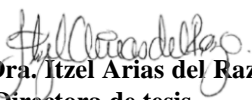
Sirva este medio para describir el proceso de revisión de la tesis realizada por la estudiante **Frida Ximena Garnica Martínez** titulada “**Variación de la distribución potencial de especies focales en la región oriental de la Faja Volcánica Transmexicana en los últimos 70 años**” para optar por su grado de **Maestra en Ciencias Biológicas**.

La versión final del documento de tesis de **Frida Ximena Garnica Martínez** se sometió a un análisis de similitud en el programa Turnitin, LLC el día 19 de enero de 2022. Se analizaron un total de 15459 palabras y 86519 caracteres, excluyéndose la portada y la sección de Bibliografía, y se encontró una similitud general del 16%. Todas las coincidencias encontradas no representaron >1% del total del texto y en la inspección manual de las coincidencias se encontró que la mayoría era por “Fraseología de uso común” o menciones debidamente referenciadas.

Por lo anterior, confirmamos que **la estudiante no incurrió en ninguna práctica no deseable** en la escritura de la tesis.

Sin más por el momento, reciban atentos saludos.

**A T E N T A M E N T E**  
**“POR LA CULTURA A LA JUSTICIA SOCIAL”**  
**TLAXCALA DE XICOTÉNCATL A 19 DE ENERO DE 2022**

  
**Dra. Itzel Arias del Razo**  
**Directora de tesis**

  
**Dra. Yendi Ebenezzer Navarro Noya**  
**Codirectora de tesis**



Sistema Institucional de Gestión de la Calidad Certificado bajo la Norma:  
ISO 9001:2015-NMX-CC-9001-IMNC-2015



## Agradecimientos

- Al posgrado en Ciencias Biológicas del Centro Tlaxcala de Biología de la Conducta (CTBC) de la Universidad Autónoma de Tlaxcala (UATx)
- A los integrantes y al personal administrativo del proyecto “Análisis de la conectividad funcional entre los Parques Nacionales La Malinche e Iztaccíhuatl – Popocatepetl, e identificación de áreas prioritarias para la conservación” (Proyecto No. 286794).
- Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), número 1001839.
- A los miembros del Comité Tutor: La Dra. Itzel Arias del Razo, La Dra. Yendi E. Navarro Noya, al Dr. Aníbal Díaz de la Vega-Pérez, al Dr. Enrique Martínez Meyer y a la Dra. Araxi Urrutia Odobachian.
- A la Fis. Rosario Landgrave Ramírez del Instituto de Ecología, A.C. por su asesoría en los análisis espaciales y por aceptarme en el curso de SIG del posgrado.
- A los integrantes del jurado La Dra. Bárbara Cruz Salazar y el Dr. José Víctor Peralta Moctezuma, por la revisión y comentarios que mejoraron el trabajo.
- A compañeros y amigos que formaron parte de esta etapa en especial a Mayra y Zuñy por su ayuda infinita en el proceso del trabajo.
- A mis padres por siempre estar presentes y apoyarme en mis decisiones, son un gran pilar en mi vida.
- A mi hermano David por escucharme, abrazarme y darme todo su cariño día con día.
- A Guicho por ser otro papá para mí y siempre estar al pendiente.
- A mi abuelita Pilar por darme siempre su cariño y su apoyo.
- A Alberto por volverse mi familia principal junto a nuestros perros. Eres el apoyo más valioso que tuve durante este tiempo, gracias por dar un cachito de ti para mí. Te amo.

<b>Resumen .....</b>	<b>12</b>
<b>Antecedentes .....</b>	<b>19</b>
<b>Teoría del concepto de nicho ecológico y distribución potencial de especies .....</b>	<b>19</b>
<b>Métodos para la estimación de Modelos de nicho ecológico y Modelos de distribución potencial .....</b>	<b>21</b>
<b>Distribución de especies bajo efecto del cambio climático.....</b>	<b>22</b>
<b>Justificación.....</b>	<b>24</b>
<b>Pregunta de investigación .....</b>	<b>25</b>
<b>Objetivo General.....</b>	<b>25</b>
<b>Objetivos Particulares .....</b>	<b>25</b>
<b>Materiales y métodos.....</b>	<b>26</b>
<b>Área de Estudio .....</b>	<b>26</b>
<b>Selección de Especies.....</b>	<b>27</b>
<b>Variables ambientales .....</b>	<b>28</b>
<b>Delimitación del área de accesibilidad o “M” .....</b>	<b>29</b>
<b>Modelos y transferencias .....</b>	<b>31</b>
<b>Mapa de presencia, ausencia y persistencia potencial.....</b>	<b>33</b>
<b>Resultados .....</b>	<b>35</b>
<b>Discusión.....</b>	<b>49</b>
<b>Conclusiones.....</b>	<b>55</b>
<b>Literatura citada.....</b>	<b>56</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>63</b>
<b>Anexo I. Mapas de distribución potencial de cada especie a nivel país (esquina inferior derecha) y para el área de estudio considerando la máscara antropizada para los siglos XX y XXI. ....</b>	<b>63</b>
• <b>Anfibios .....</b>	<b>63</b>
• <b>Reptiles.....</b>	<b>66</b>
• <b>Mamíferos .....</b>	<b>69</b>
• <b>Vegetación arbórea .....</b>	<b>73</b>
<b>Anexo II. Métricas de rendimiento y configuración de los mejores modelos para cada especie.....</b>	<b>77</b>
• <b>Anfibios .....</b>	<b>77</b>
• <b>Mamíferos .....</b>	<b>77</b>
• <b>Reptiles.....</b>	<b>77</b>



- **Vegetación arbórea ..... 78**
- Anexo III. Puntos de Validación de la transferencia..... 79**
- Anexo IV. Área calculada (Km<sup>2</sup>) para las categorías: ausencia, persistencia, pérdida y ganancia de la distribución de cada especie. .... 80**
- Anexo V. Porcentajes obtenidos para las categorías: ausencia, persistencia, pérdida y ganancia de la distribución de cada especie. .... 81**
- Anexo VI. Porcentajes obtenidos de vegetación para la serie I y serie VI asociados a las categorías de pérdida, ganancia y persistencia, de cada especie respecto al total del área de estudio..... 92**
- Anexo VII. Gráficas de dispersión tomando en cuenta temperatura promedio anual (bio01) y precipitación (bio12) para el siglo XX y XXI de cada especie. \*Los puntos en color gris representan los datos para el siglo XX y los puntos en color azul representan los datos para el siglo XXI..... 95**

## Índice de figuras

<b>Figura 1. Concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera vs. tamaño de la población humana (Fuente: Zamora <i>et al.</i>, 2016).....</b>	<b>13</b>
<b>Figura 2. Esquema del proceso de modelado de nicho ecológico (MNE) y de distribución potencial (MDP; Fuente: Martínez-Meyer, 2014). En donde: A son los insumos para la modelación de MNE, B es la proyección al espacio ambiental (E) y C es la proyección al espacio geográfico (G) conocido como MDP.....</b>	<b>18</b>
<b>Figura 3. Dualidad de Hutchinson ejemplificado con tres variables climáticas, en donde: A es el diagrama de dispersión en el espacio ambiental y B el mapa en un espacio geográfico. Entre ambos existe correspondencia uno a uno (tomada de Soberón <i>et al.</i>, 2017).....</b>	<b>20</b>
<b>Figura 4. Diagrama BAM (tomada de Soberón <i>et al.</i>, 2017) .....</b>	<b>21</b>
<b>Figura 5. Localización del área de estudio .....</b>	<b>27</b>
<b>Figura 6. Área (km<sup>2</sup>) calculada para las categorías: persistencia, pérdida y ganancia de la distribución de las especies de anfibios: <i>Ambystoma velasci</i>, <i>Pseudoeurycea leprosa</i> y <i>Aquiloerycea cephalica</i> .....</b>	<b>37</b>
<b>Figura 7. Área (Km<sup>2</sup>) calculada para las categorías: persistencia, pérdida y ganancia de la distribución de las especies de mamíferos: <i>Mustela frenata</i>, <i>Neotomodon alstoni</i>, <i>Peromyscus difficilis</i> y <i>Silvylagus cunicularius</i> .....</b>	<b>37</b>
<b>Figura 8. Área (km<sup>2</sup>) calculada para las categorías: persistencia, pérdida y ganancia de la distribución de las especies de reptiles: <i>Crotalus triseriatus</i>, <i>Plestiodon brevirostris</i> y <i>Thamnophis scalaris</i>.....</b>	<b>38</b>
<b>Figura 9. Área (km<sup>2</sup>) calculada para las categorías: persistencia, pérdida y ganancia de la distribución de las especies de vegetación arbórea: <i>Pinus hartwegii</i>, <i>Pinus montezumae</i>, <i>Quercus glabrescens</i> y <i>Quercus rugosa</i> .....</b>	<b>38</b>
<b>Figura 20. Referencia a sitios relevantes en la zona de estudio.....</b>	<b>39</b>
<b>Figura 21. Mapas de pérdida, ganancia y persistencia de la distribución potencial de A) <i>Ambystoma velasci</i>, B) <i>Aquiloerycea cephalica</i> y C) <i>Pseudoeurycea leprosa</i>. .....</b>	<b>41</b>
<b>Figura 22. Mapas de pérdida, ganancia y persistencia de la distribución potencial de A) <i>Crotalus triseriatus</i>, B) <i>Plestiodon brevirostris</i> y C) <i>Thamnophis scalaris</i>.....</b>	<b>43</b>
<b>Figura 23. Mapas de pérdida, ganancia y persistencia de la distribución potencial de A) <i>Mustela frenata</i>, B) <i>Neotomodon alstoni</i>, C) <i>Peromyscus difficilis</i> y D) <i>Silvylagus cunicularius</i> .....</b>	<b>46</b>
<b>Figura 24. Mapas de pérdida, ganancia y persistencia de la distribución potencial de A) <i>Pinus hartwegii</i>, B) <i>Pinus montezumae</i>, C) <i>Quercus glabrescens</i> y D) <i>Quercus rugosa</i>.....</b>	<b>48</b>

## Índice de tablas

<b>Tabla 1. Variables ambientales consideradas para crear los modelos de nicho ecológico (Fuente: Cuervo-Robayo <i>et al.</i>, 2020) .....</b>	<b>29</b>
<b>Tabla 2. Provincias seleccionadas para la “M” de cada especie.....</b>	<b>30</b>
<b>Tabla 3. Parámetros de la máscara antropizada (hábitat/ no hábitat).....</b>	<b>32</b>
<b>Tabla 4. Registros de presencia y colecciones digitales de origen. ....</b>	<b>35</b>
<b>Tabla 5. Variables seleccionadas por especie y número de subconjuntos (subsets) .....</b>	<b>35</b>
<b>Tabla 6. Número de modelos candidatos y mejores modelos para cada especie. ....</b>	<b>36</b>
<b>Tabla 7. Área calculada (Km<sup>2</sup>) para las categorías: ausencia, persistencia, pérdida y ganancia de la distribución de cada especie para el siglo XXI. ....</b>	<b>37</b>
<b>Tabla 8. Porcentaje de pérdida, ganancia y persistencia para cada especie con respecto al área de estudio. ....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

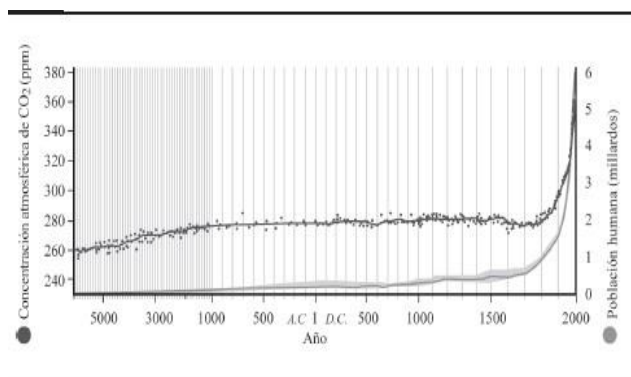
## **Resumen**

Las actividades humanas han generado el aumento de la temperatura media anual y alteraciones en los patrones de precipitación. Estos cambios han originado modificaciones ecológicas en la biodiversidad, como son los cambios en la distribución de las especies. En México, la Faja Volcánica Transmexicana (FVT) es una de las zonas con mayor alteración, pues aquí se concentra la mayor parte de la población del país, lo que pone en riesgo a su biodiversidad. El objetivo de este estudio fue identificar variaciones en la distribución potencial de distintas especies focales en la región oriental de la FVT en los últimos 70 años con ayuda de modelos de distribución potencial. Los modelos se generaron con variables ambientales del siglo XX con la paquetería “kuenm” del software R, el cual utiliza el algoritmo Maxent. Se seleccionaron los mejores modelos a partir de la significancia estadística, simplicidad y rendimiento predictivo. Una vez teniendo los modelos para el siglo XX, se realizó una transferencia con las variables del siglo XXI y una validación colocando puntos de presencia georreferenciados del siglo XXI sobre los modelos del siglo XXI. Posteriormente, se generaron mapas de consenso y se reclasificaron en binarios (presencia-ausencia), se agregó el efecto antrópico a partir de una máscara de hábitat especie-específica para sumar los mapas del siglo XX y XXI de cada especie, utilizando el software ArcGis 10.5. Una vez obtenidos los mapas para cada especie se generaron categorías (0 = ausencia, 1 = pérdida, 2 = ganancia, 3 = persistencia), obteniendo para cada una de ellas el área en Km<sup>2</sup>, el porcentaje de vegetación y cambios en temperatura y precipitación. Los resultados muestran que la vertiente nororiental del Parque Nacional La Malinche (PNLM) presenta mayor pérdida de distribución potencial de especies, mientras que la Sierra de Tlaxco presenta parches de vegetación primaria de bosques de coníferas, lo que permite que las especies persistan. La región intermedia entre el PNLM y Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl (PNIP) incluye fragmentos de vegetación primaria de bosque de coníferas, lo cual hace que sea una zona de ganancia y persistencia de las especies. También vemos que hay mayor persistencia y ganancia en las faldas del polígono establecido para el PNIP, debido a la existencia de fragmentos de vegetación primaria y secundaria de bosques de coníferas. Las especies se registraron en zonas con mayor humedad y menor temperatura durante el siglo XX, y en la actualidad estas zonas presentan mayores temperaturas, lo que está promoviendo la pérdida de distribución potencial.

## Introducción

Un parteaguas histórico para la humanidad fue el descubrimiento de la agricultura (8000 a.C.), que permitió el establecimiento, crecimiento y expansión de sus poblaciones, esto desencadenó la transformación de la cubierta vegetal (Moscoso, 2018) y un consecuente incremento en la concentración de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en la atmósfera (Figura 1; Zamora *et al.*, 2016). A finales del siglo XIX inició la segunda revolución industrial, que llegó con invenciones y cambios que revolucionaron la industria agrícola, textil, siderúrgica, minera y el comercio a nivel mundial (Friedman, 1995). A partir de este momento el consumo desmedido de recursos naturales y la dependencia en los combustibles fósiles ocasionó un incremento en las concentraciones de los gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera (Huerta & García, 2009; Moscoso, 2018). Por ejemplo, el metano ( $\text{CH}_4$ ) tuvo un incremento a inicios del siglo XX de 715 a 1774 ppb, el  $\text{CO}_2$  de 280 a 379 ppb y el óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) de 270 a 319 ppb (Cano & Cano, 2016).

El cambio climático es el resultado de las modificaciones en los patrones climáticos a partir de variaciones en los valores promedio de la temperatura y precipitación, debido a alteraciones en la composición de la atmósfera que persisten por periodos prolongados (Díaz, 2012). Las anomalías en la atmósfera pueden ser causadas por procesos geológicos, ajustes ecosistémicos (que se han desarrollado a lo largo de millones de años) y por actividades humanas (Cano & Cano, 2016).



**Figura 1.** Concentración de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera vs. tamaño de la población humana (Fuente: Zamora *et al.*, 2016).

Uno de los principales motores del cambio climático es el cambio de uso del suelo, 17% de las emisiones globales de los GEI se derivan de esta práctica (Benjamín & Masera, 2001), debido a que al deforestar se libera y se deja de fijar el CO<sub>2</sub> de los tejidos vegetales (Montero *et al.*, 2005). La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO) estimó en 1995 que para finales del siglo XX los bosques y selvas se habían reducido en un 53% con respecto a su cobertura original.

El periodo en el que las transformaciones antropogénicas han impactado los procesos naturales de la tierra ha sido denominado como Antropoceno. Este concepto hace referencia a los tiempos recientes en los que el ser humano se ha convertido en una fuerza dominante, cuyas actividades han escalado a niveles planetarios. Actualmente se tiene el 95% de certeza que la actividad humana es la causa principal del cambio climático (Zamora *et al.*, 2016). Este periodo ha sido dividido en dos fases: La Era Industrial (1800 – 1945) y La Gran Aceleración (1945 – 2015), esta última comienza después de la Segunda Guerra Mundial y abarca parte de la segunda Revolución Industrial en la que el crecimiento de la población, el desarrollo tecnológico y el consumo desmedido de recursos se han convertido en factores determinantes del impacto ambiental humano (Steffen *et al.*, 2011).

Por ejemplo, en la fase de La Gran aceleración del Antropoceno, se han registrado cambios en la precipitación, un aumento en el continente americano, norte de Europa, Asia Central y Septentrional y ha disminuido en el sur de Asia, África y el Mediterráneo (Fernández, 2013). Para finales del siglo XX se registró un aumento en la temperatura media anual global de 1.8°C, que es tres veces mayor respecto a la registrada a principios de siglo, lo que se traduce en cambios en el nivel del mar, fusión de los hielos marinos y fenómenos meteorológicos extremos (Delgado & Romero, 2007).

El aumento de la temperatura ha originado cambios en los sistemas agrícolas y forestales, dando lugar a la plantación temprana de cultivos en primavera y a un incremento en la incidencia de incendios (Moscoso, 2018). Al aumentar las actividades agrícolas se intensifican los cambios en la radiación solar y se amplifican los impactos en el sistema climático (Delgado & Romero, 2007). Los cambios de temperatura y precipitación han originado alteraciones ecológicas en la biodiversidad, impactando todos los niveles de

organización biológica a escalas espaciales y temporales, incluyendo cambios en la distribución de especies (de la Flor & Romero, 2015).

En México la temperatura media anual aumentó 0.22°C en un periodo de 30 años (1970 – 2000) que cubre finales del siglo XX y principios del siglo XXI, mientras que la precipitación ha disminuido principalmente en la zona de transición, en donde convergen las regiones biogeográficas neártica (áreas templadas y áridas - semiáridas del norte de México) y neotropical (áreas tropicales húmedas y subhúmedas al sur de México) y en donde se encuentra la provincia biogeográfica conocida como Faja Volcánica Transmexicana (FVT) (Morrone, 2009; Cuervo-Robayo *et al.*, 2020).

México se destaca por tener una gran diversidad y extensión de bosques tropicales (lluvioso, caducifolio y de montaña) y templados, los cuales cumplen funciones ecológicas, como la fijación de carbono (que permite mitigar los efectos de los GEI) (Morrone, 2009). Sin embargo, su deterioro es alarmante, pues cerca del 50% del territorio ha perdido la cubierta vegetal original (Mendoza-Ponce *et al.*, 2012). Entre los ecosistemas más amenazados están las selvas secas y los bosques templados (de coníferas y encinos) (Padilla *et al.*, 2014). A nivel nacional, el 20% de la cobertura forestal ha sufrido una disminución en cuanto a su extensión y en el número de especies. Se tiene registro de que la deforestación promedio anual es mayor al 0.5% (Galicia *et al.*, 2015). Esto es consecuencia de la implementación de programas gubernamentales mal fundamentados, que, buscando alternativas para la producción de alimentos, nos han llevado a perder gran parte del capital natural del país. Ejemplo de ello, fue el Programa Nacional de Desmontes (PRONADE) impulsado por el gobierno federal en la década de los 70's, cuya meta era talar el 12% del territorio nacional (Moreno, 2011).

Una de las zonas con mayor alteración por actividades humanas (i.e. cambio de uso de suelo con fines agrícolas y de expansión de la mancha urbana, sobrepastoreo, exceso de contaminantes atmosféricos, y tala ilegal) es la FVT, en la región oriental de la provincia se ubican dos importantes áreas naturales protegidas, los Parques Nacionales Iztaccíhuatl-Popocatepetl (PNIP) y La Malinche (PNLM) que se distinguen por ser un parteaguas de recursos hídricos, albergar especies endémicas y proporcionar servicios ambientales (SEMARNAT-CONANP, 2017). Sin embargo, estas áreas naturales protegidas también han

sido afectadas y han ido perdiendo cobertura forestal como consecuencia de la elevada densidad poblacional que los rodea (Aguilar Tomasini *et al.*, 2020; Hernández, 2020), lo cual ha ocasionado pérdida de hábitat, que se define como el área que proporciona las condiciones óptimas para que una especie pueda vivir, considerando factores bióticos (como la presencia de especies y sus interacciones) y abióticos (como el espacio físico, calidad del aire y agua, tipo de suelo etc.) (Anciães & Peterson, 2006; Delfín-Alfonso *et al.*, 2013). El espacio geográfico que envuelve las condiciones óptimas se conoce como el área de distribución de una especie, la cual indica su presencia de manera no efímera en el ecosistema (Zunino & Palestrini, 1991).

A la capacidad que tienen las especies para mantener poblaciones en su área de distribución actual, a pesar de los cambios en el hábitat se le conoce como persistencia, la cual indica que las especies tienen amplios rangos de tolerancia climática y mayor plasticidad fenotípica para ajustar sus preferencias a las nuevas condiciones ambientales (Pollock *et al.*, 2020). Por ejemplo, si las tasas de natalidad e inmigración son mayores a las tasas de mortalidad y emigración se genera un incremento poblacional, que se puede traducir como persistencia de la especie y que representa un potencial aumento en su área de distribución, como es el caso de algunos mamíferos del orden *Rodentia* (Maciel-Mata, 2015). Sin embargo, el mecanismo de respuesta inmediato de las especies a los cambios ambientales es su potencial para desplazarse en el espacio geográfico, lo que les permite encontrar condiciones idóneas y colonizar zonas actualmente deshabitadas pero que les son favorables (Arribas *et al.*, 2012).

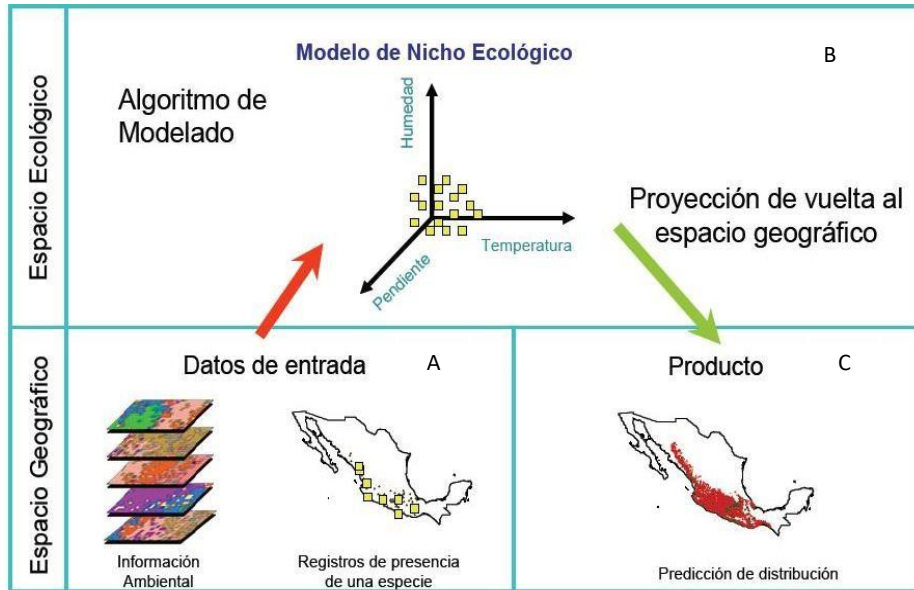
La vulnerabilidad de las especies ante la pérdida de hábitat y el cambio climático global hace referencia a su capacidad de respuesta a nuevas condiciones ambientales, que varían en términos de la exposición (magnitud del cambio), sensibilidad (susceptibilidad al cambio) y capacidad de adaptación (habilidad para ajustarse al cambio) que tienen las especies (Arribas *et al.*, 2012). Considerando que las especies están asociadas a intervalos térmicos, de humedad, radiación y elevación acorde a su distribución geográfica, aquellas que tengan una capacidad de respuesta limitada, como son los organismos ectotermos (que dependen de la temperatura ambiental para controlar su metabolismo como anfibios y reptiles), o como las especies que se distribuyen en climas templados montañosos (i.e. los



géneros *Pinus* y *Quercus*), que son más vulnerables a las variaciones climáticas y por lo tanto experimentarán reducciones en su distribución (McKinney, 1997; Matías, 2012).

Por lo anterior, es complicado calcular con exactitud el área de distribución de una especie, puesto que es un fenómeno dinámico, los métodos actuales solo son una estimación momentánea, la cual se debe considerar como una hipótesis y no como una representación precisa de la realidad (Maciel-Mata *et al.*, 2015). Con el paso de los años estos se han ido perfeccionando, pasando por identificar las zonas a mano alzada, reconstrucciones cartográficas, hasta los métodos más actuales que están basados en modelos probabilísticos y que incluyen factores bióticos y abióticos (Guisan & Zimmermann, 2000; Mateo *et al.*, 2011).

Actualmente los modelos correlativos como el modelado de nicho ecológico (MNE) se han convertido en una de las principales herramientas para estimar la distribución potencial de las especies, estos funcionan relacionando los factores ambientales (capas climáticas; Pearson & Dawson, 2003; Soberón, 2007) con datos de presencia de la especie (representados por coordenadas geográficas; Phillips *et al.*, 2006). Se trata de una aproximación limitada del nicho fundamental (Soberón, 2007) y el resultado es un objeto en el espacio ambiental (E) (Figura 2, B) que puede ser proyectado al espacio geográfico (G) (Figura 2, C) para obtener mapas de los modelos de distribución potencial (MDE) (Soberón & Peterson, 2005) que reflejan el área geográfica en la que puede distribuirse el taxon (Ortíz *et al.*, 2014).



**Figura 2.** Esquema del proceso de modelado de nicho ecológico (MNE) y de distribución potencial (MDP; Fuente: Martínez-Meyer, 2014). En donde: A son los insumos para la modelación de MNE, B es la proyección al espacio ambiental (E) y C es la proyección al espacio geográfico (G) conocido como MDP.

Entre las aplicaciones del MDE están las transferencias o proyecciones temporales y espaciales, del pasado al presente, actuales y a futuro, utilizando variables descriptoras que correspondan al tiempo y áreas de interés, es decir, debe haber correspondencia entre los datos (Maciel-Mata *et al.*, 2015). Estas transferencias han ayudado a inferir aspectos evolutivos (conservación de nicho) y ecológicos (estabilidad de nicho), que entre otros aspectos nos pueden ayudar a determinar la vulnerabilidad de las especies a los cambios ambientales y climáticos (Peterson *et al.*, 2006; Cuervo-Robayo *et al.*, 2020). Sin embargo, estos estudios se han centrado principalmente en una sola especie, dejando a un lado la posibilidad de integrar los efectos del cambio climático sobre la distribución de distintas especies para analizarlos a nivel comunitario (Peterson *et al.*, 2002).

Las transferencias espaciales han ayudado a conocer el potencial invasivo de especies de importancia médica (vectores; Muñoz, 2019) y económica (plagas; Sánchez *et al.*, 2021), en algunos casos del pasado al presente para identificar tendencias de cambio a lo largo del

tiempo (Varela *et al.*, 2011; Pliscoff & Castillo, 2011) y del presente al futuro para medir el nivel de exposición y sensibilidad al cambio climático (Costion *et al.*, 2015).

## **Antecedentes**

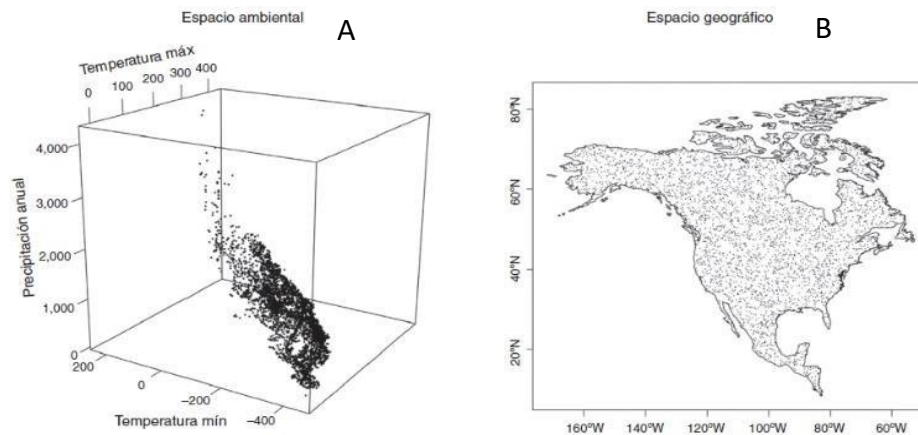
### **Teoría del concepto de nicho ecológico y distribución potencial de especies**

Desde la ecología surgió el concepto de nicho ecológico propuesto por Grinnell (1924) quien lo define como “*el área en la que se encuentra una especie, por sus características climáticas y físicas*”, el cual se evalúa a partir de variables que no se ven influenciadas por la presencia ni las interacciones entre especies (escenopoéticas) (Soberón, 2007). Posteriormente, Elton (1927) redefine el concepto como “*el lugar que ocupa la especie en el medio biótico, es decir, incorpora las interacciones con otras especies, particularmente la relación entre alimento y depredadores*”.

Más adelante Hutchinson (1957) delimita el concepto y plantea la existencia de dos nichos: 1) nicho fundamental que se refiere a un hipervolumen de  $n$  dimensiones, donde  $n$  son las variables ambientales relevantes para la especie y que le permiten existir y 2) nicho realizado, parte del nicho fundamental en la que las especies están restringidas por las interacciones interespecíficas y en donde están presentes las condiciones en las que la especie existe (Soberón & Peterson, 2012). Además, sugiere que hay correspondencia entre el espacio ecológico, en donde están representados los nichos, y el espacio geográfico, en el cual se expresan las distribuciones y plantea que hay dos tipos de variables que pueden conformar el ambiente multidimensional: a) variables escenopoéticas o no interactivas, las cuales no dependen de la presencia de la especie como la temperatura, precipitación, etc. y b) variables bionómicas que son alteradas por la presencia de los organismos como por ejemplo el pH.

Soberón (2007) sugiere que los conceptos deben ser separados de acuerdo con el tipo de variables, i.e. si se utilizan las bionómicas se estaría estimando el nicho Eltoniano, pero si se utilizan las escenopoéticas se trataría del nicho Grinelliano. Además, Soberón y Peterson (2005), mencionan que una forma de estimar la distribución geográfica es a través de la estimación de su nicho y para eso existen dos enfoques: 1) el mecanicista, que modela la respuesta de los individuos a las variables ambientales, aquí se obtienen valores de aptitud

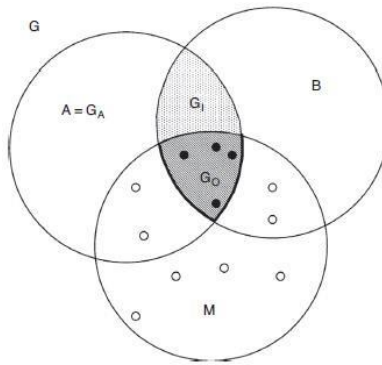
que se pueden mostrar en un mapa con valores positivos y 2) el correlativo, en el cual se construye un objeto en el espacio ambiental (Figura 3, A), que se basa en la relación de datos de presencia con variables ambientales y que posteriormente se proyecta al espacio geográfico (Figura 3, B), en donde se identifican áreas con condiciones climáticas similares, a esto se le denomina la dualidad de Hutchinson (Colwell & Rangel, 2009).



**Figura 3.** Dualidad de Hutchinson ejemplificado con tres variables climáticas, en donde: A es el diagrama de dispersión en el espacio ambiental y B el mapa en un espacio geográfico. Entre ambos existe correspondencia uno a uno (tomada de Soberón *et al.*, 2017).

Una forma de ejemplificar las interacciones entre los factores bióticos (B), abióticos (A) y de movimiento (M) es mediante el diagrama BAM (Figura 4), en donde Soberón & Peterson (2005) representan el área invadible acotada por movimientos ( $G_1$ ) y el nicho materializado o efectivo ( $G_0$ ) que es la región ocupada por la especie. Sus dimensiones definen las condiciones bajo las cuales los organismos pueden interactuar, pero no definen la naturaleza, intensidad y dirección de estas interacciones (Soberón & Nakamura, 2009). En donde:

- G** - Espacio geográfico.
- A** - factores abióticos favorables como el clima, suelo, etc.
- B** - Factores bióticos favorables como las interacciones biológicas.
- M** - Región históricamente accesible para la dispersión de la especie.
- $G_0$**  - Área ocupada por la especie, en donde, se interceptan A, B y M.
- $G_1$**  - Región con condiciones favorables para la especie pero que se ha mantenido fuera de las capacidades de dispersión de la especie.



**Figura 4.** Diagrama BAM (tomada de Soberón *et al.*, 2017).

### **Métodos para la estimación de Modelos de nicho ecológico y Modelos de distribución potencial**

Para modelar el nicho ecológico se han desarrollado diversos algoritmos, que son utilizados para identificar relaciones entre los valores ambientales y los datos georreferenciados de presencia de la especie (Copper & Soberón, 2018). Entre los más utilizados se encuentra Maxent, el cual se basa en el principio de máxima entropía que utiliza una aproximación bayesiana para realizar predicciones a partir de información incompleta (Phillips *et al.*, 2004). Este algoritmo estima la distribución de probabilidad más cercana a la uniforme de manera aleatoria a lo largo del área de estudio, con la restricción de que el valor esperado para cada variable ambiental en una distribución concuerde con los valores promedio para el conjunto de datos de ocurrencia (Phillips *et al.*, 2006).

La selección de parámetros (i.e. clases de identidad y marcadores de regularización) y variables (i.e. temperatura y precipitación) agrega complejidad al proceso del modelado pues representa mejor el fenómeno de interés al encontrar el ajuste más adecuado para la calibración de los modelos, que a su vez sirve para crear los modelos finales y las transferencias (Peterson *et al.*, 2018). Las combinaciones de estos parámetros y variables automatizados a partir de la paquetería “kuenm” para el software R utilizando el algoritmo Maxent permite aumentar la robustez de los MNE (Cobos *et al.*, 2019). Cuando se genera el MNE, es posible proyectarlo al espacio geográfico para obtener un mapa con un gradiente continuo que muestra la probabilidad de presencia de la especie dadas las condiciones

ambientales, en donde cada píxel cuenta con un valor entre cero (menor probabilidad de presencia) y uno (mayor probabilidad de presencia) (Bravo *et al.*, 2011; Merow *et al.*, 2013).

### **Distribución de especies bajo efecto del cambio climático**

En México se han modelado los efectos del cambio climático sobre la distribución potencial de distintas especies de vertebrados entre las que destacan algunos reptiles (Pennington & Sarukhán, 2005), mamíferos (Briones-Salas *et al.*, 2012) y anfibios (Parra-Olea *et al.*, 2005). En el caso particular de los anfibios se ha encontrado que, aunque presentan una amplia distribución, pueden verse afectados por el cambio climático en los próximos 50 años como el caso de *Pseudoeurycea leprosa* y *Aquiloeurucea cephalica* (Parra-Olea *et al.*, 2005). Mientras que para especies representativas de bosques templados como *Pinus hartwegii*, *Pinus ayacahuite*, *Abies hickelii*, *Quercus laurina* y *Quercus ocoteifolia* (Gutiérrez & Trejo, 2014; Alfaro-Ramírez *et al.*, 2020) se ha mostrado una pérdida de más del 50% de sus poblaciones (Sánchez-Cordero *et al.*, 2005).

Estudios con un enfoque multitaxonómico como el de Martínez-Meyer (2017), muestran que los anfibios, reptiles, aves, mamíferos y las plantas experimentarán una disminución en su distribución potencial bajo escenarios de cambio climático. Por otro lado, Peterson *et al.* (2002) modelaron la distribución potencial de 1870 especies de aves, mamíferos y mariposas, y encontraron que en general las especies experimentarían extirpación dependiendo del escenario climático asignado y los distintos supuestos de dispersión. Sin embargo, las especies responden de manera distinta a los cambios ambientales, por lo que los patrones de distribución no serán iguales, algunas especies experimentarían pérdida, ganancia y/o persistencia (Ovando-Hidalgo, 2020).

Para caracterizar los patrones de cambio en la distribución actual de una especie se debe contrastar con la distribución histórica (construida a partir de registros fósiles o registros de un periodo reciente) (Peterson, 2003). Estudios como el de Martínez-Meyer *et al.* (2004) que utilizan transferencias del presente al Pleistoceno para 23 especies de mamíferos y viceversa, encontraron un aumento en el área de distribución potencial. No obstante, estudios que modelen la distribución potencial del pasado reciente al presente son muy pocos. Por ejemplo, Sinervo *et al.* (2010) modelaron la distribución potencial de 48 especies de reptiles

de los géneros *Sceloporus*, *Urosaurus*, *Cophosaurus*, *Holbrookia*, *Callisaurus*, *Phrynosoma*, *Tapaja*, *Anota* y *Dolisaurus*, los autores encontraron que alrededor del 12% de las poblaciones se han extinguido en poco más de 30 años a consecuencia del cambio climático. Por otra parte, Brown & López (2001) registraron que en poco menos de 10,000 años el jaguar (*Panthera onca*) paso de tener una distribución continental a una distribución agrupada en México, Centro y Sudamérica.

También se han registrado especies que conservan su área de distribución y esto se debe a su respuesta adaptativa o de aclimatación fisiológica, lo que les permite ajustarse a los cambios ambientales, como es el caso de los anfibios: *Rana temporaria*, *Epidalea calamita*, *Lissotriton vulgaris* y *Triturus cristatus*, las cuales se distribuyen al sur de Inglaterra y solo han presentado cambios temporales en su actividad reproductora (Beebee, 1995).

## Justificación

Durante el Antropoceno, principalmente en la fase de La Gran aceleración (1945 – 2015), las actividades antrópicas como la deforestación, agricultura y el desarrollo industrial se han incrementado de manera exponencial, ocasionando cambios en el uso de suelo y en las condiciones climáticas. Estas modificaciones han generado el aumento de los gases de efecto invernadero (GEI) entre el siglo XX y XXI, lo que ha provocado un aumento en la temperatura media global del 0.85%.

En México entre los años 1970 y 2000 la tasa de deforestación promedio anual ha sido mayor al 0.5% y la temperatura media anual se ha incrementado 0.22°C. Una de las regiones más vulnerable a estos cambios es la provincia biogeográfica conocida como la Faja Volcánica Transmexicana (FVT) y en particular la región oriental, que se encuentra bajo una fuerte presión antrópica, pues aquí se ubica una de las zonas metropolitana más densamente pobladas del continente americano (Suárez – Mota *et al.*, 2013) que rodea a tres importantes Parques Nacionales, La Malinche (PNLM), el Iztaccíhuatl – Popocatepetl (PNIP) y Xicoténcatl (PNX).

Estos cambios tienen efectos sinérgicos en la distribución potencial de las especies que dependiendo de sus respuestas adaptativas pueden experimentar pérdida, ganancia y/o persistencia. Determinar la variación en la distribución potencial de las especies, comparando la distribución pasada *versus* la actual nos permite caracterizar la direccionalidad de los cambios en el futuro, además de identificar aspectos clave como la adaptación a ciertas condiciones ambientales, que nos pueden ayudar a identificar zonas que podrían servir como refugios para su conservación a largo plazo.



## **Pregunta de investigación**

¿Cómo ha variado la distribución potencial de 14 especies pertenecientes a cuatro grupos taxonómicos (anfibios, reptiles, mamíferos y árboles) dentro y entre los Parques Nacionales La Malinche (PNLM), Iztaccíhuatl-Popocatepetl (PNIP) y Xicoténcatl (PNX) considerando los cambios ambientales y climáticos de los últimos 70 años?

## **Objetivo General**

Identificar variaciones en la distribución potencial de 14 especies pertenecientes a cuatro grupos taxonómicos dentro y entre el Parque Nacional La Malinche, Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl y Parque Nacional Xicoténcatl debido a los cambios en las condiciones ambientales en los últimos 70 años.

## **Objetivos Particulares**

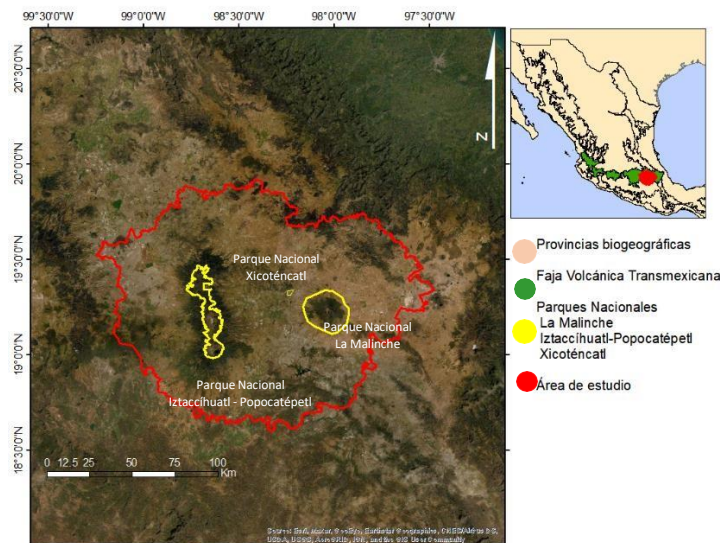
- Estimar la distribución potencial de 14 especies dentro y entre los Parques Nacionales La Malinche, Iztaccíhuatl-Popocatepetl y Xicoténcatl en el pasado reciente (siglo XX, 1950-1979).
- Identificar las zonas de persistencia actual de las especies (siglo XXI, 1980-2009).
- Determinar cambios (pérdida y ganancia) en la distribución potencial de las especies del siglo XX al siglo XXI.
- Identificar si la persistencia, pérdida o ganancia de la distribución potencial de las especies están asociadas a cambios en la temperatura y precipitación entre el siglo XX y el XXI.

## **Materiales y métodos**

### **Área de Estudio**

La zona de estudio (Figura 5) se ubica en la región oriental de la provincia biogeográfica conocida como la Faja Volcánica Transversal, entre los estados de Puebla, Tlaxcala, Estado de México, Morelos e Hidalgo. Tiene una extensión aproximada de 17,188.14 km<sup>2</sup>. Aquí se encuentran tres áreas naturales protegidas federales, los Parques Nacionales La Malinche, Iztaccíhuatl-Popocatepetl y Xicoténcatl.

Presenta un clima templado subhúmedo, la temperatura media anual oscila entre los 14 y 21.5°C dependiendo del mes del año, la precipitación media anual va de los 545 a 1,900 mm, con lluvias en verano entre junio y octubre (INEGI, 2016). En la provincia se registra una riqueza biológica excepcional con cerca de cinco mil especies distribuidas principalmente en los bosques templados (Villaseñor & Ortiz, 2007), entre los que predominan los bosques del género *Pinus*, con 21 especies registradas entre ellas *P. hartwegii* y *P. montezumae*. Se han reportado también 75 especies del género *Quercus*, como *Q. rugosa* y *Q. glabrescens*; además de bosques de oyamel, táscate y pastizal alpino, este último localizado en las partes altas de los volcanes. En las planicies donde los suelos son poco húmedos hay presencia de matorrales y pastizales (Suárez-Mota *et al.*, 2013). Este tipo de vegetación está asociada a suelos de tipo litosol, andosol, fluvisol, ambisol, entre otros.



**Figura 5.** Localización del área de estudio (Fuente: provincias biogeográficas, Morrone, 2017; SEMARNAT, 2017).

### Selección de Especies

Se consideraron los siguientes criterios para la selección de especies: 1) que hayan sido reportadas en el área de estudio, 2) que no fueran especies invasoras o exóticas, 3) que sean sensibles a la deforestación y 4) que cuenten con registros disponibles en la zona de estudio. Se consideraron cuatro grupos taxonómicos cada uno con tres o cuatro especies focales: anfibios (*Ambystoma velasci*, *Aquiloerycea cephalica*, *Pseudoeurycea leprosa*), reptiles (*Crotalus triseriatus*, *Plestiodon brevirostris*, *Thamnophis scalaris*), mamíferos (*Mustela frenata*, *Neotomodon alstoni*, *Sylvilagus cunicularius*, *Peromyscus difficilis*) y vegetación arbórea (*Pinus hartwegii*, *P. montezumae*, *Quercus glabrescens*, *Q. rugosa*).

Se realizó una búsqueda de registros en diferentes colecciones digitales como: Global Biodiversity Information Facility (GBIF; [www.gbif.org](http://www.gbif.org)), Sistema Nacional de Información Biológica de CONABIO (SNIB; <http://www.snib.mx>), e iNaturalist (INAT; [www.inaturalist.org](http://www.inaturalist.org)). Para mejorar la precisión del análisis, los datos de presencia de cada colección se filtraron para eliminar los registros: 1) duplicados sin coordenadas geográficas y año de colecta, 2) no entraran en el periodo de interés y 3) atípicos, es decir, que se encontrarán fuera del área de distribución reportada. Posteriormente y considerando que los datos están autocorrelacionados espacialmente se hizo un filtrado espacial para disminuir el

sesgo y la concentración de registros en alguna zona en particular utilizando un radio de 2 km<sup>2</sup> para anfibios y reptiles y de 5 km<sup>2</sup> para mamíferos, tomando en cuenta la vagilidad de las especies de cada grupo. Para ello se utilizaron los programas de Excel para Office 365 MSO y ArcGIS 10.5. Los datos georreferenciados se dividieron aleatoriamente en subconjuntos 70% para el entrenamiento y 30% para la validación, con la paquetería “kuenm” para el software R v4.2 (Cobos *et al.*, 2019).

### **Variables ambientales**

Se descargaron 19 coberturas bioclimáticas derivadas de valores mensuales de temperatura y precipitación que representan tendencias anuales, estacionalidad y factores ambientales extremos o limitantes (Hijmans *et al.*, 2005). Este conjunto fue actualizado para México por Cuervo-Robayo *et al.* (2020) y están divididas en tres periodos de tiempo que cubren el siglo XX, T1: 1940 (1910-1949), T2: 1970 (1950-1979) y la primera década del XXI T3: 2000 (1980-2009). Para los fines de este estudio, se seleccionó el T2 (finales del siglo XX) y el T3 (siglo XXI). Para el análisis de correlación de Pearson se excluyeron cuatro variables que mostraron anomalías espaciales (Escobar *et al.*, 2014): 1) temperatura media del trimestre más húmedo (BIO8), 2) temperatura media del trimestre más seco (BIO9), 3) precipitación del trimestre más cálido (BIO18) y 4) precipitación del trimestre más frío (BIO19). Las variables se procesaron en formato ráster y en coordenadas geográficas (Datum WGS-84).

Se realizó una selección de variables para generar los modelos por especie, mediante una matriz de correlación de Pearson entre las 15 variables climáticas en el software ArcGis 10.5, utilizando la herramienta SDM Toolbox v2.4 (Explore Climate Data, Correlations and Summary Stats). Se eliminó una de cada par de variables altamente correlacionadas ( $r \geq 0.8$ ), tomando en cuenta un análisis de Jackknife generado con el software Maxent 3.4.4, el cual arrojó la contribución de cada variable al modelo, cuando arrojaba más de dos variables correlacionadas se consideró la importancia biológica para la especie. Posteriormente, se crearon los subconjuntos de variables (sets) utilizando la paquetería “kuenm” en el software R, únicamente con las variables previamente seleccionadas para cada una de las especies.

**Tabla 1.** Variables ambientales consideradas para crear los modelos de nicho ecológico (Fuente: Cuervo-Robayo *et al.*, 2020).

<b>Código</b>	<b>Descripción de variables</b>
<b>Bio01</b>	Temperatura promedio anual
<b>Bio02</b>	Oscilación diurna de la temperatura
<b>Bio03</b>	Isotermalidad
<b>Bio04</b>	Estacionalidad de la temperatura
<b>Bio05</b>	Temperatura máxima del mes más cálido
<b>Bio06</b>	Temperatura mínima del mes más frío
<b>Bio07</b>	Oscilación anual de la temperatura
<b>Bio10</b>	Temperatura media del trimestre más cálido
<b>Bio11</b>	Temperatura media del trimestre más frío
<b>Bio12</b>	Precipitación anual
<b>Bio13</b>	Precipitación del mes más húmedo
<b>Bio14</b>	Precipitación del mes más seco
<b>Bio15</b>	Estacionalidad de la precipitación
<b>Bio16</b>	Precipitación del trimestre más húmedo
<b>Bio17</b>	Precipitación del trimestre más seco

### **Delimitación del área de accesibilidad o “M”**

El área de accesibilidad “M” se define como la región accesible para la especie a través del tiempo y es relevante para tener modelos de alta calidad, debido a que el desempeño adecuado de los algoritmos está directamente relacionado con la extensión del área M (Soberón, 2005).

El área M se definió para cada una de las especies a partir de la intersección de la distribución reportada, los puntos de presencia y las provincias (Tabla 2): biogeográficas (Morrone, 2017), herpetofaunísticas (Casas-Andreu & Reyna-Trujilla, 1990), mastogeográficas (Ramírez-Pulido & Castro-Campillo, 1990) y fisiográficas (INEGI, 2001).

**Tabla 2.** Provincias seleccionadas para el área “M” de cada especie.

Grupo	Especie	Provincias	Subprovincia seleccionada
<b>Anfibios</b>	<i>Ambystoma velasci</i>	Herpetofaunísticas	EJE NEOVOLCÁNICO, DESIERTO CHIHUAHUENSE, SIERRA MADRE ORIENTAL, VERACRUZANA, MEXICANA DEL OESTE.
	<i>Aquiloerycea cephalica</i>	Herpetofaunísticas	EJE NEOVOLCÁNICO, SIERRA MADRE ORIENTAL, SIERRA MADRE DEL SUR, VERACRUZANA.
	<i>Pseudoeurycea leprosa</i>	Herpetofaunísticas	EJE NEOVOLCÁNICO, SIERRA MADRE DEL SUR, VERACRUZANA.
<b>Reptiles</b>	<i>Crotalus triseriatus</i>	Herpetofaunísticas	EJE NEOVOLCÁNICO, SIERRA MADRE DEL SUR, VERACRUZANA.
	<i>Plestiodon brevirostris</i>	Herpetofaunísticas	EJE NEOVOLCÁNICO, SIERRA MADRE DEL SUR, VERACRUZANA.
	<i>Thamnophis scalaris</i>	Herpetofaunísticas	EJE NEOVOLCÁNICO, VERACRUZANA.
<b>Mamíferos</b>	<i>Neotomodon alstoni</i>	Mastofaunísticas	VOLCÁNICO-TRANSVERSAL
	<i>Mustela frenata</i>	Mastofaunísticas	CHIHUAHUENSE, SIERRA MADRE OCCIDENTAL, COAHUILENSE, SINALOENSE, TAMAULIPECA, SIERRA MADRE ORIENTAL, ZACATECANA, NAYARITA, DEL GOLFO, VOLCÁNICO-TRANSVERSAL, YUCATECA, DEL BALSAS, OAXACO-TEHUACANENSE, SIERRA MADRE DEL SUR, GUERRERENSE, CHIAPANECA.
	<i>Sylvilagus cunicularius</i>	Mastofaunísticas	NAYARITA, VOLCÁNICO-TRANSVERSAL, DEL BALSAS, OAXACO – TEHUACANENSE, SIERRA MADRE DEL SUR, GUERRERENSE.
	<i>Peromiscus difficilis</i>	Mastofaunísticas	SIERRA MADRE OCCIDENTAL, COAHUILENSE, SIERRA MADRE ORIENTAL, ZACATECANA, NAYARITA, VOLCÁNICO-TRANSVERSAL, DEL BALSAS, OAXACO – TEHUACANENSE, SIERRA MADRE DEL SUR, GUERRERENSE.
<b>Vegetación arbórea</b>	<i>Pinus hartwegii</i>	Biogeográficas	SIERRA MADRE ORIENTAL, FAJA VOLCÁNICA TRANSMEXICANA, SIERRA MADRE DEL SUR.
	<i>Pinus montezumae</i>	Biogeográficas	SIERRA MADRE ORIENTAL, FAJA VOLCÁNICA TRANSMEXICANA, SIERRA MADRE DEL SUR.
	<i>Quercus glabrescens</i>	Biogeográficas	EJE NEOVOLCÁNICO, LLANURA COSTERA DEL GOLFO, SIERRA MADRE DEL SUR Y SIERRA MADRE ORIENTAL.

	<i>Quercus rugosa</i>	Biogeográficas	CORDILLERA CENTROAMERICANA, EJE NEOVOLCÁNICO, MESA DEL CENTRO, SIERRA MADRE DEL SUR, SIERRA MADRE ORIENTAL, SIERRA MADRE OCCIDENTAL Y SIERRA DE CHIAPAS Y GUATEMALA.
--	-----------------------	----------------	--

## Modelos y transferencias

La calibración, generación y evaluación de los modelos para cada especie se hizo con Maxent 3.4.4 con la paquetería “kuenm” de R. Los mejores modelos se seleccionaron de acuerdo con tres criterios: 1) significancia estadística (ROC parcial; Peterson *et al.*, 2008), 2) rendimiento predictivo para evitar un alto error de omisión (Anderson *et al.*, 2003) y 3) simplicidad del modelo (criterio de información de Akaike con corrección, AICc; Warren & Seifert, 2011).

Se crearon todos los modelos candidatos resultantes de la combinación de los conjuntos de variables ambientales para el siglo XX, siete valores de multiplicador de regularización (0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1, 5 y 10) y cinco clases de entidades (lineal = l, cuadrática = q, producto = p, umbral = t y bisagra = h). Los modelos candidatos se evaluaron con ROC parcial (curvas operadas por el receptor), con 500 iteraciones y 50% de datos para bootstrapping (Peterson *et al.*, 2008), tasas de omisión  $\leq 5\%$  (Anderson *et al.*, 2003) y valores delta AICc  $\leq 2$  (Phillips *et al.*, 2006). Esto genera un mejor modelo, el cual formó una combinación de variables ambientales, con un multiplicador de regularización y clases de entidad. Al realizar la transferencia al siglo XXI se utilizó la misma combinación del mejor modelo con la diferencia de que las variables ambientales fueron las del siglo XXI.

Se hicieron 10 remuestreos tipo Bootstrap con salida logística. Para crear los mapas consenso, se calculó la mediana de los remuestreos y en los casos en que se obtuvo más de un mejor modelo se utilizó la mediana de las medianas de cada uno.

Los mapas consenso se reclasificaron en ArcGIS 10.5 para generar mapas binarios utilizando el umbral mínimo de presencia, modificado con una tasa de omisión  $E = 5\%$  (LPT – E), debido a que los registros fueron descargados de bases de datos digitales y podrían tener cierto error asociado, como una georreferenciación poco precisa (Jiménez – García & Peterson, 2019). Para el pasado reciente (presencia = 1, ausencia = 0) y para el presente (presencia = 2, ausencia = 0).

Los modelos de distribución potencial de las especies se recortaron con una máscara, para incorporar el impacto antrópico (Yáñez-Arenas *et al.*, 2012). Para ello se consideró: 1) el uso de suelo y vegetación de la serie I (INEGI, 2006) para los modelos del siglo XX (1950 – 1979) y la serie VI para los del siglo XXI (1980 – 2009) (INEGI, 2006), 2) el modelo digital de elevaciones (INEGI, 2013) y las curvas de nivel (INEGI, 2013) y 3) únicamente para la vegetación arbórea la capa de edafología (INEGI, 2006). A partir de esto se obtuvieron dos categorías: 1) hábitat, que engloba las coberturas de suelo, tipos de vegetación y el intervalo altitudinal reportado para cada especie y 2) no hábitat, aquellas zonas en donde no se distribuye la especie o es poco probable que pueda sobrevivir, este proceso se llevó a cabo con ArcGIS 10.5.

**Tabla 3.** Parámetros de la máscara antropizada (hábitat/ no hábitat).

<b>Grupo</b>	<b>Especie</b>	<b>Elevación m.s.n.m.</b>	<b>Categorías incluidas (tipo de vegetación/ de suelo/ cuerpos de agua)</b>
<b>Anfibios</b>	<i>Aquiloerycea cephalica</i>	1000 – 3500	VEG PRIMARIA Y SECUNDARIA DE BOSQUES PINO, PINO/ENCINO, OYAMEL (Schatti & Kucharzewski., 2018)
	<i>Ambystoma velasci</i>	2240 - 2700	CUERPOS DE AGUA (Flores – Villela <i>et al.</i> , 2010)
	<i>Pseudoeurycea leprosa</i>	1750 - 3600	VEG PRIMARIA Y SECUNDARIA DE BOSQUES PINO, BOSQUES PINO/ENCINO, BOSQUES OYAMEL (García – Vázquez <i>et al.</i> , 2006)
<b>Reptiles</b>	<i>Crotalus triseriatus</i>	2200 - 4500	BOSQUES DE PINO, PINO/ENCINO, ENCINO, ROBLE (Flores – Villela <i>et al.</i> , 2010)
	<i>Plestiodon brevirostris</i>	2600 – 3400	BOSQUES DE PINO, PINO/ENCINO, ENCINO, ROBLE (Flores – Villela <i>et al.</i> , 2010)
	<i>Thamnophis scalaris</i>	2200 - 4100	BOSQUES DE PINO, PINO/ENCINO, ENCINO (Flores – Villela <i>et al.</i> , 2010)
<b>Mamíferos</b>	<i>Neotomodon alstoni</i>	2400 - 4960	VEG. PRIMARIA SECUNDARIA DE BOSQUES DE PINO, BOSQUES DE PINO/ENCINO, BOSQUES DE OYAMEL Y PASTIZALES (Ceballos, 2014)
	<i>Mustela frenata</i>	0 - 4200	VEG. PRIMARIA Y SECUNDARIA DE BOSQUES DE PINO, BOSQUES DE PINO/ENCINO, BOSQUES DE OYAMEL,



			PASTIZALES, BOSQUES DE TASCATE, MATORRAL XEROFILO, CULTIVOS, MATORRAL CRASICAULE / SUBINERME, MATORRAL DESÉRTICO ROSETÓFILO CON CRASI-ROSULIFOLIOS (Ceballos, 2014)
	<i>Peromyscus difficilis</i>	1200 - 3700	VEG. PRIMARIA Y SECUNDARIA DE BOSQUES DE PINO, BOSQUES DE PINO/ENCINO, BOSQUES DE OYAMEL, PASTIZALES, BOSQUES DE TASCATE (Ceballos, 2014)
	<i>Sylvilagus cunicularius</i>	0 - 4300	VEG. PRIMARIA Y SECUNDARIA DE BOSQUES DE PINO, PINO/ENCINO, PASTIZALES (Ceballos, 2014)
<b>Vegetación</b>	<i>Pinus hartwegii</i>	3000 - 4000	LITOSOL, FEOZEM HALPICO, REGOSOL DISTRICTO, REGOSOL EUTRICO, ANDOSOL OCRICO, ANDOSOL HUMICO, CAMBISOL EUTRICO, PLANOSOL HUMICO, CAMBISOL HUMICO, VERTISOL CROMICO, (Manzanilla – Quiñones <i>et al.</i> , 2019)
	<i>Pinus montezumae</i>	1200 - 3200	REGOSOL EUTRICO, ANDOSOL OCRICO, ANDOSOL HUMICO, VERTISOL CROMICO, FEOZEM HALPICO, AMBISOL HUMICO, FLUVISOL EUTRICO, LUVISOL CROMICO, LUVISOL VERTICO, ANDOSOL OCRICO (iNaturalista; CONAFOR)
	<i>Quercus glabrescens</i>	2500 - 3400	LITOSOL, ACRISOL HUMICO, LUVISOL VERTICO, LUVISOL FERRICO, LUVISOL CROMICO, VERTISOL PELICO, FEOZEM HALPICO, CAMBISOL HUMICO, FLUVISOL DISTRICTO (CONABIO)
	<i>Quercus rugosa</i>	1100 - 1800	ANDOSOL HUMICO, ANDOSOL MOLICO, ANDOSOL OCRICO, LUVISOL VERTICO, FEOZEM HALPICO, REGOSOL EUTRICO, REGOSOL DISTRICTO (CONABIO)

### Mapa de presencia, ausencia y persistencia potencial

Una vez generados los modelos de distribución potencial de ambos tiempos y recortados con la máscara antropizada, se utilizó el álgebra de mapas de ArcGIS 10.5 para obtener un mapa final con la suma los mapas de los siglos XX y XXI de cada especie, obteniendo así cuatro categorías (0 = ausencia, 1 = pérdida, 2 = ganancia y 3 = persistencia), los resultados se

presentan en términos del área (km<sup>2</sup>) que ocupa cada categoría y en porcentajes con respecto al área total de la distribución potencial de cada especie.

## Resultados

Derivado del proceso de limpieza y homogeneización de las bases de datos obtuvimos 2,352 registros georreferenciados que se utilizaron para generar los modelos de las 14 especies focales consideradas en este estudio (Tabla 4).

**Tabla 4.** Registros de presencia y colecciones digitales de origen.

Grupo	Especie	No. total de registros filtrados	Colección digital fuente
Anfibios	<i>Aquiloerycea cephalica</i>	152	GBIF, SNIB
	<i>Ambystoma velasci</i>	135	GBIF, SNIB
	<i>Pseudoeurycea leprosa</i>	194	GBIF, SNIB
Reptiles	<i>Crotalus triseriatus</i>	81	GBIF, SNIB
	<i>Plestiodon brevirostris</i>	42	GBIF, SNIB
	<i>Thamnophis scalaris</i>	87	GBIF, SNIB
Mamíferos	<i>Neotomodon alstoni</i>	152	GBIF, SNIB, iNAT
	<i>Mustela frenata</i>	51	GBIF, SNIB, iNAT
	<i>Peromyscus difficilis</i>	215	GBIF, SNIB, iNAT
	<i>Sylvilagus cunicularius</i>	35	GBIF, SNIB, iNAT
Vegetación	<i>Pinus hartwegii</i>	238	GBIF, SNIB, iNAT
	<i>Pinus montezumae</i>	193	GBIF, SNIB, iNAT
	<i>Quercus glabrescens</i>	198	GBIF, SNIB
	<i>Quercus rugosa</i>	580	GBIF, SNIB, iNAT

Una vez eliminadas las variables ambientales altamente correlacionadas ( $r > 0.8$ ), se crearon subconjuntos de parametrizaciones (subsets) para generar los modelos de cada especie (Tabla 5).

**Tabla 5.** Variables seleccionadas por especie y número de subconjuntos de parametrizaciones (subsets).

	Especie	Variables	Subsets
Anfibios	<i>Aquiloerycea cephalica</i>	bio02, bio05, bio07, bio10, bio11, bio12, bio14	99
	<i>Ambystoma velasci</i>	bio03, bio04, bio06, bio10, bio13, bio14, bio15	99
	<i>Pseudoeurycea leprosa</i>	bio03, bio04, bio06, bio07, bio12, bio15, bio17	99
Reptiles	<i>Crotalus triseriatus</i>	bio03, bio04, bio05, bio07, bio12, bio15	42

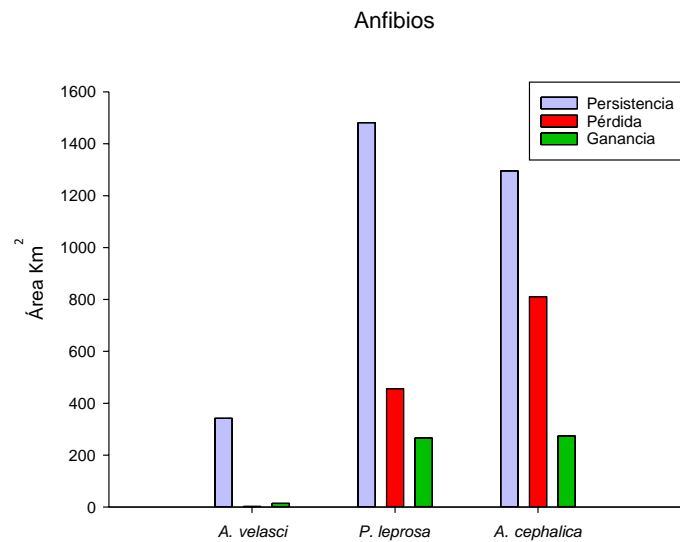
	<i>Plestiodon brevirostris</i>	bio03, bio04, bio05, bio07, bio12, bio15, bio17	99
	<i>Thamnophis scalaris</i>	bio03, bio04, bio05, bio07, bio12, bio15, bio17	99
<b>Mamíferos</b>	<i>Neotomodon alstoni</i>	bio03, bio04, bio05, bio07, bio12, bio14, bio15	99
	<i>Mustela frenata</i>	bio03, bio07, bio10, bio12, bio14, bio15	42
	<i>Peromyscus difficilis</i>	bio02, bio03, bio06, bio07, bio10, bio12, bio14	99
	<i>Sylvilagus cunicularius</i>	bio03, bio04, bio06, bio07, bio12, bio15, bio17	99
<b>Vegetación</b>	<i>Pinus hartwegii</i>	bio01, bio03, bio04, bio07, bio13, bio17	42
	<i>Pinus montezumae</i>	bio03, bio04, bio05, bio07, bio14, bio15, bio16	99
	<i>Quercus glabrescens</i>	bio03, bio04, bio05, bio07, bio12, bio15	99
	<i>Quercus rugosa</i>	bio02, bio04, bio05, bio12, bio14, bio15, bio17	99

El número de modelos candidatos generados y de mejores modelos para cada especie se describen en la Tabla 6, mientras que las métricas de rendimiento y configuración de los mejores modelos se muestran en el anexo II.

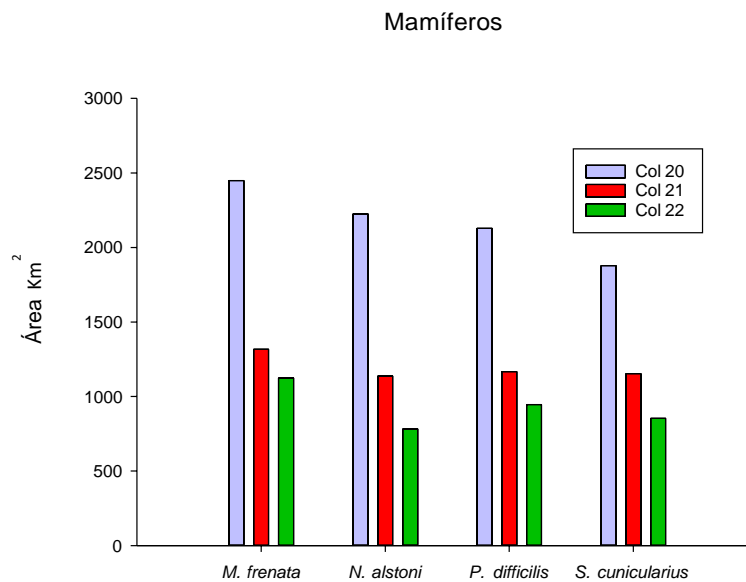
**Tabla 6.** Número de modelos candidatos y mejores modelos para cada especie.

Grupo	Especie	No. Modelos candidatos	No. Mejores modelos
<b>Anfibios</b>	<i>Aquiloemyza cephalica</i>	3,465	1
	<i>Ambystoma velasci</i>	3,465	1
	<i>Pseudoeurycea leprosa</i>	3,465	1
<b>Reptiles</b>	<i>Crotalus triseriatus</i>	1,460	1
	<i>Plestiodon brevirostris</i>	3,465	5
	<i>Thamnophis scalaris</i>	3,465	1
<b>Mamíferos</b>	<i>Neotomodon alstoni</i>	3,465	1
	<i>Mustela frenata</i>	1,460	2
	<i>Peromyscus difficilis</i>	3,465	2
	<i>Sylvilagus cunicularius</i>	3,465	1
<b>Vegetación arbórea</b>	<i>Pinus hartwegii</i>	1,460	2
	<i>Pinus montezumae</i>	3,465	3
	<i>Quercus glabrescens</i>	3,465	1
	<i>Quercus rugosa</i>	3,465	1

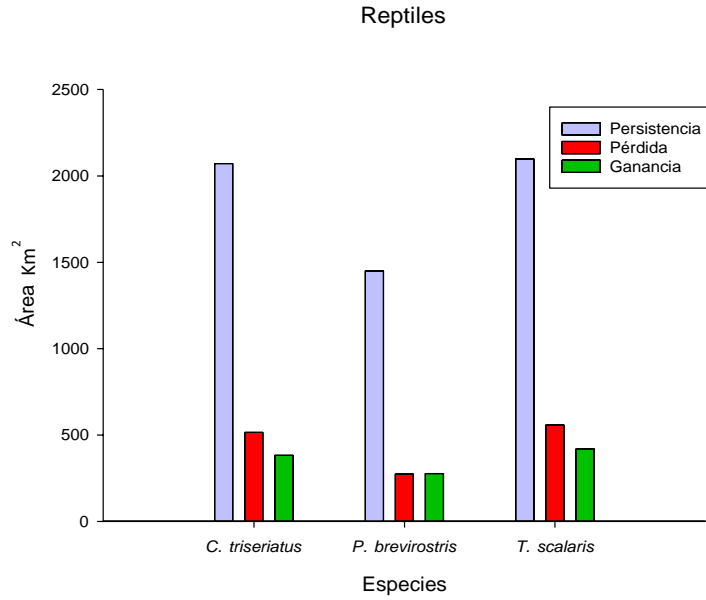
El área (km<sup>2</sup>) y los porcentajes calculados a partir de la suma de los modelos del siglo XX y XXI, así como los porcentajes para las tres categorías: pérdida, ganancia y persistencia de la distribución de cada especie se muestran en los Anexos III y VI.



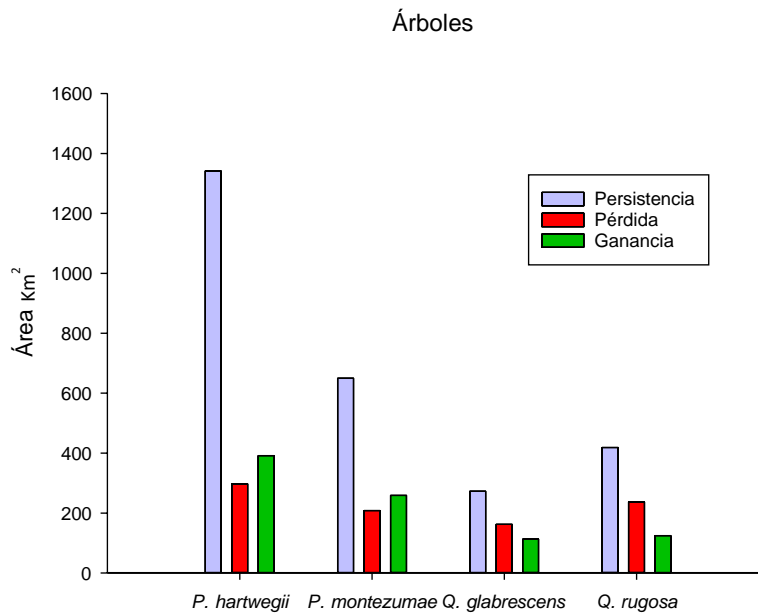
**Figura 6.** Área (km<sup>2</sup>) calculada para las categorías: persistencia, pérdida y ganancia de la distribución de las especies de anfibios: *Ambystoma velasci*, *Pseudoeurycea leprosa* y *Aquiloerycea cephalica*.



**Figura 7.** Área (Km<sup>2</sup>) calculada para las categorías: persistencia, pérdida y ganancia de la distribución de las especies de mamíferos: *Mustela frenata*, *Neotomodon alstoni*, *Peromyscus difficilis* y *Silvylagus cunicularius*.

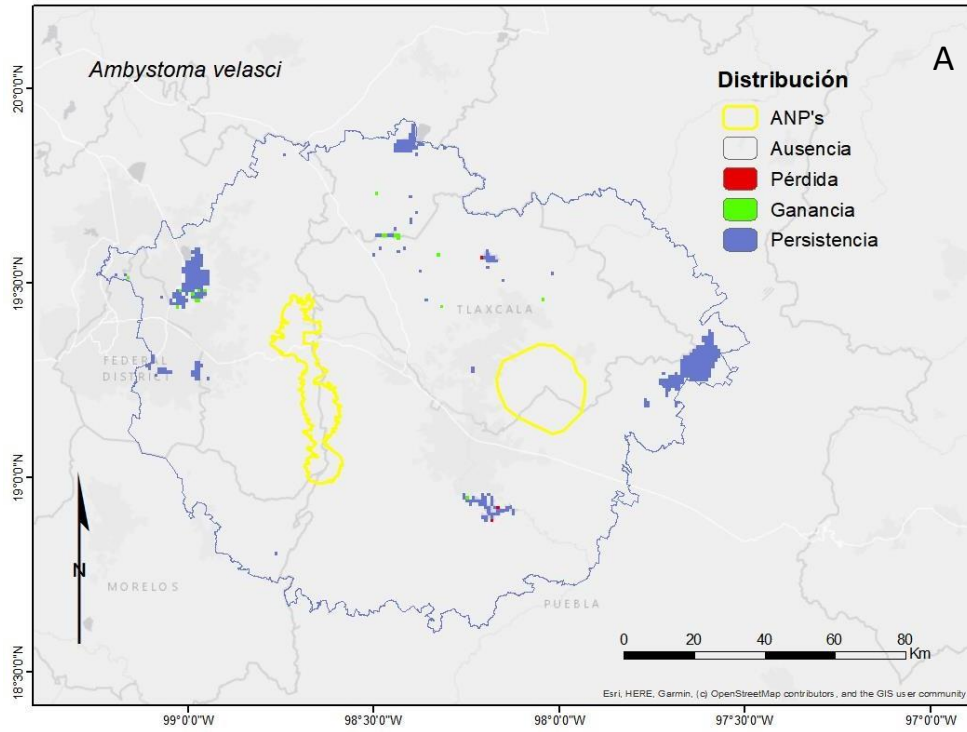


**Figura 8.** Área (km<sup>2</sup>) calculada para las categorías: persistencia, pérdida y ganancia de la distribución de las especies de reptiles: *Crotalus triseriatus*, *Plestiodon brevirostris* y *Thamnophis scalaris*.

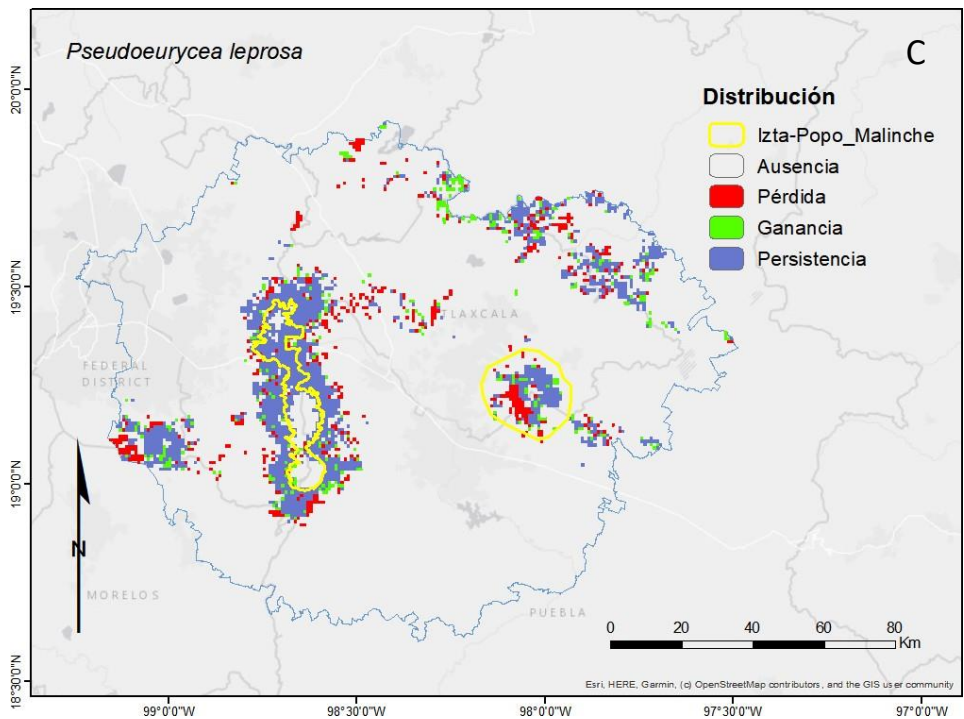
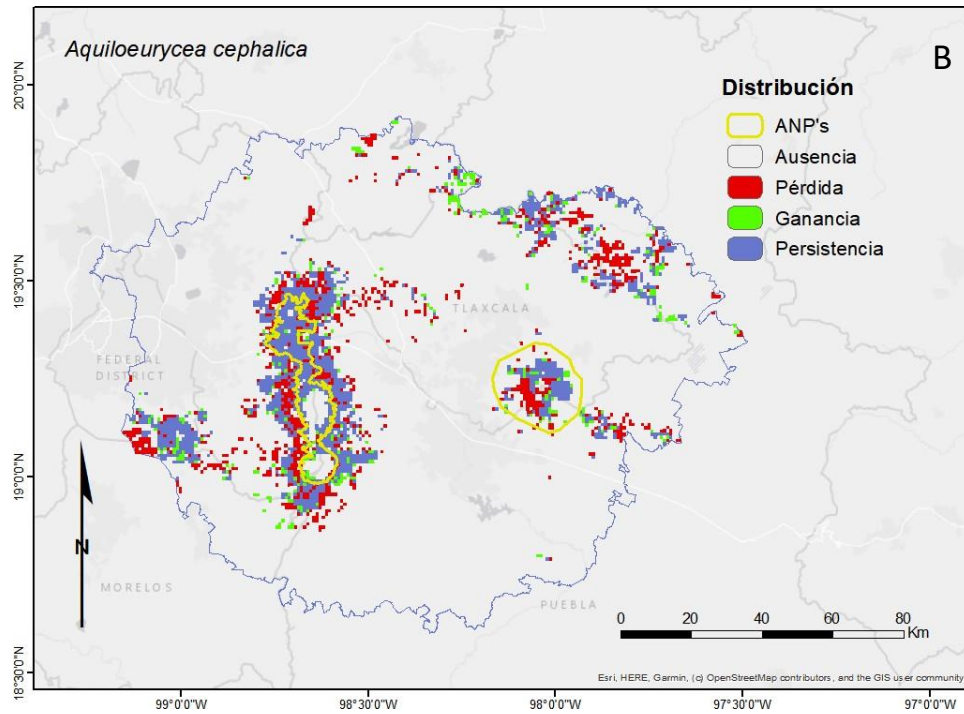


**Figura 9.** Área (km<sup>2</sup>) calculada para las categorías: persistencia, pérdida y ganancia de la distribución de las especies de vegetación arbórea: *Pinus hartwegii*, *Pinus montezumae*, *Quercus glabrescens* y *Quercus rugosa*.



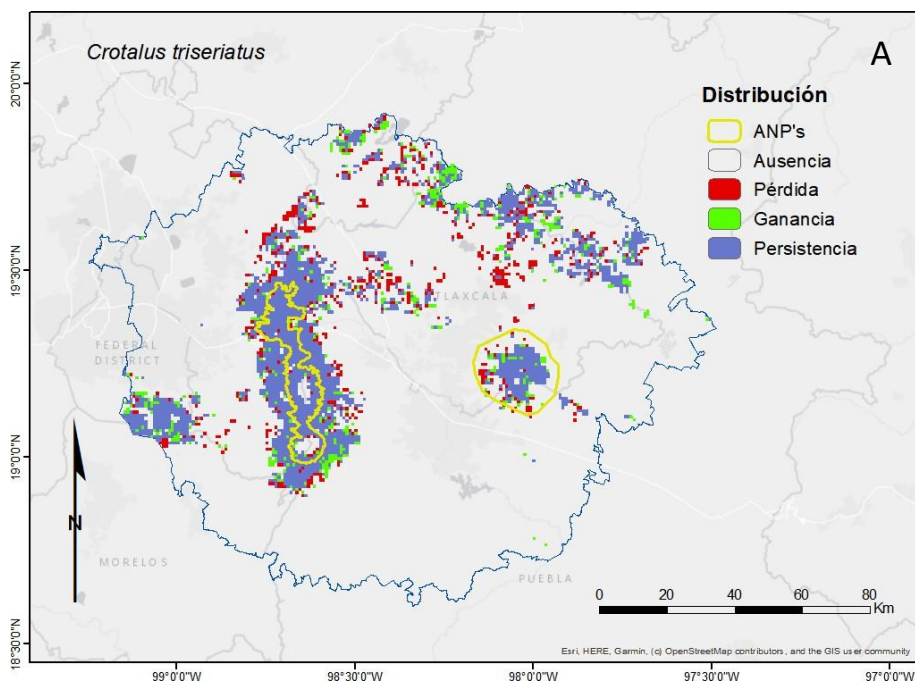


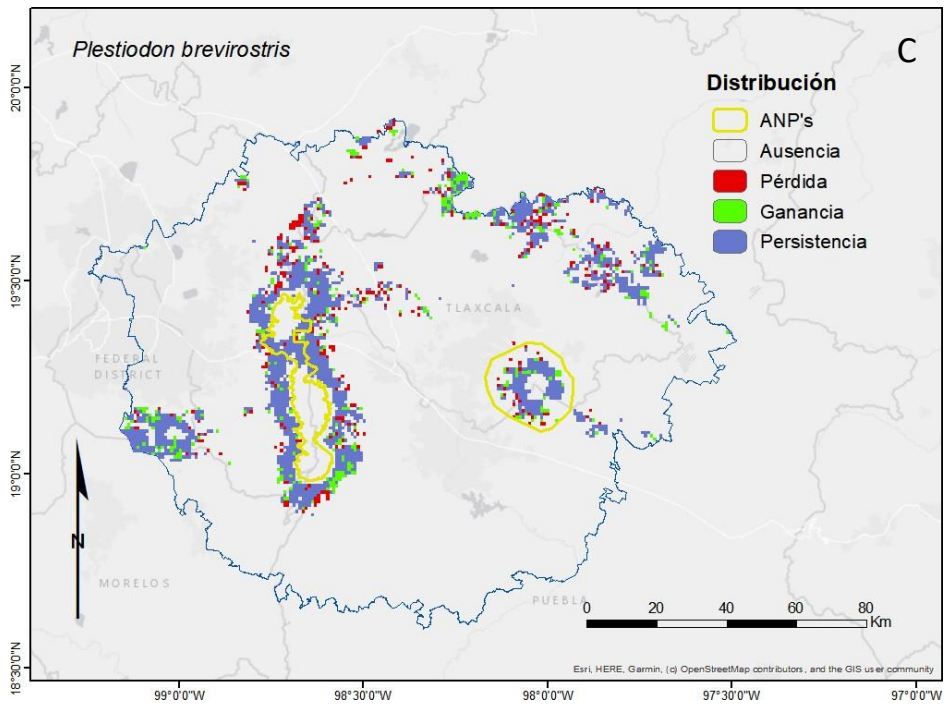
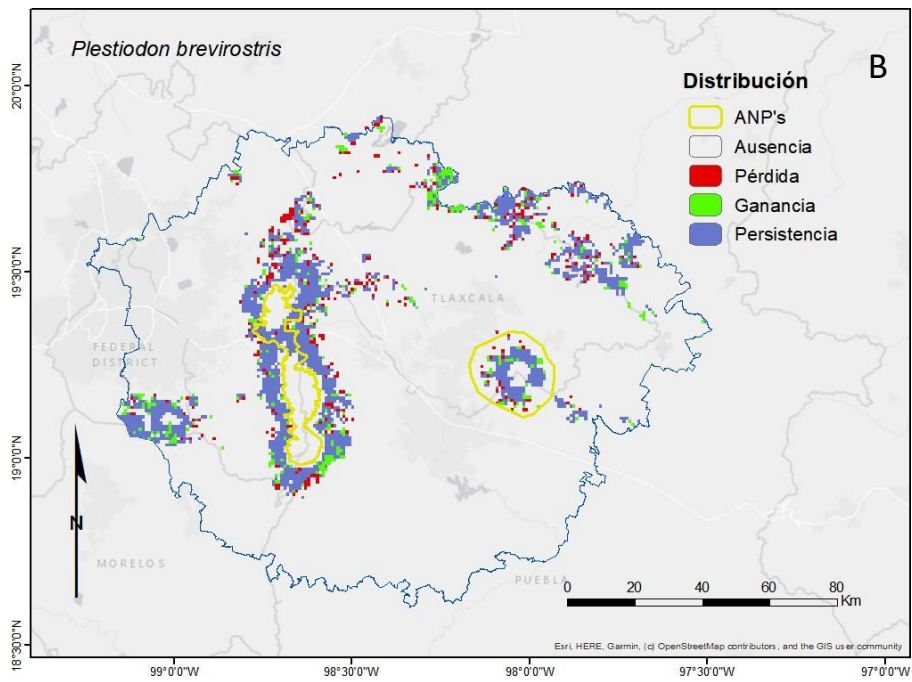




**Figura 21.** Mapas de pérdida, ganancia y persistencia de la distribución potencial de A) *Ambystoma velasci*, B) *Aquiloeurycea cephalica* y C) *Pseudoeurycea leprosa*.

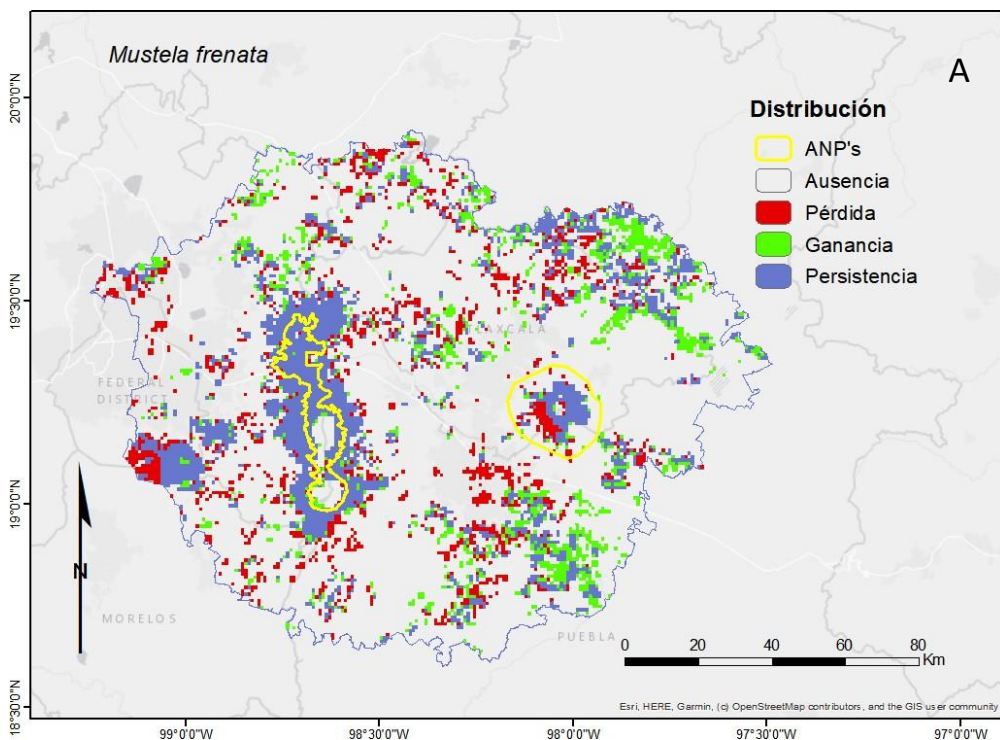
Para las tres especies de reptiles (*Crotalus triseriatus*, *Plestiodon brevirostris* y *Thamnophis scalaris*) en conjunto se muestra una pérdida del 7.83% respecto al total del área de estudio (Anexo IV), principalmente en las zonas aledañas al PNIP, los lomeríos del centro de Tlaxcala y el noroeste del PNLM, donde aumentan las zonas con agricultura. La ganancia fue de 6.25% en los cerros blancos y la región intermedia entre los PNLM y PNIP así como al noroeste de Almoloya. La persistencia tuvo un total de 32.70% dentro y fuera del PNIP y dentro del PNLM, en donde disminuye el uso de suelo catalogado como urbano construido, las tres especies de reptiles muestran una persistencia en su área de distribución potencial. Para las tres especies se observa una disminución de humedad y un aumento de temperatura en las zonas donde habitaban (Anexo VII).



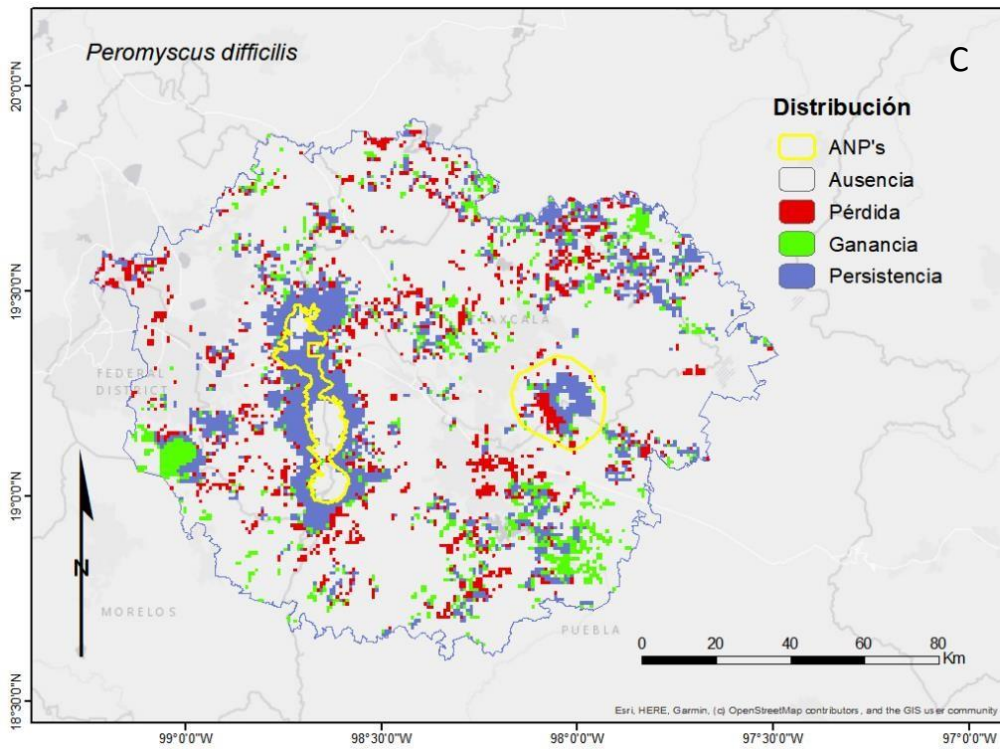
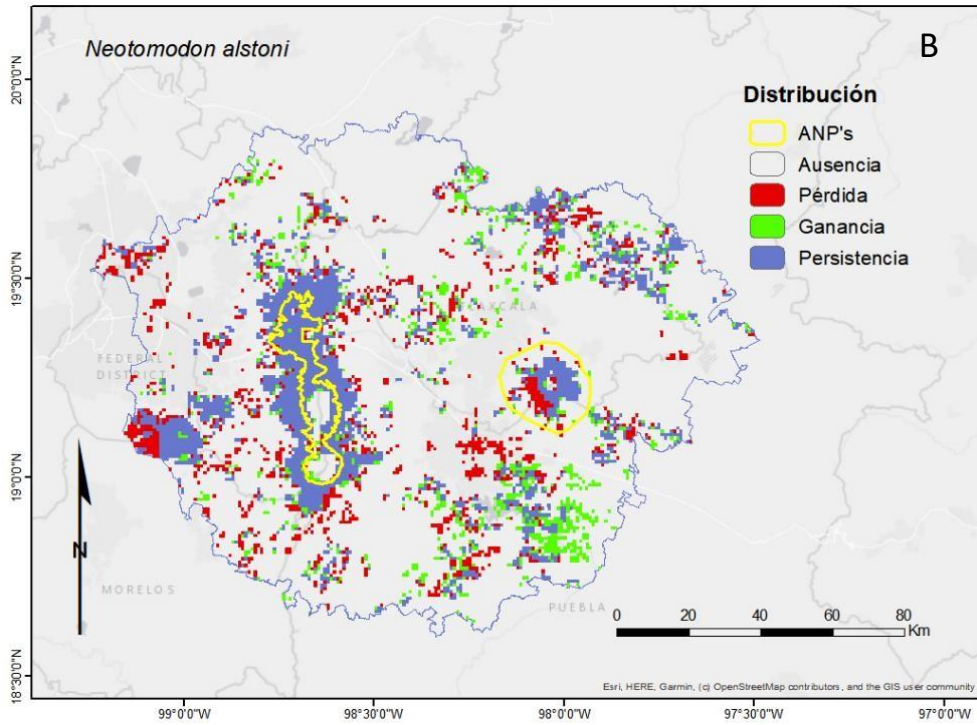


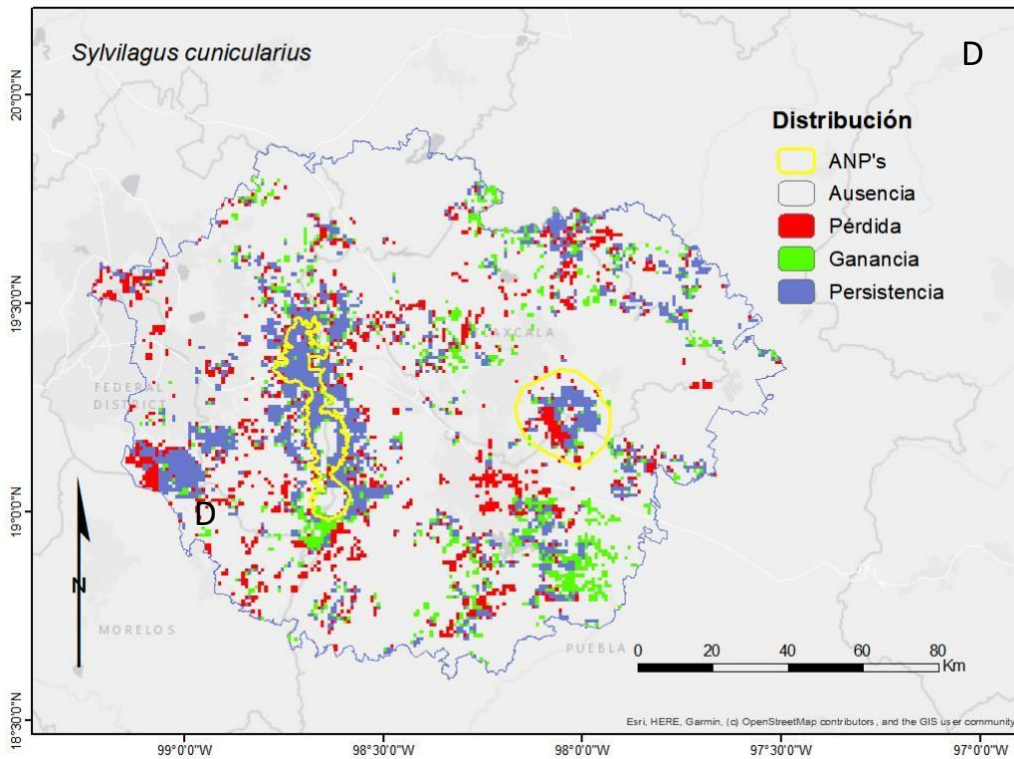
**Figura 22.** Mapas de pérdida, ganancia y persistencia de la distribución potencial de A) *Crotalus triseriatus*, B) *Plestiodon brevirostris* y C) *Thamnophis scalaris*.

Para las cuatro especies de mamíferos (*Mustela frenata*, *Neotomodon alstoni*, *Peromyscus difficilis* y *Sylvilagus cunicularius*) en conjunto se obtuvo una pérdida del 27.75% respecto al área de estudio (Anexo IV). Las zonas con pérdida están dentro y fuera del PNIP, en los lomeríos de Tlaxcala, en la zona noroeste del PNLM y hacia Tlaxco en donde se observa un aumento de las tierras agrícolas y una disminución en los bosques de coníferas, las cuatro especies muestran mayor pérdida en su distribución que ganancia. La ganancia fue de 21.54% en los cerros blancos y la zona intermedia entre el PNLM y el PNIP, Tlaxco norte, hacia el norte del PNIP y rumbo a Puebla en Tecali de Herrera y Tzicatlacoyan, las cuales son zonas que albergan bosques de coníferas. La persistencia fue del 50.5% dentro y fuera del PNIP y dentro del PNLM, *M. frenata* parece ser la especie con más persistencia, debido a su tolerancia para habitar en zonas urbanas y pastizales. Las cuatro especies se distribuían en zonas con menor temperatura y mayor humedad en el siglo XX y en el XXI se observan en zonas con mayor temperatura y disminución de humedad (Anexo VII).



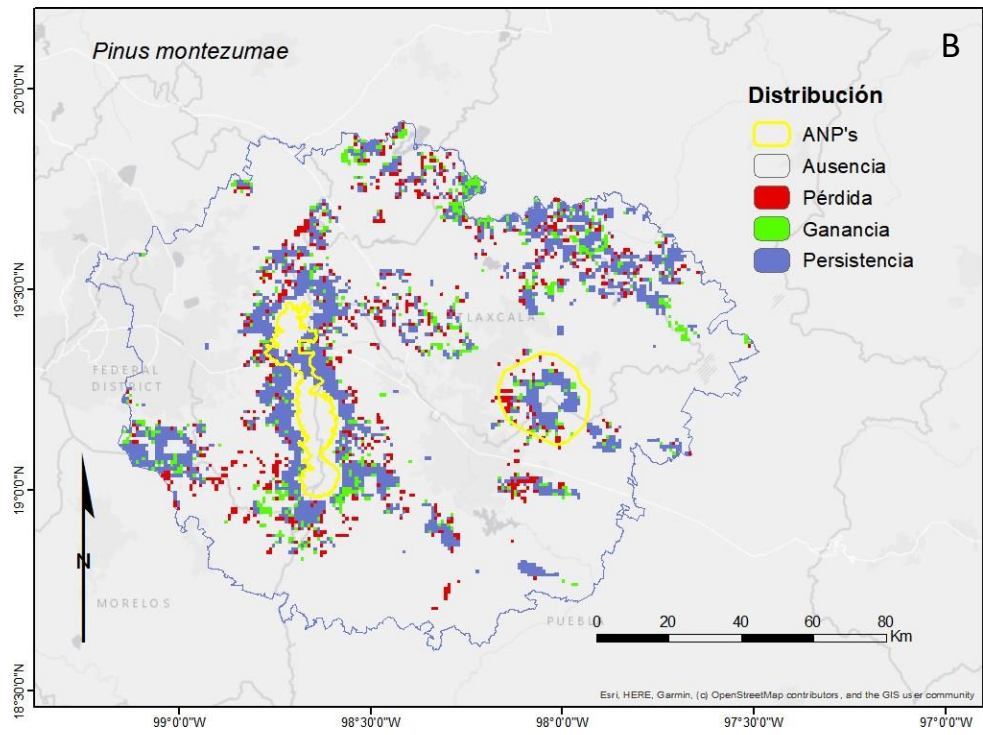
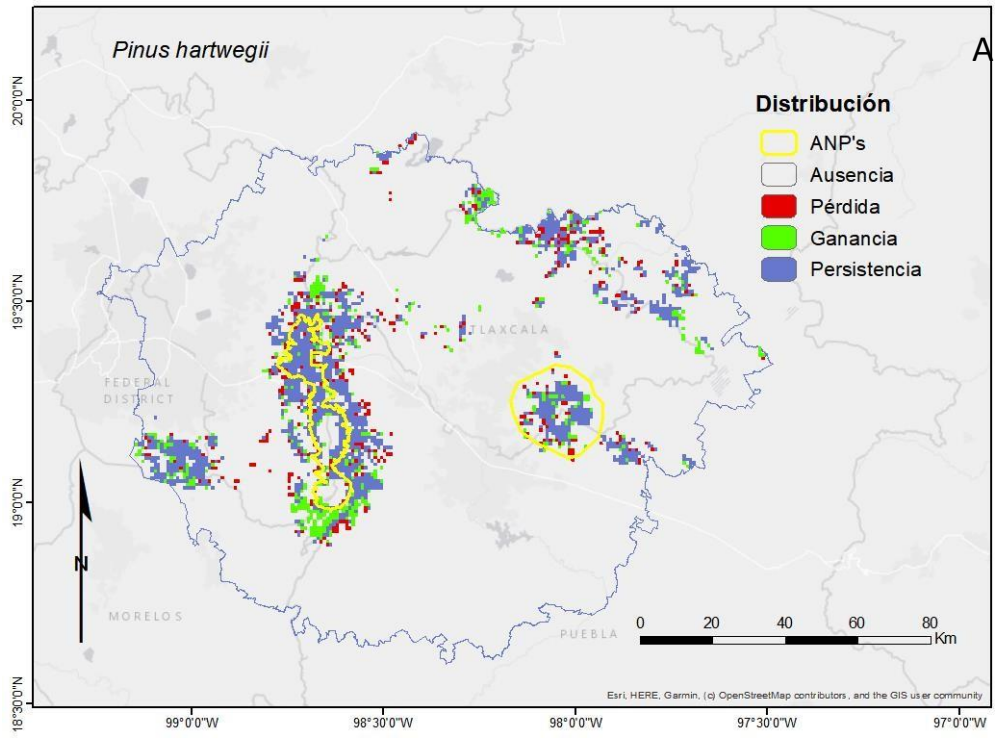




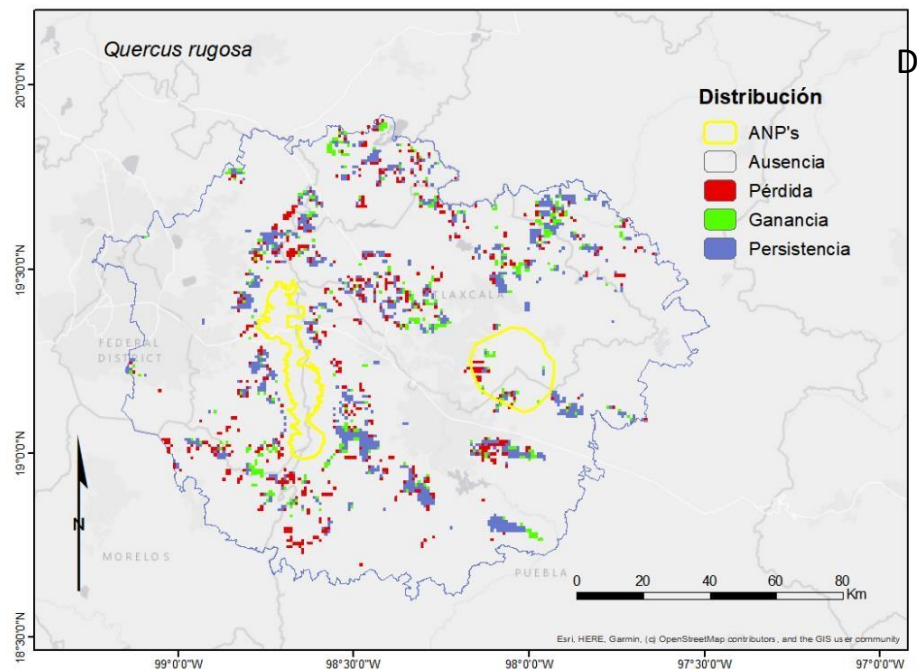
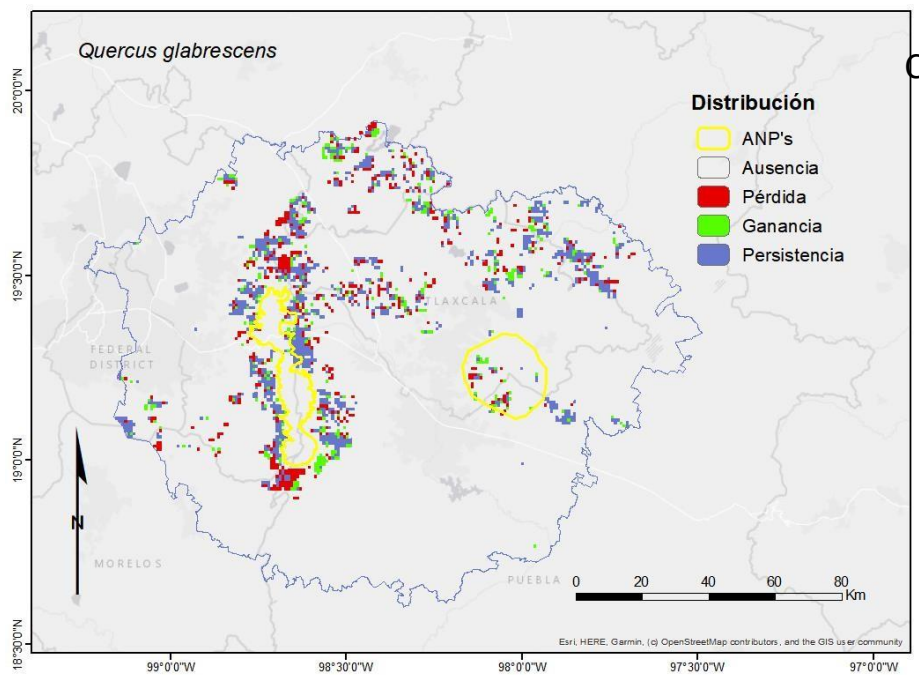


**Figura 23.** Mapas de pérdida, ganancia y persistencia de la distribución potencial de A) *Mustela frenata*, B) *Neotomodon alstoni*, C) *Peromyscus difficilis* y D) *Sylvilagus cunicularius*.

Para las cuatro especies de árboles en conjunto se obtuvo una pérdida de 5.25%, respecto al total del área de estudio. La pérdida se observa principalmente al sur del PNIP en Tetela del volcán, Actopan, Ozumba y Totolapan, en los lomeríos de Tlaxcala, en la zona noroeste del PNLM y en Tlaxco, las dos especies del género *Quercus* (*Q. rugosa* y *Q. glabrescens*), presentan mayor pérdida que ganancia. La ganancia fue del 5.71% y se presentó en los cerros blancos y la zona intermedia entre el PNLM y PNIP, al sur del PNIP en San Pedro Benito Juárez Ecatzingo, La Magdalena y Tetela del volcán. La persistencia tuvo 15.61% fuera del PNIP, dentro del PNLM, hacía el sureste del PNLM en Acajete. La especie *Pinus hartwegii* muestra mayor persistencia. Las cuatro especies presentaban su distribución potencial en zonas con menor temperatura y mayor humedad, sin embargo, en la actualidad se observan en zonas con mayor temperatura y menor humedad (Anexo VII).







**Figura 24.** Mapas de pérdida, ganancia y persistencia de la distribución potencial de A) *Pinus hartwegii*, B) *Pinus montezumae*, C) *Quercus glabrescens* y D) *Quercus rugosa*.



## Discusión

En este estudio se utilizaron modelos de distribución potencial con transferencia de tiempo del pasado reciente al presente, con el fin de identificar variaciones en la distribución potencial debidos a los cambios en las condiciones ambientales del siglo XX (1950 – 1979) al XXI (1980 – 2009) para 14 especies focales de cuatro grupos taxonómicos: anfibios, reptiles, mamíferos y árboles. Las transferencias de tiempo se han utilizado para analizar cambios en la distribución potencial de las especies bajo el efecto del cambio climático y condiciones ambientales. Comúnmente se utilizan modelos de circulación global con diversas Trayectorias de Concentración Representativas (RCP). Sin embargo, una manera más cercana a la realidad para identificar patrones de variación en la distribución potencial de las especies es considerar información climática histórica. Este enfoque permite determinar si se distribuyen de la misma manera o si sus patrones van cambiando a lo largo del tiempo (Peterson, 2003).

Sexton *et al.* (2009) mencionan que el clima es un factor determinante para la distribución de las especies, pues hay evidencia que las modificaciones de este provocan alteraciones principalmente en especies con menor capacidad de aclimatación térmica. Por el contrario, los resultados del presente estudio sugieren que los cambios más notorios en la distribución potencial de las especies se dan por la pérdida de vegetación a la que se encuentran asociadas.

En los modelos que obtuvimos, se observa que la distribución potencial de *Ambystoma velasci* está asociada a cuerpos de agua que se encuentran rodeados de zonas agrícolas como la Presa Manuel Ávila Camacho, el Lago San Antonio de Atocha, el Lago el Sol y la laguna de Atlangatepec. Se ha reportado que esta especie habita en gran variedad de cuerpos de agua como estanques, arroyos, lagos, charcos y presas (Contreras – Calvario *et al.*, 2021). No obstante, no existen trabajos previos que reporten su distribución potencial. Por lo tanto, se sugiere realizar monitoreos en las zonas predichas por los modelos.

Para las otras dos especies de anfibios (*Aquiloerycea cephalica* y *Pseudoeurycea leprosa*) se observa una ganancia hacia Almoloya y el noroeste de Tlaxco, debido a que existen remanentes de bosque de coníferas (Galicia *et al.*, 2015). Se observa una notoria

pérdida de distribución potencial en el PNLM al ser una de las zonas más afectadas por la deforestación (Suárez-Mota *et al.*, 2013), que podría derivar en un aumento en la temperatura y la disminución de humedad. La distribución potencial de ambas especies de salamandras se ha reportado previamente bajo escenarios de cambio climático, mostrando reducciones en las áreas que habitan actualmente (Vargas – Jaime *et al.*, 2021). Existen estudios que mencionan que *Pseudoeurycea leprosa* se encuentra en las montañas de la parte central y oriental de la Faja Volcánica Transmexicana y que habita áreas cubiertas por bosque de *Pinus*, *Pinus-Quercus*, y *Abies* (García-Vázquez *et al.*, 2006; Parra – Olea *et al.*, 2016). Para *Aquiloerycea cephalica* se han definido a los bosques de coníferas (i.e. *Pinus*, *Pinus – Quercus*) como el hábitat adecuado (Flores-Villela *et al.*, 2010), hábitats que fueron seleccionados para generar la máscara antropizada en este trabajo. A partir de la transferencia de tiempo, se sugiere una posible extirpación de los bosques de coníferas y un aumento de temperatura en estos bosques, lo que ocasionaría que estas salamandras se desplacen a lugares con mayor elevación.

Al comparar los modelos de distribución potencial de las especies de reptiles, se encontró que *Crotalus triseriatus* presenta una variación sutil respecto a la que reporta Paredes-García *et al.* (2011), pues estos autores indican que la especie tiene una distribución potencial restringida debido a casos de omisión por datos de presencia poco representativos, aunado a esto no consideran el área de calibración (M), la cual tiene efectos en la estimación de nicho debido a que los algoritmos comparan las condiciones ambientales en donde se encuentra la especie (Anderson & Raza, 2010) y no consideran la máscara antropizada (hábitat/ no hábitat) para determinar el hábitat adecuado para la especie. En sus resultados, Paredes-García *et al.* (2011) sugieren que la representatividad de la especie se encuentra en los parques nacionales, lo que corrobora las zonas (PNIP y PNLM) en donde se registra la persistencia de la especie, en nuestro estudio. Además, se registra que las transformaciones en el hábitat de *C. triseriatus* la vuelve más vulnerable, debido a que esta especie posee baja vagilidad e intervalos de tolerancia térmica, como lo reportan Sunny *et al.* (2019), lo cual podemos identificar con las modificaciones de temperatura del siglo XX al siglo XXI, pues se genera un aumento de temperatura y disminución en la distribución potencial.

*Thamnophis scalaris* es una especie de amplia distribución, pero ha sufrido reducciones críticas en los últimos 10 años. González-Fernández *et al.* (2018) realizaron transferencias al año 2050 y utilizaron el intervalo de elevación y la serie V de INEGI para determinar la distribución potencial en el presente y el futuro, lo cual puede ser comparable con los resultados obtenidos en este trabajo debido a que consideramos el intervalo de elevación reportado para *Thamnophis scalaris* (Flores – Villela *et al.*, 2010) y las series I y VI para crear la máscara antropizada. Reportaron que los bosques son la variable más importante para la determinación de la distribución potencial, lo que corrobora los resultados que obtuvimos, al mostrar que en zonas donde hay bosques de coníferas hacia Tlaxco hay persistencia e incluso ganancia en el área de distribución, lo cual nos estaría indicando que tanto la temperatura como la humedad no ha cambiado mucho en estas zonas o bien la especie se estaría adaptando a estas nuevas condiciones.

Nuestros resultados de distribución potencial de *Plestiodon brevirostris* difieren con los obtenidos en el trabajo de Flores-Villela & Ochoa-Ochoa (2010), pues presentan un área de distribución más restringida, debido a que no utilizaron el área de calibración (M) para generar los modelos y a *posteriori* recortaron sus mapas tomando en cuenta la distribución reportada para la especie. Sin embargo, se observan zonas de presencia en los PNLM y PNIP, lo cual corrobora los resultados obtenidos en este estudio. No es posible hacer una comparación de los cambios de temperatura y humedad ya que no existen estudios disponibles, pero se puede observar que las zonas en donde habitan hay menos humedad.

En cuanto a los mamíferos, la especie *Mustela frenata* no cuenta con estudios de distribución potencial, pero esta reportada como una especie con distribución amplia (Johnston *et al.*, 2019) pues los tipos de cobertura en donde se puede encontrar son áreas abiertas como praderas, áreas alpinas, bosques abiertos y matorrales (Schwartz & Schwartz, 2006), que son las categorías que seleccionamos para crear la máscara antropizada. Sin embargo, se ha registrado esta especie es sensible a la fragmentación del hábitat inducida por la agricultura. En el presente estudio podemos identificar una pérdida de distribución potencial en la zona noroeste del PNLM, Tlaxco, lomeríos y en Milpa Alta. Debido a que la especie es de intervalos amplios de tolerancia no se observan cambios asociados a la temperatura y humedad. Para *Neotomodon alstoni* se encontró una mayor pérdida en su

distribución potencial en nuestro estudio, en comparación con la ganancia y el estudio de Sánchez-Cordero *et al.*, (2005), quienes reportan que esta especie ha perdido más del 50% de su distribución potencial, ellos utilizaron 10 capas con datos ambientales, así como la vegetación (Rzedowski, 1986), elevación y pendiente en el algoritmo genético GARP. Se sabe que al utilizar distintos algoritmos con los mismos datos de entrada el resultado puede diferir (Peterson *et al.*, 2007), aunque en este estudio no se utilizaron como datos de entrada, sino más bien como parte de una capa de hábitat. Para el caso de *Sylvilagus cunicularius* y *Peromyscus difficilis* no hay trabajos que reporten su distribución potencial pasada o actual, por lo tanto, no podemos realizar una comparación, no obstante, se observa un desplazamiento hacía mayores temperaturas y menor humedad.

En el caso de las especies de vegetación arbórea, *Pinus hartwegii* es considerada una de las especies de *Pinus* más vulnerables al cambio climático. Esta especie ha sido modelada con transferencias al futuro (2040-2060) y se sugiere que la zona más susceptible es la Faja Volcánica Transmexicana, al encontrarse las zonas metropolitanas más pobladas del país. Especialmente en la ladera nororiental del PNLM se presenta una pérdida del 19.6% de su distribución actual (Manzanilla-Quñones *et al.*, 2019), esto relacionado con un aumento de la temperatura promedio anual (0.7°C y 1.5°C). Los resultados del presente estudio sugieren que la pérdida de esta especie se presenta principalmente en los alrededores de Tlaxco, en la ladera nororiental del PNLM y en algunas zonas del PNIP en donde la temperatura posiblemente ha presentado un aumento. Se ha registrado que *Pinus hartwegii* tenderá a cambiar su distribución hacia áreas de mayor elevación y dado que las cumbres de las montañas son más estrechas que las bases, seguramente ocuparán menor superficie, por lo cual su distribución se vería reducida (García, 2013), en este estudio esta especie es la que presenta mayor porcentaje de pérdida.

Para *Pinus montezumae* se ha observado una disminución de sus poblaciones debido a la deforestación, pues se han registrado poblaciones extirpadas y zonas conformadas por parches de bosque aislados (Delgado *et al.*, 2015). El estudio de Manzanilla-Quñones *et al.*, (2019) indica que la Faja Volcánica Transmexicana es una zona de alta calidad para la distribución de la especie, en nuestro caso encontramos una pérdida en la zona noroeste del PNLM, los lomeríos, alrededores de Tlaxco y en la parte sur del PNIP denominado Ozumba,

lugares que posiblemente estén presentando mayores temperaturas. Para *Quercus glabrescens* y *Quercus rugosa* no hay reportes en la literatura sobre su distribución potencial, pero se ha determinado que está asociada de manera positiva con la heterogeneidad topográfica, las variables climáticas de ciertas zonas y a elevaciones específicas (Flores & García, 2021), por eso la selección del intervalo altitudinal utilizado en la máscara antropizada fue el adecuado.

La mayor parte de la persistencia y ganancia de distribución potencial se encontró en los parches de vegetación secundaria de coníferas y de bosques de coníferas en donde no se aprecian cambios de temperatura y humedad, ya que se encuentran menos afectados por la presencia de asentamientos humanos. Por otro lado, en las zonas de agricultura podemos observar una mayor pérdida de distribución potencial, debido al manejo que se les brinda (i.e. agroquímicos, pesticidas, insecticidas, fertilizantes), lo cual genera zonas de menor humedad y mayor temperatura. Las especies presentan una distribución discontinua debido a la variación espacial de las condiciones ambientales en las que habitan. No obstante, las modificaciones a corto plazo que son resultado de acciones humanas generan destrucción y fragmentación de los bosques por la expansión de cultivos y pastizales (Santos & Tellería, 2006), que coincide con los resultados del presente estudio, pues la mayoría de las especies presentan preferencia por zonas que poseen parches de vegetación primaria y secundaria de bosques de coníferas y que no presentan cambios en la temperatura y humedad.

La interpretación de los modelos de distribución potencial se debe tomar con cautela, debido a que se basan en supuestos, son hipótesis que se generan a partir de variables climáticas y deben ponerse a prueba. Existen muchos factores que influyen en la distribución de las especies para adaptarse a las modificaciones ambientales y en ocasiones es complicado integrarlos en la generación de los modelos (Anderson, 2013). Por ejemplo, se ha sugerido que a partir del algoritmo Maxent es posible comprender la complejidad de un sistema físico y su funcionamiento al ofrecer una versión manejable de procesamiento y análisis de datos (de Pando & de Giles, 2007). No obstante, y a pesar de aproximarse mucho a la realidad, el algoritmo Maxent tiene varias limitaciones en sentido estricto, pues solo señala zonas similares climáticamente a las ocupadas por cada especie (Illodi & Escalante, 2008; Jiménez – Valverde *et al.*, (2008). Algunos casos que ejemplifican este problema en nuestro estudio son *Quercus glabrescens*, *Plestiodon brevirostris* y *Pseudoeurycea leprosa* ya que la

validación de los modelos de la transferencia presenta puntos georreferenciados fuera del modelo, lo cual nos estaría indicando error de omisión, se sugiere tomar con cautela estos resultados y comenzar desde el inicio con la limpieza de las bases de datos digitales y la selección más precisa de las variables ambientales y parámetros para estas especies.

Los modelos no pueden prever que exista una inesperada capacidad adaptativa de las especies ante condiciones climáticas, ni tampoco toman en cuenta los factores bióticos que pueden reducir el área potencial como la competencia (Pearson y Dawson, 2003) o el mutualismo (Gutiérrez et al., 2005) y otros factores de especial importancia en relación con el cambio climático (Araújo y Luoto, 2007). En este estudio se agregó una máscara de hábitat – no hábitat para explicar los patrones de la distribución de las especies, al agregar estas características especie – específico, los resultados muestran una distribución más compleja, a partir de estudios como el de Araujo *et al.* (2005) se proporciona evidencia de que las especies responden de manera distinta respecto a gradientes climáticos y topográficos, por lo anterior, al incluir mayor cantidad de variables ecológicas para las especies, se pueden generar resultados más cercanos a la realidad.

Trabajos que intentan predecir eventos futuros basados en calibraciones actuales, suelen tener riesgos altos en sus interpretaciones ya que se vuelve imposible tomar en cuenta todos los factores potenciales que impulsan los cambios en la distribución potencial de las especies a través del tiempo (Oreskes *et al.*, 1994). Sin embargo, dentro de este estudio se tienen datos reales de lo que ha ocurrido a lo largo del tiempo con la temperatura y precipitación de México (Cuervo – Robayo *et al.*, 2020), lo que permite identificar cambios de estas variables para integrar la información al proceso de modelado de distribución potencial. Esto ayuda a tener una información más clara de lo que ha pasado y está pasando en la actualidad con la distribución potencial de especies, los resultados de este estudio pueden ayudar en la planificación de la conservación de la biodiversidad a escala regional en y validarse con muestreos en campo.

## Conclusiones

- Los bosques de coníferas (*Pinus*, *Quercus*, *Pinus – Quercus*) son el hábitat principal para algunas especies presentadas en este estudio, por lo que la preservación de estos bosques es un factor clave para su conservación.
- La ladera nororiental del Parque Nacional La Malinche presenta la mayor pérdida de distribución potencial de especies, debido a los cambios que han ocurrido en la vegetación nativa.
- La Sierra de Tlaxco presenta persistencia y ganancia de distribución potencial de todas las especies en este estudio, debido a que permanecen parches de vegetación primaria de bosques de coníferas, por lo cual se deben realizar monitoreos en esta región e identificar sitios para la conservación de las especies.
- La región intermedia entre el PNLN y PNIP presentan ganancia y persistencia en la distribución potencial de las especies, debido a que es una zona en donde se conservan pequeños fragmentos de vegetación primaria de bosques de coníferas.
- Existe mayor persistencia y ganancia en la distribución potencial en los alrededores del PNIP en comparación con el interior del parque nacional, gracias a la existencia de fragmentos de vegetación primaria y secundaria de bosques de coníferas que se encuentran en estas zonas, por ello es factible ampliar los esfuerzos de conservación.
- Se observó que las especies han presentado desplazamientos en su distribución potencial principalmente hacia regiones más cálidas y con menor humedad, debido a que las condiciones ambientales en las que se distribuían originalmente están siendo modificadas como consecuencia de las actividades antropogénicas y el cambio climático.

## Literatura citada

- Aguilar-Tomasini, M. A., Escalante, T., & Farfan, M. (2020). Effectiveness of natural protected areas for preventing land use and land cover changes of the Transmexican Volcanic Belt, Mexico. *Regional Environmental Change*, 20(3), 1-9.
- Alfaro-Ramírez, F. U., Ramírez-Albores, J. E., Vargas-Hernández, J. J., Franco-Maass, S., & Pérez-Suárez, M. (2020). Potential reduction of Hartweg's Pine (*Pinus hartwegii* Lindl.) geographic distribution. *PloS one*, 15(2), e0229178.
- Anderson, R.P. (2013). A framework for using niche models to estimate impacts of climate change on species distributions. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1297 (1), 8-28. <http://doi.org/10.1111/nyas.12264>
- Andreu, G. C., Aviña, R. C., & Miguel, X. A. (2003). Un regalo poco conocido de México al mundo: el ajolote o axolotl (*Ambystoma*: Caudata: Amphibia). Con algunas notas sobre la crítica situación de sus poblaciones. *Ciencia Ergo Sum*, 1(1), 304-308.
- Anciães, M., & Peterson, A. T. (2006). Climate change effects on neotropical manakin diversity based on ecological niche modeling. *The Condor*, 108(4), 778-791.
- Arribas, P., Abellán, P., Velasco, J., Bilton, D. T., Lobo, J. M., Millán, A., & Sánchez-Fernández, D. (2012). La vulnerabilidad de las especies frente al cambio climático, un reto urgente para la conservación de la biodiversidad. *Revista Ecosistemas*, 21(3), 79-84.
- Beebee, T. J. C. (1995). Amphibian breeding and climate. *Nature*, 374, 219-220.
- Benjamín, J. A., & Maser, O. (2001). Captura de carbono ante el cambio climático. *Madera y bosques*, 7(1), 3-12.
- Bravo Cadena, J., Sánchez Rojas, G., & Gelviz-Gelvez, S. M. (2011). Estudio de la distribución de las especies frente al cambio climático.
- Briones-Salas, M., Lavariega, M. C., & Lira-Torres, I. (2012). Distribución actual y potencial del jaguar (*Panthera onca*) en Oaxaca, México. *Revista mexicana de biodiversidad*, 83(1), 246-257.
- Brown, D. E. & López, G. C. A. (2001). *Borderland Jaguars*. Utah: The University of Utah Press.
- Cano Barbacil, C., & Cano Sánchez, J. (2016). Efectos del cambio climático sobre las aves.
- Ceballos, G. (Ed.). (2014). *Mammals of Mexico*. JHU press.
- Chambers, J. M. (2008). *Software for data analysis: programming with R (Vol. 2)*. New York: Springer.
- Congreso General de los Estados Unidos Mexicanos (CGEUM). “Ley General de Cambio Climático”, en: *Diario Oficial de la Federación (DOF)*. México, CGEUM, 2012.



- Contreras-Calvario, Á. I., Soto-Pozos, Á. F., Castillo-Juárez, J. L., Calzada-Arciniega, R. A., & Parra-Olea, G. (2021). The distribution of *Ambystoma velasci* Dugès, 1888 in Veracruz, Mexico: insights for its conservation in the region. *Herpetology Notes*, 14, 469-473
- Colwell, R. K., & Rangel, T. F. (2009). Hutchinson's duality: the once and future niche. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(Supplement 2), 19651-19658.
- Costion, C. M., Simpson, L., Pert, P. L., Carlsen, M. M., John Kress, W. & Crayn, D. (2015). Will tropical mountaintop plant species survive climate change? Identifying key knowledge gaps using species distribution modelling in Australia. *Biological Conservation*, 191, 322–330. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biocon.2015.07.022>
- Cuervo-Robayo, A. P., Téllez-Valdés, O., Gómez-Albores, M. A., Venegas-Barrera, C. S., Manjarrez, J., & Martínez-Meyer, E. (2014). An update of high-resolution monthly climate surfaces for Mexico. *International journal of climatology*, 34(7), 2427-2437.
- de la Flor, M. T., & Romero, M. A. C. (2015). Biogeografía predictiva: técnicas de modelamiento de distribución de especies y su aplicación en el impacto del cambio climático. *Espacio y Desarrollo*, (27), 159-179.
- Delfín-Alfonso, C. A., Gallina-Tessaro, S., & López-González, C. A. (2013). El hábitat: definición, dimensiones y escalas de evaluación para la fauna silvestre. *Fauna silvestre de México: uso, manejo y legislación*, 285-288.
- Delgado, P., V. Rebolledo-Camacho, C. Flores-López, J. J. García-Magaña, A. González, D. Piñero & A. Y. Vázquez-Lobo. (2015). Aproximación molecular para la evaluación genética de áreas productoras de semillas y de conservación en especies del género *Pinus*. Informe del Proyecto CONAFOR-2012-C01-176167. México, D.F., México. 52 pp
- Delgado, J. F. I., & Romero, D. C. (2007). Cambio climático. Glaciaciones y calentamiento global. U. Jorge Tadeo Lozano.
- de Pando, B. B., & De Giles, J. P. (2007). Aplicación de modelos de distribución de especies a la conservación de la biodiversidad en el sureste de la Península Ibérica. *GeoFocus: Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, (7), 6.
- Díaz Cordero, G. (2012). El cambio climático. *Ciencia y sociedad*.
- Escobar, L., Lira-Noriega, A., Medina-Vogel, G., & Peterson, T. (2014). Potential for spread of the white-nose fungus (*Pseudogymnoascus destructans*) in the Americas: Use of Maxent and NicheA to assure strict model transference. *Geospatial Health*, 9(1), 221–229.
- FAO 1988. An intern report on the state of forest resources in the developing countries, Forest Resource Division, Forestry Department, Roma.
- Fernández, J. L. U. (2013). El cambio climático: sus causas y efectos medioambientales. *Anales de la real academia de medicina y cirugía de Valladolid*, (50), 71-98.

- Flores, A., & García, J. O. R. (2021). Nota de Investigación. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12, 64.
- Flores-Villela, O., Canseco-Márquez, L., & Ochoa-Ochoa, L. (2010). Geographic distribution and conservation of the herpetofauna of the highlands of Central Mexico. *Conservation of mesoamerican amphibians and reptiles*. Utah: Eagle Mountain Publishing Co, 303-321.
- Flores-Villela, O. & Ochoa Ochoa, 2010. Áreas potenciales de distribución y GAP análisis de la herpetofauna de México. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ciencias. Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. DS009. Ciudad de México.
- Friedman, M. (1995). La Segunda Revolución Industrial. *Ciencia política: Revista trimestral para América Latina y España*, (33), 49-58
- Galicia, L., Gómez-Mendoza, L., & Magaña, V. (2015). Climate change impacts and adaptation strategies in temperate forests in Central Mexico: a participatory approach. *Mitigation and adaptation strategies for Global Change*, 20(1), 21-42.
- Galicia, L., Potvin, C., & Messier, Ch. (2015). Maintaining the high diversity of pine and oak species in Mexican temperate forests: a new management approach combining functional zoning and ecosystem adaptability. *Canadian Journal of Forest Research*, 45(10), 1358-1368. doi: 10.1139/cjfr-2014-0561.
- García Martínez, M. F. (2013). Patrones de distribución de *Pinus hartwegii*, como posible estrategia de adaptación al cambio climático en el Parque Nacional Nevado de Toluca.
- García-Vázquez, U. O., Gutiérrez-Mayén, M. G., Hernández-Jiménez, C. A., & Auriolos-López, V. (2006). Estudio de la densidad poblacional y algunos aspectos ecológicos de *Pseudoeurycea leprosa* en el Parque Nacional La Malinche, Tlaxcala, México. *Boletín de la Sociedad Herpetológica Mexicana*, 14(1), 10-17
- González-Fernández, A., Manjarrez, J., García-Vázquez, U., D'Addario, M., & Sunny, A. (2018). Present and future ecological niche modeling of garter snake species from the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Peer J*, 6, (e4618).
- Gutiérrez, E., & Trejo, I. (2014). Efecto del cambio climático en la distribución potencial de cinco especies arbóreas de bosque templado en México. *Revista mexicana de biodiversidad*, 85(1), 179-188.
- Hernández, Y. (2020). Cambio climático: causas y consecuencias. *Renovat: Revista de Estudios Interdisciplinarios en Ciencias Sociales, Tecnología e Innovación*, 4(1), 38-.
- Guisan, A. & Zimmermann, N. E. (2000). Predictive habitat distribution model in ecology. *Ecological Modelling*, 135, 147-186.
- Huerta, E & García, J. (2009). Estrategias de gestión ambiental: Una perspectiva de las organizaciones modernas. *Clío América*, 3 (5), 15 – 30.

- Johnston, S. D., Sasse, D. B., & Kissell Jr, R. E. (2019). Long-tailed weasel (*Mustela frenata*) distribution survey in Arkansas: challenges in detecting a rare species. *Journal of the Arkansas Academy of Science*, 73(1), 83-92.
- Maciel-Mata, C. A., Manríquez-Morán, N., Octavio-Aguilar, P., & Sánchez-Rojas, G. (2015). El área de distribución de las especies: revisión del concepto. *Acta universitaria*, 25(2), (03-19).
- Macip-Ríos, R., & Lara, G. O. J. (2014). Estado de conservación de los recursos naturales y la biodiversidad de los estados de Puebla y Tlaxcala. Macip Ríos, R. y Espinosa Santiago, O. *Problemas ambientales asociados al desarrollo*. (71-102).
- Manzanilla Quiñones, U., Delgado Valerio, P., Hernández Ramos, J., Molina Sánchez, A., García Magaña, J. J., & Rocha Granados, M. D. C. (2019). Similaridad del nicho ecológico de *Pinus montezumae* y *P. pseudostrabus* (Pinaceae) en México: implicaciones para la selección de áreas productoras de semillas y de conservación. *Acta botánica mexicana*, (126).
- Manzanilla-Quñones, U., Aguirre-Calderón, Ó. A., Jiménez-Pérez, J., Treviño-Garza, E. J., & Yerena-Yamallel, J. I. (2019). Distribución actual y futura del bosque subalpino de *Pinus hartwegii* Lindl en el Eje Neovolcánico Transversal. *Madera y bosques*, 25(2).
- Martínez-Meyer, E. (2017). Actualización de la evaluación de impactos del cambio climático sobre la distribución potencial de especies de mamíferos, aves, reptiles, anfibios y plantas que habitan las islas de México.
- Martínez, M. F., & Osnaya, P. (2004). *Cambio climático: una visión desde México*. Instituto Nacional de Ecología.
- Martínez-Meyer, E., Townsend Peterson, A., & Hargrove, W. W. (2004). Ecological niches as stable distributional constraints on mammal species, with implications for Pleistocene extinctions and climate change projections for biodiversity. *Global Ecology and Biogeography*, 13(4), 305-314.
- Mateo, R. G., Felicísimo, Á. M., & Muñoz, J. (2011). Modelos de distribución de especies: Una revisión sintética. *Revista chilena de historia natural*, 84(2), 217-240
- Matías, L. (2012). Cambios en los límites de distribución de especies arbóreas como consecuencia de las variaciones climáticas. *Revista Ecosistemas*, 21(3), 91-96.
- Mendoza-Ponce, A., Corona-Núñez, R. O., Galicia, L., & Kraxner, F. (2019). Identifying hotspots of land use cover change under socioeconomic and climate change scenarios in Mexico. *Ambio*, 48(4), 336-349.
- Merow, C., Smith, M. J., & Silander Jr, J. A. (2013). A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter. *Ecography*, 36(10), 1058-1069.

- Montero, G., Ruiz-Peinado, R., & Muñoz, M. (2005). Producción de biomasa y fijación de CO<sub>2</sub> por los bosques españoles. Madrid: INIA-Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria.
- Moreno Unda, A. A. (2011). Efectos ambientales del Programa Nacional de Desmontes, México, 1972-1982. Repositorio Nacional CONACYT.
- Morrone, J. J. 2009. Evolutionary biogeography: an integrative approach with case studies. Columbia Univ. Press.
- Moscoso, R. (2018). La Industria y sus efectos en el cambio climático Global. RECIAMUC, 2(2), 595-611.
- Muñoz Palma, M. S. (2019). Cambio climático y distribución geográfica potencial de vectores de enfermedades en Ecuador continental, basados en el modelo del nicho ecológico.
- Ortíz-Yusty, C., Restrepo, A., & Páez, V. P. (2014). Distribución potencial de *Podocnemis lewyana* (Reptilia: Podocnemididae) y su posible fluctuación bajo escenarios de cambio climático global. Acta Biológica Colombiana, 19(3), 471-481.
- Ovando-Hidalgo, N., Tun-Garrido, J., Mendoza-González, G., & Parra-Tabla, V. (2020). Efecto del cambio climático en la distribución de especies clave en la vegetación de duna costera en la península de Yucatán, México. Revista mexicana de biodiversidad, 91.
- Padilla, V. J. A., Martínez, E. E., Ortega-Rubio, A., Miranda, R. P., & Hernández, A. R. G. (2014). Deterioro en áreas naturales protegidas del centro de México y del Eje Neovolcánico Transversal. Investigación y ciencia, 22(60), 37-49.
- Paredes-García, D. M., Ramírez-Bautista, A., & Martínez-Morales, M. A. (2011). Distribución y representatividad de las especies del género *Crotalus* en las áreas naturales protegidas de México. Revista mexicana de biodiversidad, 82(2), 689-700.
- Parra-Olea, G., Martínez-Meyer, E., & De León, G. P. P. (2005). Forecasting Climate Change Effects on Salamander Distribution in the Highlands of Central Mexico 1. Biotropica: The Journal of Biology and Conservation, 37(2), 202-208.
- Parra-Olea, G., Rovito, SM, García-París, M., Maisano, JA, Wake, DB, y Hanken, J. (2016). Biology of tiny animals: three new species of minute salamanders (Plathodontidae: Thorius) from Oaxaca, Mexico. PeerJ, 4, e2694.
- Pearson, R. G., & Dawson, T. P. (2003). Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? Global ecology and biogeography, 12(5), 361-371.
- Pennington, T. D. y J. Sarukhán K. 2005. Árboles tropicales de México. Manual para la identificación de las principales especies. 3<sup>a</sup> ed. Universidad Nacional Autónoma de México-Fondo de Cultura Económica. México, D. F. México. 523 p.

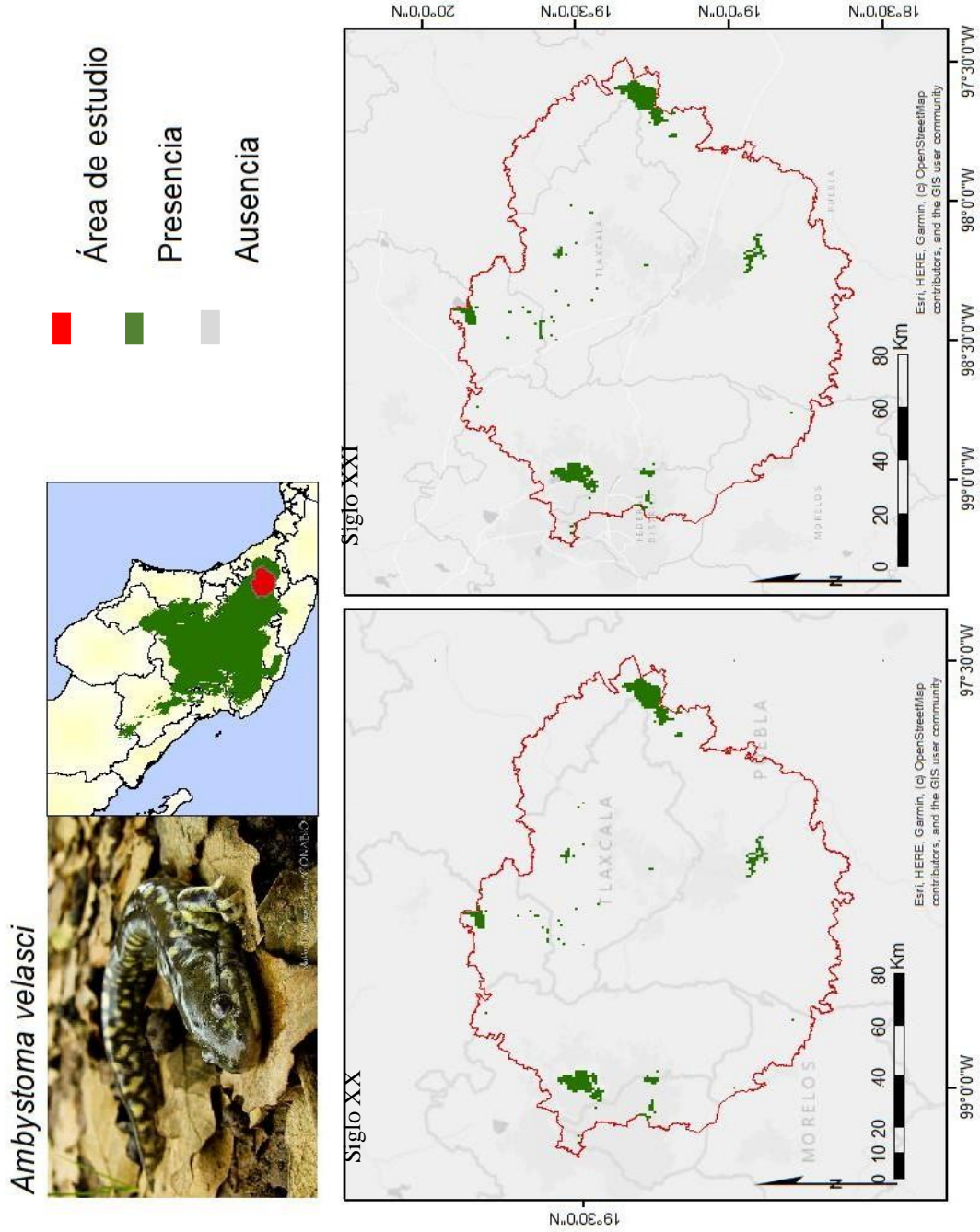
- Peterson, A. T., Ortega-Huerta, M. A., Bartley, J., Sánchez-Cordero, V., Soberón, J., Buddemeier, R. H., & Stockwell, D. R. (2002). Future projections for Mexican faunas under global climate change scenarios. *Nature*, 416(6881), 626-629.
- Peterson, A. T. (2003). Projected climate change effects on Rocky Mountain and Great Plains birds: generalities of biodiversity consequences. *Global Change Biology*, 9(5), 647-655.
- Peterson, A. T. (2006). Uses and requirements of ecological niche models and related distributional models.
- Peterson, A. T., Ortega-Huerta, M. A., Bartley, J., Sánchez-Cordero, V., Soberón, J., Buddemeier, R. H., & Stockwell, D. R. (2002). Future projections for Mexican faunas under global climate change scenarios. *Nature*, 416(6881), 626-629.
- Phillips, S., Anderson, R. & Sphapire, R. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(2006): 231-259.
- Pliscoff, P., & Fuentes-Castillo, T. (2011). Modelación de la distribución de especies y ecosistemas en el tiempo y en el espacio: una revisión de las nuevas herramientas y enfoques disponibles. *Revista de Geografía Norte Grande*, (48), 61-79.
- Pollock, H. S., Brawn, J. D., & Cheviron, Z. A. (2020). Heat tolerances of temperate and tropical birds and their implications for susceptibility to climate warming. *Functional Ecology*.
- Sánchez-Cordero, V., Illoldi-Rangel, P., Linaje, M., Sarkar, S., & Peterson, A. T. (2005). Deforestation and extant distributions of Mexican endemic mammals. *Biological Conservation*, 126(4), 465-473.
- Sánchez, Y. F., Jacho-Saa, W. R., Zambrano, J. P. U., Abasolo-Pacheco, F., Plasencia-Vázquez, A. H., Zambrano-Mero, G. J., ... & Bravo, G. V. E. (2021). Invasiones biológicas en agroecosistemas de ecuador continental: nicho ecológico de especies exóticas y cultivos agrícolas bajo riesgo. *Acta Biológica Colombiana*, 26(3).
- Santos, T., & Tellería, J. L. (2006). Pérdida y fragmentación del hábitat: efecto sobre la conservación de las especies. *Ecosistemas*, 15(2).
- SEMARNAT-CONANP (2017). Áreas Naturales Protegidas Federales de México.
- Sinervo, B., Mendez de laCruz, F., Miles, D. B., Heulin, B., Bastiaans, E., Villagrán-Santa Cruz, M., ... & Sites, J. W. (2010). Erosion of lizard diversity by climate change and altered thermal niches. *Science*, 328(5980), 894-899.
- Soberón, J. (2007). Grinnellian and Eltonian niches and geographic distributions of species. *Ecology Letters*, 10(11):1115–1123.
- Soberón, J., & Peterson, A. T. (2005). Interpretation of models of fundamental ecological niches and species' distributional areas.
- Soberón, J., & Peterson, A. T. (2012). Species Distribution Modeling and Ecological Niche Modeling: Getting the Concepts Right. *Naturaleza & Conservacao*, 10(2):102-107.

- Steffen, W., Grinevald, J., Crutzen, P. y McNeill, J. (2011). The Anthropocene: conceptual and historical perspectives. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 369(1938): 842-867.
- Suárez-Mota, M. E., Téllez-Valdés, O., Lira-Saade, R., & Villaseñor, J. L. (2013). Una regionalización de la Faja Volcánica Transmexicana con base en su riqueza florística. *Botanical Sciences*, 91(1), 93-105.
- Sunny, A., Gandarilla-Aizpuro, F. J., Monroy-Vilchis, O., & Zarco-Gonzalez, M. M. (2019). Potential distribution and habitat connectivity of *Crotalus triseriatus* in Central Mexico. *Herpetozoa*, 32, 139.
- Varela, S., Lobo, J. M. & Hortal, J. (2011). Using species distribution models in paleobiogeography: A matter of data, predictors and concepts. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 310 (3-4), 451-463
- Vargas-Jaimes, J., González-Fernández, A., Torres-Romero, E. J., Bolom-Huet, R., Manjarrez, J., Gopar-Merino, F., ... & Sunny, A. (2021). Impact of climate and land cover changes on the potential distribution of four endemic salamanders in Mexico. *Journal for Nature Conservation*, 64, 126066.
- Villaseñor J.L. y Ortiz E. 2007. La familia Asteraceae. En: Luna I., Morrone J.J. y Espinoza D. Eds. Biodiversidad de la Faja Volcánica Transmexicana, pp. 289-310, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.
- Zamora, M. E., Huerta, A. H., Maqueo, O. P., Badillo, G. B., & Bernal, S. I. (2016). Cambio global: el Antropoceno. *Ciencia ergo-sum, Revista Científica Multidisciplinaria de Prospectiva*, 23(1), 67-75.
- Zunino, M. & Palestrini, C. (1991). El concepto de especie y la biogeografía. *Anales de Biología*, 17, 85-88.

# Anexos

Anexo I. Mapas de distribución potencial de cada especie a nivel país (esquina inferior derecha) y para el área de estudio considerando la máscara antropizada para los siglos XX y XXI.

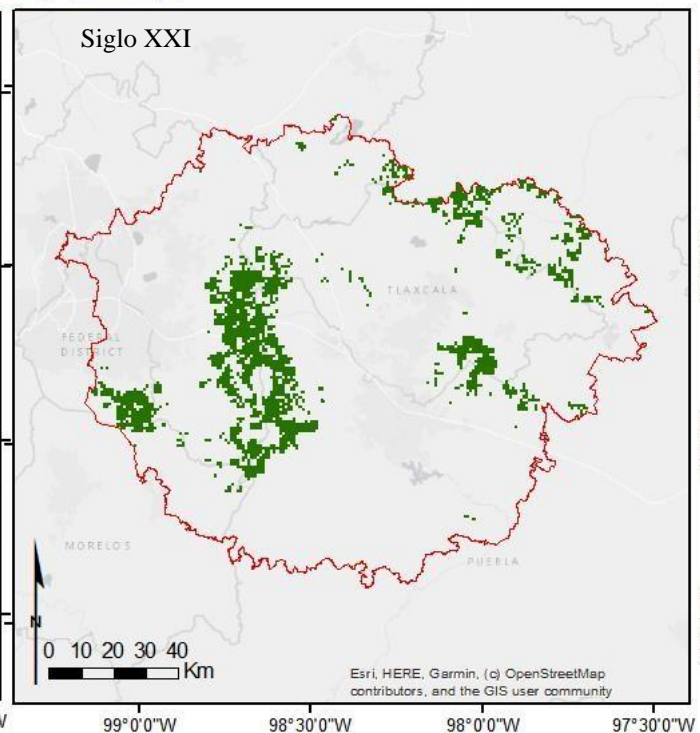
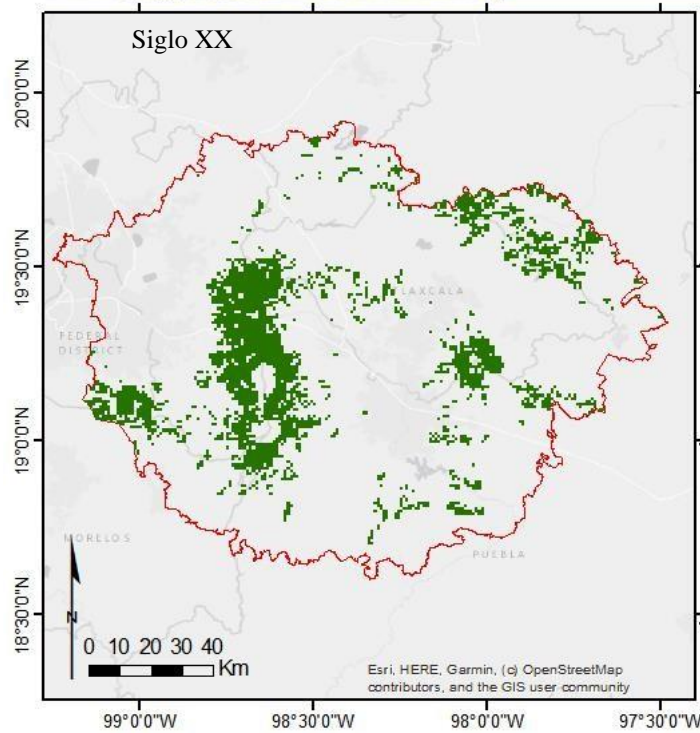
- Anfibios



*Aquiloerycea cephalica*



- Área de estudio
- Presencia
- Ausencia

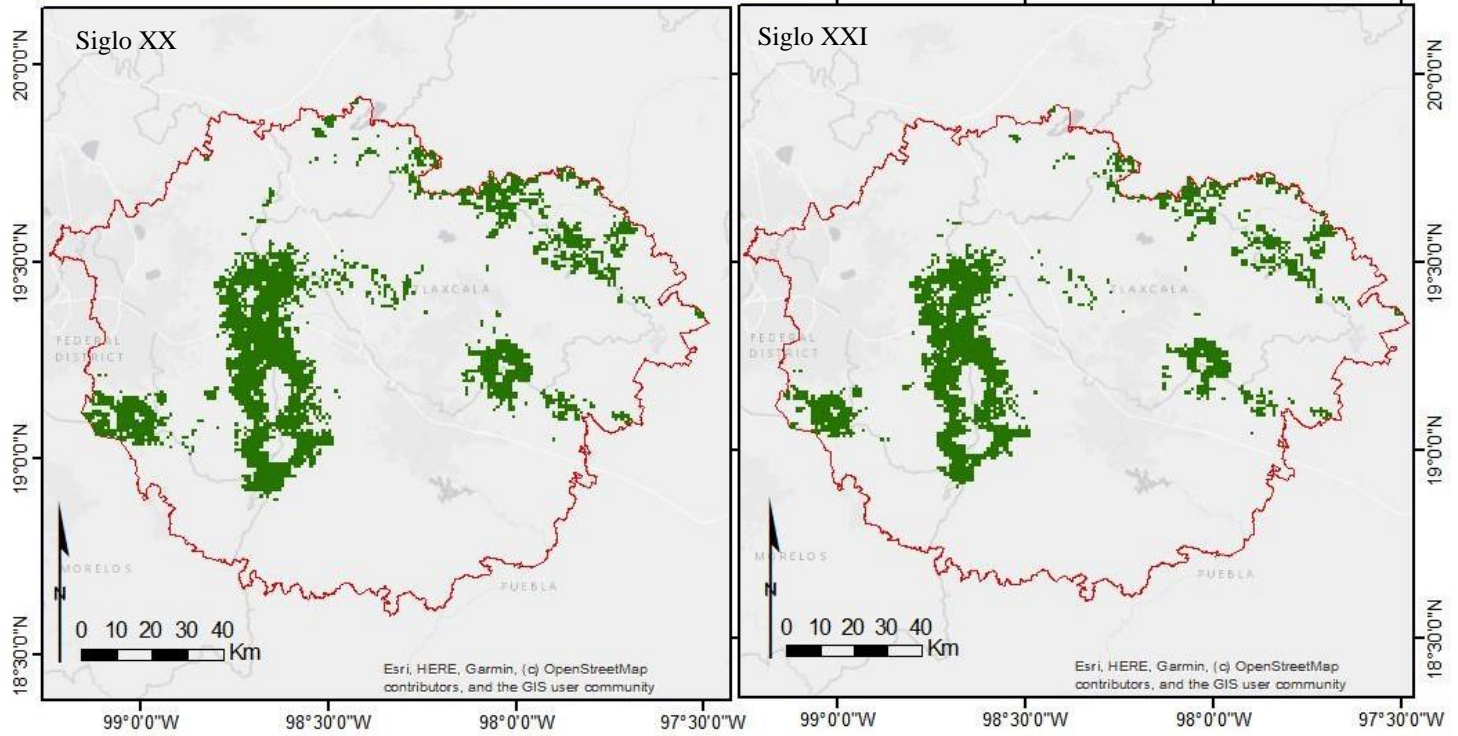




*Pseudoeurycea leprosa*



- Área de estudio
- Presencia
- Ausencia



• Reptiles

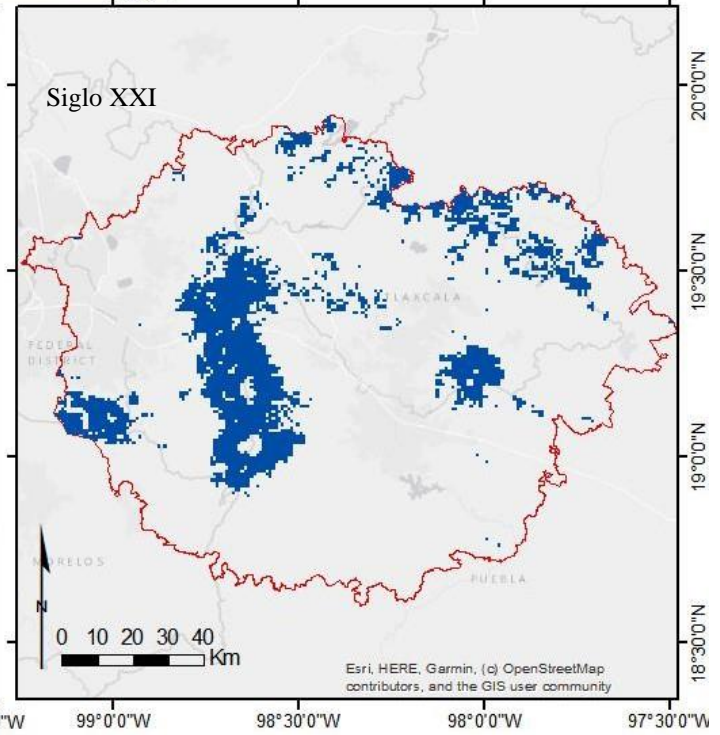
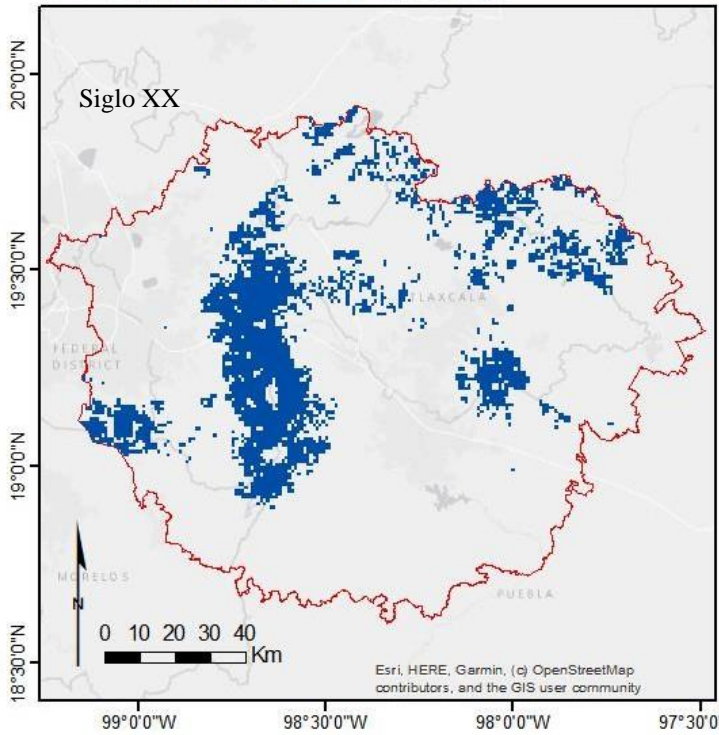
*Crotalus triseriatus*



Área de estudio

Presencia

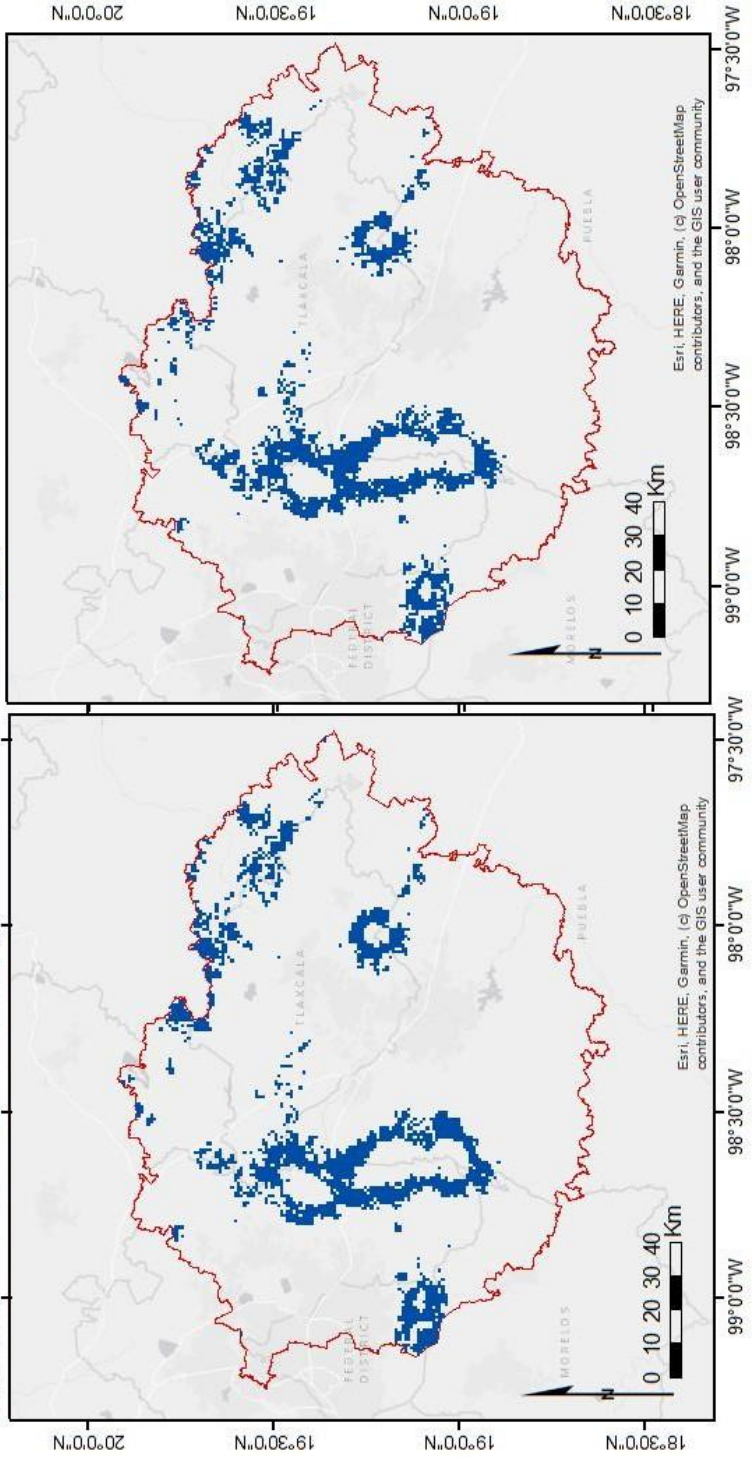
Ausencia



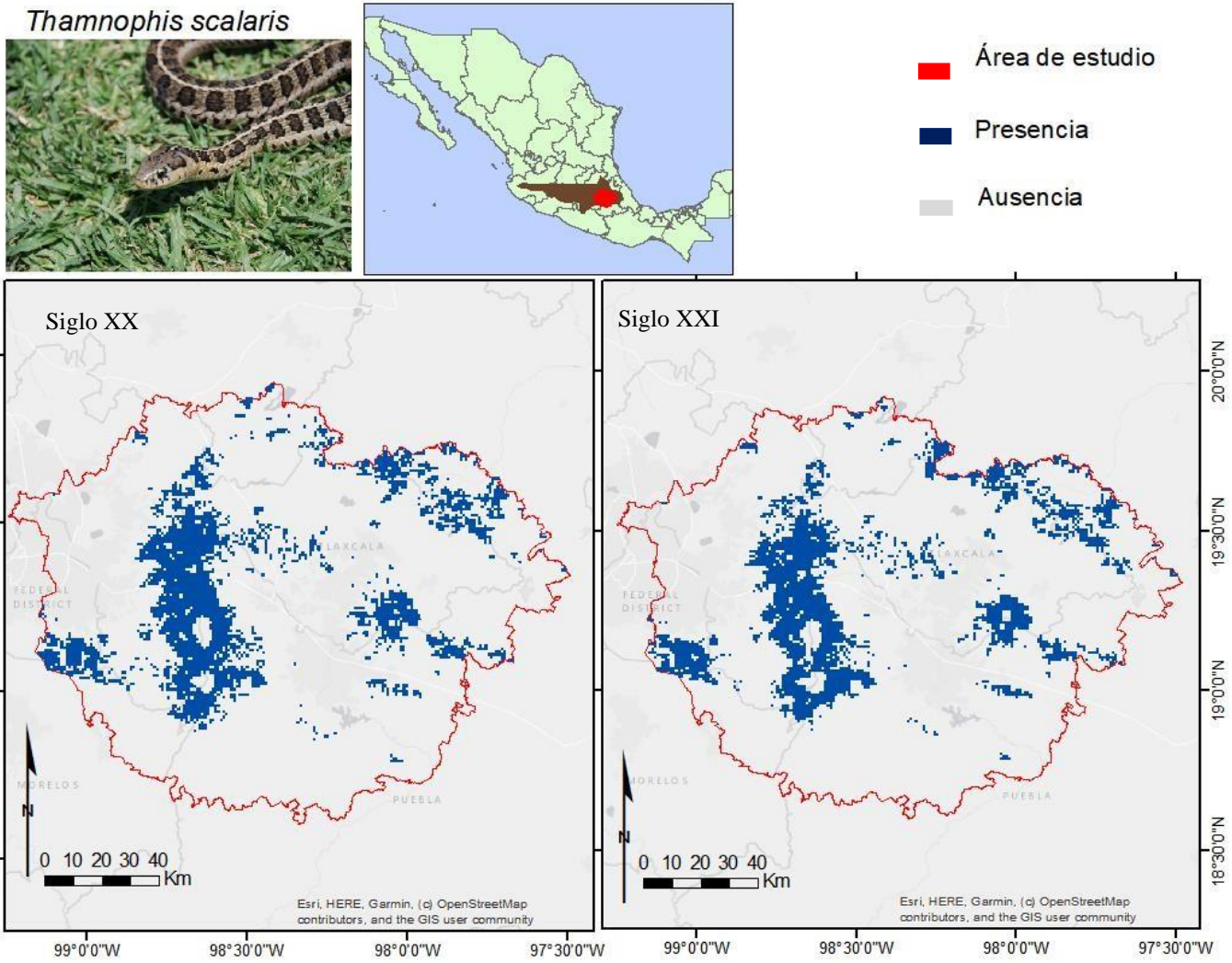
*Plestiodon brevirostris*



- Área de estudio
- Presencia
- Ausencia



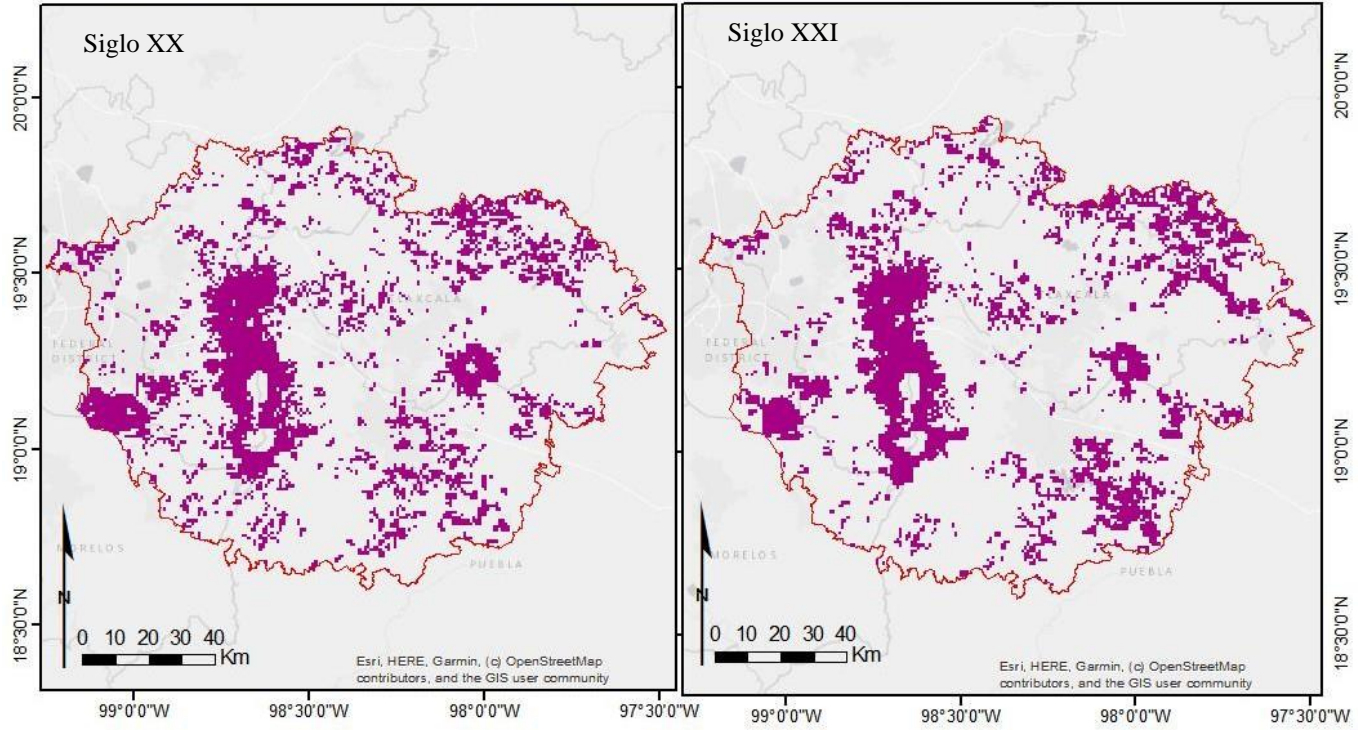




*Mustela frenata*



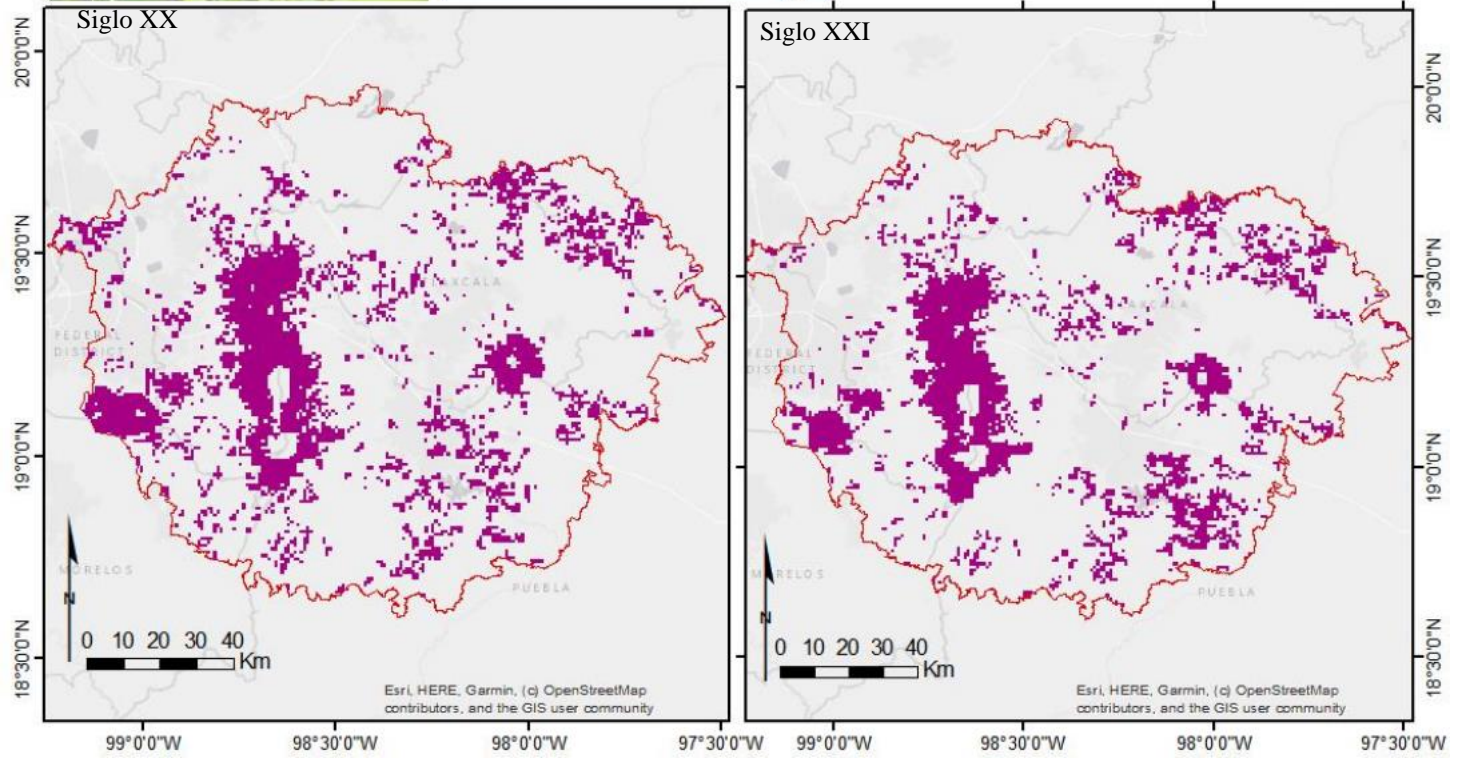
- Área de estudio
- Presencia
- Ausencia



*Neotomodon alstoni*



- Área de estudio
- Presencia
- Ausencia

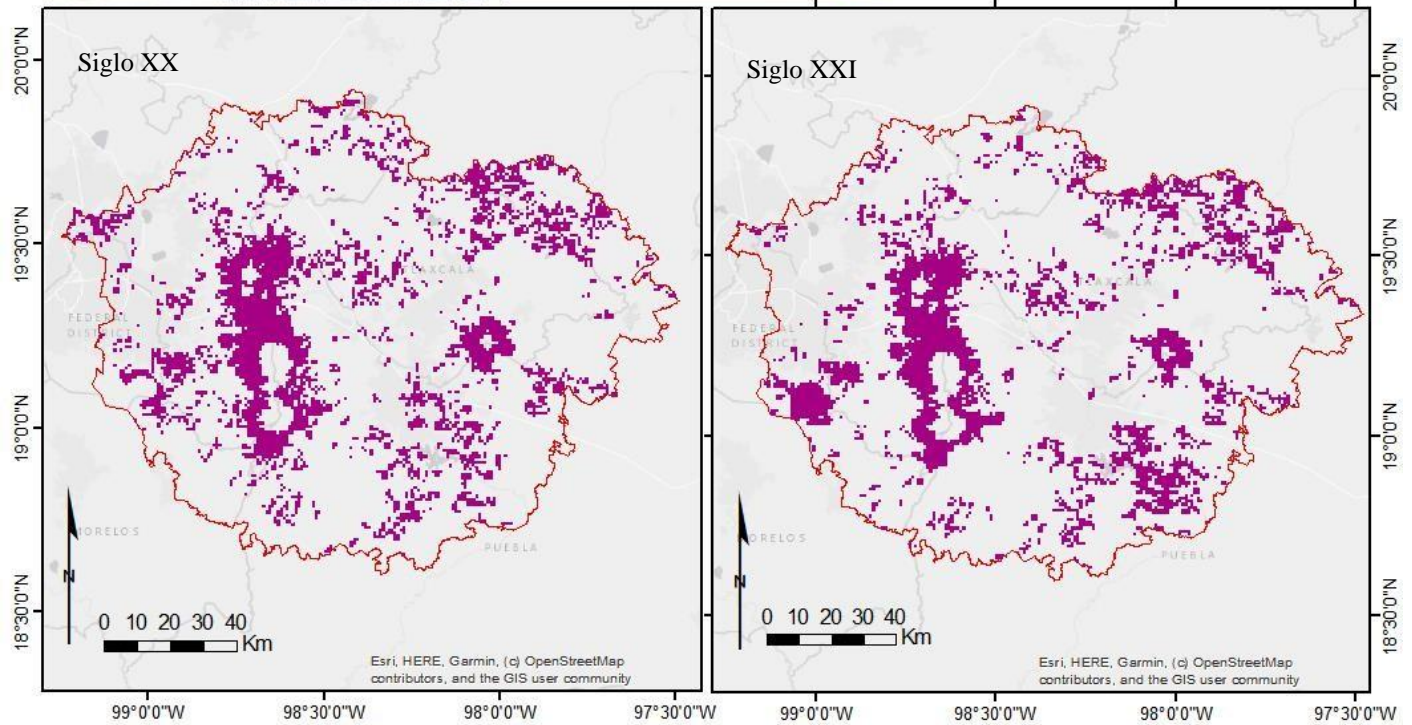




*Peromyscus difficilis*



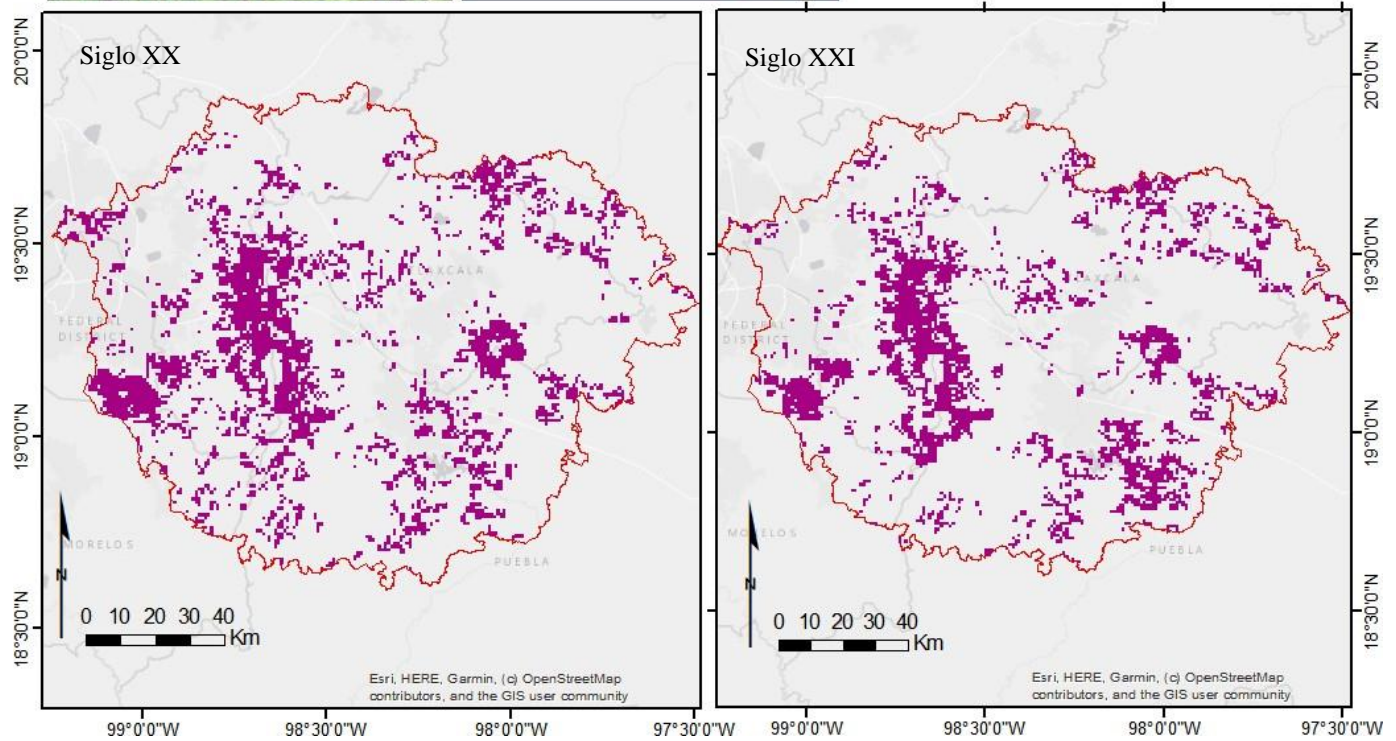
- Área de estudio
- Presencia
- Ausencia



*Sylvilagus cunicularius*

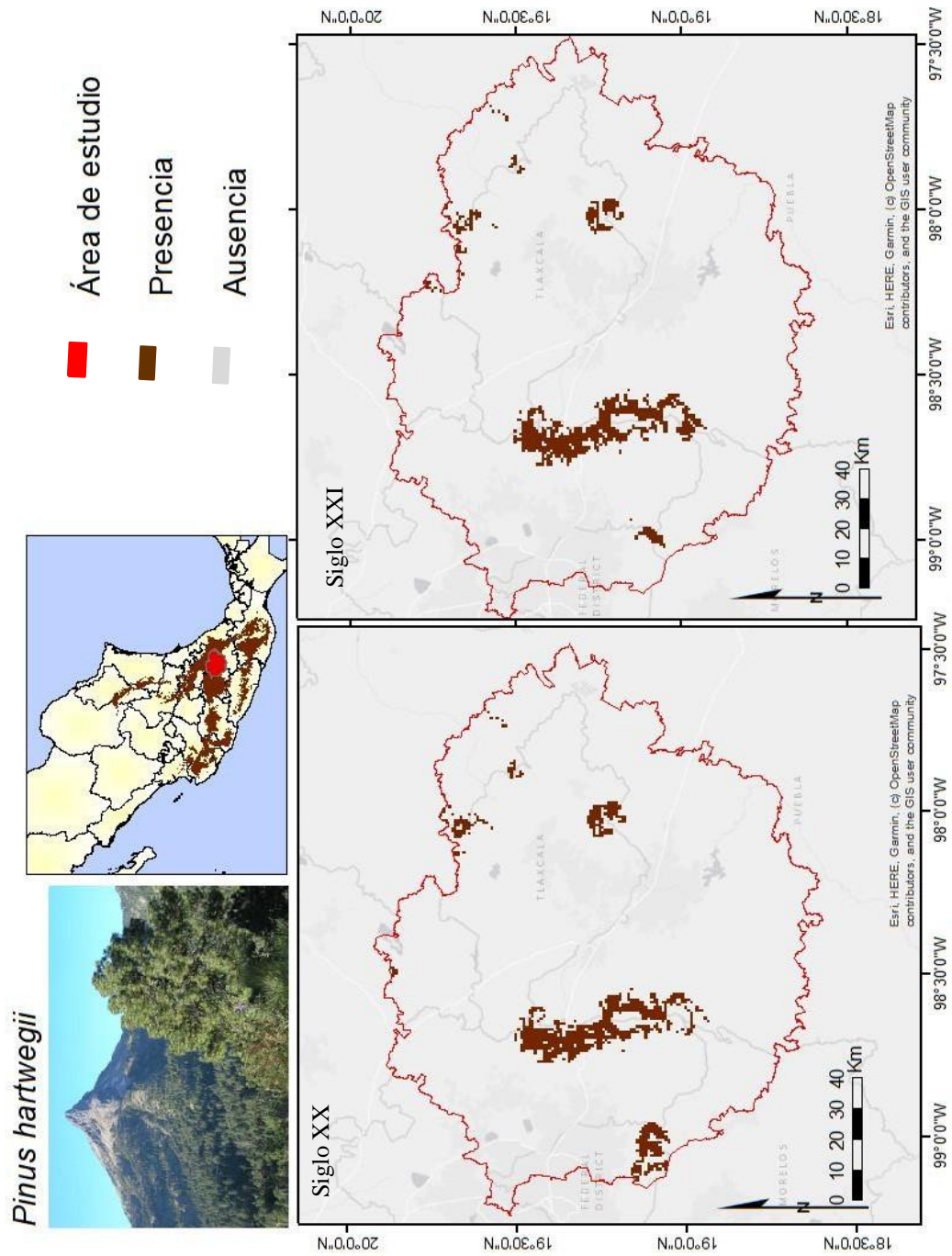


- Área de estudio
- Presencia
- Ausencia





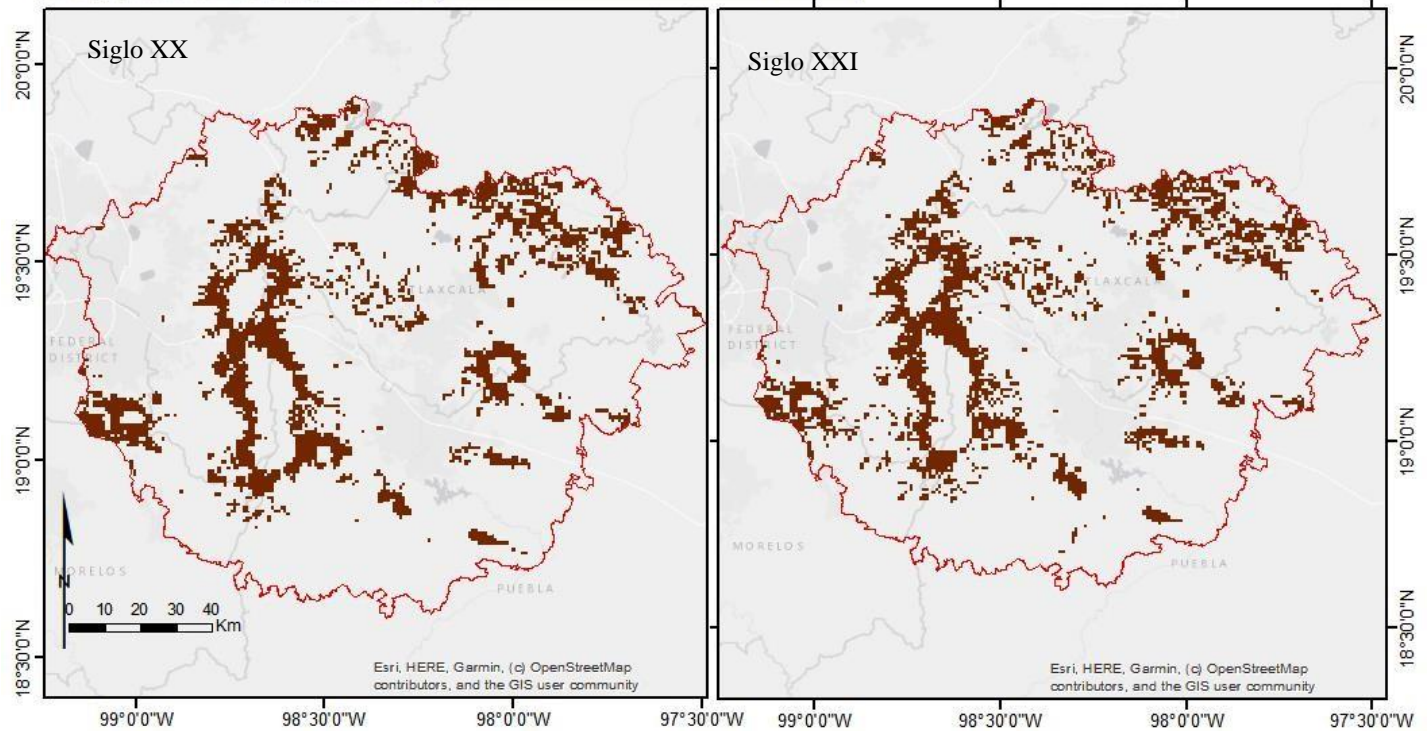
- Vegetación arbórea



*Pinus montezumae*



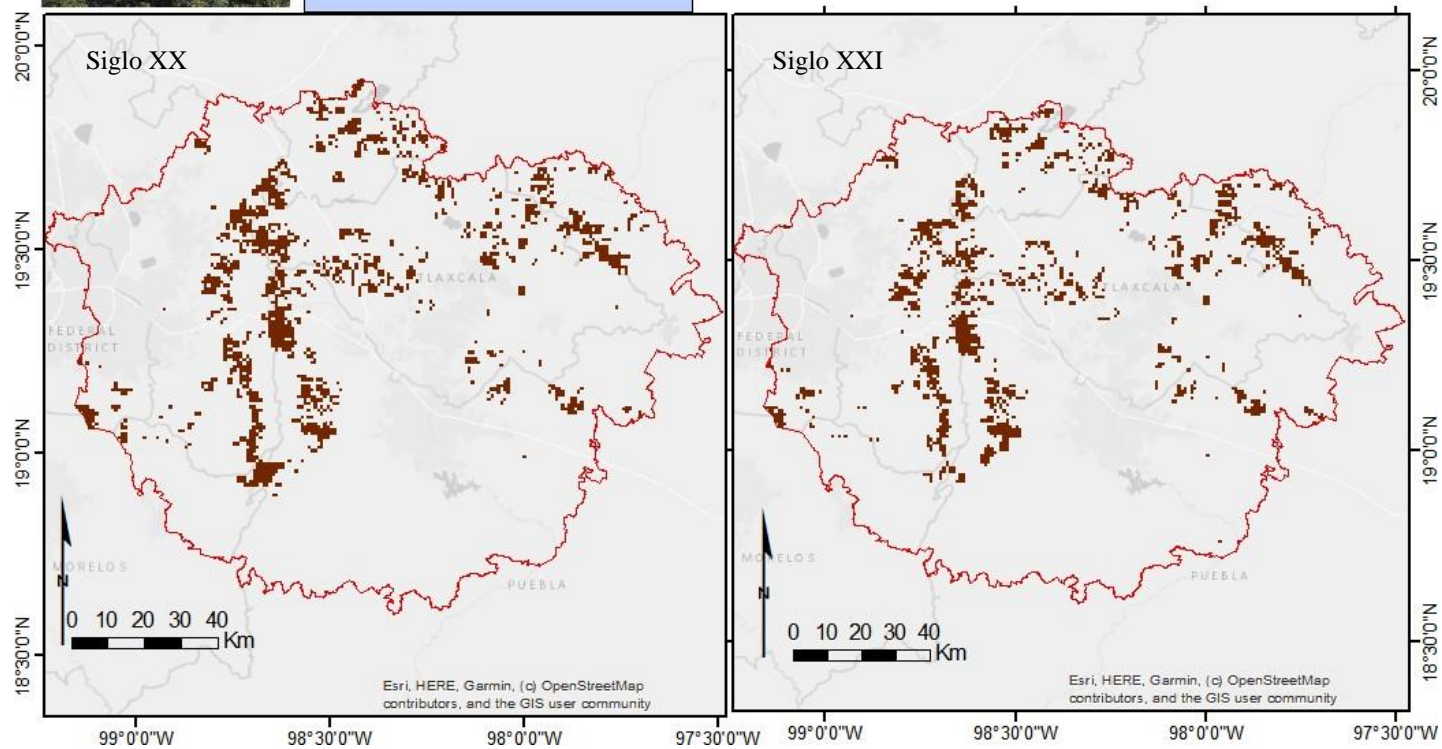
- Área de estudio
- Presencia
- Ausencia



*Quercus glabrescens*



- Área de estudio
- Presencia
- Ausencia

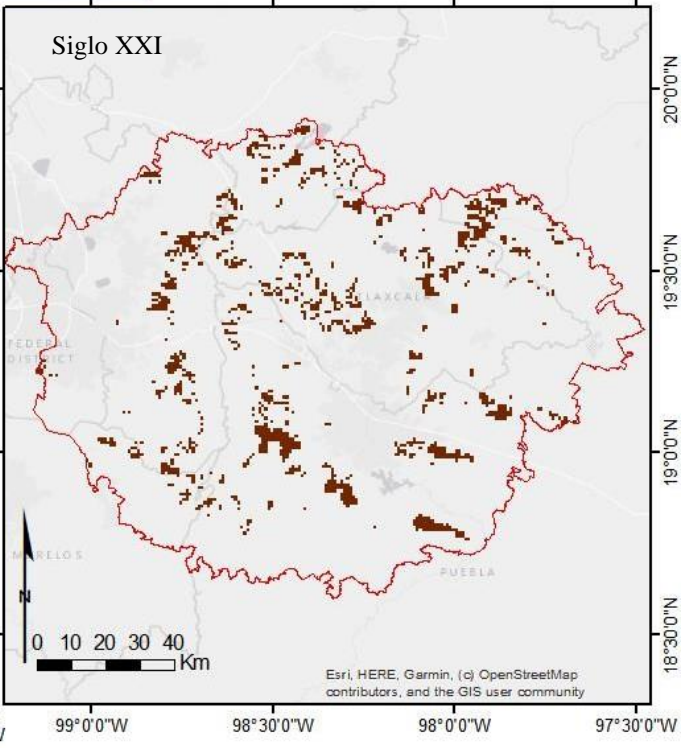
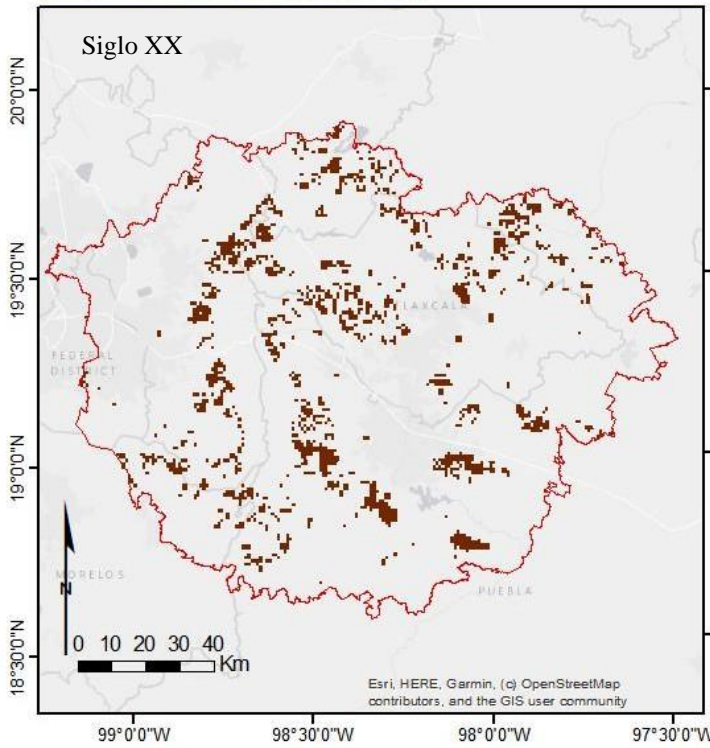




*Quercus rugosa*



- Área de estudio
- Presencia
- Ausencia



**Anexo II. Métricas de rendimiento y configuración de los mejores modelos para cada especie.**

• **Anfibios**

<b>Especie</b>	<b>Configuración del modelo</b>	<b>Área bajo la curva AUC</b>	<b>p-valor p ROC</b>	<b>Tasa de omisión 5%</b>	<b>Delta AICc</b>
<i>Ambystoma velasci</i>	MR=0.7 FC = lqp; set 71	1.9	0.0	0.021	0.0
<i>Aquiloerycea cephalica</i>	MR=1 FC=lqpt; set 2	2.0	0.0	0.038	0.0
<i>Pseudoeurycea leprosa</i>	MR= 0.1 FC=lq; set 93	3.3	0.0	0.039	0.0

• **Mamíferos**

<b>Especie</b>	<b>Configuración del modelo</b>	<b>Área bajo la curva AUC</b>	<b>p-valor p ROC</b>	<b>Tasa de omisión 5%</b>	<b>Delta AICc</b>
<i>Mustela frenata</i>	MR=1 FC=lqpt; set 19	2.0	0.0	0.0	0.0
	MR= 0.1 FC=lq; set 33	2.05	0.0	0.0	0.83
<i>Neotomodon alstoni</i>	MR=0.1 FC=l; set 97	2.2	0.0	0.036	0.0
<i>Peromyscus difficilis</i>	MR= 0.3 FC=lqp; set 34	2.42	0.0	0.045	0.0
	MR = 0.3 FC = lqp; set 49	2.37	0.0	0.045	1.87
<i>Sylvilagus cunicularius</i>	MR = 0.1 FC = lq; set 2	2.01	0.0	0.09	0.0

• **Reptiles**

<b>Especie</b>	<b>Configuración del modelo</b>	<b>Área bajo la curva AUC</b>	<b>p-valor p ROC</b>	<b>Tasa de omisión 5%</b>	<b>Delta AICc</b>
<i>Crotalus triseriatus</i>	MR= 1 FC = lqpt; set 13	1.9	0.0	0.0	0.0
<i>Plestiodon brevirostris</i>	MR=5	2.0		0.0	
	FC=lqp; set 54	2.0	0.0	0.0	0.0

	MR=5	2.0	0.0	0.0	0.0
	FC=lqp; set34	2.0	0.0	0.0	0.0
	MR=5	2.0	0.0	0.0	0.01
	FC=lqp; set70		0.0		0.02
	MR=5				
	FC=lqp; set12				
	MR=5				
	FC= lqpt; set33				
<i>Thamnophis scalaris</i>	MR= 1	2.1	0.0	0.0	0.0
	FC=lqpt; set 32				

• Árboles

Especie	Configuración del modelo	Área bajo la curva AUC	p-valor p ROC	Tasa de omisión 5%	Delta AICc
<i>Pinus hartwegii</i>	MR=0.1				
	FC=lqp; set 22	2.51	0.0	0.038	0.0
	MR= 0.1	2.28	0.0	0.038	0.85
	FC=lqp; set 6	2.53	0.0	0.038	1.65
<i>Pinus montezumae</i>	MR=0.1				
	FC=lqp; set 60	1.95	0.0	0.033	0.0
	MR=0.1	1.96	0.0	0.017	1.22
	FC=lqp; set59	1.97	0.0	0.017	1.42
<i>Quercus glabrescens</i>	MR= 1				
	FC=lqpt; set 37	2.17	0.0	0.045	0.0
<i>Quercus rugosa</i>	MR = 0.1	2.30	0.0	0.049	0.0
	FC = lqp; set 71				

**Anexo III. Puntos de Validación de la transferencia.**

<b>Especie</b>	<b># puntos dentro</b>	<b># puntos fuera</b>	<b>TOTAL ESPERADOS</b>	<b>% dentro</b>	<b>% fuera</b>
<b>Anfibios</b>					
<i>Ambystoma velasci</i>	86	20	106	81.1	18.8
<i>AquiloEURYCEA cephalica</i>	133	1	134	99.2	0.7
<i>Pseudoeurycea leprosa</i>	115	30	145	97	20.6
<b>Mamíferos</b>					
<i>Mustela frenata</i>	162	5	167	97	2.9
<i>Neotomodon alstoni</i>	204	5	209	97.6	2.3
<i>Peromyscus difficilis</i>	181	2	183	98.9	1
<i>Sylvilagus cunicularius</i>	64	2	66	96.9	3.03
<b>Reptiles</b>					
<i>Crotalus triseriatus</i>	55	9	64	85.9	14
<i>Plestiodon brevirostris</i>	43	8	51	84.3	15.6
<i>Thamnophis scalaris</i>	42	1	43	97.6	2.3
<b>Árboles</b>					
<i>Pinus hartwegii</i>	395	20	415	95.1	4.8
<i>Pinus montezumae</i>	314	36	350	89.7	10.2
<i>Quercus glabrescens</i>	178	82	260	68.4	31.5
<i>Quercus rugosa</i>	870	14	884	98.4	1.5

**Anexo IV. Área calculada (Km<sup>2</sup>) para las categorías: ausencia, persistencia, pérdida y ganancia de la distribución de cada especie.**

<b>Grupo</b>	<b>Ausencia Km<sup>2</sup></b>	<b>Persistencia Km<sup>2</sup></b>	<b>Pérdida Km<sup>2</sup></b>	<b>Ganancia Km<sup>2</sup></b>
<b>Anfibios</b>				
<i>Ambystoma velasci</i>	16828.0	342.99	2.44	14.66
<i>Pseudoeurycea leprosa</i>	14983.51	1481.97	456.24	266.41
<i>Aquiloerycea cephalica</i>	14806.72	1296.21	811.46	273.74
<b>Reptiles</b>				
<i>Crotalus triseriatus</i>	14219.30	2071.01	515.71	382.10
<i>Plestiodon brevirostris</i>	15188.0	1450.20	273.74	276.19
<i>Thamnophis scalaris</i>	14111.76	2097.90	558.08	420.39
<b>Mamíferos</b>				
<i>Mustela frenata</i>	12299.82	2448.23	1316.58	1123.49
<i>Neotomodon alstoni</i>	13045.29	2225.0	1136.53	781.31
<i>Peromyscus difficilis</i>	12949.15	2128.04	1165.86	945.07
<i>Sylvilagus cunicularius</i>	13305.19	1877.92	1152.01	853.01
<b>Vegetación arbórea</b>				
<i>Pinus hartwegii</i>	15157.05	1341.84	297.37	391.88
<i>Pinus montezumae</i>	16070.35	650.14	208.56	259.08
<i>Quercus glabrescens</i>	16639.02	272.93	162.94	113.24
<i>Quercus rugosa</i>	16407.64	418.76	237.08	124.65

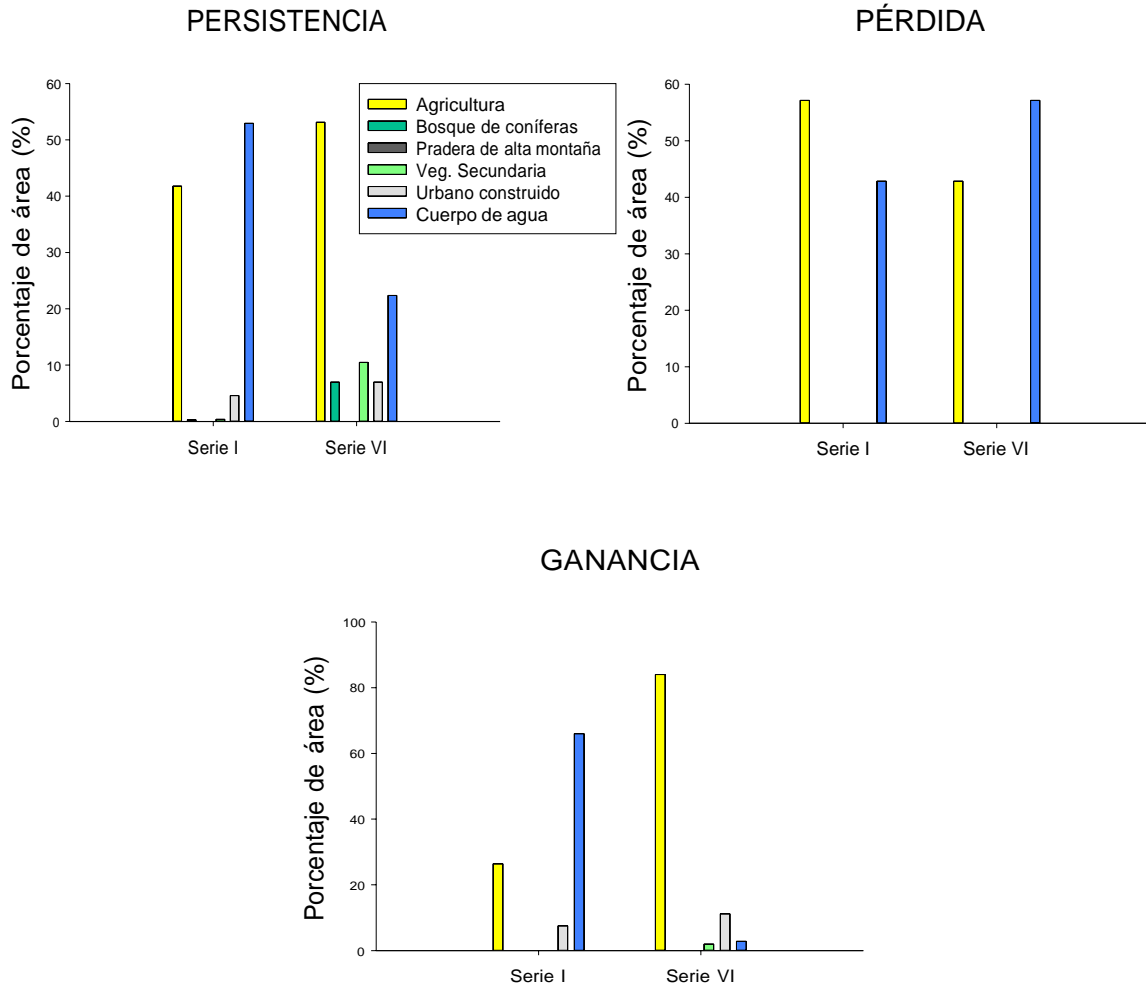


**Anexo V. Porcentajes obtenidos para las categorías: ausencia, persistencia, pérdida y ganancia de la distribución de cada especie.**

Grupo	Porcentajes %			
	Ausencia	Persistencia	Pérdida	Ganancia
<b>Anfibios</b>				
<i>Ambystoma velasci</i>	97.90	1.99	0.01	0.08
<i>Pseudoeurycea leprosa</i>	87.17	8.62	2.65	1.54
<i>Aquiloerycea cephalica</i>	86.14	7.54	4.72	1.59
<b>Reptiles</b>				
<i>Crotalus triseriatus</i>	82.72	12.04	3.0	2.22
<i>Plestiodon brevirostris</i>	88.36	8.43	1.59	1.60
<i>Thamnophis scalaris</i>	82.10	12.20	3.24	2.44
<b>Mamíferos</b>				
<i>Mustela frenata</i>	71.55	14.24	7.65	6.53
<i>Neotomodon alstoni</i>	75.89	12.94	6.61	4.54
<i>Peromyscus difficilis</i>	75.33	12.38	6.78	5.49
<i>Sylvilagus cunicularius</i>	77.40	10.92	6.70	4.96
<b>Vegetación arbórea</b>				
<i>Pinus hartwegii</i>	88.18	7.80	1.73	2.27
<i>Pinus montezumae</i>	93.49	3.78	1.21	1.50
<i>Quercus glabrescens</i>	96.80	1.58	0.94	0.65
<i>Quercus rugosa</i>	95.45	2.43	1.37	0.72

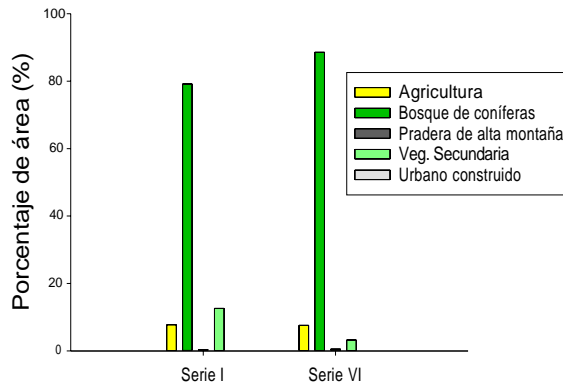
# Anfibios

*Ambystoma velasci*

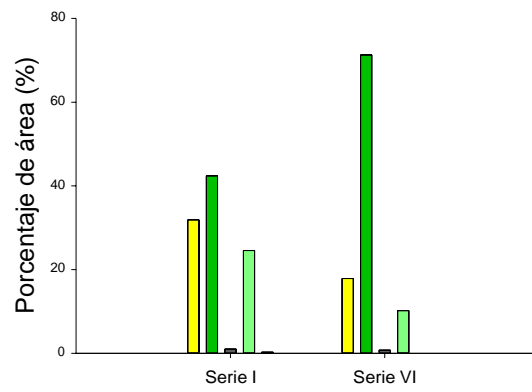


*Aquiloerycea cephalica*

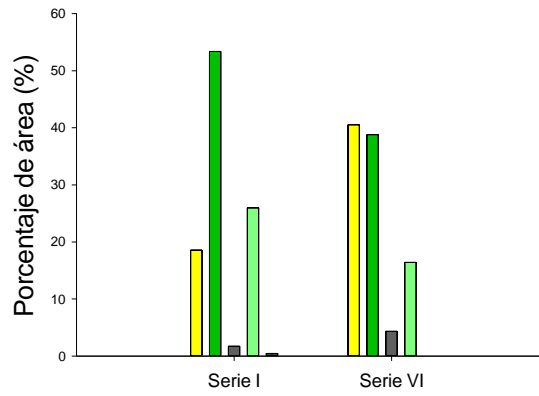
PERSISTENCIA



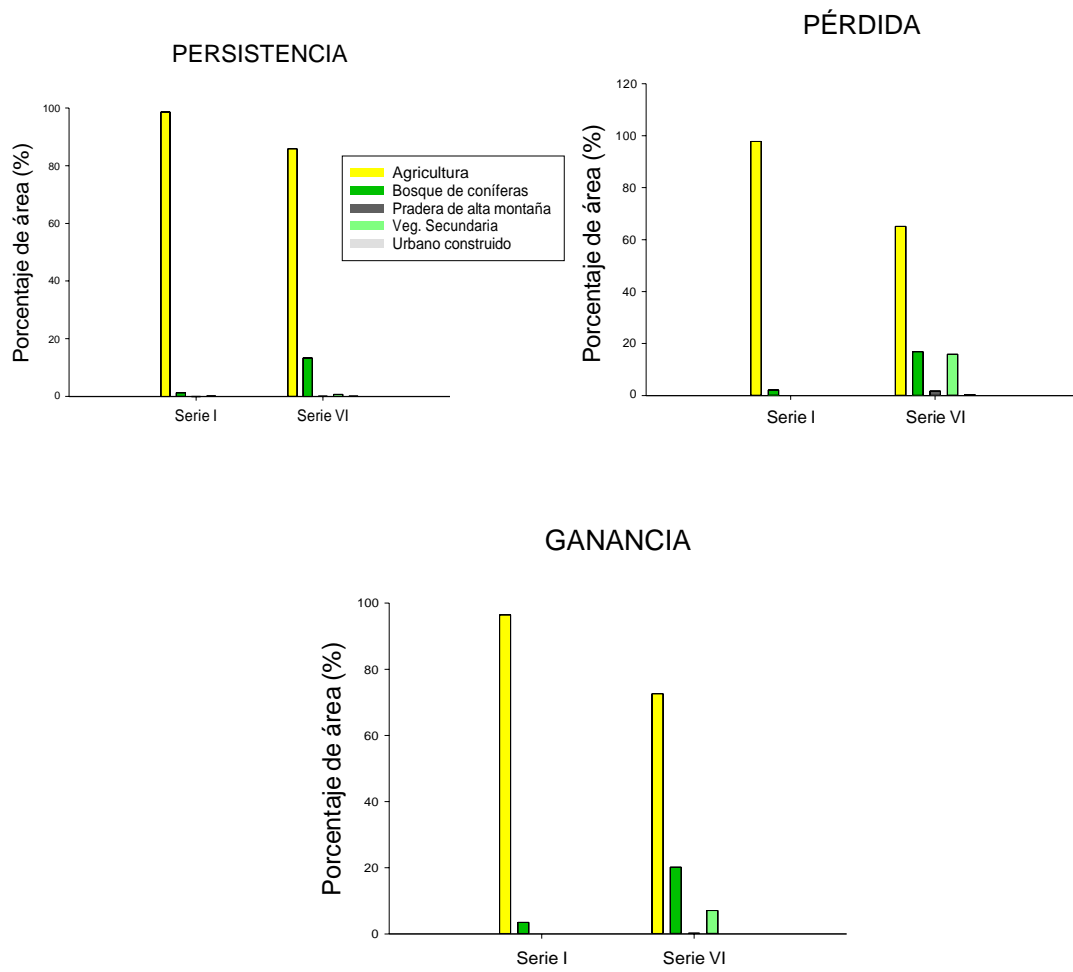
PÉRDIDA



GANANCIA

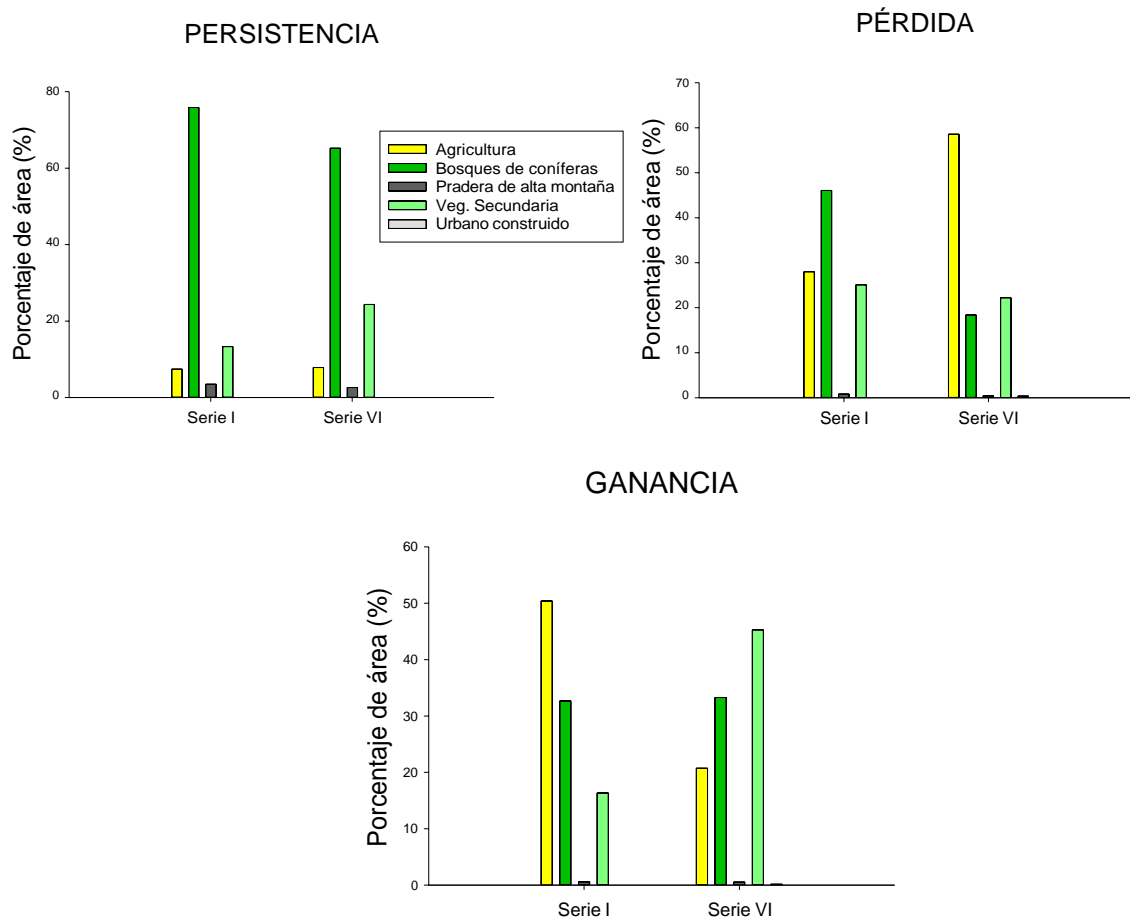


*Pseudoeuurycea leprosa*

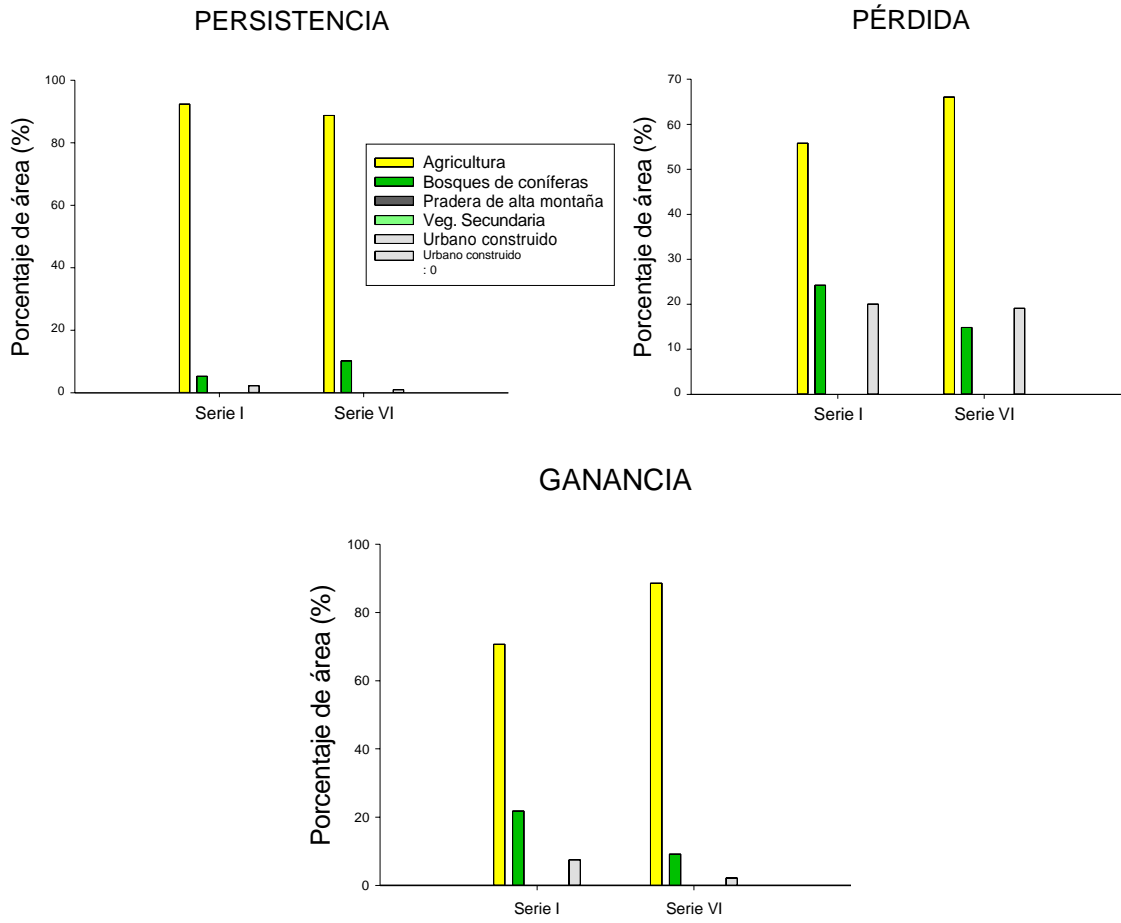


# Reptiles

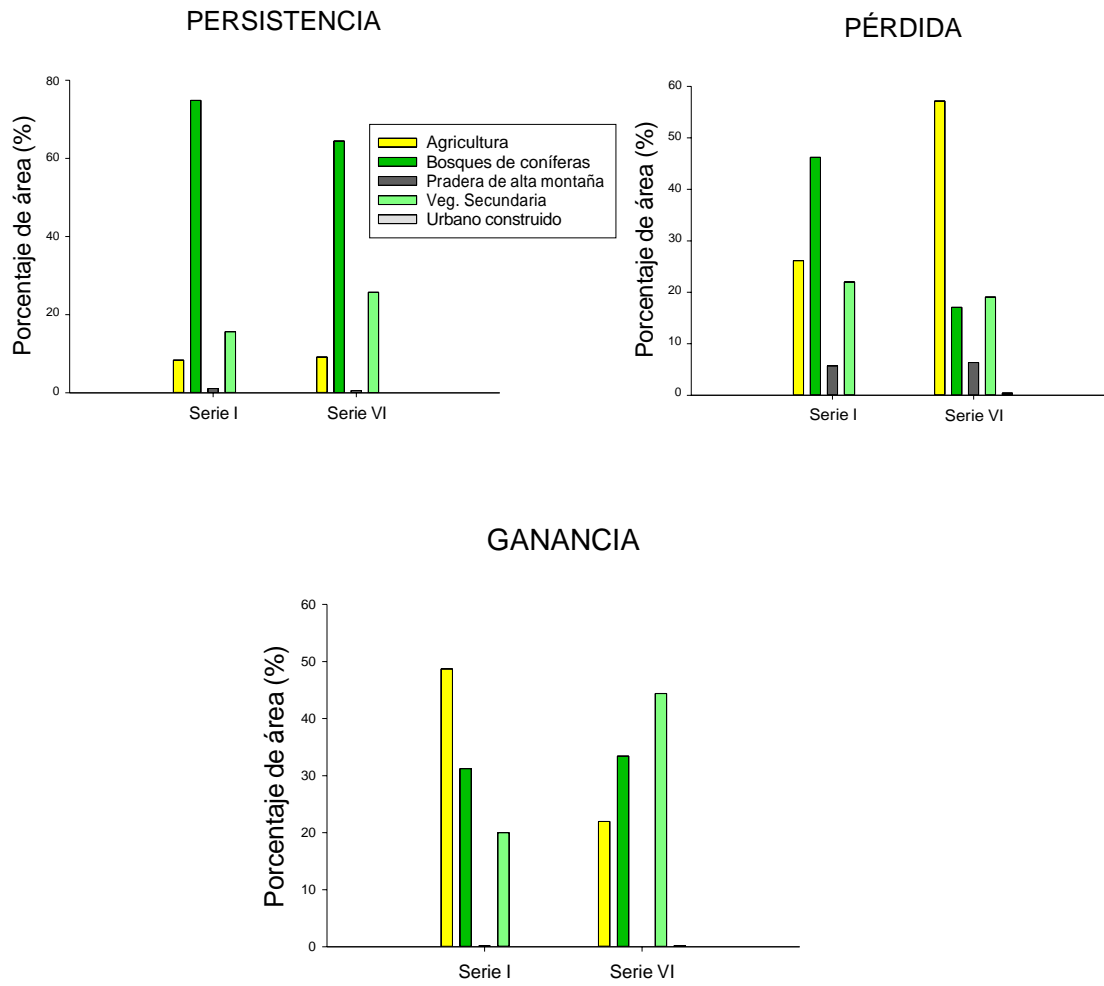
## *Crotalus triseriatus*



*Plestiodon brevirostris*

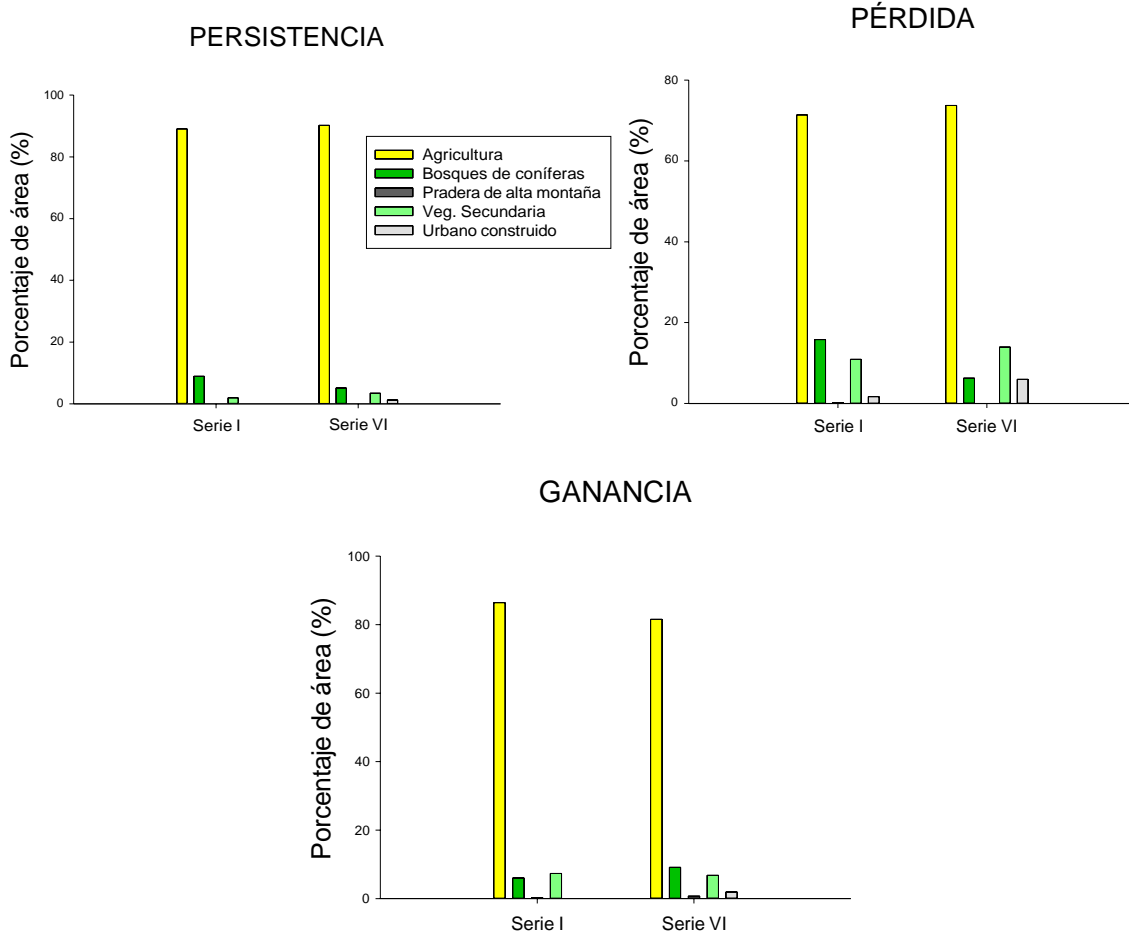


*Thamnophis scalaris*



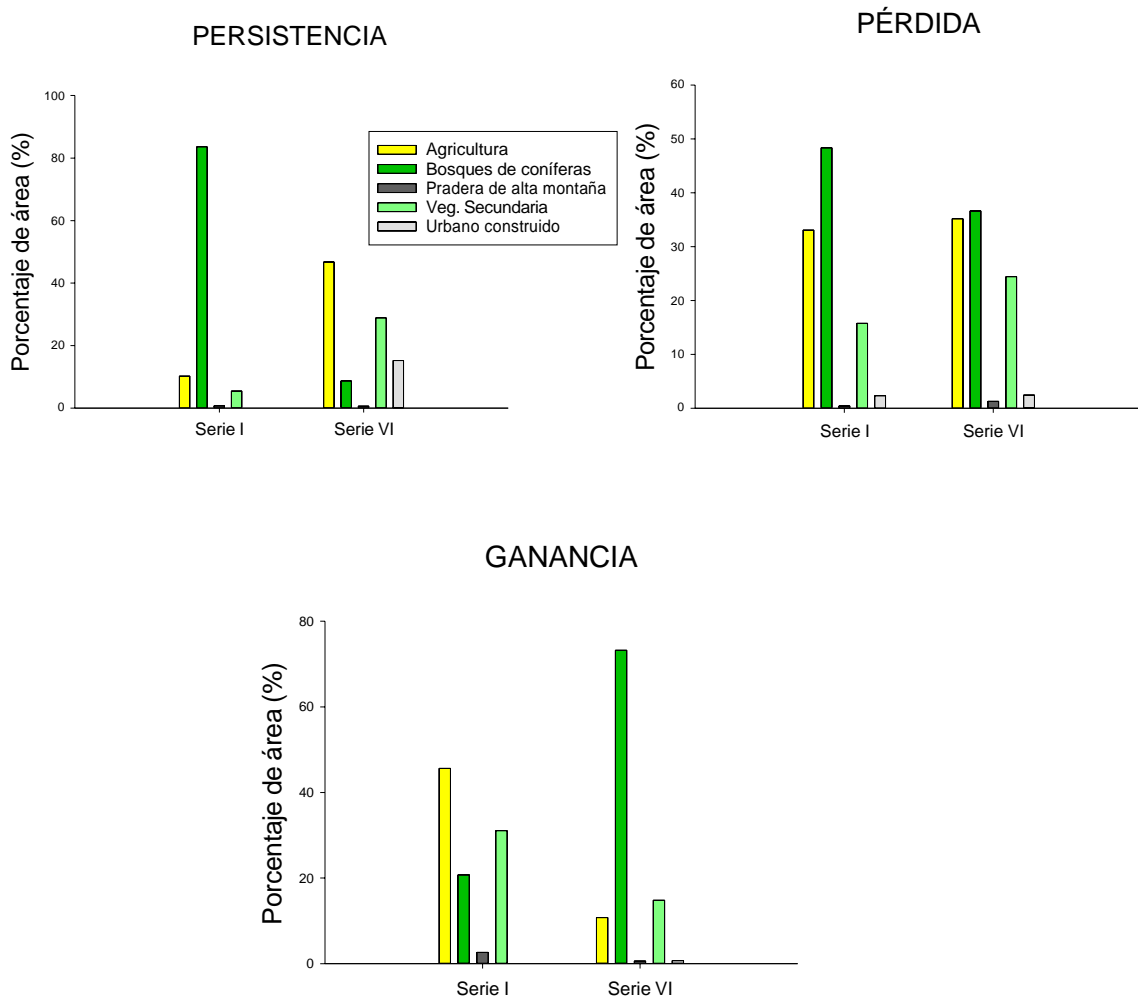
# Mamíferos

## *Mustela frenata*

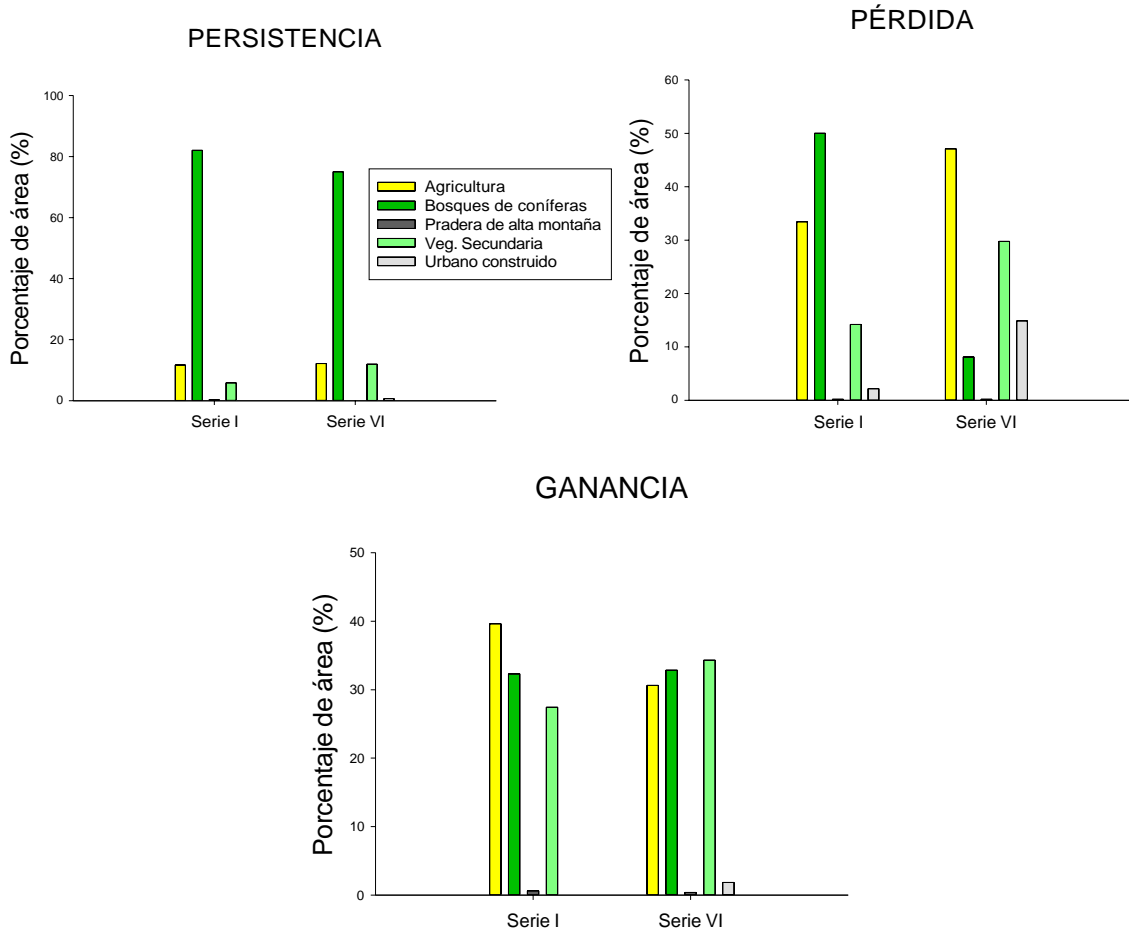




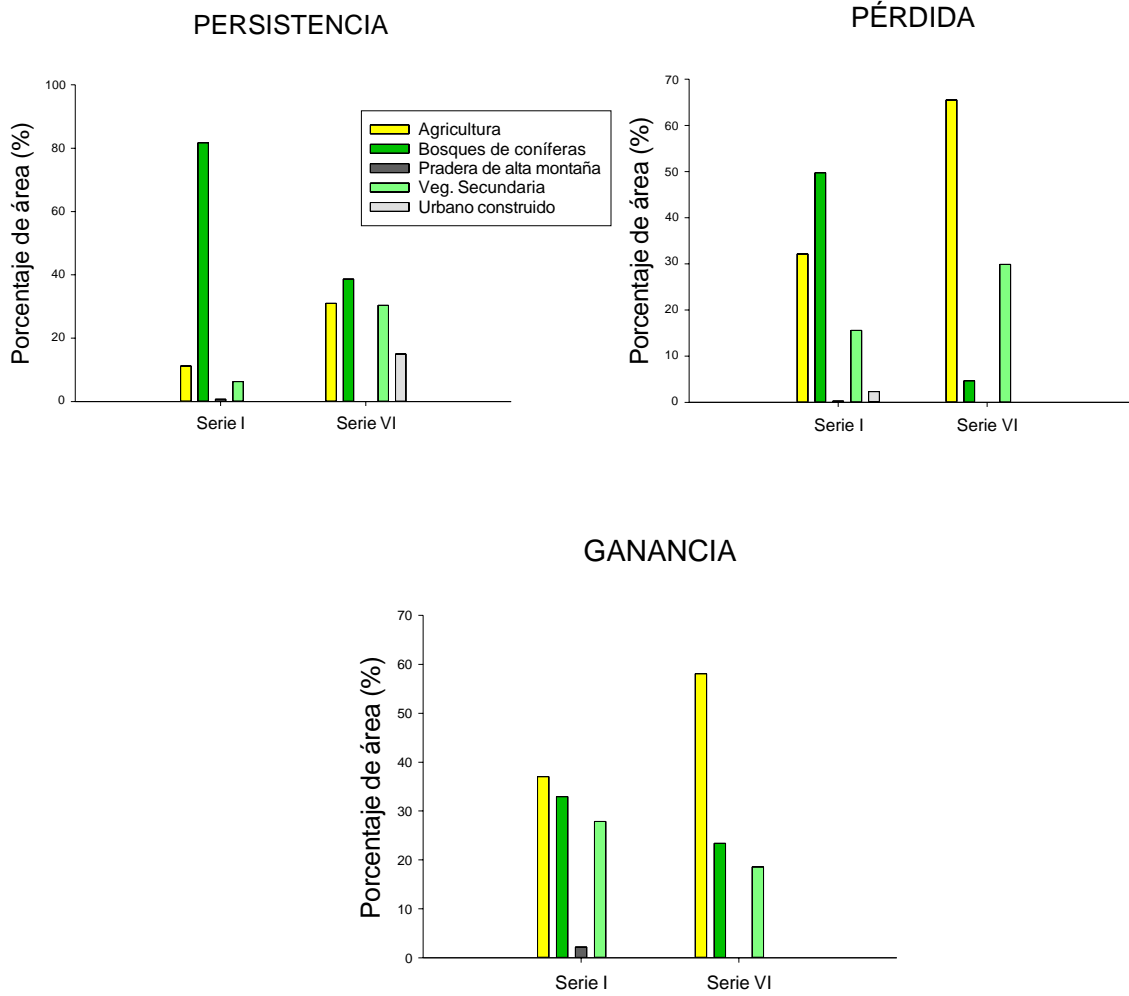
*Neotomodon alstoni*



*Peromyscus difficilis*



*Sylvilagus cunicularius*



**Anexo VI. Porcentajes obtenidos de vegetación para la serie I y serie VI asociados a las categorías de pérdida, ganancia y persistencia, de cada especie respecto al total del área de estudio.**

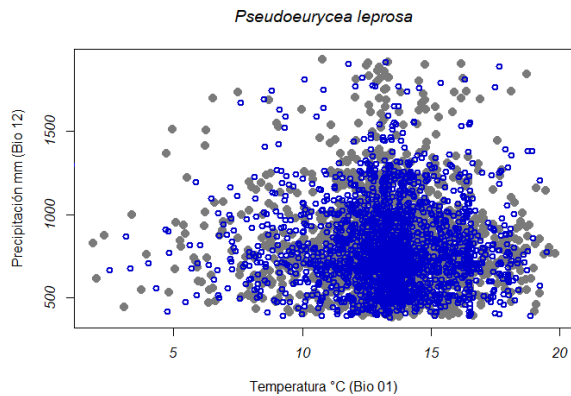
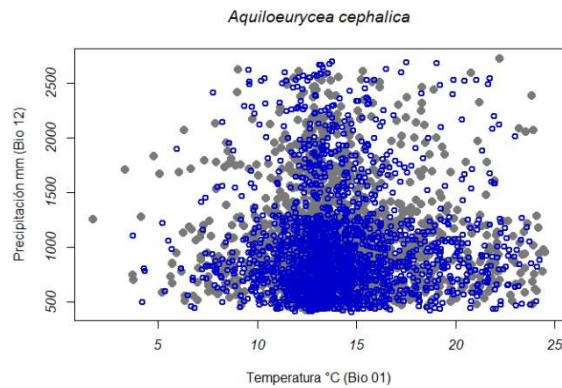
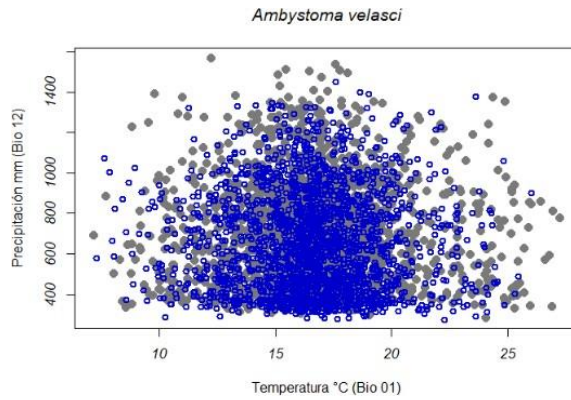
Grupo	Categoría de vegetación	Porcentajes					
		Persistencia		Pérdida		Ganancia	
		Serie I	Serie VI	Serie I	Serie VI	Serie I	Serie VI
<b>Anfibios</b>							
<i>Ambystoma velasci</i>	Agricultura	0.30	0.038	0.004 4	0.003	0.014	0.03
	Bosques de coníferas	0.002	0.005	0	0	0	0
	Pradera de alta montaña	0	0	0	0	0	0
	Vegetación secundaria	0.002 6	0.007 5	0	0	0	0.0007
	Urbano construido	0.033	0.005	0	0	0.004	0.004
	Cuerpo de agua	0.38	0.016	0.003 3	0.004	0.035	0.001
	Ausencia	99.96	99.83	99.99	99.99	99.96	99.99
<i>Pseudoeurycea leprosa</i>	Agricultura	24.82	82.44	41.33	60.79	24.01	66.92
	Bosques de coníferas	0.31	12.81	0.90	15.74	0.87	18.55
	Pradera de alta montaña	0.004	0.04	0.01	1.63	0.004	0.20
	Vegetación secundaria	0.02	0.67	0.004	14.81	0.01	6.48
	Urbano construido	0	0.031	0	0.34	0	0.0004
	Ausencia	74.83	3.99	57.73	6.66	75.08	7.82
<i>Aquiloerycea cephalica</i>	Agricultura	0.57	0.56	1.3	0.72	0.25	0.47
	Bosques de coníferas	5.83	6.53	1.73	2.88	0.72	0.45
	Pradera de alta montaña	0.029	0.04	0.04	0.03	0.023	0.05
	Vegetación secundaria	0.93	0.24	1	0.41	0.35	0.19
	Urbano construido	0.004	0	0.011	0	0.006	0
	Ausencia	92.63	92.63	95.91	95.96	98.65	98.84
<b>Reptiles</b>							
	Agricultura	0.85	0.90	0.68	1.37	0.71	0.38

<i>Crotalus triseriatus</i>	Bosques de coníferas	8.73	7.5	1.12	0.43	0.46	0.61
	Pradera de alta montaña	0.4	0.3	0.02	0.01	0.008	0.01
	Vegetación secundaria	1.53	2.8	0.61	0.52	0.23	0.83
	Urbano construido	0	0.004	0	0.009	0	0.003
	Ausencia	88.46	88.37	97.55	97.64	98.58	98.14
<i>Plestiodon brevirostris</i>	Agricultura	90.39	85.87	54.64	61.38	65.72	85.85
	Bosques de coníferas	5.21	9.88	23.71	13.78	20.28	8.9
	Pradera de alta montaña	0.0008	0.001	0.0002	0.0008	0	0
	Vegetación secundaria	0	0.001	0	0.001	0	0.0002
	Urbano construido	2.23	0.97	19.61	17.77	6.96	2.12
	Ausencia	2.15	3.26	2.02	7.05	7.02	3.04
<i>Thamnophis scalaris</i>	Agricultura	0.98	1.08	0.69	1.44	0.78	0.44
	Bosques de coníferas	8.76	7.61	1.22	0.43	0.50	0.67
	Pradera de alta montaña	0.13	0.07	0.15	0.16	0.002	0.0008
	Vegetación secundaria	1.83	3.04	0.58	0.48	0.32	0.89
	Urbano construido	0	0.003	0	0.01	0	0.004
	Ausencia	88.30	88.17	97.33	97.45	98.38	97.98
<b>Mamíferos</b>							
<i>Mustela frenata</i>	Agricultura	85.89	87.46	60.99	67.03	77.65	73.85
	Bosques de coníferas	8.60	4.94	13.50	5.67	5.40	8.25
	Pradera de alta montaña	0.004	0.006	0.18	0.07	0.21	0.62
	Vegetación secundaria	1.85	3.33	9.32	12.68	6.57	6.11
	Urbano construido	0.11	1.20	1.43	5.42	0.004	1.71
	Ausencia	3.5	3.04	14.54	9.10	10.14	9.44
<i>Neotomodon alstoni</i>	Agricultura	1.04	2.43	1.28	0.72	1.19	1.11
	Bosques de coníferas	8.52	0.45	1.87	0.75	0.54	7.57
	Pradera de alta montaña	0.07	0.032	0.017	0.026	0.068	0.06

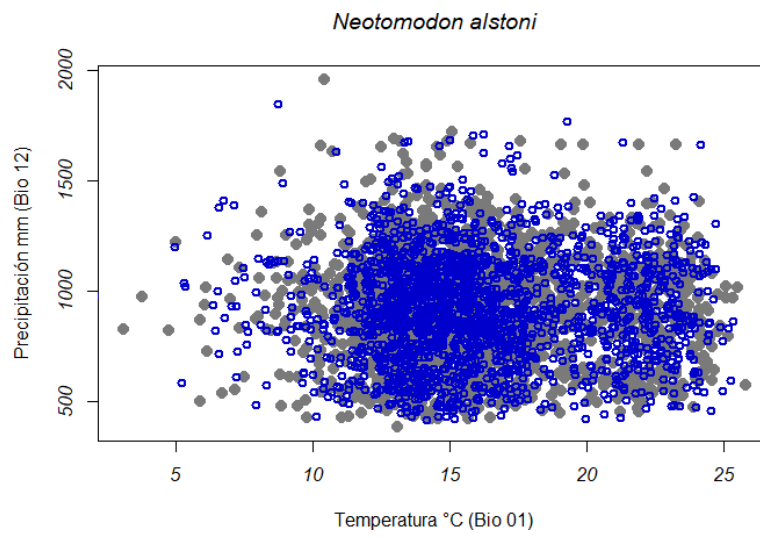
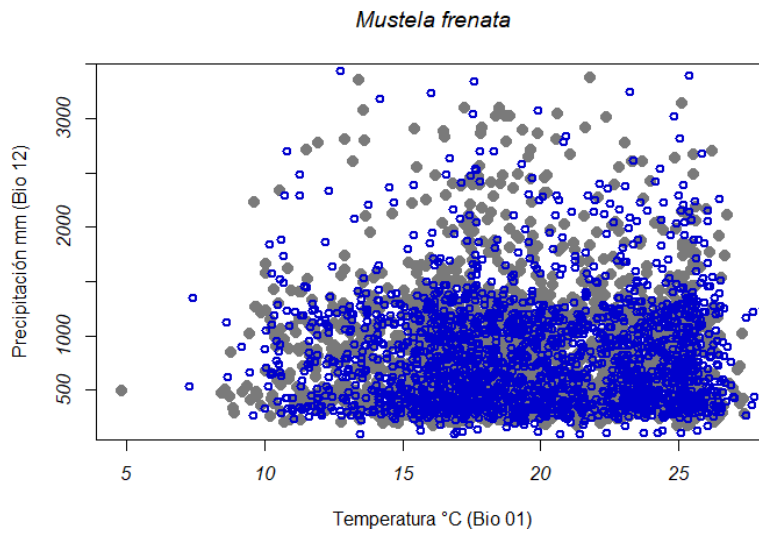
	Vegetación secundaria	0.55	1.50	0.61	0.50	0.81	1.53
	Urbano construido	0.01	0.79	0.09	0.05	0	0.07
	Ausencia	89.79	94.78	96.10	97.92	97.10	89.64
<i>Peromyscus difficilis</i>	Agricultura	1.14	1.19	1.39	2.50	1.30	0.83
	Bosques de coníferas	7.98	7.33	2.08	0.43	1.06	0.89
	Pradera de alta montaña	0.03	0.01	0.008	0.01	0.02	0.01
	Vegetación secundaria	0.57	1.17	0.59	1.58	0.90	0.93
	Urbano construido	0.0009	0.07	0.09	0.79	0	0.05
	Ausencia	90.26	90.19	95.82	94.66	96.69	97.26
<i>Sylvilagus cunicularius</i>	Agricultura	0.93	1.01	1.26	2.39	1.09	0.72
	Bosques de coníferas	6.79	1.26	1.95	0.17	0.97	0.29
	Pradera de alta montaña	0.060	0	0.01	0	0.064	0
	Vegetación secundaria	0.52	0.99	0.61	1.09	0.82	0.23
	Urbano construido	0.01	0	0.09	0	0	0
	Ausencia	91.66	96.72	96.06	96.33	97.03	98.73

**Anexo VII. Gráficas de dispersión tomando en cuenta temperatura promedio anual (bio01) y precipitación (bio12) para el siglo XX y XXI de cada especie. \*Los puntos en color gris representan los datos para el siglo XX y los puntos en color azul representan los datos para el siglo XXI.**

- Anfibios

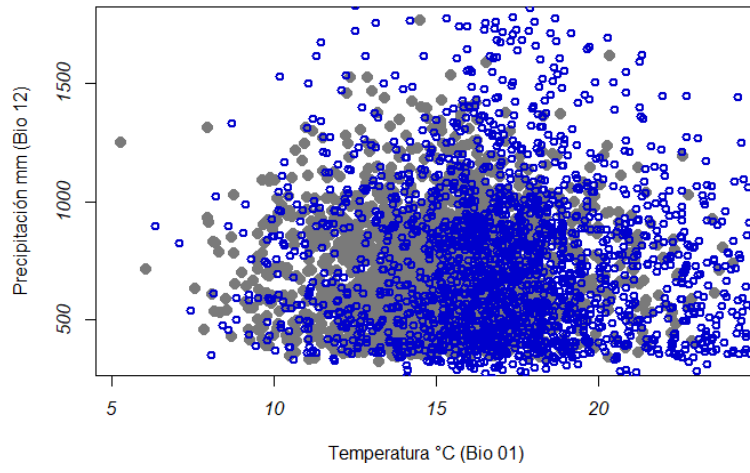


- Mamíferos

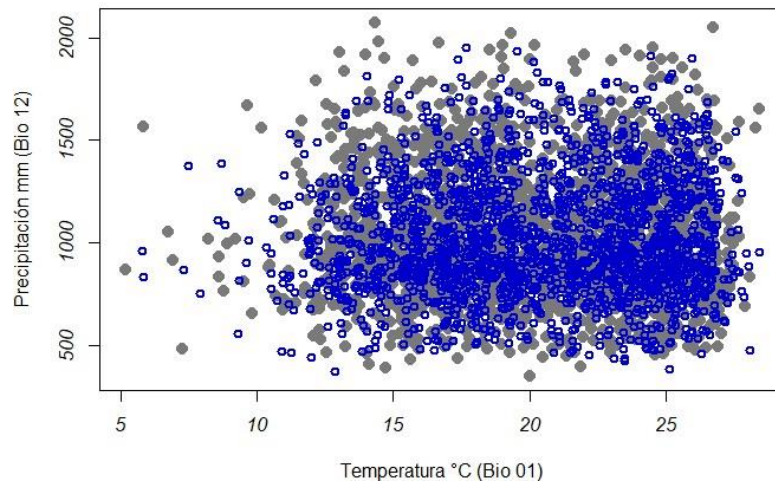




*Peromyscus difficilis*

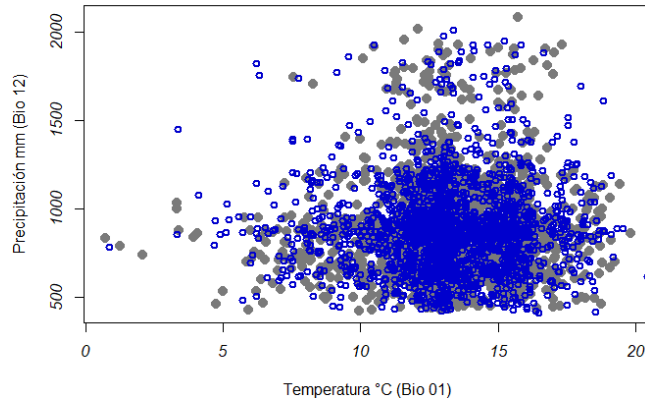


*Sylvilagus cunicularius*

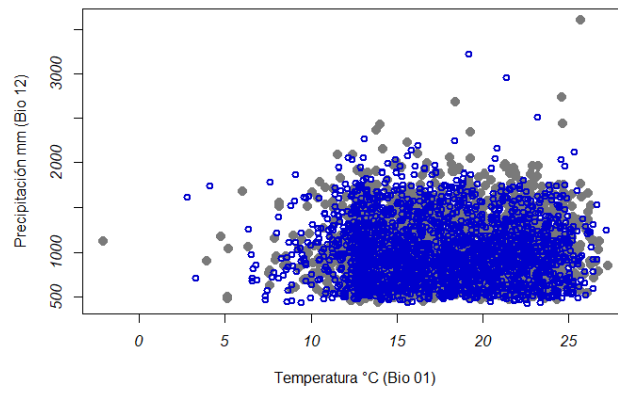


- Reptiles

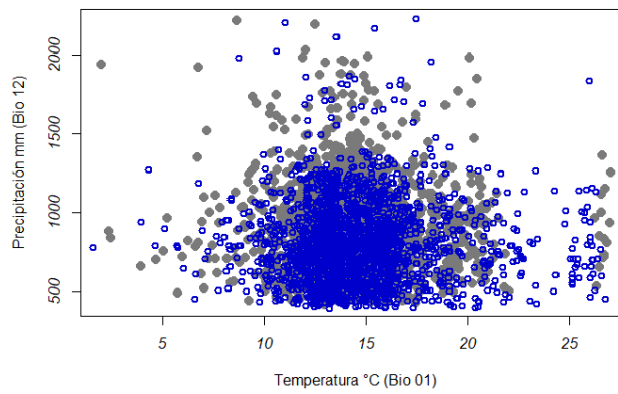
*Crotalus triseriatus*



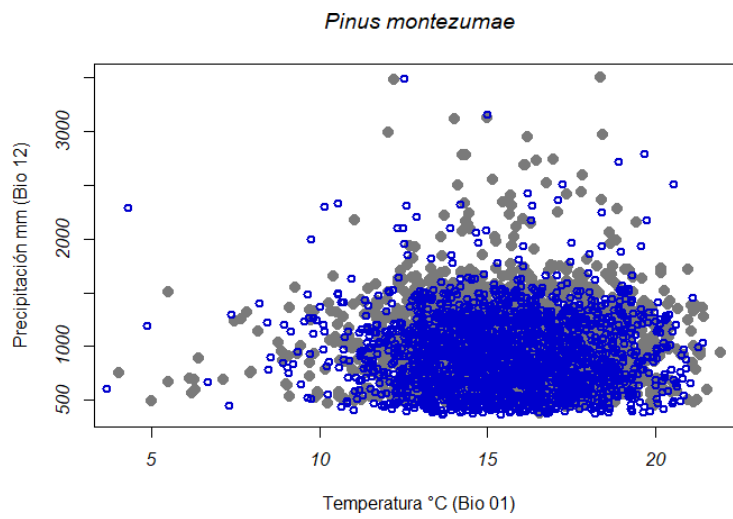
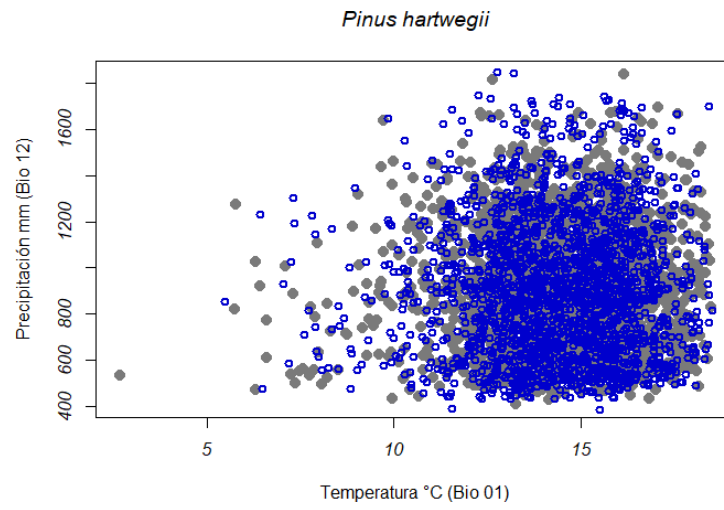
*Plestiodon breviostris*



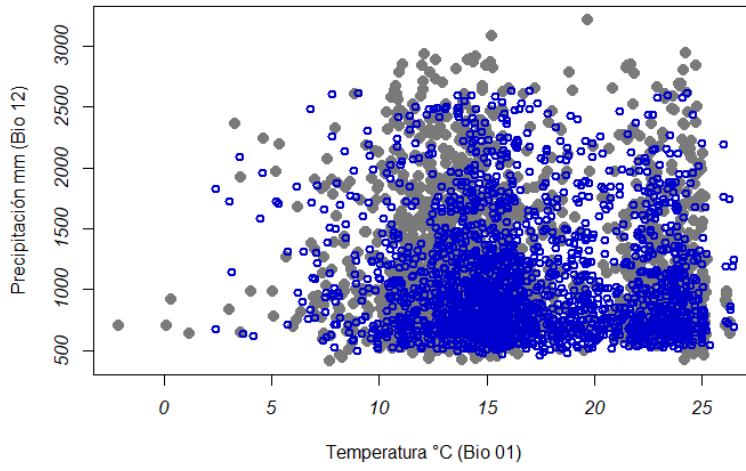
*Thamnophis scalaris*



- Vegetación arbórea



*Quercus glabrescens*



*Quercus rugosa*

