



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS**  
CENTRO DE INVESTIGACIONES EN ECOSISTEMAS  
ECOLOGÍA

**EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA DISTRIBUCIÓN ALTITUDINAL DE  
ROEDORES EN ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS**

**TESIS**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
**MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS  
(BIOLOGÍA AMBIENTAL)**

PRESENTA:

**MARTÍN CADENA SALGADO**

**TUTOR(A) PRINCIPAL DE TESIS: DR. HÉCTOR TAKESHI ARITA WATANABE**  
**CENTRO DE INVESTIGACIONES EN ECOSISTEMAS**

**COMITÉ TUTOR: DR. VÍCTOR SÁNCHEZ CORDERO DÁVILA**  
**INSTITUTO DE BIOLOGÍA**

**COMITÉ TUTOR: DR. DAVID VALENZUELA GALVÁN**  
**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN BIODIVERSIDAD Y**  
**CONSERVACIÓN, UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE**  
**MORELOS**

**MÉXICO, D.F.**

**FEBRERO, 2014**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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





**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS**  
CENTRO DE INVESTIGACIONES EN ECOSISTEMAS  
ECOLOGÍA

**EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA DISTRIBUCIÓN ALTITUDINAL DE  
ROEDORES EN ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS**

**TESIS**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
**MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS  
(BIOLOGÍA AMBIENTAL)**

PRESENTA:

**MARTÍN CADENA SALGADO**

**TUTOR(A) PRINCIPAL DE TESIS: DR. HÉCTOR TAKESHI ARITA WATANABE**  
**CENTRO DE INVESTIGACIONES EN ECOSISTEMAS**

**COMITÉ TUTOR: DR. VÍCTOR SÁNCHEZ CORDERO DÁVILA**  
**INSTITUTO DE BIOLOGÍA**

**COMITÉ TUTOR: DR. DAVID VALENZUELA GALVÁN**  
**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN BIODIVERSIDAD Y**  
**CONSERVACIÓN, UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE**  
**MORELOS**

**MÉXICO, D.F.**

**FEBRERO, 2014**



Dr. Isidro Ávila Martínez  
Director General de Administración Escolar, UNAM  
Presente

Por medio de la presente me permito informar a usted que en la reunión ordinaria del Subcomité de Ecología y Manejo Integral de Ecosistemas del Posgrado en Ciencias Biológicas, celebrada el día 8 de abril del 2013, se acordó poner a su consideración el siguiente jurado para el examen de grado de Maestra en Ciencias Biológicas (Biología Ambiental) del alumno **Martín Cadena Salgado** con número de cuenta **510007991** con la tesis titulada: **"Efectos del cambio climático en la distribución altitudinal de roedores en Áreas Naturales Protegidas"** bajo la dirección del **Dr. Héctor Takeshi Arita Watanabe**.

Presidente:	Dr. Luis Bernardo Vázquez Hernández
Vocal:	Dra. Patricia Illoldi Rangel
Secretario:	Dr. David Valenzuela Galván
Suplente:	Dra. Elizabeth Arellano Arenas
Suplente:	Dr. Roberto Antonio Lindig Cisneros

Sin otro particular, quedo de usted.

**ATENTAMENTE**  
**"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"**  
Cd. Universitaria, D.F. a, 20 de enero del 2014.

*M. del Coro Arizmendi*

**DRA. MARÍA DEL CORO ARIZMENDI ARRIAGA**  
**COORDINADORA DEL PROGRAMA**

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Posgrado en Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional Autónoma de México por la oportunidad que me dio de conocer a excelentes investigadores y colegas al cursar mis estudios de maestría en el área de Biología Ambiental.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para realizar mis estudios de maestría (No de CVU 252074).

A mi comité tutorial:

Agradezco a mi tutor, el Dr. Héctor Takeshi Arita Watanabe, porque con su ejemplo de investigador y divulgador de la ciencia singular hacen que uno aspire a tener esa capacidad para transformar lo complejo en textos sencillos e interesantes. Agradezco también la orientación y comentarios recibidos sobre este proyecto, así como el que haya fomentado mi trabajo independiente y la libertad de proponer nuevas ideas para este estudio.

Al Dr. Víctor Sánchez Cordero por todo el tiempo dedicado a discutir el proyecto, enriqueciéndolo siempre con sus comentarios y por las innumerables ideas que surgieron de ahí para continuar en un futuro próximo por este camino que forma parte de la conservación.

Al Dr. David Valenzuela Galván por contagiarme su pasión por los mamíferos y por estar siempre dispuesto a aportar ideas frescas y apoyo para mejorar este proyecto. Por su apertura para escuchar mis ideas desordenadas y sin pulir y por guiarme para que éstas tomaran forma.

## **AGRADECIMIENTOS A TÍTULO PERSONAL**

A mis revisores del jurado. Gracias a los Doctores David, Elizabeth, Paty, Roberto y Luis Bernardo por el tiempo dedicado a revisar detalladamente el escrito y enriquecerlo con su experiencia y valiosos comentarios.

A mis compañeros de laboratorio de macroecología. Gracias por tantas y tan ricas discusiones y buenos momentos a Pau, Fabricio, Lorena, Daniela y Leonel.

A mis profesores Héctor Arita, Paty Balvanera, Miguel Martínez, Víctor Arroyo, Julieta Benítez por su dedicación y por inspirar a sus alumnos.

A Dolores por su paciencia apoyo y comprensión con los innumerables trámites.

A mis compañeros de maestría por ser y estar. En especial al “equipo” porque con ella arreglamos y desarreglamos el mundo más de una vez.

A mi querido grupo PAO por su amistad de más de diez años, por soñar juntos con un mundo más equitativo y porque ustedes y sus ideas me inspiran. En especial a Óscar por su apoyo incondicional durante esta etapa.

Al Dr. Schondube por prestarme un lugar cuando aún el laboratorio de macroecología no tenía su espacio propio. Gracias a los compañeros del laboratorio por tantas buenas pláticas y consejos: Lore, Lety, Héctor, Ian.

Al CIECO por ser un espacio en donde todos podemos exponer nuestras ideas y puntos de vista, por valorar la riqueza de la diversidad de pensamiento.

A mis compañeros de CONANP, en especial a mis colegas de cambio climático por acompañarme en esta última etapa de la Maestría y por inspirarme para trabajar incansablemente por un país menos vulnerable y más equitativo.

A todos aquellos biólogos, curadores de museos, bases de datos de colecciones científicas que con sus datos hicieron posible este análisis.

Para Carito

Gracias mi vida por tanto, por tus consejos, por creer siempre en mí aun en los momentos en los que yo no lo hice, por tu amor incondicional y por ser una luz en mi camino. Te dedico este trabajo.

Para mamá y papá

Porque con ustedes conocí el amor incondicional, por darme todo sin reservas, por su paciencia y por su ejemplo de seres humanos excepcionales.

Para Gabo

Porque eres y seguirás siendo mi mejor amigo, por querer tanto a Carito y porque si la vida lo permite te vamos a convertir en tío y si te descuidas hasta en mi compadre.

Para mis abuelos

Por su cariño y por tantas cosas que pude vivir a su lado. No saben cómo aprendí y disfruté de su compañía, sus cuentos, anécdotas y chistes. Aun los extraño.

Para mi familia grande

Gracias a Herme, Luis, Juan, Edith, Arturo y Gaby por permitirme entrar en sus vidas y porque desde hace más de una década forman parte de la mía.

Gracias a mis tíos y primos por su apoyo en todo momento y sus buenos consejos.



## INDICE

<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>i</b>
<b>AGRADECIMIENTOS A TÍTULO PERSONAL</b> .....	<b>ii</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>1</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>3</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>5</b>
<b>ANTECEDENTES</b> .....	<b>7</b>
<b>OBJETIVO</b> .....	<b>11</b>
Objetivos específicos .....	11
<b>HIPÓTESIS</b> .....	<b>12</b>
<b>METODOLOGÍA</b> .....	<b>13</b>
Área de estudio .....	13
Oaxaca y las Áreas Naturales Protegidas.....	15
Revisión de puntos de colecta .....	17
Procesamiento de capas (variables).....	17
Generación de modelos (Maxent).....	18
Matrices presencia- ausencia .....	19
Gráficas de distribución-diversidad (range-diversity plots) .....	21
Análisis estadísticos .....	22
<b>RESULTADOS</b> .....	<b>22</b>
Análisis de distribución potencial .....	22
Análisis considerando todo el estado de Oaxaca.....	26
Escenario A1B Oaxaca. ....	26
Escenario A2A Oaxaca .....	30
Escenario B2A Oaxaca.....	32
Análisis altitudinal por especie para todo el estado de Oaxaca.....	35
Rasgos de las especies y su relación con los cambios en el intervalo de distribución altitudinal potencial.....	39
Análisis considerando las Áreas Protegidas Federales de Oaxaca .....	42
Escenario A1B para el subconjunto de ANP .....	44
Escenario A2A para el subconjunto de ANP.....	47
Escenario B2A para el subconjunto de ANP .....	49
Análisis de los intervalos de distribución altitudinal por especie para el subconjunto de ANP.....	52
<b>DISCUSIÓN</b> .....	<b>54</b>
Distribución potencial y escenarios .....	54
Riqueza y altitud .....	55

Límites de distribución altitudinal .....	57
Efectos mixtos de los intervalos de distribución de las especies .....	58
Rasgos de las especies y su relación con los cambios en el intervalo de distribución altitudinal.....	59
Extinciones locales en ANP.....	60
Consideraciones a los modelos de distribución potencial.....	61
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>63</b>
<b>LITERATURA CITADA.....</b>	<b>65</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>71</b>
Anexo I. Escenarios de Cambio Climático.....	71
Caso Oaxaca.....	73
Anexo II. Especies de roedores reportadas para el Estado de Oaxaca .....	74
Anexo III. Variables bioclimáticas utilizadas para generar los modelos con el algoritmo Maxent.....	76
Anexo IV. Mapas de distribución potencial de roedores para el Estado de Oaxaca, bajo el escenario A1B 2080 de Cambio Climático.....	77

Figura 1. Representación general de los elementos que utiliza el algoritmo Maxent para construir modelos de distribución potencial de especies.....	10
Figura 2. Esquema general para la obtención y análisis de datos .....	13
Figura 3. Mapa altitudinal de Oaxaca e histograma de frecuencias de la altitud de la cuadrícula de 0.01 x 0.01° .....	15
Figura 4. Vegetación primaria y secundaria de Oaxaca y Áreas Naturales Protegidas Federales.....	16
Cuadro 1. Áreas Naturales Protegidas Federales de Oaxaca.....	16
Figura 5. Mapas de <i>Sciurus aureogaster</i> .....	23
Figura 6. Mapas potenciales de riqueza de especies de roedores para Oaxaca en el tiempo presente y para los escenarios A1B, A2A y B2A en el periodo 2080.....	24
Figura 7. Relación riqueza- altitud en un gradiente altitudinal “virtual” para todo el estado de Oaxaca para los escenarios A1B, A2A y B2A. ....	25
Cuadro 2. Indicadores para el escenario A1B considerando todo el estado de Oaxaca.....	26
Figura 8. Gráficas áreas de distribución- diversidad, distribuciones de frecuencia de la riqueza y distribuciones de frecuencia del área potencialmente ocupada por los roedores para todo el estado de Oaxaca en el escenario A1B .....	29
Cuadro 3. Indicadores para el escenario A2A considerando todo el estado de Oaxaca.....	30
Figura 9. Gráficas áreas de distribución- diversidad, distribuciones de frecuencia de la riqueza y distribuciones de la frecuencia del área potencialmente ocupada por los roedores para todo el estado de Oaxaca en el escenario A2A 2080. ....	31
Cuadro 4. Indicadores para el escenario B2A considerando todo el estado de Oaxaca.....	32
Figura 10. Gráficas de áreas de distribución- diversidad, distribuciones de frecuencia de la riqueza y distribuciones de la frecuencia del área potencialmente ocupada por los roedores para todo el estado de Oaxaca en el escenario B2A 2080 .....	33
Figura 11. Distribuciones de frecuencia del espacio altitudinal potencialmente ocupado por los roedores de Oaxaca en el presente y el periodo 2080 para los escenarios A1B; A2A y B2A. ....	34
Figura 12. Distribución de frecuencia de <i>Baiomys musculus</i> respecto a la altitud para el presente y el escenario A1B (periodo 2080). ....	35
Cuadro 5. Especies que no presentaron diferencias significativas en las distribuciones de frecuencia del espacio altitudinal potencialmente ocupado de acuerdo a las comparaciones hechas mediante la prueba de Kolmogorov- Smirnov. ....	36
Cuadro 6. Diferencias en los límites de distribución altitudinal potencial de roedores entre el tiempo presente y el periodo 2080 para los tres escenarios analizados .....	37

Cuadro 7. Rasgos ecológicos de las especies de roedores que consistentemente presentan expansiones y contracciones en sus intervalos de distribución altitudinal potencial en los tres escenarios de cambio climático. ....	40
Figura 13. Relación riqueza- altitud en un gradiente altitudinal “virtual” para el subconjunto de ANP de Oaxaca para los escenarios A1B, A2A y B2A. ....	43
Cuadro 8. Indicadores para el escenario A1B considerando el subconjunto de ANP .....	44
Figura 14. Gráficas de áreas de distribución- diversidad, distribuciones de frecuencia de la riqueza y distribuciones de la frecuencia del área potencialmente ocupada por los roedores para el subconjunto de ANP en el escenario A1B.....	46
Cuadro 9. Indicadores para el escenario A2A considerando el subconjunto de ANP .....	47
Figura 15. Gráficas de áreas de distribución- diversidad, distribuciones de frecuencia de la riqueza y distribuciones de la frecuencia del área potencialmente ocupada por los roedores para el subconjunto de ANP en el escenario A2A. ....	48
Cuadro 10. Indicadores para el escenario B2A considerando el subconjunto de ANP.....	49
Figura 16. Gráficas de áreas de distribución- diversidad, distribuciones de frecuencia de la riqueza y distribuciones de la frecuencia del área potencialmente ocupada por los roedores para el subconjunto de ANP en el escenario B2A.....	50
Figura 17. Distribuciones de frecuencia de los intervalos de distribución altitudinal potencial para los roedores del subconjunto de ANP bajo los escenarios A1B, A2A y B2A. ....	51
Cuadro 11. Diferencias en los límites potenciales de distribución altitudinal de roedores en las ANP de Oaxaca entre el tiempo presente y el periodo 2080 para los tres escenarios analizados .....	52
Figura 18. Modelo climático generalizado para gradientes altitudinales y riqueza de murciélagos .....	56
Cuadro 12. Características generales de cada familia de escenarios de cambio climático del IPCC.....	72
Cuadro 13. Temperatura promedio anual (°C) para todo el Estado de Oaxaca de acuerdo a los diferentes escenarios de cambio climático. ....	73

## RESUMEN

Dos de los principales objetivos de las Áreas Naturales Protegidas (ANP) son representatividad de la biodiversidad y su persistencia en el tiempo. En este sentido, los efectos del cambio climático (que según distintas proyecciones y evidencia empírica están afectando la distribución de varias especies) representan una extensión al problema de la persistencia. Como los gradientes de temperatura altitudinales son más pronunciados que los latitudinales, aquellos sitios con amplios gradientes elevacionales representan una opción potencialmente más viable de migración que la latitudinal para las especies afectadas por el cambio climático. Los roedores, como parte de este grupo de especies, son particularmente útiles en el estudio de los gradientes ambientales, pues tienden a formar ensambles más o menos conspicuos, convirtiéndolos en indicadores potencialmente buenos de recambio de especies a lo largo de gradientes altitudinales.

Con base en lo anterior, se analizó para el Estado de Oaxaca y sus ANP el cambio en la distribución potencial de roedores para tres escenarios de cambio climático (A1B, A2A y B2A) y en cada uno para tres periodos diferentes (2020, 2050, 2080) con énfasis en su distribución altitudinal. Esto mediante la generación de mapas de distribución potencial obtenidos a través de un algoritmo de máxima entropía (Maxent) con base en puntos de colecta y variables topográficas y climáticas, así como de vegetación.

**Oaxaca.** Los resultados mostraron una disminución consistente (en los tres escenarios) en el número de sitios con la mayor riqueza de roedores entre el presente y el periodo 2080. Altitudinalmente, hacia el 2080 las especies presentaron un desplazamiento hacia arriba del gradiente de  $10.85\text{m década}^{-1}$  para los tres escenarios. Esto coincide con estudios recientes, que basados en evidencia empírica estimaron desplazamientos promedio hacia arriba del gradiente de  $11\text{m década}^{-1}$ .

Al considerar solo el “espacio” altitudinal, se observó que mientras el pico de riqueza de especies se alcanzó en zonas de altitudes medias para el tiempo presente, este se desplazó/extendió a sitios de mayor altitud hacia el 2080.

En cuanto a los resultados por especie, hacia el 2080, diez de las 53 analizadas presentaron una extensión altitudinal en los tres escenarios, con un cambio promedio del límite superior en 333m. Solo en una especie cambió el límite inferior hacia abajo del

gradiente. Por otro lado, ocho especies presentaron consistentemente una contracción, moviendo el límite inferior de su intervalo en 510m en promedio.

**ANP de Oaxaca.** Cuatro especies no se encontraron potencialmente representadas en la actualidad ni en ninguno de los periodos de los tres escenarios. Esto sugiere que la representatividad de roedores en las ANP de Oaxaca está incompleta y que la probabilidad de que estos sitios protegidos sean “colonizados” por alguna de estas especies en el futuro es baja. Otras dos especies están potencialmente presentes pero sólo en algunos periodos y escenarios.

Altitudinalmente, seis especies extendieron su intervalo altitudinal consistentemente hacia el 2080, moviendo el límite superior en 393m en promedio; mientras que el límite inferior presentó movimientos mixtos. De las especies que redujeron su intervalo, cinco fueron consistentes hacia el 2080, moviendo el límite inferior en 442m en promedio.

Para Oaxaca y sus ANP, el escenario A1B (que tuvo la mayor diferencia en temperatura media anual entre el presente y el periodo 2080) mostró las tendencias más claras en cuanto a la disminución de la riqueza promedio por sitio, la disminución de sitios promedio ocupados por las especies, así como un aumento en la diversidad  $\beta$  y en el coeficiente de Schluter, utilizado como un indicador de la co-ocurrencia de las especies.

No se encontraron rasgos ecológicos comunes en las especies que extendieron o redujeron su intervalo altitudinal. Si bien poco más de la mitad (12) están asociadas a bosques de pino-encino y la mayoría de las que presentó extensión son de distribución amplia, no hay un patrón claro que permita sugerir la dirección de los cambios. Algunas razones para esto son que las especies podrían responder de manera independiente al cambio climático o que podrían presentar un retraso en la respuesta de su distribución respecto a un cambio en la temperatura.

Para aumentar la probabilidad de que los roedores de Oaxaca estén representados en sus ANP y permanezcan en ellas, la recomendación es proteger y conectar los gradientes altitudinales en buen estado de conservación con las ANP actuales y futuras. Esto potencialmente permitiría a algunas especies responder vía migración ante los efectos del cambio climático.

## ABSTRACT

Two of the main objectives of Protected Areas (PA) are biodiversity representation and its persistence through the time. In this sense, Climate change effects, (which according to different projections and empirical evidence, are modifying the range limits of various species) represent an extension to the persistence problem. As the elevational gradients are steeper in temperature as the longitudinal ones, sites with large elevational gradients represent potentially a more viable option for migration than latitudinal, for those species affected by climate change. Rodents, as part of this species group, are particularly useful to study environmental gradients, as they form more or less conspicuous assemblies, turning them into potentially good indicators of species changes through elevational gradients.

Based on the foregoing, we analyzed for Oaxaca and its PA, the potential change in rodent distribution for three different climate change scenarios (A1B, A2A and B2A) and for three different periods (2020, 2050 and 2080) with emphasis in elevational ranges.

**Oaxaca.** Results showed a consistent (in the three scenarios) decrease in the number of sites with maximum values of richness when comparisons were made between present time and 2080. Elevationally, considering the 2080 period, species showed an upslope shift of the average elevational range at a rate of 10.85m decade<sup>-1</sup> for the three scenarios. This result is consistent with other studies that, based on empirical evidence, showed an average upslope shift of elevational species ranges at a rate of 11m decade<sup>-1</sup>.

When we consider only the elevational space, we can observe a richness peak located in middle elevational sites. This richness peak moves/ extends consistently to higher altitudes for the 2080 period in all scenarios.

Regarding species level results, by 2080 period, ten of the 53 species analyzed, presented expansions consistently, which means an upslope shift for the superior limit of the ranges in 333m in average and in just one case there was a downslope shift for the inferior limit. In other hand, eight species presented range contractions in the three scenarios, showing an upslope shift of the inferior limit in 510m in average.

**Oaxaca's Protected Areas.** Four species are not potentially represented in present time nor in any of the scenarios and periods analyzed. This suggest that rodent richness representativeness is not complete, and that PA probabilities to serve as potential “sites for colonization” for these four species is low. Two other species are potentially represented in PA but just in some of the scenarios and periods.

Elevationally, only six species presented range extensions in the three scenarios in 2080, shifting the superior range limit in 393m in average; inferior limit presented mixed movements. From the species set that showed range contractions, five were constant through all scenarios in 2080, shifting the inferior range limit upslope 442m in average.

In both cases (Oaxaca state and the PA's subset) the A1B scenario (which shows the major differences in average annual temperature between the present and 2080 period) showed the more clear trend in richness average loss in the sites, decrease of average site occupied by a species and an increment  $\beta$  diversity and Schluter coefficient, used in this case as an indicator of the species co-occurrence.

We did not find common ecological traits in species that showed elevational range extension or contraction. More than half of the species (12) are associated with pine-oak forests and most of the species that presented extensions have larger distribution ranges, but no clear pattern were found that allow us to suggest their trend of changes. Reasons to explain this is that species could respond independently to climate change effects. Other explanations are the existence of a lag between temperature and shift range changes.

In order to increase probability that all rodent species are represented in present time and persist through time under climate change effects, recommendation is to protect and connect current and future NPA with well-conserved elevational gradients. This will allow some species to respond via migration to climate change effects.



## INTRODUCCIÓN

Actualmente existen en México 176 Áreas Naturales Protegidas (ANP) de carácter federal que abarcan más de 25 millones de hectáreas y que, junto con las ANP estatales y municipales, representan cerca del 13% del territorio de nuestro país (CONANP, 2012). No obstante, a pesar de contar con esta gran proporción de territorio protegido, la representatividad de las especies, entendida como la presencia de una o más de sus poblaciones en estos sitios, no es equitativa ni está completa. Por ejemplo, para el caso de los mamíferos, existen vacíos importantes en cuanto a especies endémicas (alrededor del 33% no están representadas) y también respecto a especies consideradas en alguna categoría de amenaza por la UICN (31% no están representadas en las ANP federales; Vázquez y Valenzuela-Galván, 2009). Espacialmente hablando, el mayor número de especies no protegidas se encuentra en la Península de Baja California, la vertiente del Pacífico, la Sierra Madre Occidental y el sur del país (Oaxaca; Vázquez y Valenzuela-Galván, 2009).

En cuanto a ecorregiones terrestres, cuya intención es representar a los diferentes ecosistemas de una región, 11 de las 96 consideradas se encuentran sin protección y 50 están subrepresentadas en el sistema de ANP (CONABIO et al., 2007). De forma similar ocurre para otros elementos como son los gradientes altitudinales. De los paisajes ubicados por debajo de los 2,600m de altitud (donde se encuentra más del 95% del territorio nacional), sólo el 10% tienen algún tipo de protección (CONABIO, 2006).

Lograr que en la red de ANP exista una alta representatividad de la diversidad biológica del país no garantiza la persistencia (permanencia de sus poblaciones en el tiempo) de las especies en el largo plazo. Factores como la dinámica natural de las poblaciones, así como las presiones inducidas por el hombre (caza furtiva, fragmentación del hábitat, ampliación de la frontera agrícola y ganadera, incendios forestales, entre otros), representan serios obstáculos para la persistencia de las especies en las ANP (Araújo et al., 2002; Araújo et al., 2004). Aunado a esto, varios estudios han demostrado que la variación del clima producto de actividades humanas que alteran la composición de la atmósfera del planeta, conocida como cambio climático (LGCC, 2012), puede afectar de manera importante y en un tiempo relativamente corto las áreas de distribución de las especies (Parmesan y Yohe, 2003; Rosenzweig et al., 2007; Chen et al., 2011).

Asimismo, investigaciones recientes basadas en evidencia empírica, sugieren que existe una relación directa entre el cambio de temperatura y el desplazamiento de las áreas de distribución de las especies, en donde los mayores desplazamientos en general coinciden con los sitios que presentaron los mayores aumentos en temperatura (Chen et al., 2011). En este sentido, el cambio climático es considerado como una extensión al problema de la persistencia, pues podría forzar a las especies a “salir” de las ANP (Araújo, *et al.*, 2004).

Si consideramos que durante los últimos 100 años (1906-2005) el aumento estimado de temperatura promedio del planeta ha sido de 0.74°C (intervalo probable de 0.56-0.92°C) y que las proyecciones para los próximos 100 años consideran que ésta puede aumentar en promedio de 1.8 a 3.4 °C (Nakicenovic y Swart, 2000; Pachaury y Reisinger, 2008, Anexo I), podría esperarse que varias especies vean afectadas sus áreas de distribución, incluso con desplazamientos mayores a los reportados hasta ahora (Chen et al. 2011; Colwell et al., 2008; La Sorte y Jetz 2010).

Como los gradientes de temperatura altitudinales son más pronunciados que los latitudinales (e.g. en los trópicos hay un decremento de 5.2 a 6.5 °C por cada km de elevación, mientras que el decremento es de 6.9 °C por 1,000 km a 45° N o S), los sitios que tienen amplios gradientes altitudinales representan una opción potencialmente más viable de migración que la latitudinal, para aquellas especies afectadas por el cambio climático (Collwell, *et al.*, 2008). Sin embargo, para las especies que tienen intervalos estrechos de distribución o un potencial de dispersión limitado, los cambios en temperatura tienen un mayor impacto; si éstos son aunados a la fragmentación del hábitat y a la interrupción de los corredores forestales pueden provocar “huecos” entre la distribución actual y la distribución potencial futura, considerando los efectos de cambio climático (Bush, *et al.*, 2008). Asimismo, las especies que se distribuyen en las tierras más altas podrían presentar situaciones de extinción, al no tener la opción de migrar altitudinalmente para encontrar climas menos cálidos (Williams *et al.*, 2007).

Estudiar los impactos potenciales que el cambio climático tendrá en las áreas de distribución altitudinal de las especies requiere hacer proyecciones de las mismas. Al respecto, los roedores son un grupo particularmente útil en el estudio de los gradientes ambientales, pues tienden a formar ensambles más o menos conspicuos como resultado

de adaptaciones, entre otros, a la elevación y la vegetación, y por factores históricos (Heaney 2001; Sánchez-Cordero 2001; Rickart, 2001). Esto los convierte en indicadores potencialmente buenos de recambio de especies a lo largo de gradientes altitudinales (Mena y Vázquez-Domínguez, 2005). En este sentido, el presente estudio se propone estimar los efectos potenciales de tres escenarios de cambio climático (Anexo I) en la distribución altitudinal de los roedores en Oaxaca y sus ANP Federales, tomando como base la teoría que actualmente se desarrolla en el laboratorio de Macroecología de la UNAM (Arita, *et al.*, 2008; 2011; Villalobos y Arita, 2010). Esta teoría se encuentra basada en el análisis de matrices de presencia-ausencia (PAM) mediante procedimientos novedosos que consideran de forma simultánea la información de las filas y las columnas (métodos Rq y Qr). La información de la distribución y riqueza de especies puede ser mostrada de forma simultánea mediante gráficas de distribución-diversidad (range-diversity plots, Arita *et al.*, 2011).

## **ANTECEDENTES**

Basados en evidencia empírica, varios estudios han analizado los efectos que el cambio climático tiene sobre la distribución de algunas especies. Los resultados, que en ocasiones muestran efectos mixtos (Rowe *et al.*, 2010), presentan en general una tendencia de cambio en las áreas de distribución hacia latitudes más cercanas a los polos y hacia mayores altitudes (Chen *et al.*, 2011; McDonald *et al.*, 2012). Un ejemplo de esto es el estudio realizado en el Parque Nacional Yosemite, E.E.U.U. (Moritz, *et al.*, 2008), que muestra una relación entre el aumento estimado de  $\sim 3^{\circ}\text{C}$  en las temperaturas mínimas mensuales durante el último siglo y cambios de aproximadamente 500m hacia arriba en los límites de la distribución altitudinal de la mitad de las especies de pequeños mamíferos que registraron en un gradiente que va de los 60msnm a los 3300msnm. Las especies de tierras bajas expandieron sus áreas de distribución, mientras que las de las tierras más altas se contrajeron, cambiando la composición de especies sobre todo en las partes altas y medias.

Otra aproximación al estudio de la relación entre el cambio climático y las áreas de distribución de las especies ha sido por medio de la generación de modelos. Éstos, en general, se construyen a partir de variables que han mostrado tener influencia en la

distribución de algunas especies como pueden ser el tipo de suelo, altitud (La Sorte y Jetz, 2010), el tipo de vegetación (Hernández et al., 2008), la pendiente y variables climáticas (Phillips et al., 2006) con los valores estimados que tendrán en cierto periodo futuro (e.g. escenarios de emisiones futuras del IPCC; anexo I). El análisis de la(s) relación(es) que tienen estas variables con los sitios en donde se ha localizado/colectado a la especie de interés (y también, cuando es posible, con los sitios en donde se sabe que está ausente), permite generar mapas potenciales de distribución y analizar los posibles cambios entre el tiempo actual y el futuro (La Sorte y Jetz, 2010) y/o comprobar la efectividad del modelo tratando de predecir la distribución presente (Hernández et al., 2008). Los resultados dependen del método o algoritmo utilizado (Elith et al., 2006; Hernández et al., 2006), de la calidad de los datos disponibles sobre la(s) especie(s) (Elith et al., 2010), y de los supuestos bajo los cuales las especies podrían dispersarse hacia las nuevas zonas disponibles (Peterson et al., 2002; La Sorte y Jetz, 2010).

Para el caso de México, se cuenta con predicciones sobre la distribución de especies vegetales (y tipos de vegetación) y animales utilizando diferentes métodos. Así, se han proyectado, por ejemplo, cambios en las especies vegetales utilizando modelos que relacionan algunas variables climáticas con los tipos de clima y zonas de vida (Villers-Ruiz y Trejo-Vázquez 1998) y que muestran, dependiendo del escenario de cambio climático considerado, que los impactos potenciales más significativos podrían suceder en la vegetación que actualmente se encuentra en las zonas templadas, la cual tenderá a reducir su área de manera importante e incluso podría llegar a desaparecer. Por otro lado, las selvas secas y similares tenderán a ocupar extensiones mayores.

Estudios más recientes han utilizado métodos que exploran diferentes relaciones entre las variables climáticas y ambientales y los datos donde se ha encontrado a la especie de interés (e.g. Algoritmos genéticos como GARP; Stockwell y Peters, 1999). Así, Peterson y colaboradores (2002) realizaron predicciones de la fauna mexicana bajo escenarios de cambio climático, encontrando que bajo el supuesto de que las especies pueden migrar sólo a sitios contiguos, la colonización de nuevos sitios se concentrará en las grandes sierras de México y las extinciones serán más probables en el desierto abierto de Chihuahua y la planicie costera del noroeste. En las áreas de distribución, de las 1870 especies analizadas, existe una tendencia creciente a que éstas se contraigan. Esto bajo modelos en los que las especies pueden dispersarse a sitios contiguos o de no

dispersión. La consecuencia será una disminución de la riqueza promedio de toda el área analizada, así como un cambio en la composición de especies. Habría un aumento en los sitios con bajo número de especies y una disminución de aquellos con la riqueza más alta.

Actualmente existe una gran variedad de métodos con los que es posible modelar la distribución potencial de las especies: algoritmos genéticos, redes neuronales artificiales, modelos lineales generalizados (MLG), modelos aditivos generalizados (MAG), árboles de regresión, máxima entropía (Maxent), entre otros (Pearson, 2007; Elith y Leathwick, 2009). Éste último es un método de propósito general para hacer predicciones o inferencias a partir de información incompleta (en este caso se refiere específicamente a la falta de información sobre “ausencias verdaderas” de las especies; Phillips *et al.*, 2006). La finalidad de Maxent es estimar una distribución de probabilidad objetivo encontrando la distribución de probabilidad de máxima entropía (la más amplia, o la más cercana a lo uniforme), sujeta a un conjunto de restricciones que representan nuestra información incompleta acerca de la distribución objetivo. La información disponible acerca de la distribución de probabilidad objetivo frecuentemente se presenta como un conjunto de variables medidas, llamadas “atributos”, y las restricciones son que el valor esperado de cada variable debe empatar con su promedio empírico (Phillips *et al.*, 2004, 2006).

Cuando Maxent se utiliza en modelos de distribución de especies, los píxeles del área de estudio son el espacio en donde la distribución de probabilidad Maxent es definida, los píxeles con presencia de la especie constituyen los puntos de muestreo y los atributos son las variables climáticas (figura 1).

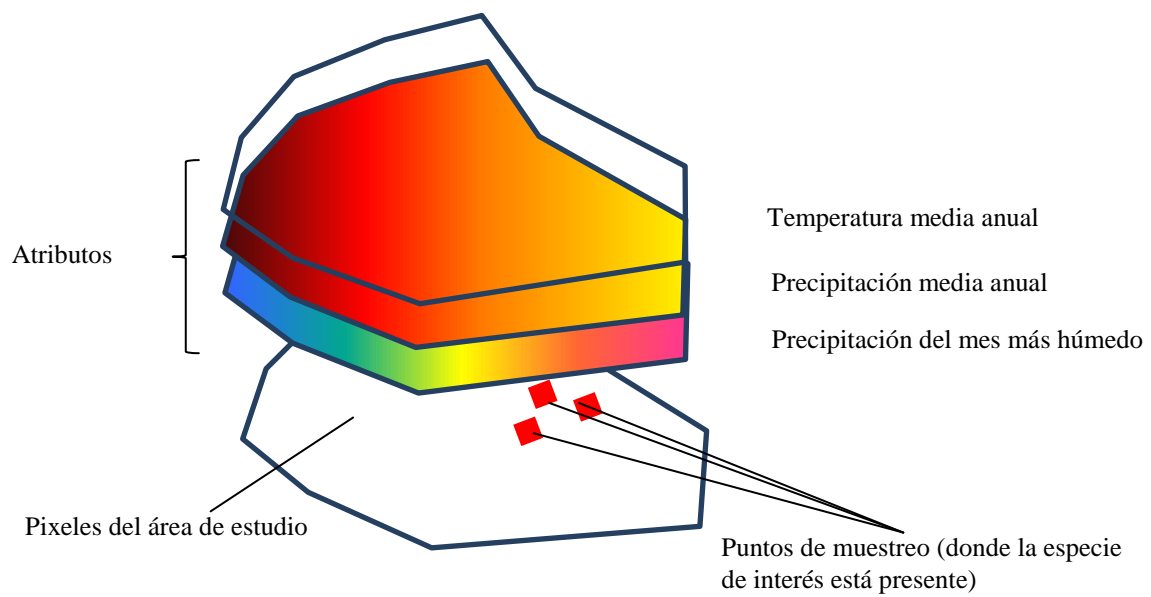


Figura 1. Representación general de los elementos que utiliza el algoritmo Maxent para construir modelos de distribución potencial de especies. La diferencia en colores de los atributos simula variación espacial en los valores de la variable que se indica. Fuente: Elaboración propia.

Varios estudios consideran a Maxent como un algoritmo que en general proporciona buenos resultados (Phillips et al., 2004), incluso cuando se dispone de pocos puntos en donde se ha localizado/colectado a la especie de interés (Pearson et al. 2007).

Con base en lo anterior, el presente estudio utiliza el algoritmo Maxent para generar los mapas potenciales de distribución altitudinal de roedores en el presente y en tres periodos futuros bajo diferentes escenarios de cambio climático, representativos de las diferentes familias (anexo I). De estos mapas, se obtendrán matrices de presencia-ausencia (PAM) para las especies de roedores reportados para Oaxaca (Sánchez-Cordero *et al.* 2001; Briones-Salas y Sánchez-Cordero, 2004).

## **OBJETIVO**

Estimar si los efectos potenciales del cambio climático producen cambios significativos en la distribución, con énfasis en el intervalo altitudinal, de las especies de roedores para el estado de Oaxaca y para el subconjunto territorial que representan las ANP federales que ahí se encuentran.

### **Objetivos específicos**

1. Obtener, mediante el algoritmo Maxent, mapas de distribución potencial de las especies de roedores reportadas para Oaxaca en tres periodos diferentes (2020, 2050, 2080) para tres escenarios de cambio climático representativos de las diferentes familias (A1B, A2A, B2A).
2. Con base en las distribuciones potenciales, describir las diferencias en riqueza y composición de especies entre los diferentes periodos y escenarios y para los sitios de elevación baja, media y alta. Esto para todo Oaxaca y el subconjunto de ANP.
3. Evaluar la representatividad y la persistencia de las especies de roedores en las ANP federales de Oaxaca, comparando los resultados de las distribuciones potenciales en tres periodos diferentes para tres escenarios de cambio climático con las obtenidas para todo el estado.

## **HIPÓTESIS**

Altitudinalmente se espera que el efecto potencial del cambio climático en las especies analizadas se vea reflejado en un cambio significativo hacia arriba del gradiente de sus intervalos de distribución altitudinal (considerando el punto medio y/o los límites), en el mismo sentido que la evidencia empírica ha mostrado en otros estudios (Moritz et al., 2008). Si ambos límites de la distribución sufren este efecto, esto se traducirá en una reducción de las áreas de distribución de las especies (Peterson et al., 2002), ya que los sitios más altos son menos frecuentes (Figura 3). Esto cambiará la composición de especies en general, por lo que también se espera un aumento en la diversidad beta.

Para el subconjunto de las áreas naturales protegidas se espera que si éstas son representativas de la riqueza de roedores presenten las mismas tendencias que el estado de Oaxaca. Esto implica una reducción de las áreas de distribución de las especies en general y un aumento hacia arriba del gradiente de los límites de los intervalos de distribución altitudinal. Adicionalmente, se espera que no se presenten extinciones potenciales a nivel local.



## METODOLOGÍA

Para poder comparar los cambios en distribución y en los intervalos altitudinales potenciales de los roedores de Oaxaca en los diferentes periodos y escenarios considerados, se llevó a cabo una serie de pasos que implicó desde la obtención de los registros de la presencia de las especies hasta la estimación de los cambios en riqueza a lo largo del gradiente altitudinal. En el proceso se obtuvieron diferentes productos, como son mapas de distribución potencial de roedores, matrices de presencia-ausencia, matrices de presencia- ausencia altitudinales, entre otros. De manera general los pasos que se siguieron se mencionan en la figura 2:

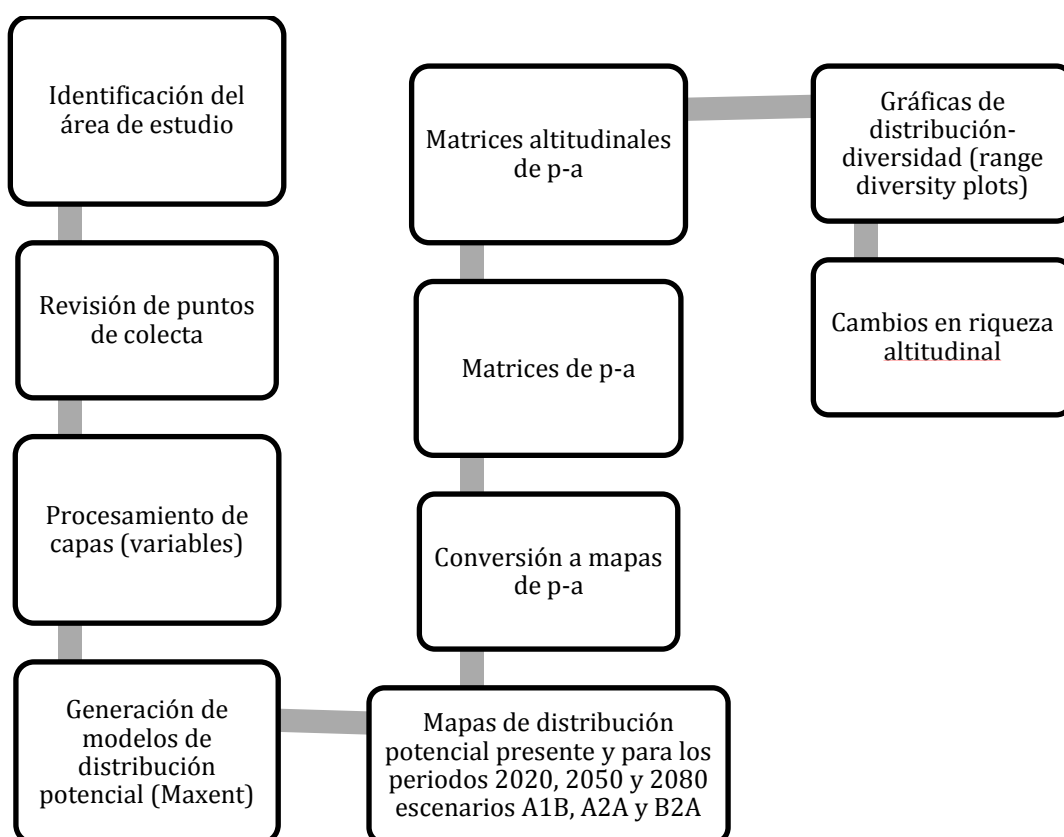


Figura 2. Esquema general para la obtención y análisis de datos

### Área de estudio

El análisis sobre los cambios potenciales en distribución altitudinal de roedores se realizó para el estado de Oaxaca, ubicado en la porción meridional de México, limitando al norte con Veracruz y Puebla, al este con Chiapas y al oeste con Guerrero. Posee una superficie de 95364 km<sup>2</sup> lo que representa el 4.8% del territorio nacional, siendo el quinto estado con mayor extensión. Es considerado uno de los estados más

biodiversos del país, con un total de 12,974 especies, de las cuales 3,112 son de vertebrados; 1,431 de invertebrados; 627 de pteridofitas; 52 de gimnospermas y 7,752 de angiospermas (García- Mendoza, *et al.*, 2004). En cuanto a la vegetación, ésta también es muy diversa, ya que se han descrito 26 tipos diferentes que van desde dunas costeras hasta bosque mesófilo de montaña (Torres Colín, 2004).

La gran diversidad del estado también se ve reflejada en sus climas, pues posee 12 tipos diferentes, que van desde los cálidos húmedos a los cálidos muy áridos y de los semifríos húmedos a los subhúmedos (Trejo, 2004). Por la posición intertropical de Oaxaca, se esperaría que tuviera una temperatura cálida. Sin embargo, el relieve aquí juega un papel fundamental. Por ejemplo, en la Sierra de Juárez se ha estimado un descenso de  $0.7^{\circ}\text{C}$  en la temperatura media anual por cada 100m de incremento en altitud (Zacarías- Eslava y del Castillo, 2010).

Si consideramos que el gradiente altitudinal aproximado de Oaxaca, de acuerdo al modelo de elevación obtenido de Worldclim ([www.worldclim.org](http://www.worldclim.org)) abarca desde los -23 a los 3661msnm (para el subconjunto de ANP el gradiente va de 0 a 2888msnm; Figura 3), esto nos ayuda a entender porque las temperaturas medias promedio de la mayor parte del estado van de los 18 a los  $26^{\circ}\text{C}$ . Para la temperatura máxima anual, la mayoría del estado presenta registros mayores a  $30^{\circ}\text{C}$ , llegando en algunas zonas a temperaturas por encima de  $45^{\circ}\text{C}$ . Por otro lado, las temperaturas mínimas, en las partes altas de las sierras, alcanzan puntos menores a los  $0^{\circ}\text{C}$ .

El relieve también tiene un efecto en cuanto a la precipitación, lo que contribuye a explicar la gran variación que se encuentra a lo largo del estado: desde los 300mm hasta más de 4500mm anuales. Esto en un gradiente que de manera muy general va de menos a más a partir centro del estado hacia los extremos. Respecto a la relación entre altitud y precipitación, se encontró, por ejemplo, que en la Sierra de Juárez la estimación es de un aumento de 35mm en la precipitación media anual por cada 100 m de incremento de altitud (Zacarías- Eslava y del Castillo, 2010).

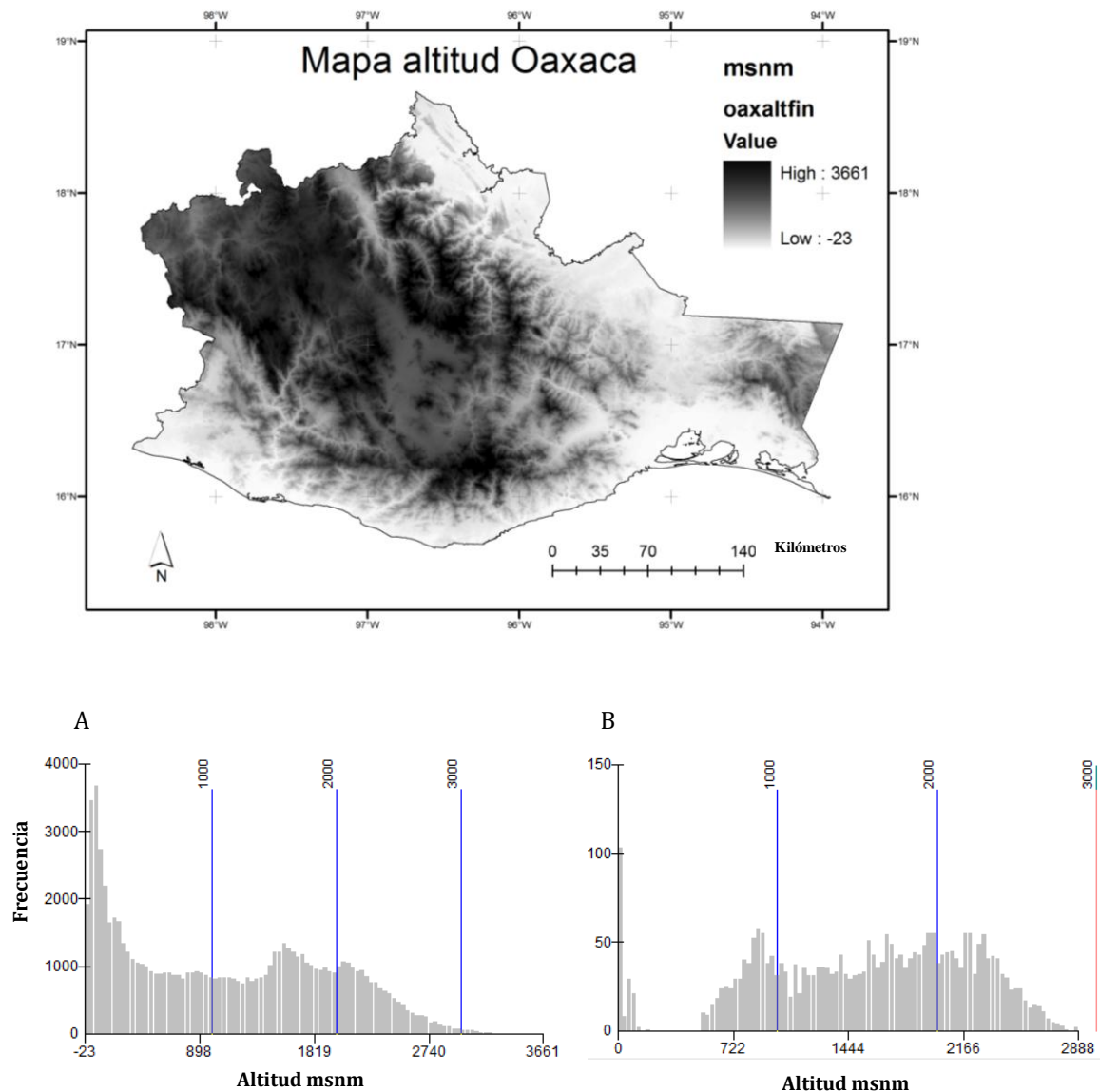


Figura 3. Mapa altitudinal de Oaxaca e histograma de frecuencias de la altitud de la cuadrícula de 0.01 x 0.01° A) histograma para el Estado de Oaxaca y B) histograma para el subconjunto formado por las ANP Tehuacán- Cuicatlán, Boquerón de Tonalá, Benito Juárez, Yagul, Lagunas de Chacahua, Playa de la Bahía de Chacahua, Playa Escobilla y Huatulco.

### Oaxaca y las Áreas Naturales Protegidas

Paradójicamente siendo Oaxaca uno de los estados más biodiversos del país, sólo un poco más del 3% de su superficie se encuentra bajo protección a través de ocho Áreas Naturales Protegidas Federales (Figura 4; Cuadro1). Paralelo a estos esfuerzos, algunas comunidades indígenas han establecido áreas de reserva comunales, como el caso de la

reserva ecológica Campesina de los Chimalapas (García- Mendoza *et al.*, 2004) y existe una reserva estatal, Hierve el Agua, la cual comprende un área de 41.29 km<sup>2</sup> (Illoldi-Rangel *et al.*, 2008).

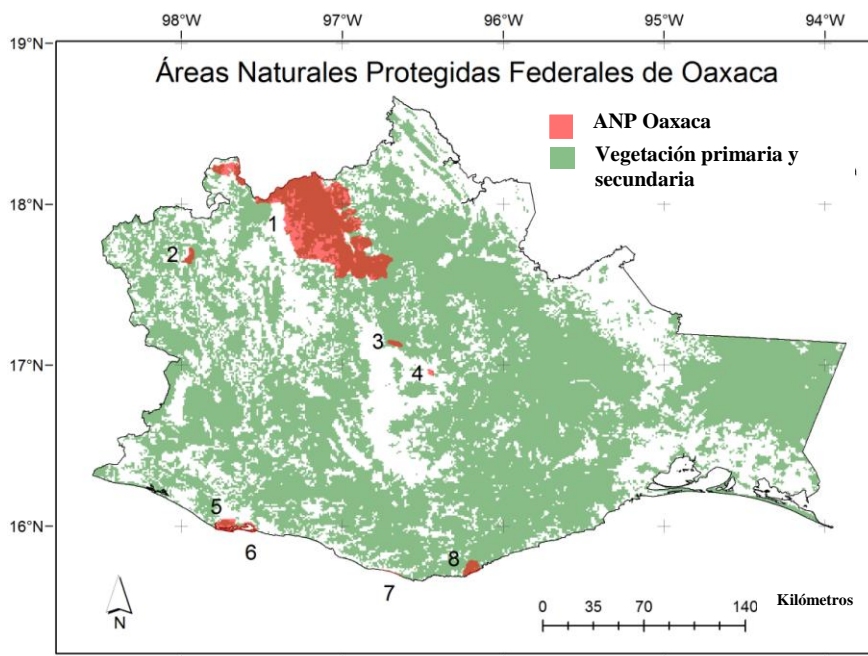


Figura 4. Vegetación primaria y secundaria de Oaxaca y Áreas Naturales Protegidas Federales (datos del mapa Uso de suelo y Vegetación Serie IV INEGI, 2010 y CONABIO, 2010). Los números dentro del mapa corresponden a las ANP señaladas en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Áreas Naturales Protegidas Federales de Oaxaca

No	Categoría	Nombre	Superficie (ha)	Año de decreto	Porcentaje aprox. de la superficie estatal
1	RB	Tehuacán- Cuicatlán <sup>1</sup>	270000	1998	2.8313
2	APFF	Boquerón de Tonalá	3912	2008	0.0410
3	PN	Benito Juárez	2737	1937	0.0287
4	MN	Yagul	1076	1999	0.0113
5	PN	Lagunas de Chacahua	14187	1937	0.1488
6	S	Playa de la Bahía de Chacahua <sup>2</sup>	92	1986/2002*	0.0010
7	S	Playa Escobilla	30	1986/2002*	0.0003
8	PN	Huatulco	11891	1998	0.1247
TOTAL					3.1870

<sup>1</sup> La superficie total es de 49,187 ha. La Reserva se encuentra entre Puebla y Oaxaca

<sup>2</sup> Dato aproximado de superficie

\* Año de recategorización

RB: Reserva de la Biosfera; PN: Parque Nacional; MN: Monumento Nacional; APFF: Área de Protección de Flora y Fauna; S: Santuario. Fuente: Elaboración propia con datos de CONANP

Dado que el porcentaje de superficie del Estado bajo protección federal está muy por debajo del nacional (~13%), la propuesta del presente proyecto va en el sentido de aportar elementos para conocer si las ANP de Oaxaca tienen el potencial para lograr la

representatividad y persistencia de las especies de roedores bajo los efectos pronosticados del cambio climático.

### **Revisión de puntos de colecta**

Para esta parte se consideró a las 56 especies de roedores reportadas para Oaxaca (Sánchez-Cordero *et al.*, 2001; Briones-Salas y Sánchez-Cordero, 2004). Cabe mencionar que siguiendo a Sánchez-Cordero (2001) consideramos también la presencia de *Oryzomys melanotis*, que es similar a *O. rostratus* y fueron consideradas la misma especie hasta que Engstrom (1984) las separó (Ceballos y Oliva, 2005). La identidad de las especies puede consultarse en el Anexo II.

Se realizó una búsqueda de puntos de colecta de los roedores en el Global Biodiversity Information Facility ([www.gbif.org](http://www.gbif.org)) y en las Colecciones Biológicas del Instituto de Biología de la UNAM, a través de la Unidad de Informática para la Biodiversidad ([unibio.unam.mx](http://unibio.unam.mx)). La información que contienen estas dos fuentes proviene de diversas colecciones nacionales y extranjeras. Posteriormente se hizo una revisión de cada uno de los puntos, proyectándolos en un mapa y excluyendo a todos aquellos cuya localización en el mapa no coincidiera con los datos de la localidad de captura que traía el punto de colecta. El número final de puntos de colecta considerado para cada especie está en el anexo II.

### **Procesamiento de capas (variables)**

Para generar los modelos de distribución potencial de las especies fueron consideradas 23 variables diferentes, todas con una resolución de  $\sim 1\text{km}^2$ . De éstas, 19 corresponden a aspectos del clima (bioclimáticas), las cuales son potencialmente útiles para definir tolerancias ecofisiológicas de las especies (Graham y Hijmans 2006; Muriene *et al.* 2009). Las otras cuatro corresponden a la altitud, pendiente, orientación y vegetación, que generalmente son consideradas también como variables de importancia para la generación de modelos de distribución potencial (Phillips *et al.* 2006; Hernández, *et al.* 2008; Kumar y Stohlgren, 2009).

Los datos de altitud, así como los de las variables bioclimáticas para el tiempo presente, fueron obtenidos a través del sitio Worldclim (<http://www.worldclim.org/>). El resto se obtuvo de la siguiente manera:

- Pendiente. Generada a partir del mapa mundial de altitud disponible en Worldclim (mediante la función “slope” del Spatial Analyst (ArcMap 9.3).
- Orientación. Mismo procedimiento que en la variable anterior pero utilizando la función “aspect” del Spatial Analyst.
- Vegetación1 (CGL2000). Las fuentes de estos datos son muy variables para cada estudio. En este caso se utilizaron los datos de The Global Land Cover for the Year 2000 (The European Commission Joint Research Centre <http://www.gvm.jrc.it/glc2000>). Este mapa utiliza 22 diferentes clases de cobertura.

La información de las variables bioclimáticas en el futuro para los tres escenarios considerados (A1B, A2A y B2A) se obtuvo del modelo CCCMA-CGCM3.1 del Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis. Los datos se descargaron a través del Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) Climate Change Downscaled Data ([http://gisweb.ciat.cgiar.org/GCMPage/download\\_sres.html](http://gisweb.ciat.cgiar.org/GCMPage/download_sres.html), recientemente cambió a <http://www.ccafs-climate.org/>), quienes tomaron como base la información de Worldclim y del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC).

### **Generación de modelos (Maxent)**

Todos los modelos de distribución potencial de especies fueron generados con el programa Maxent versión 3.3.3a (<http://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent/>).

Para tener una medida del poder predictivo del modelo, el programa utiliza datos de presencia de las especies que no hayan sido empleados para la construcción del mismo (test points). Lo ideal es que los “test points” sean independientes de los que se utilizan para la construcción del modelo (training points), e incluso que sean colectados después de haberlo generado (Pearson et al., 2007). Sin embargo, este tipo de datos rara vez están disponibles, por lo que en la práctica lo que se hace es dividir desde un inicio los

datos disponibles en dos grupos (Araújo, 2005; Hernández et al., 2008). En nuestro caso, para la construcción de cada modelo se consideró la selección al azar de 75% de los puntos de colecta y de un 25% para prueba (Hernández *et al.* 2008). Los modelos de cada especie fueron replicados 10 veces (con 1000 iteraciones cada una), utilizando para los análisis el promedio de estas 10 réplicas.

El resultado de estos modelos son mapas que muestran, en términos de una probabilidad continua, la distribución geográfica potencial de la especie. Para convertir esto en un mapa binario de presencia- ausencia es necesario definir un umbral. Existe una gran variedad de criterios al respecto, así como críticas y comparaciones sobre su desempeño (Liu et al., 2005; Pearson, 2007). Probablemente en lo que la mayoría de los autores está de acuerdo es en que los criterios subjetivos (como determinar el umbral *a priori*, comúnmente en 0.5) son los que tienen el desempeño más pobre (Liu et al., 2005).

En nuestro caso utilizamos el que maximiza la suma de la sensibilidad + especificidad, el cual es un método objetivo que ha mostrado su efectividad en comparación con otros métodos de determinación del umbral para la predicción de presencia- ausencia (Liu et al., 2005). La sensibilidad es la proporción de los sitios en los que el modelo predice presencia de la especie y que efectivamente tienen registro de presencia. La especificidad se refiere a la proporción de sitios donde se predice ausencia de la especie y que realmente está ausente. Como estamos trabajando con datos de presencia solamente, esto se traduce en la proporción de sitios del total que presenta condiciones favorables para la especie. De esta manera, el desempeño general del modelo no se mide por qué tan bien puede distinguir las presencias de las ausencias, sino por su predicción de las presencias comparadas con un modelo completamente aleatorio (Phillips, 2006).

### **Matrices presencia- ausencia**

Se construyó una malla para conformar las matrices de presencia-ausencia. Para ello se dividió al Estado de Oaxaca en cuadrantes de  $0.01 \times 0.01^\circ$  ( $\sim 1\text{km}^2$ ) en la escala de longitud x latitud, obteniéndose una malla de 78782 cuadros. Antes de construir las matrices se realizó un post procesamiento de los cuadrantes realmente disponibles de la

mallas, el cual consistió en excluir del análisis aquellas áreas de las que no se tuvieran datos de altitud (338 cuadros) y que no tuvieran vegetación primaria o secundaria de acuerdo al mapa de Uso de Suelo y Vegetación serie IV (26,868 cuadros; INEGI, 2010). El resultado fue una malla de 51,576 cuadros.

Lo anterior se debe a que se consideró, al igual que Illoldi-Rangel y colaboradores (2008), que los hábitats transformados en agroecosistemas así como en asentamientos rurales y urbanos en general no son capaces de mantener poblaciones sin la inmigración de los hábitats naturales adyacentes. En este sentido, el algoritmo Maxent también asume que las localidades en donde se reporta la presencia de la especie pertenecen a hábitats “fuente” y no a “sumideros”, en donde una población sólo puede permanecer por inmigración (Phillips *et al.*, 2006).

Por otro lado, se ha demostrado que en zonas donde el paisaje ha sido severamente modificado por la actividad humana, los mamíferos pequeños no muestran un cambio sistemático de sus áreas de distribución que concuerde con lo que se predice si se considera solamente a los efectos del cambio climático (Rowe, *et al.*, 2011), teniendo al final un efecto que confunde estos factores.

Se realizaron dos tipos de análisis sobre las PAM. Uno que comprende a todo el estado de Oaxaca y el segundo a un subconjunto que considera a 6 de las 8 Áreas Naturales Protegidas de carácter Federal que tiene el Estado. Las dos ANP que fueron excluidas son las Playas de la Bahía de Chacahua y Escobilla, pues poseen un área menor a uno de los cuadrantes de  $0.01 \times 0.01^\circ$  (Cuadro 1). En cada caso se analizaron cambios en las áreas de distribución potencial de las especies. El componente altitudinal fue utilizado para conocer al detalle la composición de estas áreas de distribución potencial.

En el primer grupo de matrices, que nombraremos “latlong”, N es el número de cuadrantes de la malla de  $0.01 \times 0.01^\circ$  escala longitud x latitud mencionada anteriormente (en este caso  $N= 51576$ ) en donde se registra la presencia (1) o ausencia (0) de cada una de las especies. A partir de esta matriz se generaron tanto las gráficas de área de distribución- diversidad como las distribuciones de frecuencia de la riqueza y también las distribuciones de frecuencia de las áreas de distribución.



Para el segundo grupo de matrices, que nombraremos “altitudinal”, se dividió el intervalo altitudinal de Oaxaca (-23 a 3661msnm de acuerdo al Modelo Digital de elevación del sitio Worldclim) en pisos de 10m, registrando las presencias y ausencias (N= 368). Este es un espacio virtual, en donde las especies que coinciden en el mismo piso altitudinal no necesariamente lo hacen en el mismo espacio geográfico. El propósito es analizar de manera detallada los cambios en la composición altitudinal de las áreas de distribución de las especies en los diferentes escenarios de cambio climático.

Por último, a partir de estos dos grupos de matrices, se seleccionaron los subconjuntos que corresponden a los cuadrantes que coincidieron con una de las 6 Áreas Naturales Protegidas consideradas (N= 2,232; Cuadro 1).

### **Gráficas de distribución-diversidad (range-diversity plots)**

Es a partir de las PAM  $\Delta$  especies x sitio que se construyen este tipo de gráficas (Arita et al., 2008, 2011) en donde S representa el número total de especies y N los sitios. Las especies se encuentran en las filas y los sitios en las columnas y cada elemento de la matriz es  $\delta(i,j)= 1$  si la especie  $i$  está presente en el sitio  $j$ , y  $\delta(i,j)= 0$  cuando no es así. La suma de los elementos en una fila arroja como resultado el número de sitios en los que una especie en particular está presente (el área de distribución  $n_i$ ), y la suma de una columna equivale al número de especies presentes en un sitio determinado (la riqueza  $s_j$ ).

A partir de lo anterior se realizaron los siguientes cálculos:

$\bar{s}$ = Se refiere al número de especies promedio que se encuentran en todos los sitios

$$\sum_{j=1}^N s_j / N$$

$\bar{n}$ = Número de sitios (cuadros de 0.01 x 0.01°) que en promedio ocupan todas las especies

$$\sum_{i=1}^S n_i / S$$

$\beta$ = índice de diversidad de Whittaker (1960). Es el factor que relaciona la riqueza total con la riqueza promedio de cada sitio  $\beta= S/\bar{s}$ .

Estos cálculos, junto con la gráfica de distribución-diversidad ayudarán a identificar tendencias para describir las diferencias en riqueza y composición de especies entre los diferentes periodos y escenarios.

### **Análisis estadísticos**

Se utilizaron correlaciones de Pearson para conocer cómo se relacionaba la riqueza con la altitud y si esta relación cambiaba entre los diferentes periodos y escenarios, sugiriendo que existen otros factores además de la altitud que pueden explicar esos cambios.

Posteriormente se empleó una prueba de t para evaluar si los cambios en la distribución altitudinal promedio de las especies eran significativamente diferente de cero o bien difería del valor estándar de un desplazamiento de 11m década<sup>-1</sup> hacia arriba del gradiente calculado por Chen et al. (2011).

Se utilizaron pruebas de Kolmogorov- Smirnov para evaluar si existían diferencias entre las distribuciones de frecuencia de la riqueza de las especies entre los diferentes periodos considerados para cada escenario. Esto para analizar si los cambios en las áreas de distribución son significativos.

## **RESULTADOS**

### **Análisis de distribución potencial**

Se obtuvieron mapas de distribución potencial para 53 de las 56 especies de roedores registradas en Oaxaca (Briones-Salas y Sánchez-Cordero, 2004), ya que para tres de las especies no se encontraron puntos de colecta en las colecciones y periodos consultados (Anexo II). En total se obtuvieron 10 mapas de distribuciones potenciales para cada especie, correspondientes al tiempo presente y a los tres diferentes periodos (2020; 2050; 2080) considerados para cada uno de los tres escenarios analizados (A1B; A2A; B2A; figura 5).

La variable que representó el mayor poder explicativo de los modelos para 25 de las 53 especies fue la “BIO4”, la cual se refiere a la estacionalidad de temperatura (ver Anexo III para el detalle de qué mide cada variable bioclimática).

A partir de estos mapas de distribución potencial se obtuvieron mapas de presencia-ausencia considerando: a) el umbral que maximiza la suma de la sensibilidad + especificidad y b) excluyendo a todas aquellas áreas de presencia que no contaran con vegetación primaria o secundaria (según mapa de Vegetación y Uso del Suelo Serie IV INEGI, 2010). El conjunto de mapas de las 53 especies permitió la generación de mapas de riqueza de roedores para todo el estado de Oaxaca (e.g. Figura 6).

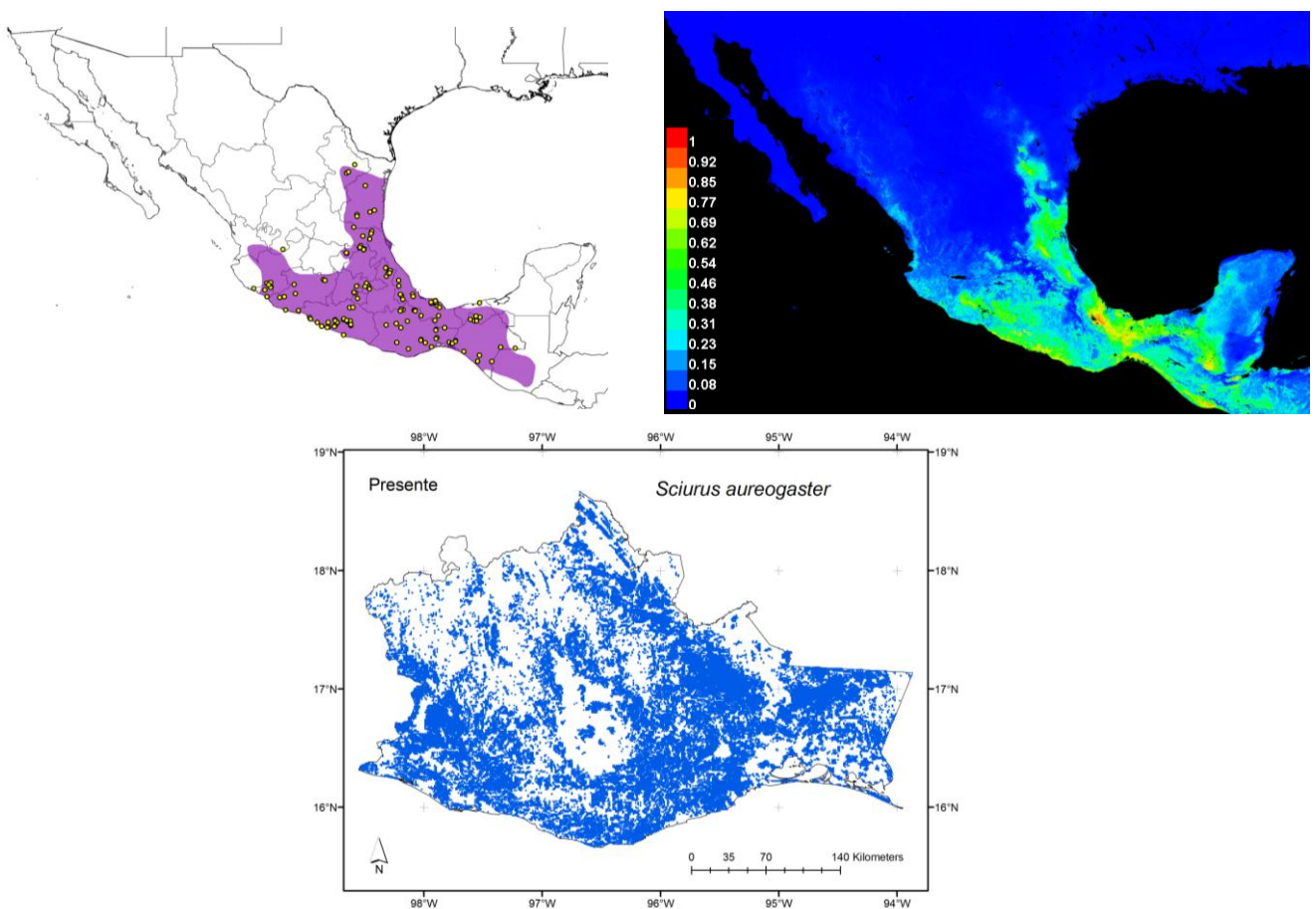


Figura 5. Mapas de *Sciurus aureogaster*: A) Distribución de acuerdo a NatureServe ([www.natureserve.org](http://www.natureserve.org); Patterson et al., 2007) y puntos de colecta considerados para los análisis con el algoritmo Maxent; B) Distribución potencial presente (promedio de 10 iteraciones). La barra de colores indica la probabilidad de presencia de la especie calculada por el modelo; C) Distribución potencial de la especie para Oaxaca: umbral definido por la maximización de la suma sensibilidad + especificidad, excluyendo los sitios que no contaran con vegetación primaria y secundaria.

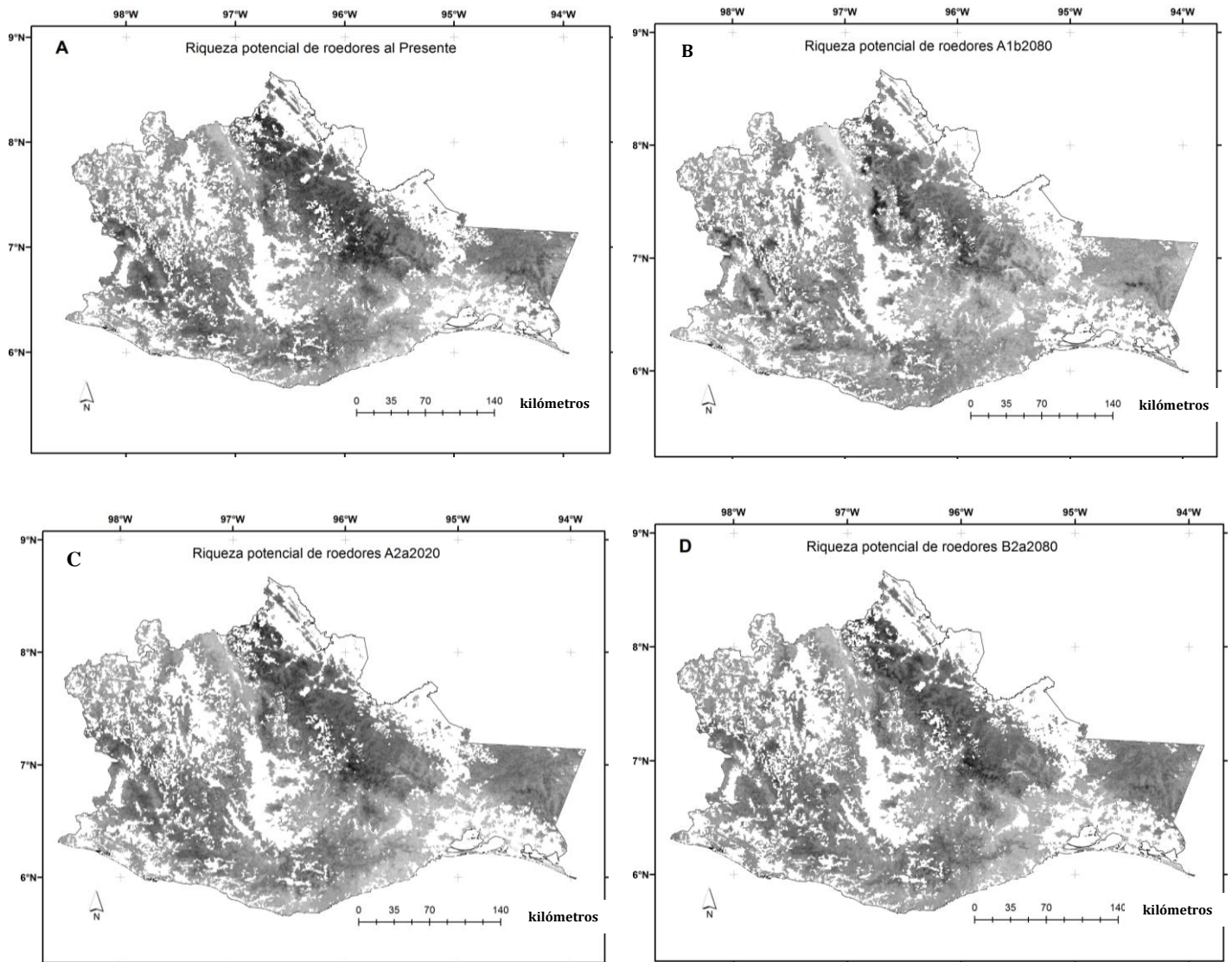


Figura 6. Mapas potenciales de riqueza de especies de roedores para Oaxaca en el tiempo presente (A) y para los escenarios A1B (B), A2A (C) y B2A (D) en el periodo 2080. El gradiente muestra las diferencias en riqueza, siendo los sitios más claros los que presentan el menor número de especies y los más oscuros los de mayor riqueza.

En general, los mapas muestran cómo la superficie de Oaxaca con mayor riqueza potencial de roedores disminuye en los tres escenarios hacia el 2080, aparentemente concentrándose en zonas más altas. Al analizar estos valores de riqueza en un gradiente “virtual altitudinal”, considerando sólo la altitud a la que se distribuyen las especies sin importar si estas comparten el mismo espacio en términos de latitud- longitud, la tendencia es que un mayor número de especies con respecto al presente se mueva o se extienda hacia zonas más altas (Figura 7).

El valor de la correlación (Pearson) entre la altitud y la riqueza en este espacio virtual que considera a todo el estado de Oaxaca (Figura 7), disminuye hacia el 2080.

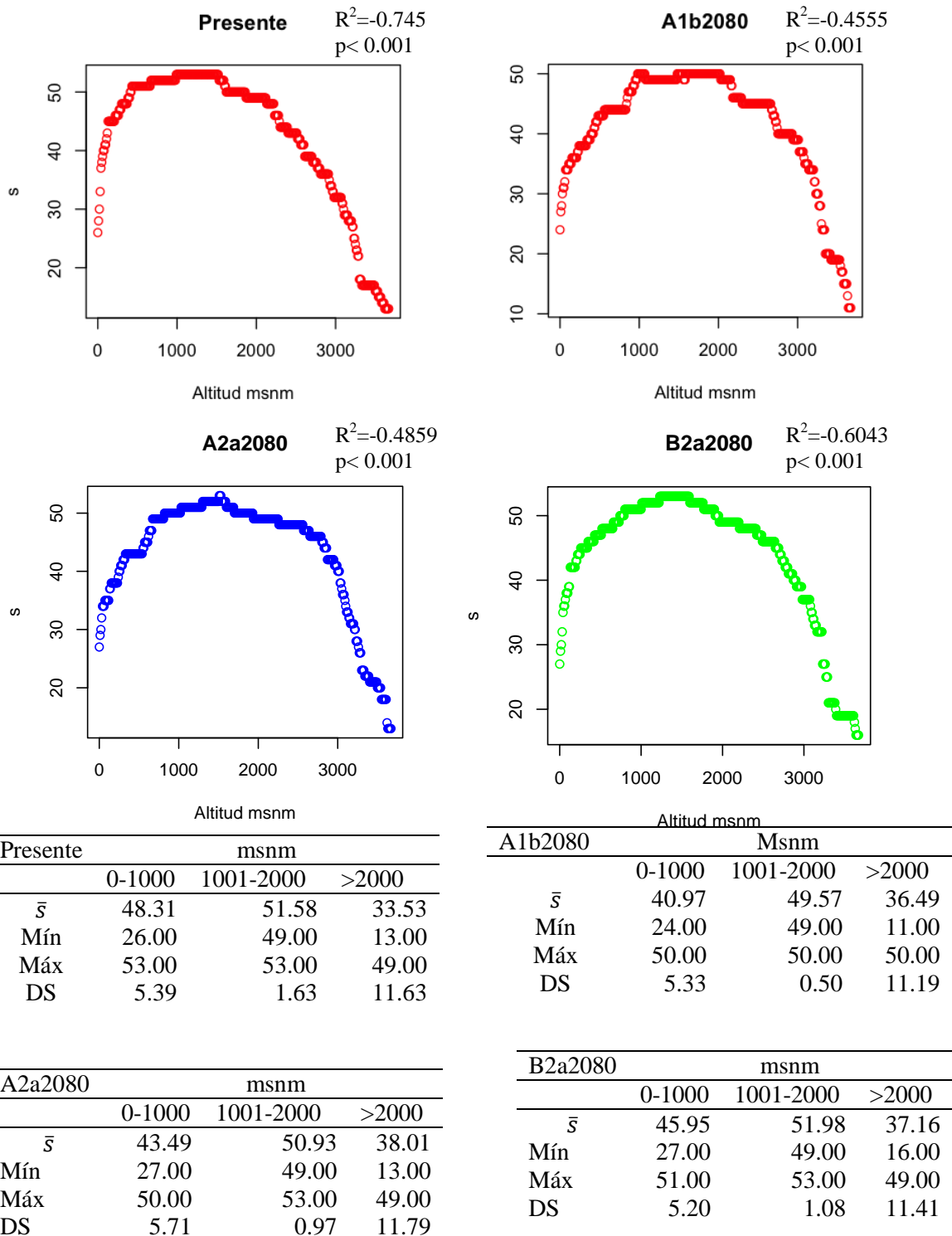


Figura 7. Relación riqueza- altitud en un gradiente altitudinal “virtual” para todo el estado de Oaxaca para los escenarios A1B, A2A y B2A.

## Análisis considerando todo el estado de Oaxaca

### Escenario A1B Oaxaca.

Al comparar la distribución de frecuencias de la riqueza del “presente” con las de los demás periodos encontramos que el número de sitios con la riqueza más alta (>20) disminuye. En general, la distribución de frecuencias de la riqueza muestra un desplazamiento de la moda hacia la izquierda, mientras que la forma de la distribución se va haciendo leptocúrtica conforme avanzamos hacia el periodo 2080.

Una prueba de Kolmogorov- Smirnov mostró que existen diferencias significativas entre la distribución de la frecuencia de la riqueza en los años analizados ( $p < 0.01$  para todas las comparaciones entre presente, A1B2020, A1B2050 y A1B2080)

Los histogramas de la frecuencia del área de distribución potencial de las especies, en donde en el eje  $x$  se muestra el número de cuadros de la gradilla “latlong”  $0.01 \times 0.01^\circ$  que una especie puede ocupar y en el eje  $y$  el número de especies, también muestran que hay una tendencia de las especies a reducir su área de distribución (Figura 8 c).

En cuanto a las gráficas de áreas de distribución- diversidad, los puntos para la mayoría de las especies se encuentran a la derecha de la línea punteada, lo que representa que su covarianza promedio es  $>0$ .

Cuadro 2. Indicadores para el escenario A1B considerando todo el estado de Oaxaca.

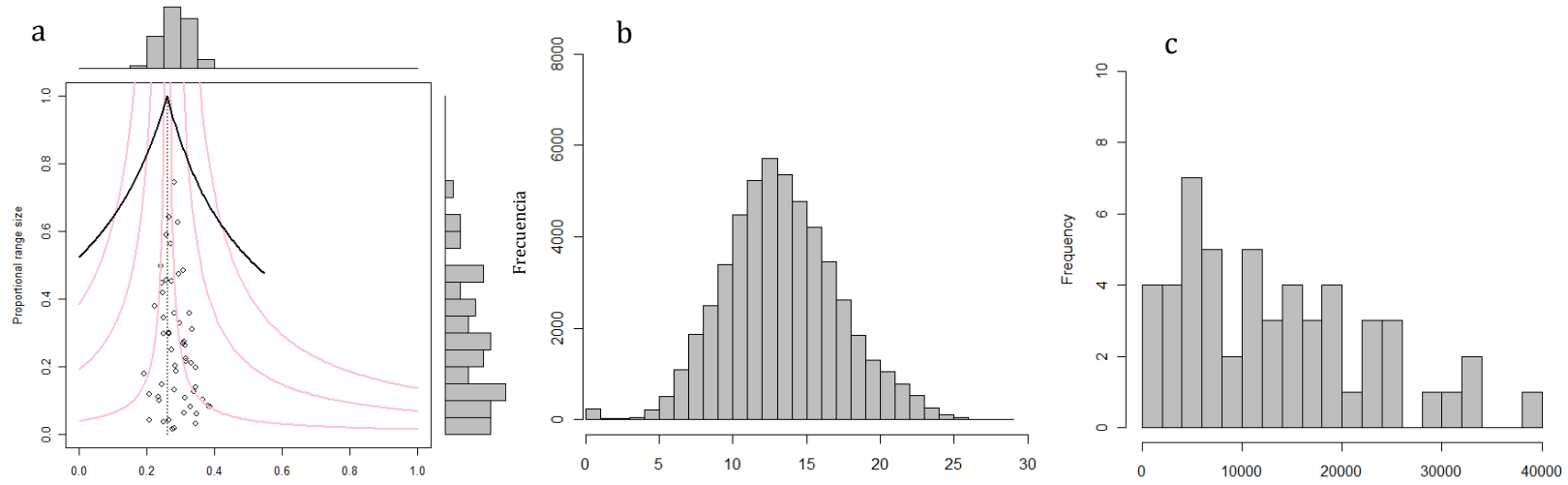
Escenario	$\bar{s}$	$\bar{n}$	B	$\beta$ altitudinal	Schluter $V_{sp}$
Presente	13.79812	13463.06	3.841104	1.249249	1.811145
A1b2020	12.83217	12520.57	4.130245	1.256796	1.758217
A1b2050	11.78294	11496.81	4.49803	1.274321	1.60101
A1b2080	10.9765	10709.96	4.828495	1.286391	1.461785

$\bar{s}$  = riqueza promedio para cada cuadro de  $0.01 \times 0.01^\circ$ ;  
 $\bar{n}$ = número de cuadros en promedio que ocupan las especies;  $\beta$ = diversidad beta;  $\beta$  altitudinal= diversidad beta considerando las diferencias entre los cuadros pertenecientes a distintos pisos altitudinales; Schluter  $V_{sp}$ = coeficiente de Schluter considerado como un indicador de la co-ocurrencia (covarianza) de las especies.

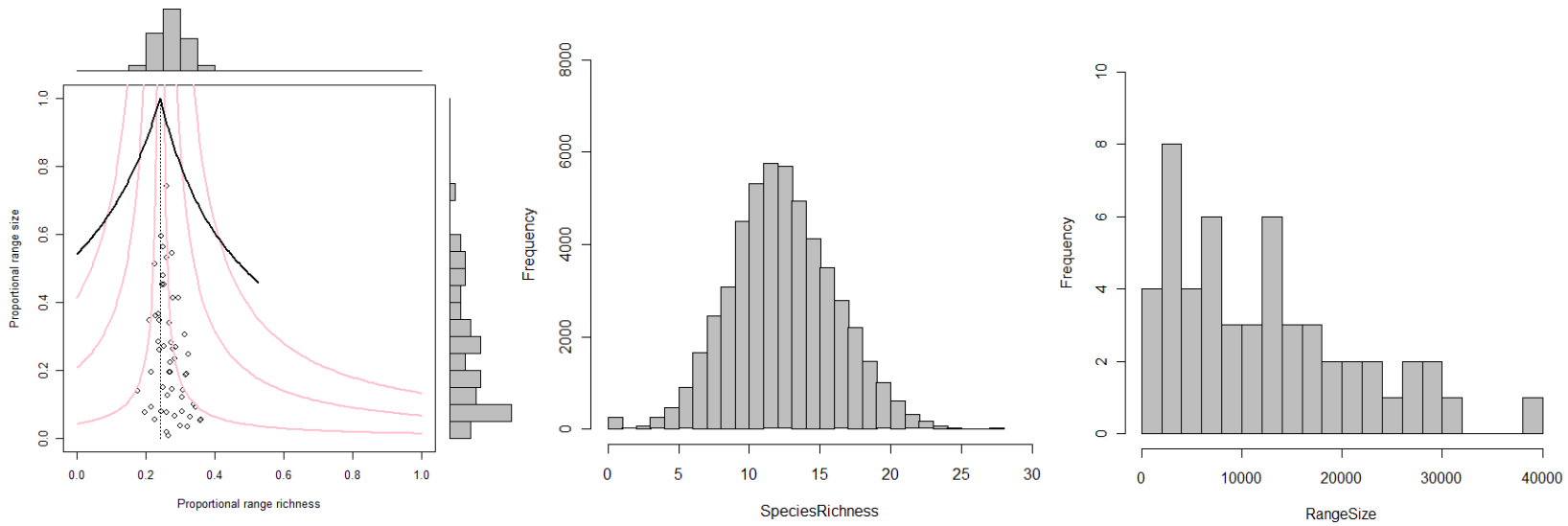
**Altitud.** Al comparar los espacios altitudinales potencialmente ocupados de las especies en el presente con el periodo 2080, el número de éstas con distribución altitudinal restringida (1000-2000m) aumenta de 4 a 6 y también existen especies que ocupan categorías nuevas de distribuciones restringidas en los intervalos por debajo de los 1500m. En cambio, las especies de distribución media (2001- 3000m) disminuyen (de 20 a 18 especies) y las de distribución amplia (>3000m) se mantienen sin cambios. Las pruebas de Kolmogorov- Smirnov no muestran diferencias significativas entre las distribuciones de frecuencia de los espacios altitudinales potenciales de las especies cuando se comparó el tiempo presente con los distintos periodos analizados.

Al comparar los cambios en los espacios altitudinales potenciales de las especies, encontramos que para el 2080 en promedio los roedores presentan un desplazamiento potencial hacia arriba del gradiente a una tasa de  $14.37\text{m década}^{-1}$ . Esto es significativamente diferente de cero ( $N=53$  especies;  $t = -2.183$ ,  $gl= 52$ ,  $p < 0.05$ ) y coincide con el valor de referencia considerado de  $11\text{m década}^{-1}$  (Chen et al., 2011;  $t = -0.5116$ ,  $gl = 52$ ,  $p= 0.6111$ ).

Presente

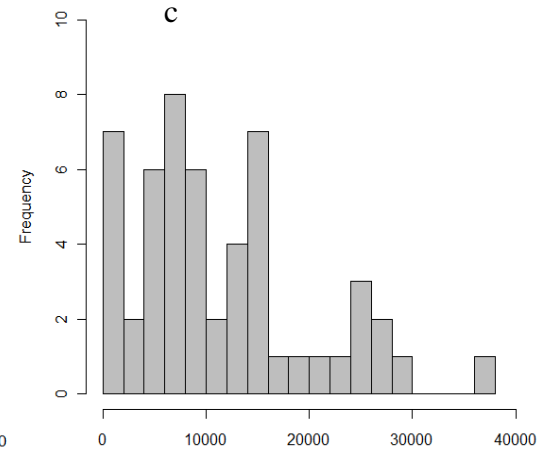
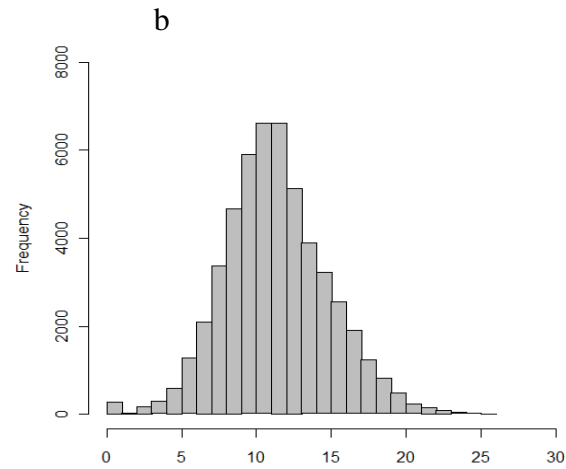
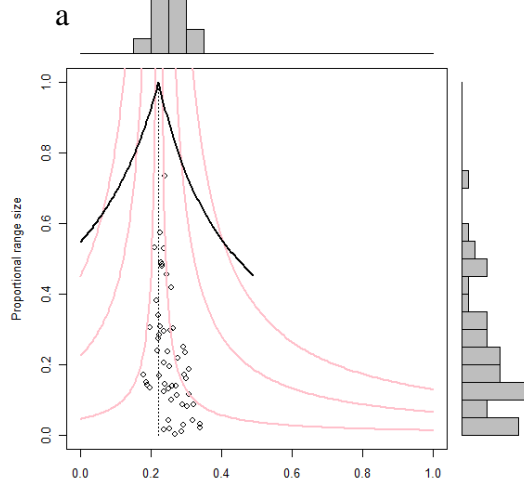


A1B2020





A1B2050



A1B2080

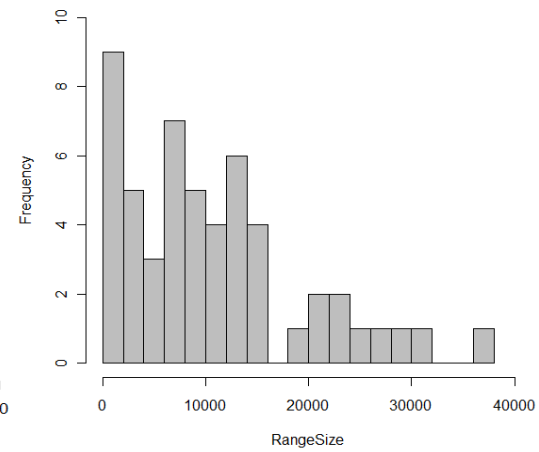
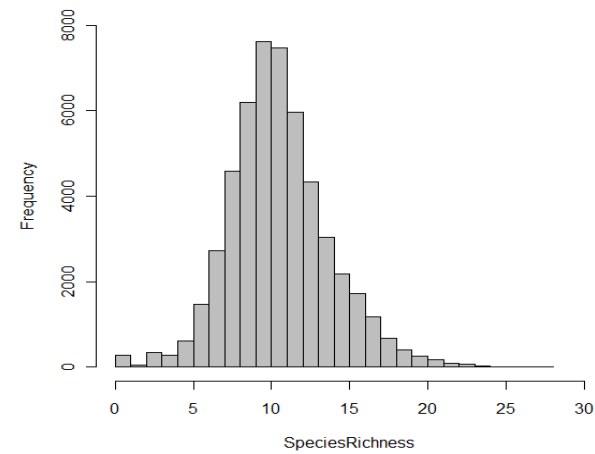
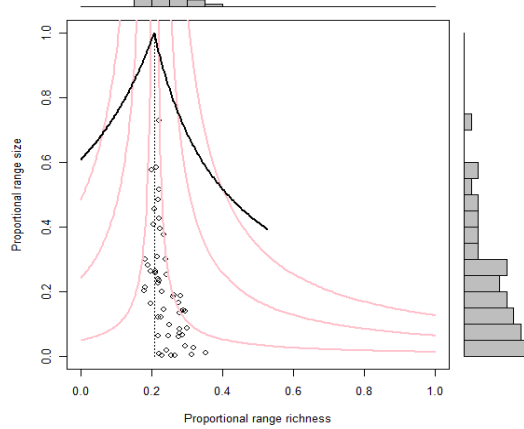


Figura 8. Gráficas áreas de distribución- diversidad (a), distribuciones de frecuencia de la riqueza (b) y distribuciones de frecuencia del área potencialmente ocupada por los roedores (c) para todo el estado de Oaxaca en el escenario A1B

## Escenario A2A Oaxaca

En este escenario, la distribución de frecuencias de la riqueza presenta un desplazamiento de la moda a la izquierda sólo para el periodo 2050. En cuanto a las áreas de distribución potencial, en las gráficas de distribución de frecuencias se observa que la categoría más amplia (especies que potencialmente se pueden encontrar en 38,000 a 40,000 cuadros) ya no es ocupada por ninguna especie hacia el 2080. Asimismo, la categoría más pequeña (la que va de 0 a 200 de los cuadros) es la que presenta la frecuencia más alta (8 especies). Las pruebas de Kolmogorov- Smirnov no muestran diferencias significativas.

Los valores de la riqueza promedio ( $\bar{s}$ ) y del área de distribución promedio ( $\bar{n}$ ) si bien son menores en el 2080 vs el presente, no presentan una tendencia clara (Cuadro 3).

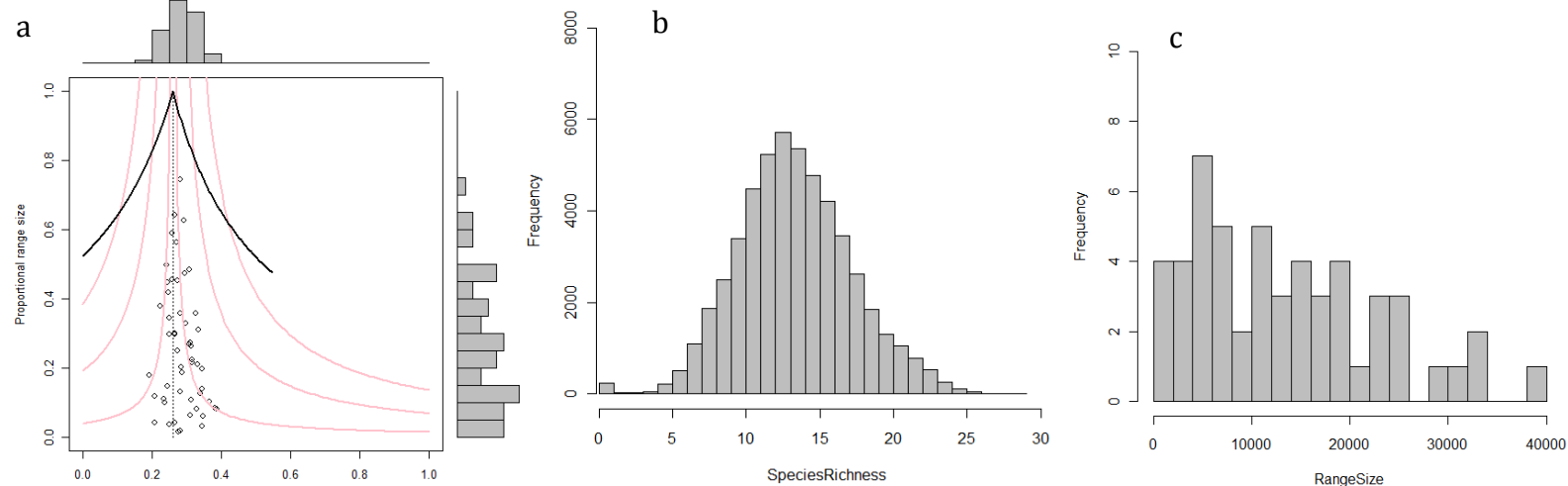
Cuadro 3. Indicadores para el escenario A2A considerando todo el estado de Oaxaca

Escenario	$\bar{s}$	$\bar{n}$	$\beta$	$\beta$ altitudinal	Schluter $V_{sp}$
Presente	13.79812	13463.06	3.841104	1.249249	1.8111
A2a2020	13.74138	13407.7	3.856963	1.232092	1.753448
A2a2050	12.30317	12004.42	4.307832	1.266891	1.406716
A2a2080	13.41001	13084.38	3.952271	1.233802	1.527764

**Altitud.** Al comparar el tiempo presente vs. 2080 encontramos que el número de especies de distribución potencial restringida aumenta de 4 a 5. Los mayores cambios se presentan en las especies de distribución media y amplia, ya que en los primeros hay una disminución de 20 a 13 mientras que en los últimos aumenta de 20 hasta 35 especies (Figura 10).

Al comparar los cambios en la distribución altitudinal de las especies, encontramos que para el 2080 en promedio los roedores presentan un desplazamiento potencial hacia arriba del gradiente a una tasa de 11.32m década<sup>-1</sup>. Esto es significativamente diferente de cero (N=53 especies;  $t = -2.8728$ ;  $gl = 52$ ;  $p < 0.01$ ) y coincide con el valor de referencia ( $t = -0.082$ ;  $gl = 52$ ;  $p = 0.935$ ).

## Presente



## A2A2080

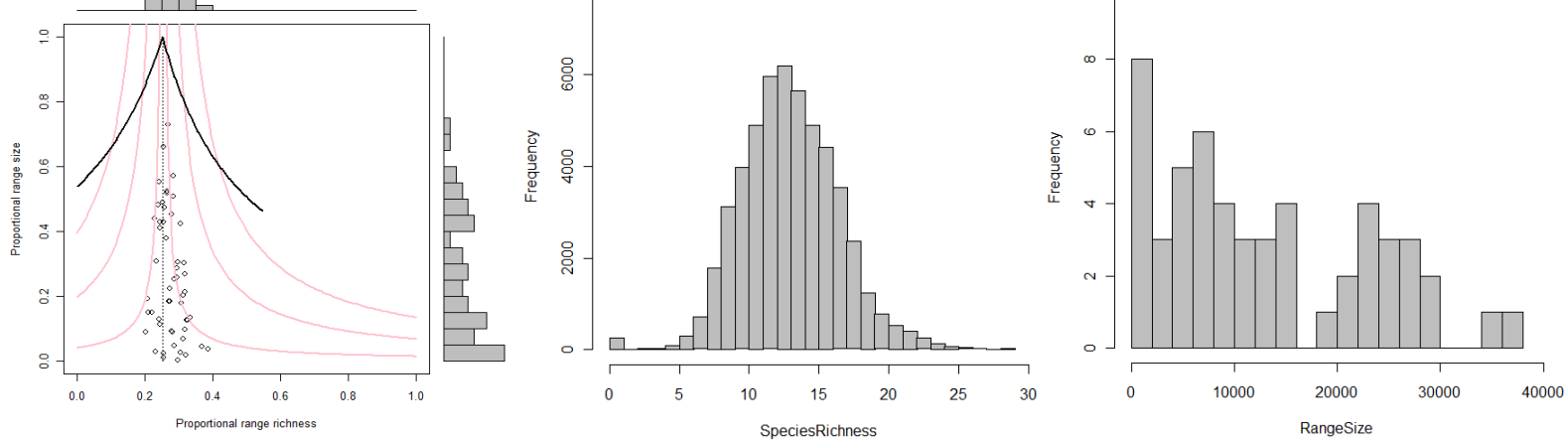


Figura 9. Gráficas áreas de distribución- diversidad (a), distribuciones de frecuencia de la riqueza (b) y distribuciones de la frecuencia del área potencialmente ocupada por los roedores (c) para todo el estado de Oaxaca en el escenario A2A 2080.

## Escenario B2A Oaxaca

Al igual que en los escenarios A2A, los valores de la riqueza promedio ( $\bar{s}$ ) y del área de distribución promedio ( $\bar{n}$ ) no presentan una tendencia clara. Descienden hacia el 2050 pero después repuntan en el 2080.

Cuadro 4. Indicadores para el escenario B2A considerando todo el estado de Oaxaca

Escenario	$\bar{s}$	$\bar{n}$	$\beta$	$\beta$ altitudinal	Schluter $V_{sp}$
Presente	13.79812	13463.06	3.841104	1.249249	1.8111
B2a2020	13.36242	13037.94	3.966346	1.240061	1.805771
B2a2050	13.31903	12995.6	3.979269	1.242977	1.47284
B2a2080	13.88993	13552.64	3.815714	1.217291	1.552861

**Altitud.** El número de especies con un intervalo de distribución altitudinal restringido aumenta hacia el 2080 al igual que con las especies con intervalos amplios (en ambos casos de 4 a 5 especies). El número de especies con intervalos medios disminuye hacia el 2080 (de 20 a 18). Las pruebas de Kolmogorov- Smirnov no resultaron significativas

En cuanto al desplazamiento promedio de los intervalos de distribución de las especies, éste presentó un cambio promedio hacia arriba del gradiente de  $6.85 \text{ m década}^{-1}$ . Esto es significativamente diferente de cero ( $t = -2.4484$ ;  $gl = 52$ ;  $p < 0.05$ ) y no es significativamente diferente de la referencia de  $11 \text{ m década}^{-1}$  ( $t = 1.4818$ ;  $gl = 52$ ;  $p = 0.1444$ ).

Presente

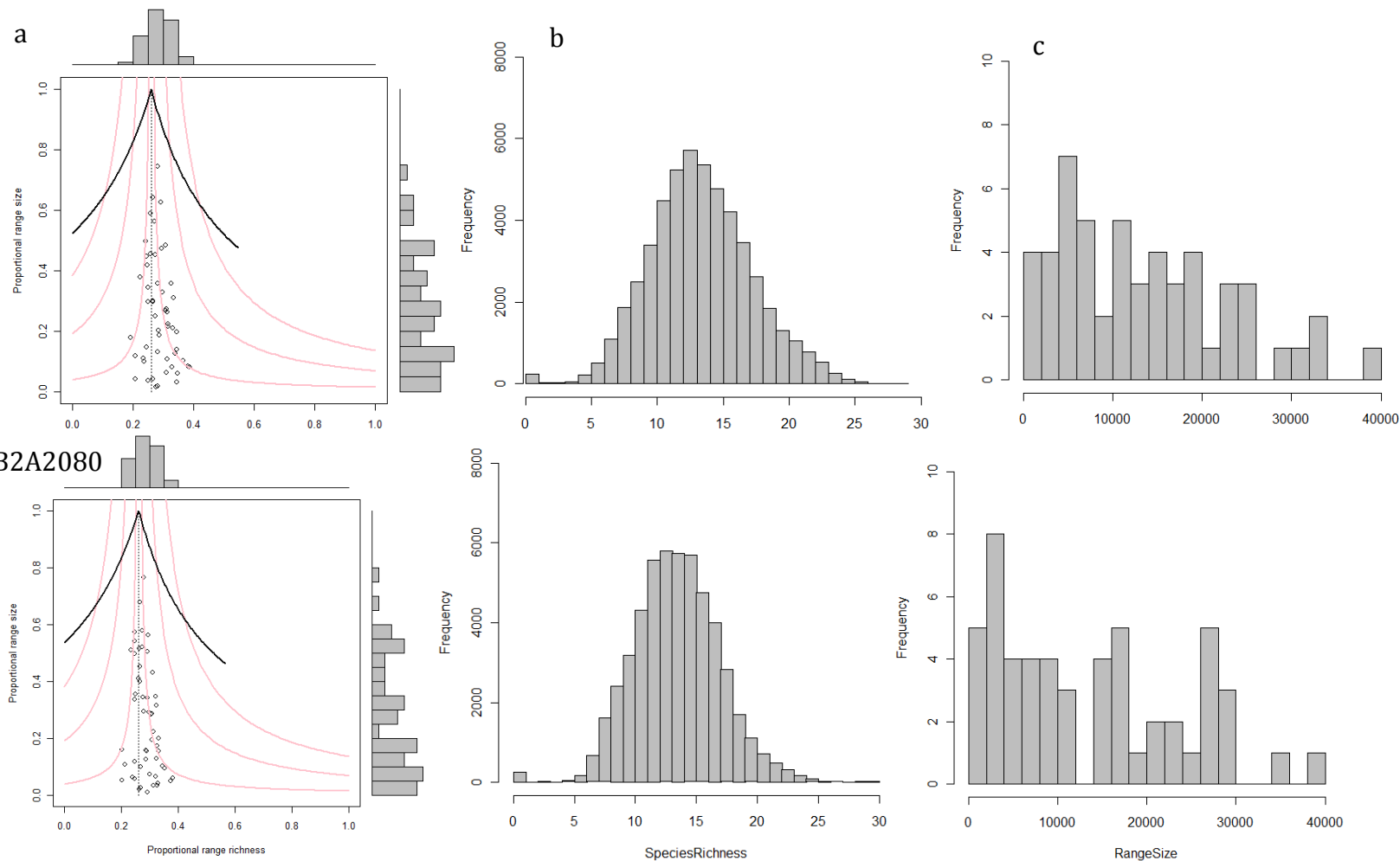


Figura 10. Gráficas de áreas de distribución- diversidad (a), distribuciones de frecuencia de la riqueza (b) y distribuciones de la frecuencia del área potencialmente ocupada por los roedores (c) para todo el estado de Oaxaca en el escenario B2A 2080

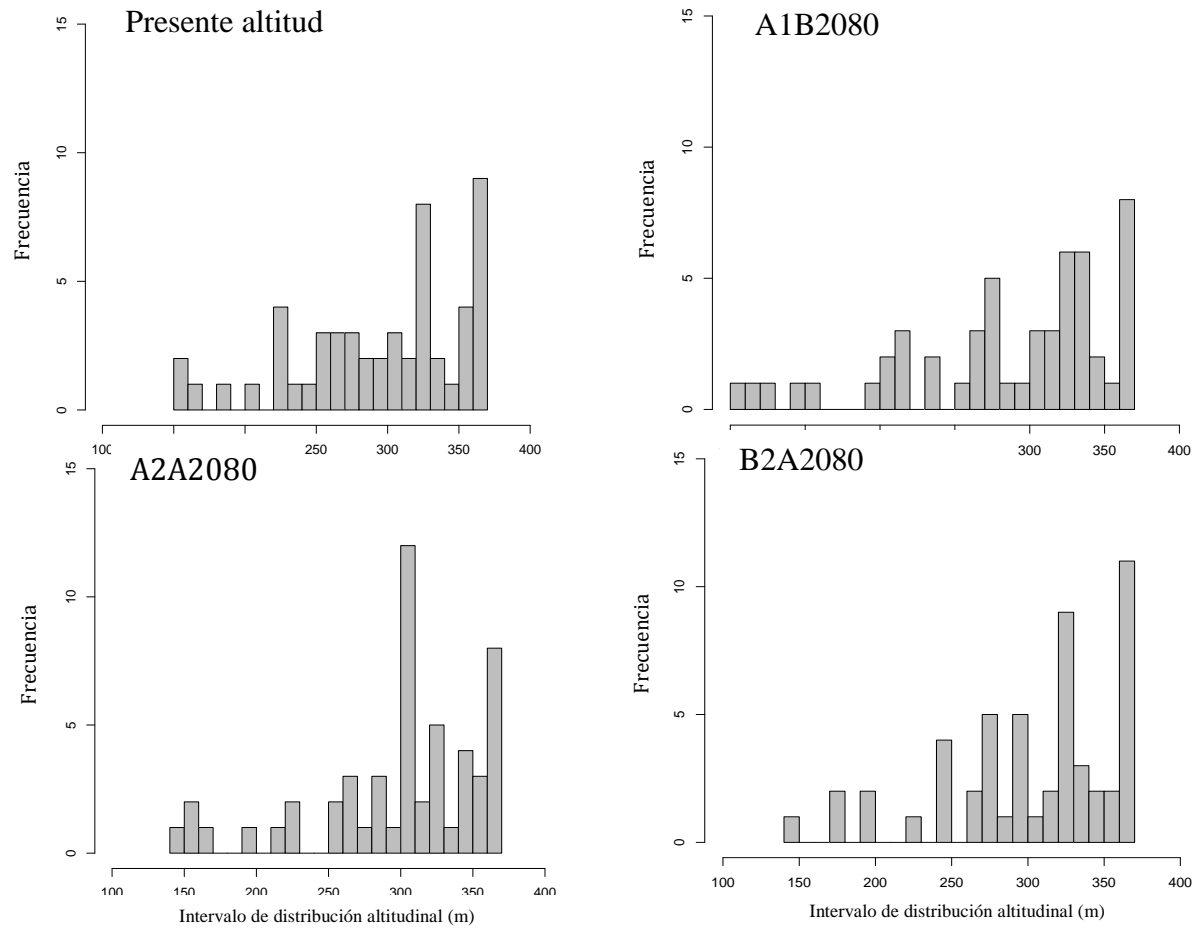


Figura 11. Distribuciones de frecuencia del espacio altitudinal potencialmente ocupado por los roedores de Oaxaca en el presente y el periodo 2080 para los escenarios A1B; A2A y B2A.

## Análisis altitudinal por especie para todo el estado de Oaxaca

Las comparaciones anteriores entre los intervalos de distribución altitudinal nos dice que varias de las especies se siguen distribuyendo en los mismos intervalos altitudinales, es decir, que la mayoría de las especies de distribución altitudinal restringida, media y amplia no cambiaron su estatus. Sin embargo, con esta información no estamos detectando si las especies sufrieron cambios en cuanto a la altitud mínima y máxima en la que se distribuyen ni en cuanto a la frecuencia en la que se distribuyen dentro del intervalo altitudinal. Por ejemplo, podríamos tener una especie que tuviera una distribución inicial de los 1000 a los 2000msnm (lo que representa un intervalo altitudinal de 1000m) y cuando analizamos el periodo 2080 del escenario A1B su distribución cambió de los 2500 a los 3500msnm. El intervalo seguiría siendo el mismo, pero la especie cambió su distribución subiendo 1500m en el gradiente altitudinal (figura 12).

Ejemplo.

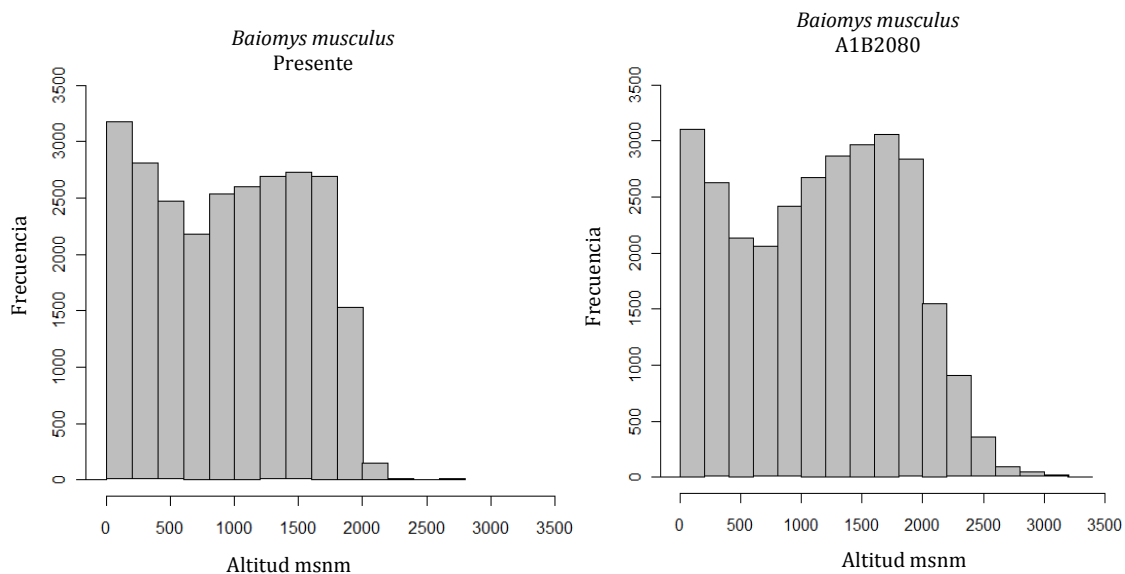


Figura 12. Distribución de frecuencia de *Baiomys musculus* respecto a la altitud para el presente y el escenario A1B (periodo 2080).

Se realizaron las pruebas de Kolmogorov- Smirnov para cada especie realizando todas las comparaciones entre los diferentes periodos analizados para cada escenario. La gran mayoría de las especies presentaron diferencias significativas entre todos los periodos y

en los tres escenarios. A continuación las especies y las comparaciones que no presentaron esas diferencias:

Cuadro 5. Especies que no presentaron diferencias significativas en las distribuciones de frecuencia del espacio altitudinal potencialmente ocupado de acuerdo a las comparaciones hechas mediante la prueba de Kolmogorov- Smirnov.

	A1B2020	A1B2050	A1B2080	A2A2020	A2A2050	A2A2080	B2A2020	B2A2050	B2A2080
Presente	a, l, n, o, u	o, u,		b, d, h, j, l, n, r, s	c, e, f, i, j, m, t, u,	L	d, e, g,	b, h, l, p, t	f, h, s
A1B2020		h, j, l, o,							
A1B2050			e, g, h, l,						
A1B2080									
A2A2020					j, q, v, y	l, s			
A2A2050						b, r			
A2A2080									
B2A2020								e, p	k
B2A2050									c, j, m, u, x
B2A2080									

a	<i>Sphiggurus mexicanus</i>	m	<i>Oryzomys rostratus</i>
b	<i>Dasyprocta mexicana</i>	n	<i>Peromyscus aztecus</i>
c	<i>Dipodomys phillipsii</i>	o	<i>Peromyscus megalops</i>
d	<i>Glaucomys volans</i>	p	<i>Peromyscus melanocarpus</i>
e	<i>Habromys ixtlani</i>	q	<i>Peromyscus melanophrys</i>
f	<i>Habromys lepturus</i>	r	<i>Peromyscus mexicanus</i>
g	<i>Liomys salvini</i>	s	<i>Reithrodontomys mexicanus</i>
h	<i>Megadontomys cryophilus</i>	t	<i>Reithrodontomys microdon</i>
i	<i>Ortogeomys grandis</i>	u	<i>Sciurus deppei</i>
j	<i>Ortogeomys hispidus</i>	v	<i>Scotinomys teguina</i>
k	<i>Oryzomys chapmani</i>	x	<i>Sigmodon leucotis</i>
l	<i>Oryzomys melanotis</i>	y	<i>Tylomys nudicaudus</i>

Para poder distinguir con mayor detalle como cambiaron los límites superiores e inferiores de las distribuciones altitudinales potenciales, se realizó una tabla con las diferencias entre el tiempo presente y el periodos 2080 para cada escenario analizado y cada especie (Cuadro 6). De esta manera se puede diferenciar aquellas especies que aumentaron intervalo de distribución altitudinal debido a un aumento del límite superior (S) o del límite inferior (I) o bien porque alguno de los dos aumentó más de lo que se contrajo el otro.






Cuadro 6. Diferencias en los límites de distribución altitudinal potencial de roedores entre el tiempo presente y el periodo 2080 para los tres escenarios analizados. I= límite inferior de la distribución; S=límite superior de la distribución

	Distribución altitudinal original		Altitud promedio presente	Cambio límites de distribución A1b2080		Diferencia Promedio A1B80	Cambio límites de distribución A2a2080		Diferencia Promedio A2A80	Cambio límites de distribución B2a2080		Diferencia Promedio B2A80	
	I	S		I	S		I	S		I	S		
	<i>Oryzomys chapmani</i>	45		3247	1342		183	323		473			360
<i>Baiomys musculus</i>	-3	2692	956		645	193		320	130		523	67	
<i>Cuniculus paca</i>	3	2213	419		463	-121		345			261		
<i>Liomys pictus</i>	-3	2917	895		86	-171		133	171		160	234	
<i>Oligoryzomys fulvescens</i>	-10	3315	899		303	-155		69			59		
<i>Peromyscus aztecus</i>	23	3526	1363		135	64		135			135		
<i>Peromyscus leucopus</i>	35	2118	718		1097	995		959			776	-127	
<i>Peromyscus mexicanus</i>	-10	3096	1056		102	-261		437			163		
<i>Sigmodon hispidus</i>	-10	2486	803		517	658		549	198		233		
<i>Peromyscus melanophrys</i>	383	2595	1440	-381	603	133	-377	221	79	-380	90		
<i>Hodomys alleni</i>	-3	1859	424		158	97		70					
<i>Dipodomys phillipsii</i>	0	2599	1690		107	-244			-148			-165	
<i>Peromyscus melanocarpus</i>	34	3264	1144		73	306			-55			-71	
<i>Reithrodontomys fulvescens</i>	3	3215	1466		74							71	
<i>Sigmodon leucotis</i>	26	3289	2313		341	-1596			-1252			-846	
<i>Oryzomys couesi</i>	-10	2284	635		975	304			172		-93	122	
<i>Megadontomys cryophilus</i>	137	3191	1398		68	73		-67					
<i>Glaucomys volans</i>	113	2948	1723	-77	389	-368	134		151		-88		
<i>Habromys lepturus</i>	124	3661	2350	270		-91	555		171			59	
<i>Peromyscus beatae</i>	670	3661	2034	285		293	369		331	138		54	
<i>Liomys salvini</i>	3	1589	553	450		416	128		297	128		193	
<i>Microtus mexicanus</i>	994	3661	2218	605		391	524		299	236		199	
<i>Peromyscus gratus</i>	135	3215	1784	724		293	435		152	389		111	
<i>Peromyscus furvus</i>	436	3063	1562	786	66	834	392		266	230		175	
<i>Peromyscus levipes</i>	65	3661	1913	855		290	560		215	678		116	
<i>Scotinomys teguina</i>	32	3661	1703	951	-135	687	225		494	168		343	
<i>Peromyscus maniculatus</i>	276	2796	2796	1211	272	1230	1025	65	5	608	740	140	76

	Distribución altitudinal original		Altitud promedio presente	Cambio límites de distribución A1b2080		Diferencia Promedio A1B80	Cambio límites de distribución A2a2080		Diferencia Promedio A2A80	Cambio límites de distribución B2a2080		Diferencia Promedio B2A80
	I	S		I	S		I	S		I	S	
	<i>Reithrodontomys mexicanus</i>	14		3661	1224			-128		188		
<i>Microtus quasiater</i>	228	2967	1251	612	-686	280	110	59	122			
<i>Reithrodontomys megalotis</i>	58	3289	1817	809	329	357	498	329	217			119
<i>Peromyscus difficilis</i>	306	3141	2085	178	152	214	373	74	158		74	129
<i>Peromyscus melanurus</i>	92	3487	1631	477	-150	578	214		440		174	259
<i>Dasyprocta mexicana</i>	-10	1610	414		-541	-177		-80	-63		145	
<i>Peromyscus megalops</i>	49	3607	1761		-201	-74	109		151		54	56
<i>Heteromys desmarestianus</i>	-10	2541	814	351	184	429		441	327		427	206
<i>Oryzomys melanotis</i>	7	1518	625		-313	-65					429	
<i>Oryzomys rostratus</i>	14	2277	630		-135			804	116		843	71
<i>Sciurus deppei</i>	-10	2502	719		-337	-63		353	76		258	
<i>Sigmodon alleni</i>	-3	3237	958		-581	-372			171		147	271
<i>Oryzomys alfaroi</i>	-10	3661	1090	55		479			102			
<i>Habromis ixtlani</i>	45	3661	1716	199		222			244			133
<i>Sphiggurus mexicanus</i>	-10	2760	433					847	126		901	257
<i>Ortogeomys hispidus</i>	-10	2212	718					576			196	
<i>Sigmodon mascotensis</i>	-3	2903	925			-213		109	160		312	202
<i>Tylomys nudicaudus</i>	-10	3087	891			232		54	128		54	107
<i>Liomys irroratus</i>	45	3661	1575			193	230		137			112
<i>Reithrodontomys sumichrasti</i>	414	3661	1978			161	221		107			58
<i>Microtus oaxacensis</i>	75	3289	1371			237			-150			
<i>Neotoma mexicana</i>	0	3661	1608			-334			-58			-72
<i>Nyctomys sumichrasti</i>	-3	3289	670			-67						
<i>Ortogeomys grandis</i>	-3	3570	1033			-170			99			146
<i>Reithrodontomys microdon</i>	0	3661	1591			234						
<i>Sciurus aureogaster</i>	-10	3661	996									

	A1b2080	A2a2080	B2a2080
<u>No. especies que extienden su intervalo de distribución</u>	18	19	23
<u>No. especies que contraen su intervalo de distribución</u>	23	20	12
<u>Especies con cambios en al menos uno de los límites de su distribución</u>	41	39	35

	Expansión
	Contracción
	Sin cambios

### **Rasgos de las especies y su relación con los cambios en el intervalo de distribución altitudinal potencial**

Se elaboró una matriz con los rasgos más importantes de las especies que presentaron consistentemente expansiones y contracciones en los tres escenarios para tratar de encontrar características en común que nos ayudaran a explicar la tendencia de sus cambios en el intervalo de distribución altitudinal (Cuadro 7). Más de la mitad de las especies (12 de un total de 21) presentaron asociación con los bosques de pino- encino y la mayoría de las que presentan extensión en su intervalo altitudinal son consideradas de distribución amplia. Sin embargo no hay un patrón claro que nos ayude a predecir, con base a sus rasgos ecológico, qué especies presentarán extensión o contracción bajo los efectos potenciales del cambio climático considerados. Así tenemos especies que pertenecen al mismo género y tienen efectos mixtos, como es el caso para el estado de Oaxaca de *Peromyscus leucopus* que es la especie que más extiende su límite superior de su distribución altitudinal (entre 776 y 1097m según el escenario considerado).

En contraste, es otro *Peromyscus*, *P. maniculatus* una de las especies que mayor contracción presentó, perdiendo entre 740 y 960m de su intervalo de distribución altitudinal potencial original.

Cuadro 7. Rasgos ecológicos de las especies de roedores que consistentemente presentan expansiones y contracciones en sus intervalos de distribución altitudinal potencial en los tres escenarios de cambio climático. Con información tomada de Ceballos y Oliva (2005).

Especie	Altitud		Hábitos			Dieta					Historia natural	Distribución			Soporta perturbación
	I	S	N	D	C	Granos	insectos	Hervívoro	Frutas	Hongos		Semi-arbórea	Amplia	Restringida	
<b>Oaxaca</b>															
Extensión área de distribución															
<i>Liomys pictus</i>	0	2045	x			x		x							
<i>Oligoryzomys fulvences</i>	0	1550										x			x
<i>Oryzomys chapmani</i>	1550	2500	x			x		x				x			x
<i>Peromyscus aztecus</i>	500	3200					x	x				x			x
<i>Peromyscus mexicanus</i>	600	2000				x	x	x							
<i>Sigmodon hispidus</i>	0	3050	x	x		x	x	x				x			
<i>Baiomys musculus</i>	0	2000		x	x	x	x	x							
<i>Cuniculus paca</i>	0	1800	x		x	x		x	x			x			
<i>Peromyscus leucopus</i>	0	3000	x			x	x	x			x	x			
<i>Peromyscus melanophrys</i>	50	2700				x						x			
Reducción área de distribución															
<i>Liomys salvini</i>	0	1500	x			x	x								x
<i>Peromyscus gratus</i>	1710	2700				x		x		x					
<i>Scotinomys teguina</i>	1000	2940		x			x						x		x
<i>Microtus mexicanus</i>	2220	4115	x	x				x				x			x
<i>Peromyscus beatae</i>	1371	3810	x												
<i>Peromyscus furvus</i>	650	2950	x					x	x				x		
<i>Peromyscus levipes</i>	690	3100	x			x	x	x	x						
<i>Peromyscus maniculatus</i>	60	3800	x			x	x	x				x			
<b>ANP</b>															
Extensión área de distribución															
<i>Oryzomys couesi</i>	0	2300	x			x		x	x			x			
<i>Reithrodontomys fulvescens</i>	0	2600	x			x	x				x	x			
Reducción área de distribución															
<i>Reithrodontomys megalotis</i>	0	4000	x			x		x				x		x	

Especie	Tipo de vegetación															Reproducción		
	BMM	BPE	BL	BTSC	BTP	BE	MX	ME	D	SM	BTC	PT	PA	PAI	CU	M	DC	Todo el año
<b>Oaxaca</b>																		
Extensión área de distribución																		
<i>Liomys pictus</i>		x				x	x			x	x							x
<i>Oligoryzomys fulvences</i>		x						x		x	x			x	x			x
<i>Oryzomys chapmani</i>	x	x																
<i>Peromyscus aztecus</i>	x	x	x	x														x
<i>Peromyscus mexicanus</i>	x																	
<i>Sigmodon hispidus</i>						x	x			x			x					x
<b><i>Baiomys musculus</i></b>						<b>x</b>	<b>x</b>				<b>x</b>	<b>x</b>			<b>x</b>		<b>x</b>	<b>x</b>
<i>Cuniculus paca</i>				x	x													
<i>Peromyscus leucopus</i>					x			x			x		x					x
<b><i>Peromyscus melanophrys</i></b>						x	x						x					
Reducción área de distribución																		
<i>Liomys salvini</i>											x							
<i>Peromyscus gratus</i>		x													x			
<i>Scotinomys teguina</i>	x	x											x		x			x
<b><i>Microtus mexicanus</i></b>		<b>x</b>											<b>x</b>					<b>x</b>
<i>Peromyscus beatae</i>					x													
<i>Peromyscus furvus</i>	<b>x</b>	<b>x</b>																<b>x</b>
<i>Peromyscus levipes</i>		x									x							
<b><i>Peromyscus maniculatus</i></b>							x		x				x		x			<b>x</b>
<b>ANP</b>																		
Extensión área de distribución																		
<i>Oryzomys couesi</i>		x				x				x	x		x		x	x		x
<i>Reithrodontomys fulvescens</i>		x				x	x				x							x
Reducción área de distribución																		
<i>Reithrodontomys megalotis</i>		x											x					

BMM: bosque mesófilo de montaña; BPE: bosque de pino encino; BL: bosque de liquidámbar; BTSC: bosque tropical subcaducifolio; BTP: bosque tropical perennifolio; BE: bosque espinoso; MX: matorral xerófilo; ME: matorral espinoso; D: desiertos; SM: selva mediana; BTC: bosque tropical caducifolio; PT: potreros; PA: pastizal; PAI: pastizal inducido; CU: cultivos; M: manglares; DC: dunas costeras. En **negritas** están las especies que presentan cambios tanto en el análisis estatal como en el del subconjunto de ANP

### **Análisis considerando las Áreas Protegidas Federales de Oaxaca**

Al ser un subconjunto que abarca aproximadamente el 3.2 por ciento de la superficie del Estado, puede ocurrir que no todas las especies reportadas para Oaxaca están representadas en las ANP. Aquellas especies que ni en el “presente” ni en ninguno de los periodos analizados de los distintos escenarios aparecen potencialmente representadas son:

*Dasyprocta mexicana*

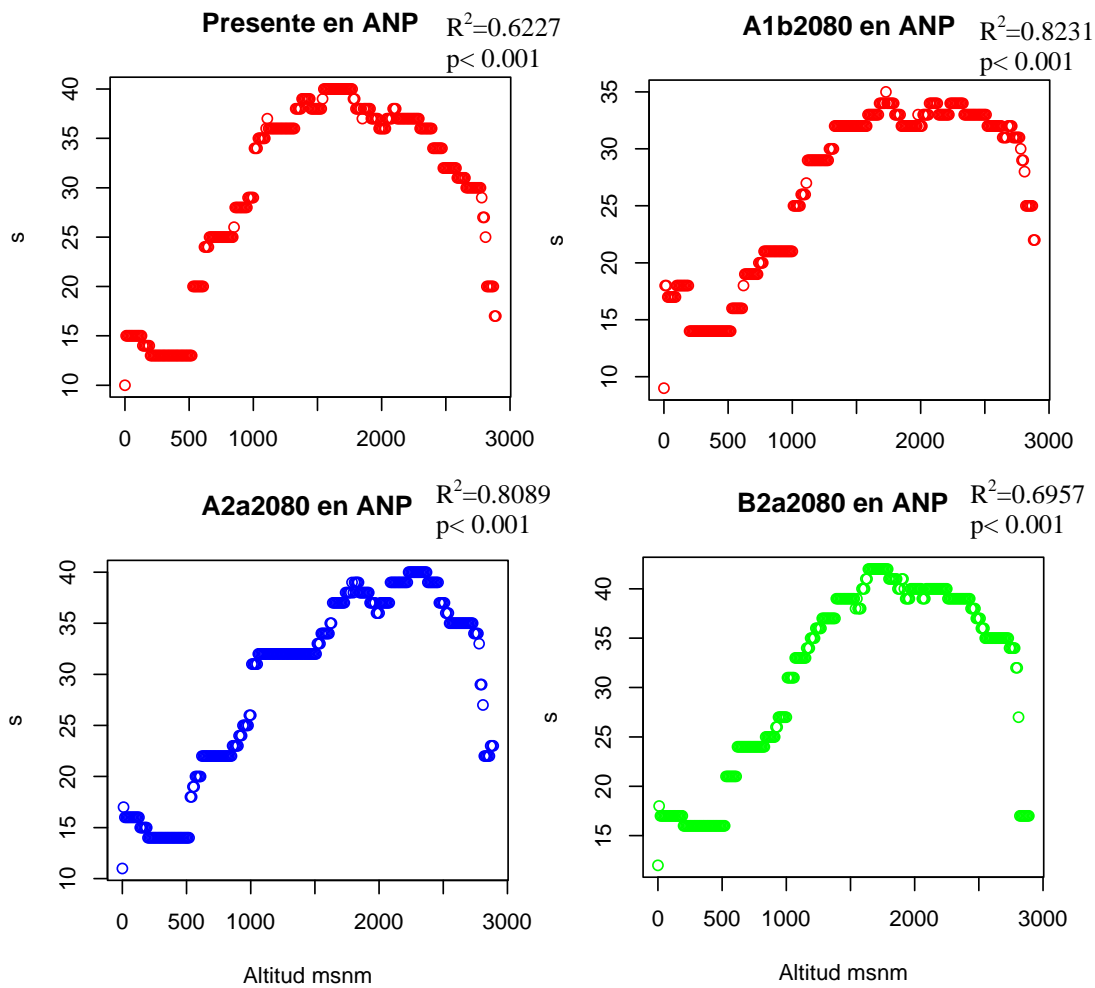
*Liomys salvini*

*Heteromys desmarestianus*

*Scotinomys teguina*

Por otra parte, la distribución potencial de *Microtus quasiater* y *Oryzomys rostratus* no incluye las ANP pero sólo en algunos escenarios. Estas son especies de distribución relativamente restringida.

En cuanto a la relación riqueza- altitud, al contrario de lo que sucede con el análisis a nivel estatal, la relación es positiva (correlación de Pearson para el presente  $R^2 = 0.6227$ ;  $p < 0.001$ , figura 13) y su valor aumenta hacia el periodo 2080 para los tres escenarios.



P	msnm		
	0-1000	1001-2000	>2000
$\bar{s}$	19.01	37.68	32.54
Mín	10.00	34.00	17.00
Máx	29.00	40.00	38.00
DS	6.15	1.75	5.19

A1b2080	msnm		
	0-1000	1001-2000	>2000
$\bar{s}$	17.23	31.10	31.82
Mín	9.00	25.00	22.00
Máx	21.00	35.00	34.00
DS	2.87	2.5	2.70

A2a2080	msnm		
	0-1000	1001-2000	>2000
$\bar{s}$	18.20	34.24	35.78
Mín	11.00	31.00	22.00
Máx	26.00	39.00	40.00
DS	4.11	2.70	4.96

B2a2080	msnm		
	0-1000	1001-2000	>2000
$\bar{s}$	20.02	38.07	35.61
Mín	12.00	31.00	17.00
Máx	27.00	42.00	40.00
DS	4.16	3.26	6.38

Figura 13. Relación riqueza- altitud en un gradiente altitudinal “virtual” para el subconjunto de ANP de Oaxaca para los escenarios A1B, A2A y B2A.

### Escenario A1B para el subconjunto de ANP

Las distribuciones de frecuencia de la riqueza muestran claramente un aumento en el número de sitios que tienen menor riqueza. Al mismo tiempo existe una disminución en el número de especies con distribución amplia. Incluso desaparecen las clases en donde el área de distribución de una especie es mayor a 1800 cuadrantes.

Cuadro 8. Indicadores para el escenario A1B considerando el subconjunto de ANP

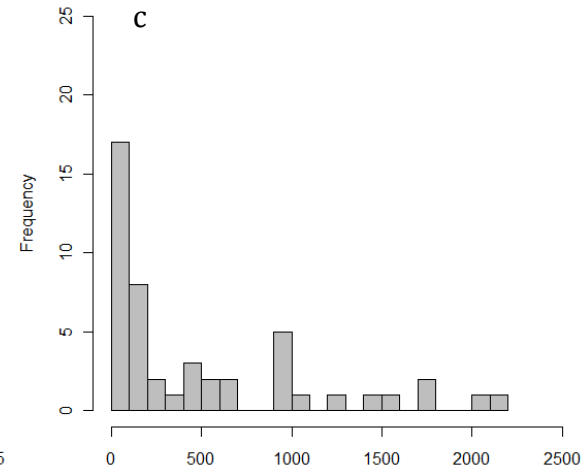
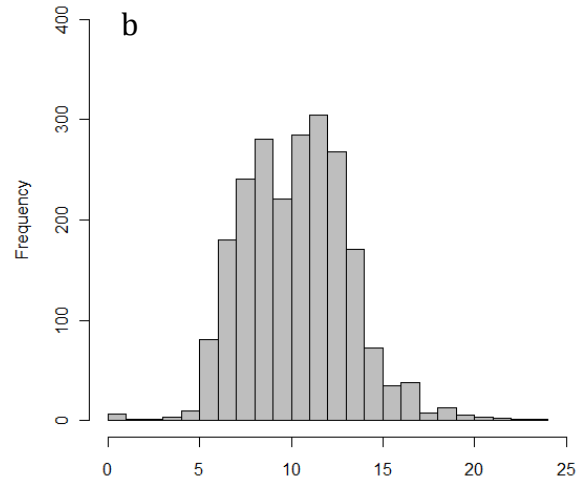
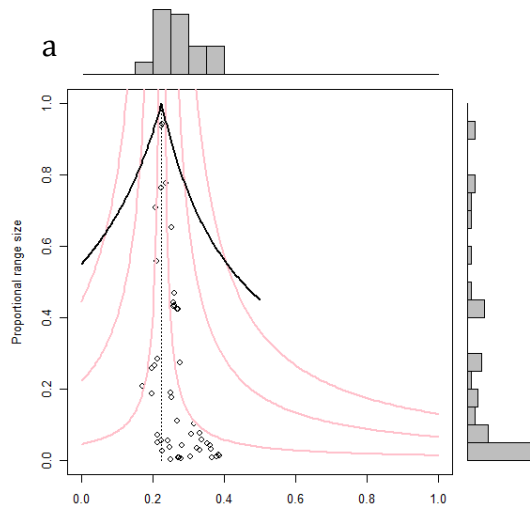
Escenario	$\bar{s}$	$\bar{n}$	$\beta$	$\beta$ altitudinal	Schluter $V_{sp}$
Presente	10.79122	501.7917	4.448061	1.621622	1.679702
A2a2020	10.09677	469.5	4.753994	1.722346	2.445472
A2a2050	9.388889	445.8723	5.005917	1.724662	3.155069
A2a2080	8.208781	389.8298	5.725576	1.774278	3.075533

**Altitud.** El número de especies con distribución potencial restringida aumenta de 6 a 13, mientras que las de distribución potencial media disminuyen de 26 a 18 y las de distribución amplia se mantienen sin cambios.

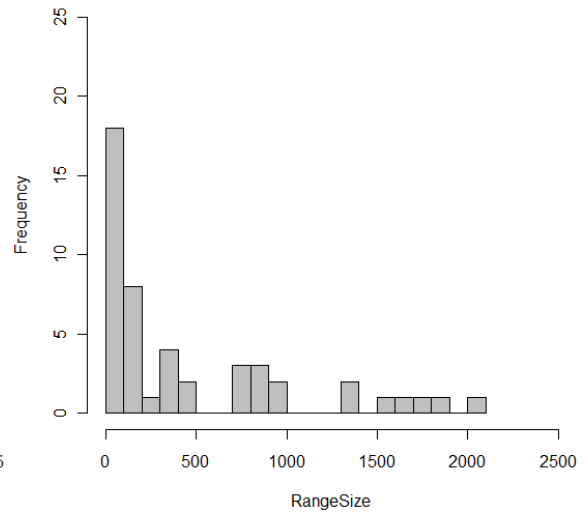
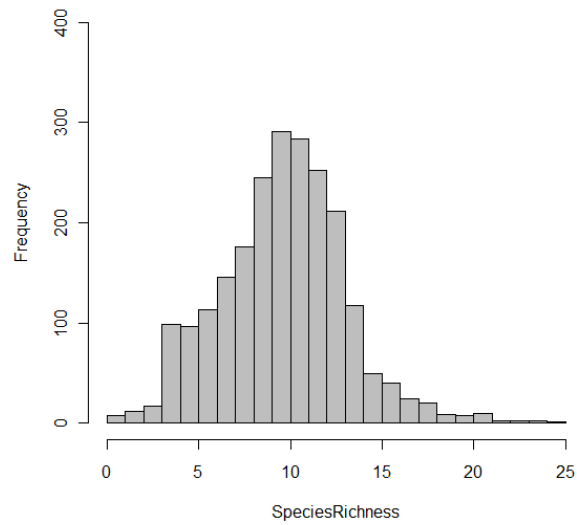
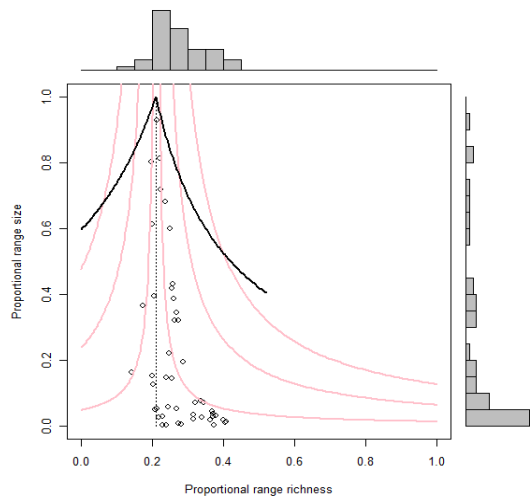
Se registró un desplazamiento para todas las especies hacia arriba del gradiente del promedio de su intervalo de distribución a una tasa promedio de 13.69m década<sup>-1</sup>, los cuales fueron significativamente diferentes de cero ( $t = -2.1616$ ,  $gl = 46$ ,  $p < 0.05$ ) y coinciden con el valor de referencia de 11m década<sup>-1</sup> ( $t = -0.4243$ ,  $gl = 46$ ,  $p = 0.6733$ ).



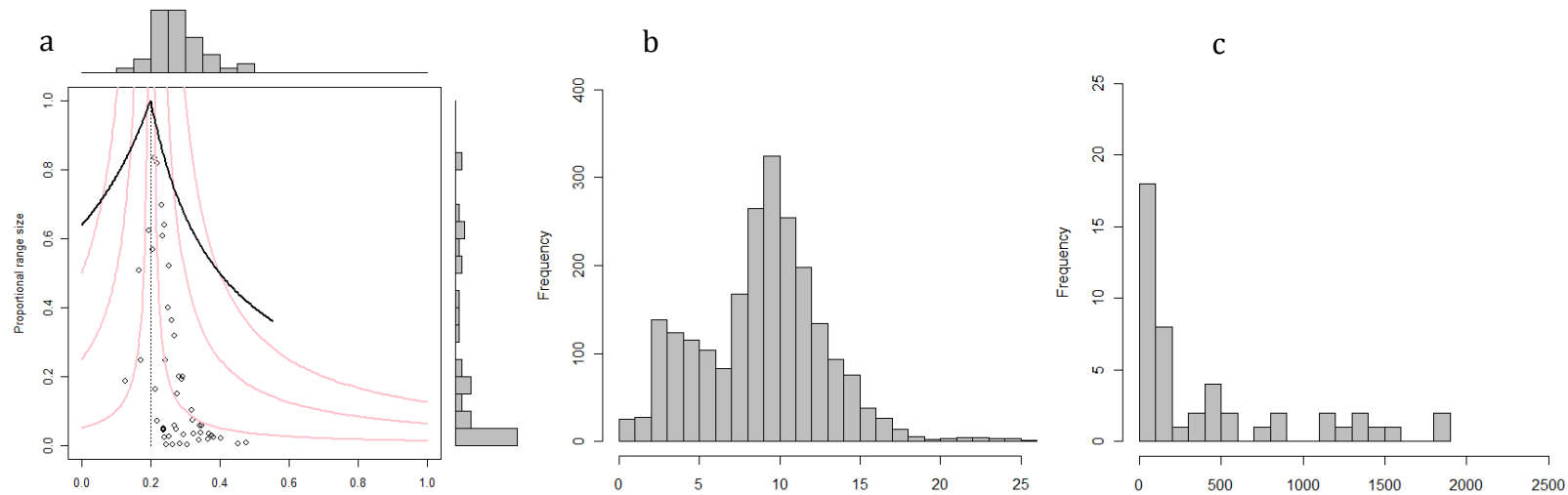
# Subconjunto ANP Oaxaca Presente



## ANP A1b2020



### ANP A1B2050



### A1B2080

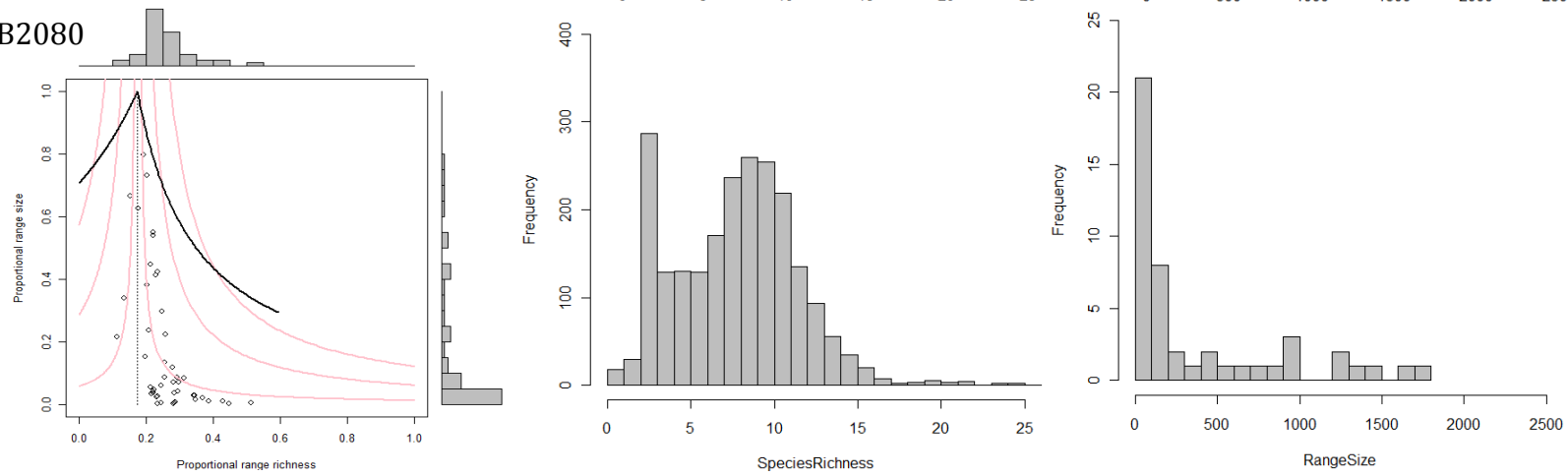


Figura 14. Gráficas de áreas de distribución- diversidad (a), distribuciones de frecuencia de la riqueza (b) y distribuciones de la frecuencia del área potencialmente ocupada por los roedores (c) para el subconjunto de ANP en el escenario A1B.

## Escenario A2A para el subconjunto de ANP

Hacia el periodo 2080 existe un desplazamiento de la moda hacia la izquierda, pues la mayor frecuencia de riqueza de sitios pasa de 12 especies en el presente a 11 en el 2080. Conforme avanzamos en los diferentes periodos analizados se puede distinguir una mayor cantidad de sitios que tienen menor riqueza potencial de roedores.

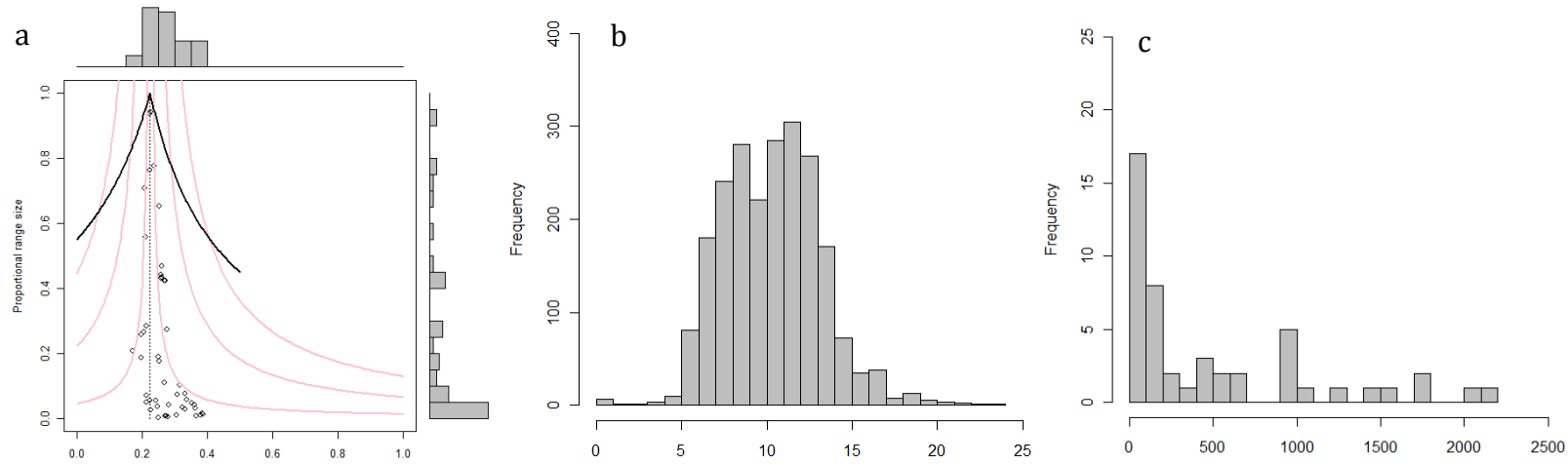
Cuadro 9. Indicadores para el escenario A2A considerando el subconjunto de ANP

Escenario	$\bar{s}$	$\bar{n}$	B	$\beta$ altitudinal	Schluter $V_{sp}$
Presente	10.79122	501.7917	4.448061	1.621622	1.679702
A2a2020	10.78674	491.3469	4.542615	1.681259	1.55106
A2a2050	10.06272	467.9167	4.77008	1.659118	2.044385
A2a2080	10.01927	465.8958	4.79077	1.648117	1.71427

**Altitud.** Aumento en el número de especies con distribución potencial restringida de 6 a 9, mientras que aquellas con distribución media y amplia disminuyen (de 26 a 24 y de 16 a 15 respectivamente)

El desplazamiento promedio que presentan las especies hacia arriba del gradiente es a una tasa de  $m$  década<sup>-1</sup>, la cual resultó significativamente diferente de cero ( $t = -2.846$ ,  $gl = 46$ ,  $p < 0.01$ ) y no tuvo diferencias significativas cuando se comparó con la tasa de  $11m$  década<sup>-1</sup> ( $t = -0.241$ ,  $gl = 46$ ,  $p = 0.8109$ )

## ANP Oaxaca Presente



## ANP A2A2080

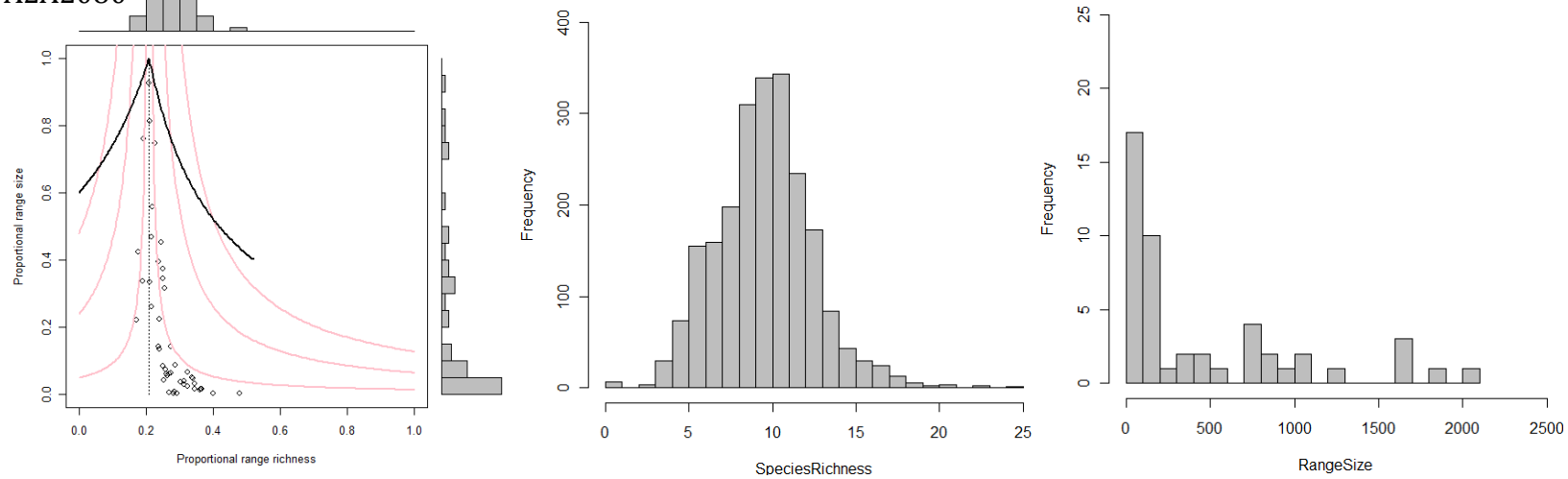


Figura 15. Gráficas de áreas de distribución- diversidad (a), distribuciones de frecuencia de la riqueza (b) y distribuciones de la frecuencia del área potencialmente ocupada por los roedores (c) para el subconjunto de ANP en el escenario A2A.

### Escenario B2A para el subconjunto de ANP

Al igual que en el escenario anterior, la moda de la riqueza presenta un desplazamiento hacia la izquierda conforme avanzamos hacia el periodo 2080.

Los indicadores de riqueza promedio presentan una tendencia a la baja hacia el 2050 y regresan a valores mayores incluso que en el tiempo presente en el 2080.

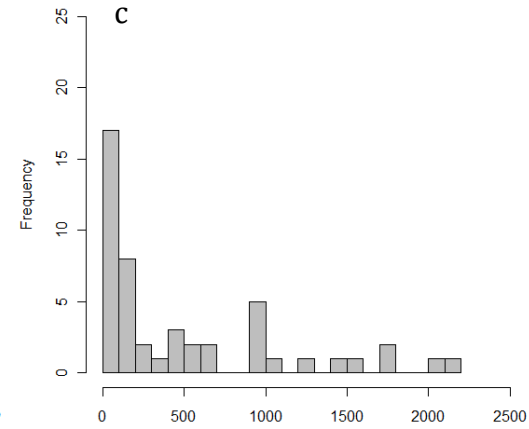
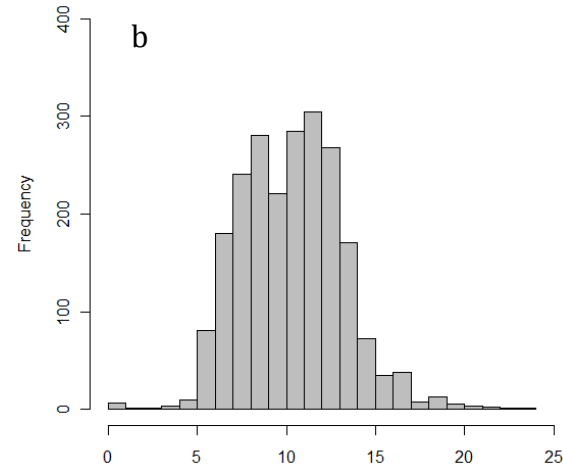
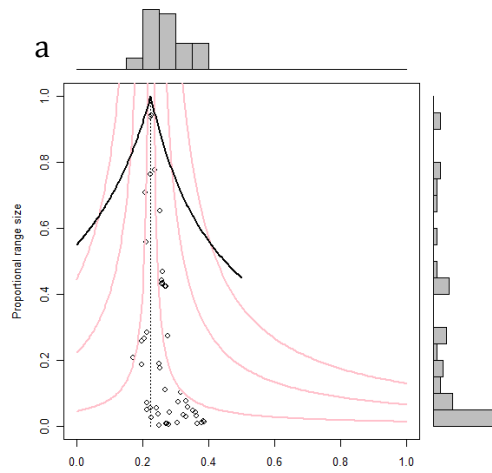
Cuadro 10. Indicadores para el escenario B2A considerando el subconjunto de ANP

Escenario	$\bar{s}$	$\bar{n}$	B	$\beta$ altitudinal	Schluter $V_{sp}$
Presente	10.79122	501.7917	4.448061	1.621622	1.679702
B2a2020	10.33961	480.7917	4.642343	1.618228	1.796103
B2a2050	10.27823	468.1837	4.76736	1.692876	1.596006
B2a2080	11.07796	504.6122	4.423198	1.57924	1.583873

**Altitud.** Hay un aumento número de especies con distribución restringida y amplia, mientras que disminuye en el número de especies de distribución media.

El punto medio de la distribución altitudinal se desplazó hacia arriba del gradiente a una tasa de 9.63m década<sup>-1</sup> y no fue significativamente diferente de cero ( $t = -1.8843$ ,  $gl = 46$ ,  $p = 0.066$ ).

ANP Oaxaca Presente



ANP B2A2080

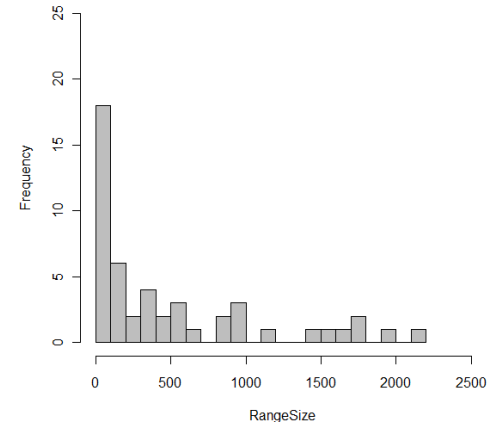
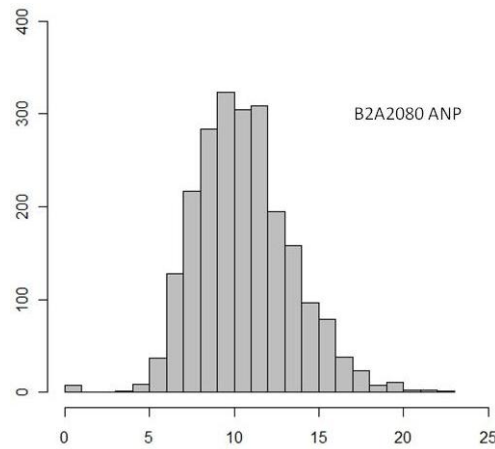
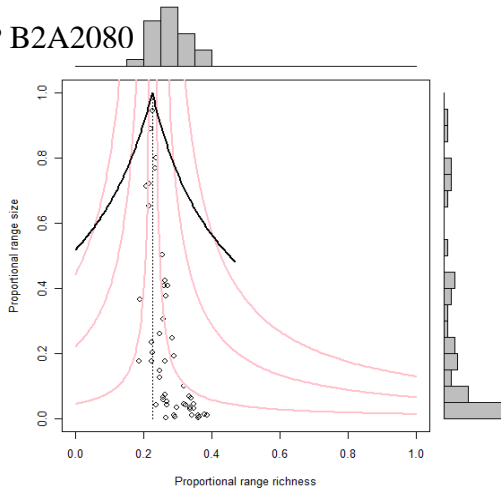


Figura 16. Gráficas de áreas de distribución- diversidad (a), distribuciones de frecuencia de la riqueza (b) y distribuciones de la frecuencia del área potencialmente ocupada por los roedores (c) para el subconjunto de ANP en el escenario B2A.

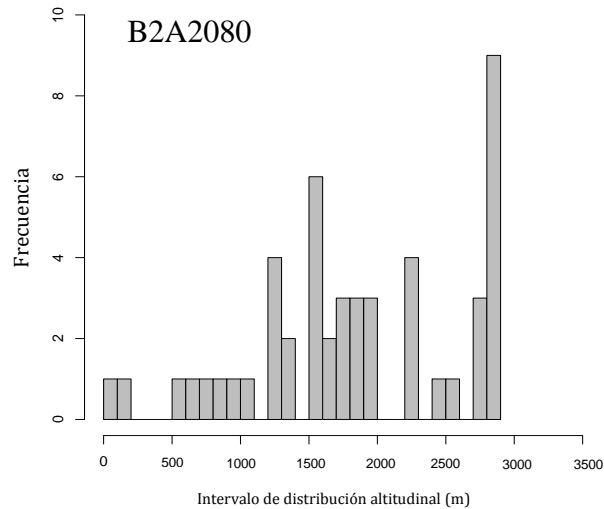
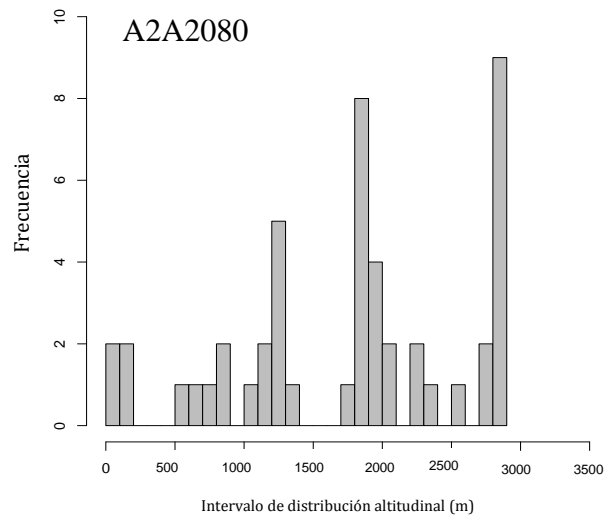
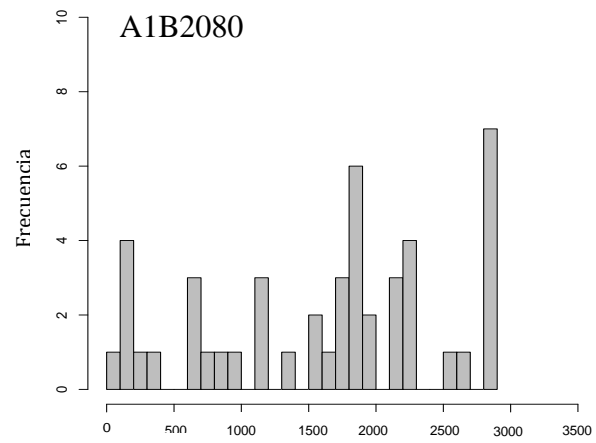
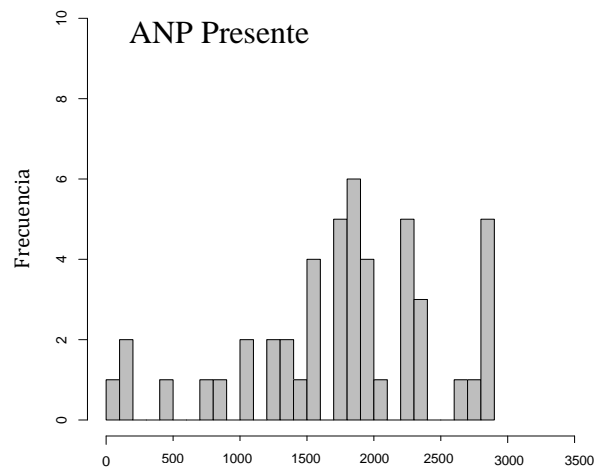


Figura 17. Distribuciones de frecuencia de los intervalos de distribución altitudinal potencial para los roedores del subconjunto de ANP bajo los escenarios A1B, A2A y B2A.

## Análisis de los intervalos de distribución altitudinal por especie para el subconjunto de ANP

Existen especies cuya distribución potencial no presenta cambios bajo los distintos escenarios y periodos analizados. Sin embargo, la frecuencia con la que aparecen en los distintos pisos altitudinales nos puede dar una idea de la tendencia que presentan. Por ello analizamos los cambios en las distribuciones de las frecuencias de su presencia vs. la altitud.

Las especies que no presentaron cambios significativos en el intervalo potencial de distribución altitudinal entre los diferentes escenarios son:

<i>Sphiggurus mexicanus</i>	<i>Habromys ixtlani</i>
<i>Habromys lepturus</i>	<i>Microtus oaxacensis</i>
<i>Nyctomys sumichrasti</i>	<i>Ortogeomys grandis</i>
<i>Ortogeomys hispidus</i>	<i>Oryzomys melanotis</i>
<i>Peromyscus beatae</i>	<i>Peromyscus melanurus</i>
<i>Reithrodontomys mexicanus</i>	<i>Sciurus deppei</i>

Para el resto se presentan los límites de su distribución altitudinal en el presente y en el año 2080 para todos los escenarios.

Cuadro 11. Diferencias en los límites potenciales de distribución altitudinal de roedores en las ANP de Oaxaca entre el tiempo presente y el periodo 2080 para los tres escenarios analizados. I: límite inferior; S: límite superior

Especie	Distribución altitudinal original		Altitud promedio presente	Cambio límites de distribución A1b2080		Diferencia Promedio A1B80	Cambio límites de distribución A2a2080		Diferencia Promedio A2A80	Cambio límites de distribución B2a2080		Diferencia Promedio B2A80
	I	S		I	S		I	S		I	S	
<i>Baiomys musculus</i>	0	2288	1209.81		219	178.43		219	162.02		219	70.94
<i>Cuniculus paca</i>	10	128	80.22		60	-1.22		60	-26.73		60	-25.40
<i>Oryzomys couesi</i>	0	1782	710.54		211	447.65		211	335.39		135	285.92
<i>Peromyscus leucopus</i>	618	1104	960.25	385	1784	689.00	385	1784	496.75	385	419	284.16
<i>Peromyscus melanophrys</i>	522	2464	1330.76		342	369.32		342	63.74		-519	14.72
<i>Reithrodontomys fulvescens</i>	522	2777	1511.48	-522	111	195.44	-522	111	91.72	-522		81.09
<i>Dipodomys phillipsii</i>	524	2464	1315.31	-514	164	89.96		164	-82.21			-113.35



	Distribución altitudinal original		Altitud promedio presente	Cambio límites de distribución A1b2080		Diferencia Promedio A1B80	Cambio límites de distribución A2a2080		Diferencia Promedio A2A80	Cambio límites de distribución B2a2080		Diferencia Promedio B2A80
	I	S		I	S		I	S		I	S	
<i>Oligoryzomys fulvescens</i>	852	1901	1303.66	-761	72	-48.79	-234	72	139.38			-15.66
<i>Sciurus aureogaster</i>	0	2806	1456.14		82	36.38		82	-60.74			-49.45
<i>Hodomys alleni</i>	0	1762	650.83		69	21.43		69	31.91		-215	-47.72
<i>Sigmodon hispidus</i>	522	2106	1229.02	250	658	411.41		658	225.37		-59	-186.91
<i>Habromys lepturus</i>	1542	2888	2467.75	-220		-36.53			-299.00		-82	-302.89
<i>Microtus oaxacensis</i>	2089	2888	2545.00	-110		-30.07			-59.03			-2.77
<i>Glaucomys volans</i>	656	2573	1587.39		233	136.99	276	233	123.89	260		62.94
<i>Peromyscus melanocarpus</i>	1378	2888	2353.42	-260		-226.29	429		102.51	206		167.88
<i>Sphiggurus mexicanus</i>	5	188	66.67			3.00			-24.07		2618	431.75
<i>Reithrodontomys mexicanus</i>	1003	2888	1792.46			141.70			148.42	-71		49.99
<i>Liomys pictus</i>	0	1433	348.06		-1245	-301.30		-1245	431.62		1344	913.12
<i>Orthogeomys grandis</i>	0	2646	284.77		-524	-218.78		-524	210.44		131	321.19
<i>Orthogeomys hispidus</i>	618	1965	1344.06		-239	-63.76	385	-239	33.58		279	-12.26
<i>Peromyscus megalops</i>	1532	2806	2363.78	472	-477	-227.28	472	-477	29.56	-306		-412.53
<i>Peromyscus melanurus</i>	2035	2777	2335.87		-69	-42.20		-69	27.43	-143		12.83
<i>Sigmodon alleni</i>	0	2389	69.11		-2201	-20.51		-2201	742.93		402	1172.77
<i>Sigmodon mascotensis</i>	0	2387	972.23		-183	-788.59		-183	262.30		419	383.69
<i>Liomys irroratus</i>	522	2806	1560.21	100	82	213.87		82	16.49			-0.99
<i>Peromyscus difficilis</i>	958	2806	2023.15	325	82	169.45	-52	82	75.48	314		113.22
<i>Oryzomys alfaroi</i>	1003	2888	1727.64	1674		1037.08			-31.81			-47.33
<i>Oryzomys chapmani</i>	1003	2888	1839.67	726		584.67			103.45			32.62
<i>Peromyscus aztecus</i>	618	2888	1784.90	120		89.53	234		105.76			18.78
<i>Peromyscus beatae</i>	1859	2864	2509.61	371		110.56	371		2.79	106	-136	25.65
<i>Peromyscus furvus</i>	1097	2888	1866.25	1117		738.80	636		575.78	291		239.62
<i>Reithrodontomys megalotis</i>	1104	2888	2217.30	480		218.09	679		251.42	284		78.40
<i>Peromyscus levipes</i>	852	2888	1839.25	266		236.49	130		128.83	215	-97	140.82
<i>Peromyscus maniculatus</i>	841	2791	2005.50	839		324.26	674		182.10	220		67.70
<i>Microtus mexicanus</i>	1329	2888	2092.79	690		431.45	310		308.40	282		190.19
<i>Reithrodontomys sumichrasti</i>	1003	2888	2013.98	101		123.33	57		10.82			-10.50

<i>Sciurus deppei</i>	618	1839	1351.82	385	-56	-4.40	-56	27.24	-6.86
<i>Habromys ixtlani</i>	1329	2888	2371.69			4.52	310	-22.83	-20.88
<i>Megadontomys cryophilus</i>	1037	2888	2116.26			-137.00	574	218.68	260.47
<i>Peromyscus gratus</i>	522	2888	1565.84	539		473.15		83.12	-82
<i>Sigmodon leucotis</i>	522	2791	2289.26			-1089.94		-862.30	-775.51
<i>Tylomys nudicaudus</i>	4	2864	1216.49			335.96		228.11	253.57
<i>Oryzomys melanotis</i>	7	7	7.00			8.00		0.00	0.00
<i>Reithrodontomys microdon</i>	0	2888	1894.80			74.32		18.15	-7.34
<i>Peromyscus mexicanus</i>	4	2864	1718.90			237.14		-48.60	119.82
<i>Neotoma mexicana</i>	17	2806	1664.31			253.35		46.50	-1.19
<i>Nyctomys sumichrasti</i>	0	2888	462.69			-1.79		-6.43	-17.39
No. especies con cambios hacia arriba del gradiente en alguno de los límites				27			27		21
Especies con cambios en al menos uno de los límites de su distribución				36			33		30

## DISCUSIÓN

### Distribución potencial y escenarios

El escenario A1B fue el que presentó las tendencias más claras, lo cual coincide con ser bajo el cual se proyectan los mayores cambios en temperatura media anual entre el presente y el periodo 2080 para Oaxaca (> 4°C, anexo I).

Bajo este escenario, el número de sitios con la mayor riqueza disminuyó, lo que sugiere que algunas especies reducen su área de distribución. A consecuencia de esto, la diversidad beta ( $\beta$ ) de los sitios tiende a aumentar al compartir éstos un menor número de especies (Cuadro 2).

Lo anterior coincide con lo que muestran las gráficas de distribución-diversidad, ya que si una especie deja de ocupar varios sitios al distribuirse en sitios más altos conforme se avanza en los periodos hacia el 2080, la riqueza de especies disminuirá en los sitios de

tierras más bajas. Probablemente la riqueza de especies de los sitios con mayor altitud aumenten, pero como éstos son menos frecuentes, la riqueza promedio de todo el Estado o de las ANP en su conjunto, tenderá a disminuir. El patrón que siguen las gráficas, donde los puntos para la mayoría de las especies se encuentran a la derecha de la línea punteada y que se mantiene de manera general en todos los análisis es característico de sitios en donde las especies que tienen una distribución restringida tienden a ocurrir en sitios con una riqueza alta, mientras que los sitios que tienen una baja riqueza cuentan en general con especies de amplia distribución (Arita *et al.* 2012).

### **Riqueza y altitud**

Hace una década se pensaba que la riqueza de especies mostraba un solo patrón altitudinal: decrecía al incrementarse la altitud. Ahora sabemos que la riqueza puede decrecer con la elevación, alcanzar su punto máximo en elevaciones medias y en algunos casos aumentar con la elevación (Rahbek, 1995; McCain, 2005).

Las explicaciones más frecuentes de los patrones de diversidad en relación con los gradientes altitudinales obedecen a un solo factor como puede ser: precipitación, temperatura, productividad, competencia, abundancia de recursos, etc. (Heaney 2001; Lomolino, 2001). La teoría actual reconoce la compleja interrelación de los factores climáticos y de éstos con los factores bióticos, los cuales pueden actuar en conjunto influenciando los patrones de diversidad (Iloldi *et al.*, 2002; Brown 2001; Lomolino 2001). El conocer los factores que tienen mayor influencia en los patrones de riqueza altitudinal de los roedores nos permitiría conocer con mucha más precisión los efectos que puede tener el cambio climático en su distribución altitudinal. Para el caso de los modelos de distribución potencial, fue la estacionalidad de la temperatura (BIO4) la que tuvo mayor influencia sobre el mismo modelo para casi la mitad de las especies.

La falta de datos de calidad de largo plazo sobre precipitación, humedad, cobertura de nubes y productividad a escala local en los gradientes altitudinales han dificultado el desarrollo de una teoría cuantitativa. Sólo se ha registrado un modelo climático en murciélagos (McCain, 2007) debido a estas limitaciones (Figura 18).

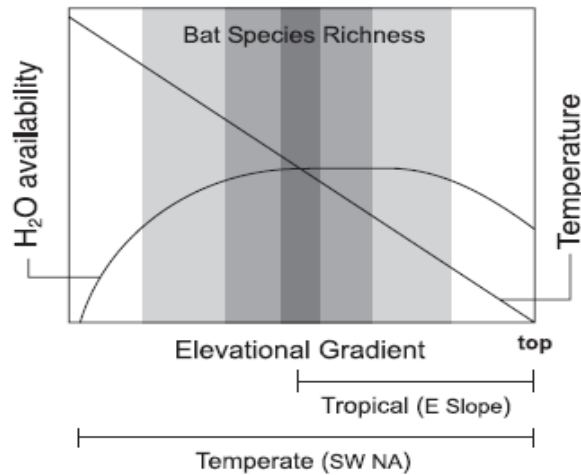


Figura 18. Modelo climático generalizado para gradientes altitudinales y riqueza de murciélagos incorporando un descenso lineal de la temperatura conforme aumenta el gradiente y una disponibilidad de agua unimodal. Los tonos más grises indican mayor riqueza de especies (Tomado de McCain, 2007).

En este caso también se encontraron los máximos de riqueza para todo Oaxaca en elevaciones medias (de 1000 a 2000msnm) así como una correlación negativa entre altitud y riqueza que se vuelve menos fuerte conforme avanzamos hacia el 2080, lo que sugiere que otros mecanismos aparte de la altitud (como los factores climáticos) están influyendo en la riqueza. De esta manera, los modelos muestran que el cambio climático podría afectar los patrones de riqueza altitudinal, ya sea extendiendo o desplazando hacia arriba del gradiente la mayor riqueza de especies.

Lo anterior, considerando que la estimación de la riqueza puede resultar artificial, ya que estamos hablando de un gradiente altitudinal “virtual” que abarca todo el estado de Oaxaca y que podría suceder que las especies realmente no se encuentran en un mismo espacio latitudinal y longitudinalmente hablando. Aun así esto es consistente con lo que han encontrado otros trabajos como el de Sánchez- Cordero (2001) en Oaxaca, cuyos resultados muestran que en general los gradientes de la riqueza de roedores y murciélagos tienen sus máximos en elevaciones bajas-intermedias y los endemismos se encuentran concentrados en las tierras elevadas.

Otros resultados que consideran varios gradientes (56) como los de McCain (2005), son en este mismo sentido, pues muestran que los pequeños mamíferos no voladores exhibían un claro patrón en donde el máximo de riqueza se encontraba en tierras de elevación media. Sin embargo, también encuentra una relación entre el tamaño de la montaña y el pico de diversidad alfa: a mayor gradiente de la montaña, el pico de diversidad se encuentra significativamente por encima del punto medio, consistente con los factores climáticos (efecto Massenerhebung).

Sin embargo, no todos los estudios encuentran el mismo patrón. Hay casos como el de Monteagudo y León (2002) que mencionan para la Sierra de Juárez, Oaxaca, una disminución de la riqueza de mamíferos con respecto a la altitud casi lineal. Esto se deriva de análisis que realizaron a trabajo de campo del grupo de Mastozoología del Museo de Zoología de la Facultad de Ciencias- UNAM.

Si comparamos los resultados de la relación de la riqueza con los pisos altitudinales en los gradientes virtuales de todo el estado con el subconjunto de ANP, observamos que en estos últimos el máximo de riqueza (41 especies) es menor que cuando consideramos toda la superficie del estado (53 especies). Además el patrón observado anteriormente se rompe, pues los máximos de riqueza si bien se alcanzan en elevaciones medias, ésta se extiende hacia elevaciones mayores a los 2000msnm. En ambos casos esto nos indica un desplazamiento del límite superior de las especies hacia arriba del gradiente, siendo más pronunciados en el subconjunto de ANP. Dado que en las ANP de Oaxaca prácticamente todos los hábitats de mayor altitud (los cuales incluyen altos endemismos para mamíferos y otros grupos; Sánchez- Cordero, 2001; Peterson *et al.*, 2003; García-Mendoza *et al.*, 2004) se encuentran excluidos, esto podría afectar negativamente la representatividad de roedores y mamíferos en general en el futuro.

### **Límites de distribución altitudinal**

Al comparar los límites de las distribuciones altitudinales de las especies de roedores del tiempo presente con las del periodo 2080, encontramos para el estado de Oaxaca que la mayoría de las especies presenta cambios hacia arriba del gradiente (34, 35 y 31 especies en los escenarios A1B, A2A y B2A respectivamente). En promedio para los tres escenarios, el límite superior se movió hacia arriba del gradiente en 315m , mientras

que el inferior lo hizo en 419m. Esto es consistente con lo que han documentado estudios como el de Moritz y colaboradores (2008) quienes al repetir un muestreo hecho a principios del siglo pasado y comparar los cambios detectaron un aumento promedio aproximado de 500m hacia arriba del gradiente de los límites de distribución altitudinales para la mitad de las especies monitoreadas. Este cambio se asocia con un aumento aproximado de 3° C en la temperatura mínima mensual durante los pasados 100 años.

El promedio de las distribuciones altitudinales de todas las especies se movió significativamente hacia arriba del gradiente a una tasa de 10.85 m década<sup>-1</sup> para los tres escenarios (prueba de t versus cero N=3; t = -4.97, gl= 2, p < 0.05) , lo que apoya la hipótesis planteada que esperaba un cambio hacia arriba del gradiente.

En cuanto al subconjunto de ANP, el número de especies que presentó cambios hacia arriba del gradiente en alguno de los límites de su intervalo de distribución altitudinal fue menor (27, 27 y 21 especies para los escenarios A1B, A2A y B2A respectivamente). El promedio de los cambios fue de 368m hacia arriba del gradiente para el límite superior y de 417m para el inferior. Al igual que en el caso anterior, la tasa promedio de cambio de las distribuciones altitudinales de todas las especies (10.62m hacia arriba del gradiente década<sup>-1</sup>) fue significativamente diferente de cero (prueba de t, N= 3; t=-6.2389 ; gl=2 , p < 0.05), lo que también coincide con la hipótesis de esperar las mismas tendencias para el estado de Oaxaca y sus ANP. Asimismo, otras proyecciones, como la que se realizó para de la Sierra Juárez de Oaxaca, apoyan estos resultados, pues establecen que las condiciones actuales de precipitación y temperatura se ubicarán a altitudes al menos 175m por arriba de lo encontrado actualmente para el 2030 (Zacarías-Eslava y del Castillo, 2010)

### **Efectos mixtos de los intervalos de distribución de las especies**

No se encontró un patrón uniforme de la respuesta en intervalos de distribución a los efectos del cambio climático analizados. Algunas especies presentaron una contracción de su intervalo de distribución, otras presentaron una extensión. Incluso la respuesta de una misma especie varió entre años y escenarios. Ya otros estudios han encontrado que existe una alta diversidad de cambios en distribución respecto al aumento de

temperatura, lo que implica que no todas las especies analizadas presentan una elevación en los límites de su distribución altitudinal (Rowe *et al.*, 2011; Chen *et al.*, 2011). Meta análisis hechos con datos empíricos provenientes de un gran número de grupos taxonómicos y regiones diferentes muestran que hasta el 25% de las especies cambiaron su distribución hacia abajo del gradiente altitudinal (Chen *et al.*, 2011). Otros trabajos que estudiaron un solo grupo de manera local también encontraron que no todos los mamíferos pequeños presentaron las mismas respuestas: en las especies adaptadas a condiciones secas no hubo una extensión de su distribución hacia arriba del gradiente altitudinal. En vez de eso, mostraron una distribución estática a través del tiempo o una contracción o expansión hacia abajo del gradiente (Rowe, *et al.*, 2010)

Al menos tres procesos pueden ayudar a explicar la gran diversidad de cambios de distribución de las especies con relación al cambio climático: puede existir un “retraso” entre el cambio en las condiciones ambientales y los cambios de distribución asociados (Rowe *et al.*, 2011; Chen *et al.*, 2011); hay restricciones fisiológicas particulares de ciertas especies, o bien, existen agentes de cambio alternativos (Chen, *et al.*, 2011)

### **Rasgos de las especies y su relación con los cambios en el intervalo de distribución altitudinal**

Como se mencionó en los resultados no se observa un patrón claro que nos ayude a predecir, con base a sus rasgos ecológico, qué especies presentarán extensión o contracción bajo los efectos del cambio climático. Efectos mixtos de especies pertenecientes al mismo género han sido encontrados en otros estudios (Moritz *et al.*, 2008) quienes reportan que algunas especies de *Peromyscus* mostraron cambios en los intervalos de distribución altitudinal (*P.truei*) mientras que otros no (*P. boylii*, *P. maniculatus*). Lo mismo para los *Microtus*. En este estudio se concluye que más allá del intervalo de distribución altitudinal original, la historia de vida y los rasgos ecológicos fueron predictores pobres acerca de qué especies exhibirán un cambio en su intervalo de distribución altitudinal hacia arriba.

### **Extinciones locales en ANP**

Como se puede observar en la figura 4, existen dos inconvenientes con la superficie protegida federal de Oaxaca. La primera es que ésta es muy pequeña (alrededor del 3.2% de la superficie estatal) y además se encuentra sesgada hacia la parte centro-oeste y noroeste del Estado. Esto disminuye las probabilidades de que especies con una distribución hacia el este de Oaxaca se encuentren representadas en las ANP. Tal es el caso de *Dasyprocta mexicana*, *Heteromys desmarestianus* y *Scotinomys teguina* que a pesar de no tener una distribución potencial restringida, se encuentran prácticamente sobre la parte este y la franja noreste del estado, por lo que su distribución potencial en los diferentes escenarios y periodos considerados no se empalma con ninguna ANP. En el mismo caso se encuentra *Liomys salvini*, quien a pesar de estar en la parte suroeste de Oaxaca, tiene una distribución potencial muy restringida.

Existe la probabilidad de que otra especie sufra extinción local, bajo ciertos escenarios y periodos (*Microtus quasiater* en el A1B a partir del 2050 y en el A2A 2080). En cambio para *Orizomys rostratus*, quien no aparece en el presente, probablemente empalmará parte de su distribución con las ANP bajo algunos periodos de los escenarios A2A y B2A. Esto rechaza lo esperado para las ANP en el sentido de que las ANP actuales para Oaxaca no son representativas de la totalidad de la riqueza de roedores bajo los efectos y escenarios de cambio climático considerados.

Lo anterior apoya lo que estudios recientes han señalado sobre la necesidad de incrementar la superficie bajo esquemas de conservación en Oaxaca para mejorar la representatividad de su mastofauna (Illoldi et al., 2008). De esta manera, se han propuesto soluciones (con énfasis en los mamíferos endémicos del estado) que indican que los sitios prioritarios para conservación se encuentra principalmente en la parte centro- este y sureste del estado, teniendo los ecosistemas de montaña una porción importante de las zonas propuestas. Esto sin considerar los efectos potenciales que el cambio climático pudiera tener sobre la distribución de las especies, los cuales, con base en los resultados del presente estudio, incrementarían el valor de los sitios de montaña al menos para los roedores.



## **Consideraciones a los modelos de distribución potencial**

Existen algunas particularidades de los datos que pueden afectar la precisión de los modelos con el algoritmo Maxent:

- Las localidades de colecta pueden estar sesgadas; e.g. suelen estar correlacionadas con la presencia cercana de caminos, ríos u otros accesos (Reddy y Dávalos, 2003)
- Las localidades pueden presentar autocorrelación espacial, como cuando los investigadores colectan especímenes de varias localidades cercanas.
- Pueden existir errores en la transcripción de las localidades, falta de detalle geográfico, o la no identificación (o equivocada) de las especies.
- El número de localidades puede ser muy bajo para estimar los parámetros del modelo de una forma fiable (Stockwell y Peterson, 2002).
- El conjunto de variables puede no ser suficiente para describir todos los parámetros del nicho fundamental de la especie que son relevantes para su distribución a la escala a la que estamos modelando (Phillips *et al.*, 2006).
- Puede haber errores en las variables ambientales, debido a errores de manipulación, a baja precisión en los modelos utilizados para obtener las variables climáticas, o a la interpolación de datos de baja resolución (Phillips *et al.*, 2006).

**Asimismo, los resultados de este estudio deben ser interpretados tomando en cuenta los siguientes puntos:**

- Para los análisis de distribución en el intervalo altitudinal se consideró una distribución continua de las especies, lo cual quiere decir que se asumió que una especie está presente en todo el gradiente que va desde la menor hasta la mayor altitud en las que el modelo las registra como potencialmente presente (interpolación). Al respecto, Grytnes y Vetaas (2002) encontraron que la interpolación puede crear un decrecimiento artificial fuerte en la riqueza de especies hacia el final del gradiente. La interpolación puede sesgar los patrones de riqueza de especies hacia tener los máximos en elevaciones medias.

- Se consideró que las especies podrían migrar sin restricciones a los nuevos sitios en donde se proyectó la distribución potencial bajo los distintos escenarios. Sin embargo, una aproximación más cercana a la realidad es que muchas especies podrían presentar “huecos” entre la distribución actual y la proyectada (Bush, *et al.*, 2008; Colwell *et al.*, 2008). Por esta razón varios estudios consideran modelos que incluyan migración con restricciones o situaciones de “no migración” ( Illoldi- Rangel *et al.*, 2008; La Sorte y Jetz, 2010).

## CONCLUSIONES

Si bien es cierto que las proyecciones de las distribuciones de las especies considerando variables climáticas y basándose sólo en datos de presencia tienen cierto grado de incertidumbre, la evidencia empírica apoya los resultados al mostrar que en varias de las especies el efecto del cambio climático está provocando un movimiento en los límites de la distribución hacia arriba del gradiente (La Sorte y Jetz, 2010; Chen *et al.*, 2011). Como las montañas normalmente tienen formas cónicas, este desplazamiento resulta, como ocurrió con varias de las especies analizadas, en una pérdida del área de distribución. Esto, en una situación extrema podría favorecer extinciones en la parte más alta de la montaña (Colwell *et al.*, 2008).

En el caso de las ANP, la disminución de los sitios en los que una especie se distribuye podría ser interpretada como una disminución del área efectiva que se está protegiendo, lo que puede tener un efecto de estar “encogiendo” a las ANP en cuanto al porcentaje de la distribución de una especie que se busca proteger. Un siguiente paso es medir esta diferencia y buscar compensarla decretando una mayor superficie de ANP en donde las especies de interés tengan poblaciones.

En nuestro caso, los resultados altitudinales para todo el estado de Oaxaca apoyan la hipótesis de que en promedio de la distribución de roedores tendrá potencialmente un desplazamiento hacia arriba del gradiente (a una tasa de  $10.85 \text{ m década}^{-1}$ ) para los tres escenarios.

En cuanto a la magnitud de los cambios que se pueden presentar, estudios recientes han encontrado que los cambios latitudinales y elevacionales observados (los segundos con una tendencia menos fuerte) han sido significativamente mayores en estudios que presentan mayores niveles de aumento de temperatura (Chen, *et al.*, 2011). Esto coincide con nuestros resultados, en donde las tendencias más claras se presentaron bajo el escenario A1B, dentro del cual se proyecta que la temperatura promedio anual aumentará en  $4.26^{\circ}\text{C}$  para el Estado de Oaxaca hacia el 2080 (Anexo I Cuadro 13).

Por lo anterior, se vuelve necesario incorporar en los planes de conservación la incertidumbre que genera el cambio climático en los cambios de distribución de las especies (Trevon *et al.*, 2008).

Los mamíferos pequeños pueden estar respondiendo directamente a factores climáticos (e.g. respondiendo a cambios en la temperatura) o indirectamente a los rasgos en la vegetación que a su vez responden a cambios en el clima (McCain, 2005). Para el primer caso, si consideramos la tasa a la que varía la temperatura con respecto a la altitud en México ( $0.51^{\circ}\text{C}$  en promedio por cada 100m de elevación; McCain, 2007) y en Oaxaca en particular ( $0.7^{\circ}\text{C}$  por cada 100m de elevación; Zacarías- Eslava y del Castillo, 2010), los gradientes altitudinales representan una excelente opción de migración.

En el segundo caso, la migración hacia arriba del gradiente presenta serios inconvenientes, ya que el bosque de montaña está siendo deforestado a unas tasas anuales muy elevadas. Ocupa actualmente menos de un tercio de la superficie que tenían en épocas precolombinas (Iloldi-Rangel *et al.*, 2008).

Aunado a lo anterior es probable que las sierras oaxaqueñas no puedan brindar en un futuro cercano las condiciones climáticas en las que ahora se ubica la vegetación de altura (Zacarías-Eslava y del Castillo, 2010).

De acuerdo con nuestros resultados y con otros estudios que presentan proyecciones y evidencia empírica, una recomendación que puede contribuir a la persistencia de las especies en el tiempo es el proteger y conectar a las actuales ANP con los gradientes altitudinales cercanos que se encuentren en buen estado de conservación, lo que permitiría a algunas especies responder vía migración a los efectos en cambio climático (Moritz *et al.*, 2008; Zacarías-Eslava y del Castillo, 2010).

## LITERATURA CITADA

- Araújo, M. B., M. Cabeza, W. Thuiller, L. Hannah y P. H. Williams. 2004. Would climate change drive species out of reserves? An assesment of existing reserve- selection methods. *Global Change Biology* 10: 1618-1626
- Arita, H. T., J. A. Christen, P. Rodríguez y J. Soberón. 2008. Species diversity and distribution in presence- absence matrices: mathematical relationships and biological implications. *The American Naturalist* 172: 519-532.
- Arita, H. T., J. A. Christen, P. Rodríguez y J. Soberón. 2012. The presence-absence matrix reloaded: The use and interpretation of range-diversity plots. *Global Ecology and Biogeography* 21:282- 292.
- Briones-Salas, M. y V. Sánchez-Cordero. 2004. Mamíferos. *In Biodiversidad de Oaxaca*, A. J. García-Mendoza, M. J. Ordóñez y M. Briones-Salas (eds.). Instituto de Biología-UNAM- Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza- World Wildlife Fund, México. p. 423-448.
- Brown, J. H. 2001. Mammals on mountain sides: elevational patterns of diversity. *Global Ecology and Biogeography* 10: 101-109.
- Bush, M. B., M. R. Silman, C. McMichael y S. Saatchi. 2008. Fire, climate change and biodiversity in Amazonia: a Late-Holocene perspective. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*. 363: 1795–1802.
- Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. 2012. Ley General de Cambio Climático. 44 p.
- Ceballos, G. y G. Oliva (coords.).2005. Los mamíferos silvestres de México. Fondo de Cultura Económica, Conabio. México. 986 p.
- Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS). 2009. [http://www.ccafs-climate.org/spatial\\_downscaling/](http://www.ccafs-climate.org/spatial_downscaling/); última consulta 10.02.2009
- Chen, I. C., J. K. Hill, R. Ohlemueller, D. B. Roy y C. D. Thomas. 2011. Rapid Range Shifts of Species Associated with High Levels of Climate Warming. *Science* 333 (6045): 1024- 1026.
- Colwell, R. K., G. Brehm, C. L. Cardelús, A. C. Gilman y J. T. Longino. 2008. Global warming, elevational range shifts, and lowland biotic attrition in wet tropics. *Science* 322: 258-261.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). Áreas protegidas decretadas. 2012. <http://www.conanp.gob.mx/>; última consulta 07.12.12

- Conabio. 2006. Capital natural y bienestar social. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México. 71 p.
- Conabio-Conanp-TNC-Pronatura-FCF, UANL. 2007. Análisis de vacíos y omisiones en conservación de la biodiversidad terrestre de México: espacios y especies. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, The Nature Conservancy-
- Elith J y R. Leathwick. 2009. Species Distribution Models: Ecological Explanation and Prediction Across Space and Time. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics* 40: 677–97
- García-Mendoza, A. J., M. J. Ordóñez y M. Briones-Salas, M. (eds.). 2004. Biodiversidad de Oaxaca. Instituto de Biología-UNAM- Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza- World Wildlife Fund, México. 603 p.
- Graham, C. H. y R. J. Hijmans. 2006. A comparison of methods for mapping species ranges and species richness. *Global Ecology and Biogeography* 15: 578– 587.
- Grytnes, J. A. y O. R. Vetaas. 2002. Species richness and altitude: a comparison between null models and interpolated plant species richness along de Himalayan altitudinal gradient, Nepal. *The American Naturalist* 159: 294-304
- Heaney, L. R. 2001. Small mammal diversity along elevational gradients in the Philippines: an assessment of patterns and hypotheses. *Global Ecology and Biogeography* 10:15-39.
- Hernandez, P.A., C.H. Graham, L.L. Master y D.L. Albert. 2006. The effect of sample size and species characteristics on performance of different species distribution modeling methods. *Ecography* 29:773–785.
- Hernández, P. A., I. Franke, S. K. Herzog, V. Pacheco, L. Paniagua, H. L. Quintana, A. Soto, J. J. Swenson, C. Tovar, T. H. Valqui, J. Vargas y B. E. Young. 2008. Predicting species distributions in poorly-studied landscapes. *Biodiversity and Conservation* 17:1353–1366.
- Hijmans, R. J., S. E. Cameron, J. L. Parra, P. G. Jones y A. Jarvis. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 25: 1965- 1978.
- Hijmans, R. J., S. E. Cameron, J. Parra, P. G. Jones y A. Jarvis. 2005. Worldclim- Global Climate Data. [www.worldclim.org/](http://www.worldclim.org/); última consulta 05.10.2009

- Illoldi-Rangel, P., M. A. Linaje y V. Sánchez- Cordero. 2002. Distribución de los mamíferos terrestres en la región del Golfo de California, México. *Anales del Instituto de Biología, UNAM, Serie Zoología* 73:213-224.
- Illoldi-Rangel, P., T. Fuller, M. Linaje, C. Pappas, V. Sánchez-Cordero y S. Sarkar. 2008. Solving the maximum representation problem to prioritize areas for the conservation of terrestrial mammals at risk in Oaxaca. *Diversity and Distribution* 14: 493-508.
- Rosenzweig, C y G. Casassa. 2007. Assessment of observed changes and responses in natural and managed systems. *In Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Parry, M. L. , O. F. Canziani, J. P. Palut, P. J. van der Linden, y C. E. Hanson (eds.). Cambridge University Press, Cambridge. p 79–131.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2010. Carta de Uso del Suelo y Vegetación, Serie IV, escala 1: 250 000. México.
- Kumar, S. y T. J. Stohlgren. 2009. Maxent modeling for predicting suitable habitat for threatened and endangered tree *Canacomyrica monticola* in New Caledonia. *Journal of Ecology and Natural Environment* 1: 94-98.
- La Sorte, F. A. y W. Jetz. 2010. Projected range contractions of montane biodiversity under global warming. *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences* 277: 3401- 3410.
- Liu, C., P. M. Berry, T. P. Dawson y R. G. Pearson. 2005. Selecting thresholds of occurrence in the prediction of species distributions. *Ecography* 28: 385-393.
- Lomolino, M. V. 2001. Elevation gradients of species-density: historical and prospective views. *Global Ecology and Biogeography* 10:3-13.
- McCain, C. M. 2005. Elevational gradient diversity in small mammals. *Ecology* 86: 366-372.
- McCain, C. M. 2007. Could temperature and water availability drive elevational species richness patterns? A global case study for bats. *Global Ecology and Biogeography* 16: 1-13.
- Monteagudo, D. y L. León. 2002. Estudio comparativo de los patrones de riqueza altitudinal de especies en mastofaunas de áreas montañosas mexicanas. *Revista Mexicana de Mastozoología* 6: 60-82.

- Moritz, C., J. L. Patton, C. J. Conroy, J. L. Parra, G. C. White y S. R. Beissinger. 2008. Impact of a century of climate change on small- mammal communities in Yosemite National Park, USA. *Science* 322: 261-264.
- Nakicenovic, N., y R. Swart (Eds.) 2000. Special Report on Emissions Scenarios: a special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel of Climate Change. Cambridge University Press 599 p.
- Pachauri, R. K. y A. Reisinger (eds.). 2008. IPCC, 2007: Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. IPCC. Ginebra, Suiza 104 p.
- Parmesan, C y G. Yohe. 2003. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature* 421: 37-42.
- Patterson, B. D., G. Ceballos, W. Sechrest, M. F. Tognelli, T. Brooks, L. Luna, P. Ortega, I. Salazar y B. E. Young. 2007. Digital Distribution Maps of the Mammals of the Western Hemisphere, version 3.0. NatureServe, Arlington, Virginia, USA. [www.natureserve.org/](http://www.natureserve.org/); última consulta 05.10.2009
- Pearson, R.G. 2007. Species' Distribution Modeling for Conservation Educators and Practitioners. Synthesis. New York: American Museum of Natural History. <http://ncep.amnh.org>
- Peterson, A. T., A. G. Navarro- Sigüenza, B. E. Hernández- Baños, G. Escalona- Segura, F. Rebón- Gallardo, E. Rodríguez- Ayala, E. M. Figueroa- Esquivel y L. Cabrera- García. 2003. The Chimalapas region, Oaxaca, Mexico: a high priority region for bird conservation in Mesoamerica. *Bird Conservation International* 13: 227- 253.
- Peterson, A. T., M. A. Ortega-Huerta, J. Bartley, V. Sánchez-Cordero, J. Soberón, R. H. Buddemeier y D. R. B. Stockwell. 2002. Future projections for Mexican faunas under global climate change scenarios. *Nature* 416: 629.
- Phillips, S. J., M. Dudík y R. E. Schapire. 2004. A maximum entropy approach to species distribution modeling. *In* Proceedings of the 21st International Conference on Machine Learning, ACM Press, New York. p. 655–662.
- Phillips, S. J., R. P. Anderson y R. E. Schapire. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* 190: 231 259.
- Programa México, Pronatura, A.C., Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León, México. 127p.
- Rahbek, C. 1995. The elevational gradient of species richness: a uniform pattern? *Ecography* 18: 200-205.



- Reddy, S. y L. M. Dávalos. 2003. Geographical sampling bias and its implications for conservation priorities in Africa. *Journal of Biogeography* 30: 1719–1727.
- Rickart, E.A. 2001. Elevational diversity gradients, biogeography and the structure of montane mammal communities in the intermountain region of North America. *Global Ecology and Biogeography* 10: 77–100.
- Rosenzweig, C y G. Casassa. 2007. Assessment of observed changes and responses in natural and managed systems. In *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Parry, M. L. , O. F. Canziani, J. P. Palut, P. J. van der Linden, y C. E. Hanson (eds.). Cambridge University Press, Cambridge. p 79–131.
- Stockwell, D. R. B. y A. T. Peterson. 2002. Controlling bias in biodiversity data. In *Predicting Species Occurrences: Issues of Accuracy and Scale*, Scott, J.M., P. J. Heglund, M. L. Morrison, J. B. Haufler, M. G. Raphael, W. A. Wall y F. B. Samson (eds.). Island Press, Washington, DC. p. 537–546.
- Stockwell, D.R.B. y D.P. Peters. 1999. The GARP modelling system: Problems and solutions to automated spatial prediction. *International Journal of Geographical Information Systems* 13: 143-158.
- Torres Colín, R. 2004. Tipos de vegetación. In *Biodiversidad de Oaxaca*, García-Mendoza, A. J., M. J. Ordóñez y M. Briones-Salas (eds.). Instituto de Biología-UNAM- Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza- World Wildlife Fund, México. p. 105-120.
- Trejo, I. 2004. Clima. In *Biodiversidad de Oaxaca*, García-Mendoza, A. J., M. J. Ordóñez y M. Briones-Salas (eds.). Instituto de Biología-UNAM- Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza- World Wildlife Fund, México. p. 67-86.
- Trevon, F., D. P. Morton y S. Sarkar. 2008. Incorporating uncertainty about species' potential distributions under climate change into the selection of conservation areas with a case study from the Arctic Coastal Plain of Alaska. *Biological Conservation* 141: 1547 –1559.
- Vázquez, L. B. y Valenzuela-Galván, D. 2009. ¿Qué tan bien representados están los mamíferos mexicanos en la red federal de áreas naturales protegidas? *Revista Mexicana de Biodiversidad* 80: 249-258.
- Villalobos, F. y H. T. Arita. 2010. The diversity field of New World leaf-nosed bats (Phyllostomidae). *Global Ecology and Biogeography* 19: 200-211.

- Villers-Ruíz, L. e I. Trejo-Vázquez. 1998. Climate change on Mexican forests and natural protected areas. *Global Environmental Change* 8: 141-157.
- Williams, J. W., S. T. Jackson y J. E. Kutzbach. 2007. Projected distributions of novel and disappearing climates by 2100 AD. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 104: 5738-5742.
- WorldClim- Global climate data.2009. <http://www.worldclim.org/>; última consulta 05.10.2009.
- Zacarías- Eslava, Y. y R. F. Del Castillo. 2010. Comunidades vegetales templadas de las Sierra de Juárez, Oaxaca: pisos altitudinales y sus posibles implicaciones ante el Cambio Climático. *Boletín de la Sociedad Botánica Mexicana* 87: 13-28.

## ANEXOS

### Anexo I. Escenarios de Cambio Climático

La proyección de cómo será la tendencia en temperatura dentro de los próximos 100 años depende en buena medida de las emisiones de gases de efecto invernadero futuras. Estas emisiones son el producto de complejos sistemas dinámicos, determinados por fuerzas como el crecimiento demográfico, el desarrollo socioeconómico y el cambio tecnológico entre otros, cuya evolución futura es muy incierta (Nakicenovic y Swart, 2000).

Con base en lo anterior, el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) desarrolló un conjunto de escenarios de emisiones futuras (IEEE; SRES por sus siglas en inglés), agrupados en cuatro familias (Cuadro 12), que exploran vías de desarrollo alternativas incorporando toda una serie de fuerzas demográficas, económicas y tecnológicas, junto con las emisiones de GEI resultantes.

Los escenarios son de utilidad para el análisis del cambio climático, y en particular para la creación de modelos del clima, para la evaluación de los impactos y para las iniciativas de adaptación y de mitigación. Sin embargo, la posibilidad de que en la realidad las emisiones evolucionen exactamente como se describe en alguno de los escenarios es muy remota (Nakicenovic y Swart, 2000).

Las principales características de cada familia son (Nakicenovic y Swart, 2000; Pachaury y Reisinger, 2008):

- **A1.** Crecimiento económico mundial muy rápido, un máximo de la población mundial hacia mediados de siglo, y una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. Se divide en tres grupos, que reflejan tres direcciones alternativas de cambio tecnológico: intensiva en combustibles fósiles (A1FI), energías de origen no fósil (A1T), y equilibrio entre las distintas fuentes (A1B).
- **B1.** Mundo convergente, con la misma población mundial que A1, pero con una evolución más rápida de las estructuras económicas hacia una economía de servicios y de información.

- **B2.** Planeta con una población intermedia y un crecimiento económico intermedio, más orientada a las soluciones locales para alcanzar la sostenibilidad económica, social y medioambiental.
- **A2.** Mundo muy heterogéneo con crecimiento de población fuerte, desarrollo económico lento, y cambio tecnológico lento.

Cuadro 12. Características generales de cada familia de escenarios de cambio climático del IPCC. Elaboración propia con información del IPCC (Nakicenovic y Swart, 2000; Pachaury y Reisinger, 2008). En paréntesis aparece la estimación óptima y el intervalo probable del cambio en temperatura en °C del periodo 2090-2099 con respecto a 1980-1999.

	Global	↔	Regional
Mayor enfoque económico	<b>A1</b> Crecimiento económico rápido (A1B 2.8; 1.7-4.4)		<b>A2</b> Crecimiento económico orientado regionalmente (3.4; 2-5.4)
↑ ↓			
Mayor enfoque ambiental	<b>B1</b> Hacia la sostenibilidad global (1.8; 1.1- 2.9)		<b>B2</b> Hacia la sostenibilidad local (2.4; 1.4-3.8)

## Caso Oaxaca

Con base en los datos de la variable bioclimática BIO1, se generó una tabla para todo el Estado de Oaxaca para conocer el cambio de temperatura media anual potencial para cada periodo y escenario considerado (Cuadro 13). Como se observa, los mayores cambios se esperan bajo el escenario A1B, el cual podría llegar a tener un aumento de temperatura media anual de hasta poco más de 4°C para el periodo de 2080.

Cuadro 13. Temperatura promedio anual (°C) para todo el Estado de Oaxaca de acuerdo a los diferentes escenarios de cambio climático.

	Escenario		
	A1B	A2A	B2A
Presente	21.34	21.3	21.3
2020	22.5	22	22
2050	24.1	22.7	22.5
2080	25.6	23.8	23
Diferencia entre el escenario 2080 vs. Presente	4.26	2.5	1.7

**Anexo II.** Especies de roedores reportadas para el Estado de Oaxaca de acuerdo a Sánchez-Cordero *et al.* (2001) y Briones-Salas y Sánchez-Cordero (2004). Elaboración propia con información de CNMA y GBIF. Los nombres de las especies corresponden a la lista de Wilson y Reader (2005; <http://www.bucknell.edu/MSW3>)

X= no existieron puntos de colecta disponibles en las bases de datos de CNMA y GBIF (2010)

Especie	Familia	Puntos de colecta considerados	Distribución
<i>Cuniculus paca</i>	Cuniculidae	152	México Suramérica
<i>Baiomys musculus</i>	Cricetidae	143	México Centroamérica
<i>Sphiggurus mexicanus</i>	Erethizontidae	18	México Centroamérica
<i>Dasyprocta mexicana</i>	Dasyproctidae	22	solo México
<i>Dipodomys phillipsii</i>	Heteromyidae	30	solo México
<i>Glaucomys volans</i>	Sciuridae	168	Canadá México (solo Ontario)
<i>Habromys chinanteco</i>	Cricetidae	X	solo Oaxaca
<i>Habromys ixtlani</i>	Cricetidae	10	solo Oaxaca
<i>Habromys lepturus</i>	Cricetidae	10	solo Oaxaca
<i>Heteromys desmarestianus</i>	Heteromyidae	154	México Suramérica (solo Colombia)
<i>Hodomys alleni</i>	Cricetidae	12	solo México
<i>Liomys irroratus</i>	Heteromyidae	417	Estados Unidos (solo Texas) México
<i>Liomys pictus</i>	Heteromyidae	327	solo México
<i>Liomys salvini</i>	Heteromyidae	17	México Centroamérica
<i>Megadontomys cryophilus</i>	Cricetidae	25	solo Oaxaca
<i>Microtus mexicanus</i>	Cricetidae	285	estados unidos México
<i>Microtus oaxacensis</i>	Cricetidae	14	solo Oaxaca
<i>Microtus quasiater</i>	Cricetidae	65	solo México
<i>Microtus umbrosus</i>	Cricetidae	X	
<i>Neotoma mexicana</i>	Cricetidae	408	Estados Unidos Guatemala
<i>Nyctomys sumichrasti</i>	Cricetidae	25	México Centroamérica
<i>Oligoryzomys fulvescens</i>	Cricetidae	164	México Suramérica
<i>Orthogeomys cuniculus</i>	Geomyidae		
<i>Orthogeomys grandis</i>	Geomyidae	16	México Centroamérica
<i>Orthogeomys hispidus</i>	Geomyidae	49	México Centroamérica
<i>Oryzomys alfaroi</i>	Cricetidae	121	México Suramérica
<i>Oryzomys chapmani</i>	Cricetidae	143	solo México
<i>Oryzomys couesi</i>	Cricetidae	309	México Centroamérica
<i>Oryzomys melanotis</i>	Cricetidae	28	solo México
<i>Oryzomys rostratus</i>	Cricetidae	17	solo México
<i>Peromyscus aztecus</i>	Cricetidae	108	México Centroamérica
<i>Peromyscus beatae</i>	Cricetidae	19	México Guatemala
<i>Peromyscus difficilis</i>	Cricetidae	219	solo México
<i>Peromyscus furvus</i>	Cricetidae	83	solo México

Especie	Familia	Puntos de colecta considerados	Distribución
<i>Peromyscus gratus</i>	Cricetidae	107	Estados Unidos México
<i>Peromyscus leucopus</i>	Cricetidae	1447	Canadá México (solo Ontario)
<i>Peromyscus levipes</i>	Cricetidae	197	solo México
<i>Peromyscus maniculatus</i>	Cricetidae	2059	Canadá México
<i>Peromyscus megalops</i>	Cricetidae	42	solo México
<i>Peromyscus melanocarpus</i>	Cricetidae	44	solo Oaxaca
<i>Peromyscus melanophrys</i>	Cricetidae	142	solo México
<i>Peromyscus melanurus</i>	Cricetidae	22	solo Oaxaca
<i>Peromyscus mexicanus</i>	Cricetidae	222	México Centroamérica
<i>Reithrodontomys fulvescens</i>	Cricetidae	662	estados unidos México
<i>Reithrodontomys megalotis</i>	Cricetidae	764	Canadá México (solo British Columbia)
<i>Reithrodontomys mexicanus</i>	Cricetidae	49	México Suramérica
<i>Reithrodontomys microdon</i>	Cricetidae	10	México Guatemala
<i>Reithrodontomys sumichrasti</i>	Cricetidae	136	México Centroamérica
<i>Rheomys mexicanus</i>	Cricetidae	X	
<i>Sciurus aureogaster</i>	Sciuridae	156	solo México
<i>Sciurus deppei</i>	Sciuridae	69	México Centroamérica
<i>Scotinomys teguina</i>	Cricetidae	14	México Centroamérica
<i>Sigmodon alleni</i>	Cricetidae	11	solo México
<i>Sigmodon hispidus</i>	Cricetidae	1143	Estados Unidos Suramérica
<i>Sigmodon leucotis</i>	Cricetidae	18	solo México
<i>Sigmodon mascotensis</i>	Cricetidae	106	solo México
<i>Tylomys nudicaudus</i>	Cricetidae	28	México Centroamérica

### **Anexo III. Variables bioclimáticas utilizadas para generar los modelos con el algoritmo Maxent**

Las cuatro variables principales, a partir de las cuales derivan las demás son:

- Temperatura media mensual promedio
- Temperatura mínima mensual promedio
- Temperatura máxima mensual promedio
- Precipitación mensual promedio

Así, las 19 variables bioclimáticas se definen como:

- BIO1 = Temperatura media anual
- BIO2 = Intervalo de temperatura media diurna (promedio diferencia de la máxima temperatura mensual- la mínima temperatura mensual)
- BIO3 = Isotermalidad (BIO2/BIO7) (\* 100)
- BIO4 = Estacionalidad de temperatura (desviación estándar \*100)
- BIO5 = Temperatura máxima del mes más cálido.
- BIO6 = Temperatura mínima del mes más frío
- BIO7 = Intervalo anual de temperatura (BIO5-BIO6)
- BIO8 = Temperatura media del trimestre más húmedo
- BIO9 = Temperatura media del trimestre más seco
- BIO10 = Temperatura media del trimestre más cálido
- BIO11 = Temperatura media del trimestre más frío
- BIO12 = Precipitación anual
- BIO13 = Precipitación del mes más húmedo
- BIO14 = Precipitación del mes más seco
- BIO15 = Estacionalidad de precipitación (coeficiente de variación)
- BIO16 = Precipitación del trimestre más húmedo
- BIO17 = Precipitación del trimestre más seco
- BIO18 = Precipitación del trimestre más cálido
- BIO19 = Precipitación del trimestre más frío

Notas: a) la estacionalidad de temperatura en este caso es la desviación estándar \*100 de la temperatura media mensual; b) En este caso un trimestre no está alineado con el calendario. Sólo se refiere a un periodo de 13 semanas consecutivas (3 meses consecutivos en el caso de que los datos originales se proporcionen con esta periodicidad).



**Anexo IV. Mapas de distribución potencial de roedores para el Estado de Oaxaca, bajo el escenario A1B 2080 de Cambio Climático de acuerdo al modelo CCCMA-CGCM3.1 del Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis.**

