



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE
MEXICO

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE
MEXICO**

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES IZTACALA

**EFFECTO DEL CAMBIO CLIMATICO EN CINCO ESPECIES DEL LIMITE
ARBOREO, ESTUDIOS DE CASO**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

BIOLOGO

P R E S E N T A:

OSCAR ARTURO ANGELES MANZANO

DIRECTOR DE LA TESIS:

DR. OSWALDO TELLEZ VALDES



LOS REYES IZTACALA, EDO. DE MEXICO, 2015



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.

Agradecimientos.

A la UNAM por ser hacerme un profesionista y a todos los maestros que me transmitieron sus conocimientos.

Al programa de becas PAPIIT por apoyarme con la beca para poder terminar mis estudios.

Y en especial al Dr. Oswaldo Tellez Valdés por orientarme y ayudarme en esta etapa de mis estudios.

Dedicatorias.

A mis padres, las personas más importantes en mi vida este logro es para ustedes, les agradezco haberme enseñado a ser la persona que soy sin ustedes estaría perdido.

A mi hermana, no puedo imaginarme una vida sin su molesta presencia..... la cual amo infinitamente.

A ceci cervantes, gracias cariño por tu apoyo eres un faro.

A mis amigos, los puedo contar con los dedos de la mano pero bastan para llenar un estadio con sus recuerdos. Todos ustedes son importantes para mi.

En memoria de:

Ivan Nava Gonzales, algún día nos veremos amigo allá donde estés.

ÍNDICE

Resumen.....	4
Introducción.....	5
Antecedentes.....	8
Objetivo general.....	9
Objetivos particulares.....	9
Material y métodos.....	11
Estructuración de la base de datos.....	11
Modelado de la distribución potencial.....	11
Modelado del cambio climático.....	13
Resultados.....	13
Discusión.....	25
Conclusiones.....	28
Literatura citada.....	29

Resumen.

El cambio climático global y sus posibles efectos en la distribución y abundancia de la biodiversidad se encuentran entre los retos más importantes de la biología de la conservación. El incremento de la temperatura tiene consecuencias en la intensidad de los fenómenos del clima en todo el mundo, esto tiene implicaciones biológicas que pueden ser estudiadas y monitoreadas, una herramienta muy útil para estos fines son los sistemas de información geográfica que junto con los modelos de cambio climático pueden predecir el comportamiento de las especies.

Los modelos de cambio climático generan escenarios de dimensión global, estos consideran las condiciones climáticas actuales y los modelos climáticos del pasado y del futuro, estos permiten estimar la distribución potencial, para el tiempo en que el clima ha sido modelado así se puede formular una hipótesis sobre la distribución geográfica de las especies, lo que es de enorme utilidad para abordar diferentes preguntas biológicas

Las comunidades que se establecen en las partes más altas de las montañas, por encima del límite altitudinal de la vegetación arbórea, se denominan del límite arbóreo y son ambientes que se caracterizan generalmente por la presencia de musgos, pastos, arbustos postrados y herbáceas

En el centro de México esta vegetación se encuentra a partir de los 4.000 msnm; mientras que para el NE del país se localiza a 3.450 msnm.

Las zonas del límite arbóreo de México, albergan diversas especies endémicas, y ocupan solo el 1% del territorio nacional. En un escenario de calentamiento global, dichas especies son las más susceptibles de ser afectadas por estar adaptadas a condiciones frías. Como respuesta al cambio climático, las especies pueden mantener o modificar sus áreas de distribución, atendiendo a tres tipos de respuesta: 1) adaptación a nuevas condiciones ambientales, 2) migración hacia nuevos sitios, 3) extinciones.

En este trabajo se analizara los posibles efectos del cambio climático en la distribución geográfica de cinco especies de Gramineae que habitan en el límite arbóreo, mediante el uso de modelos de nicho ecológico que permitan identificar su distribución potencial para el presente y para escenarios de cambio climático en los años a) 2050, b) 2080.

Respecto a las especies estas no sufrirán problemas tan drásticos, la diferencia está en la probabilidad de ocurrencia o idoneidad. Estas siguen dentro de las ANP, y tienden a migrar altitudinalmente.

Introducción.

El cambio climático se considera como el incremento de temperatura en el planeta, vinculado con el aumento en la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera, producto de actividades humanas relacionadas con la quema de combustibles fósiles (petróleo, carbón) y el cambio en el uso de suelo. Este aumento de temperatura tiene consecuencias en la intensidad de los fenómenos del clima en todo el mundo (FAO, 2013).

El llamado “efecto invernadero” se presenta cuando al atravesar la atmósfera del planeta, una pequeña fracción de la radiación de onda corta visible que emite el sol es reflejada, mientras que la mayor parte es absorbida por la Tierra, calentándola. Al calentarse, la superficie del planeta emite radiación de onda larga infrarroja hacia el espacio, una parte de ella logra atravesar la atmósfera, mientras que la otra es absorbida y remitida a todas direcciones por las nubes y los gases contenidos de manera natural en la troposfera, como el bióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O), el ozono (O₃) y el vapor de agua (H₂O), gracias a ello es posible que la temperatura promedio del planeta sea de 15° C y, por lo tanto, que existan condiciones aptas para la vida.

Sin embargo, al aumentar concentraciones de estos gases hay mayor absorción de radiación infrarroja, dando como resultado un aumento en la temperatura y con ello lo que se conoce como “cambio climático global” (Gay – García, 2000).

El cambio climático global y sus posibles efectos en la distribución y abundancia de la biodiversidad se encuentran entre los retos más importantes de la biología de la conservación, en este sentido, fuentes de evidencia sugieren que a finales del siglo XXI habrá un aumento global de temperatura entre 1.4 y 5.8 C, entre otros cambios (Lira *et al.*, 2008).

De los 12 últimos años (1995-2007), 11 figuran entre los más cálidos en los registros instrumentales de la temperatura de la superficie mundial (desde 1850). La tendencia lineal a 100 años (1906-2005), cifrada en 0,74° C es superior a la tendencia correspondiente de 0,6° C (1901-2000) indicada en el Tercer Informe de Evaluación por el panel intergubernamental sobre el cambio climático. Este aumento de temperatura está distribuido por todo el planeta y es más

acentuado en las latitudes septentrionales superiores, las regiones terrestres se han calentado más rápidamente que los océanos (IPCC, 2007).

Los modelos de cambio climático generan escenarios de dimensión global, aunque muchos de sus impactos se presenten a escala regional en combinación con modelos de mesoescala, además de presentar solo dos variables como la temperatura del aire y la precipitación pluvial, que aunque muy importantes, éstas se encuentran en sinergia con otros factores (Barradas *et al.*, 2011).

Los modelos de distribución, consideran las condiciones climáticas actuales y los modelos climáticos del pasado y del futuro, estos modelos permiten estimar la distribución potencial, para el tiempo en que el clima ha sido modelado (Lawley *et al.*, 2006). El hecho de que el clima y los factores físicos afectan profundamente la distribución de las especies ha sido conocido por mucho tiempo, en las últimas dos décadas se han desarrollado métodos matemáticos para designar la extensión geográfica del nicho ecológico (Soberón y Peterson, 2005). La predicción de la distribución de las especies con base en variables ambientales se fundamenta con la teoría de nicho formalizada por Hutchinson en 1957 y las predicciones que se hacen sobre la distribución de las especies bajo estos escenarios son llamados modelos de nicho ecológico (Lawley *et al.*, 2006).

Estos modelos permiten formular una hipótesis sobre la distribución geográfica de las especies, lo que es de enorme utilidad para abordar diferentes preguntas biológicas (Guisan y Thuiller, 2005). Las comunidades que se establecen en las partes más altas de las montañas, por encima del límite altitudinal de la vegetación arbórea, se denominan del límite arbóreo y son ambientes que se caracterizan generalmente por la presencia de musgos, pastos, arbustos postrados y herbáceas (Rzedowski, 2006). En el centro de México esta vegetación se encuentra a partir de los 4.000 msnm; mientras que para el NE del país se localiza a 3.450 msnm (Rzedowski, 2006).

Las zonas del límite arbóreo de México, albergan diversas especies endémicas, y ocupan solo el 1% del territorio nacional. En un escenario de calentamiento global, dichas especies son las más susceptibles de ser afectadas por estar adaptadas a condiciones frías. Como respuesta al cambio climático, las especies pueden mantener o modificar sus áreas de distribución, atendiendo a tres tipos de respuesta: 1) adaptación a nuevas condiciones ambientales, 2)

migración hacia nuevos sitios, 3) extinciones (Aitken, 2008). La vegetación de cadenas montañosas, y en particular la del límite arbóreo, responde con procesos migratorios altitudinales por el aumento de la temperatura, y de cumplirse las predicciones del incremento progresivo de ésta, las especies de altas montañas experimentarán procesos de extinción (Salas *et al.*, 2011). A nivel de las poblaciones, estas respuestas varían dependiendo de las especies y su capacidad de respuesta a los cambios, es decir, hay especies que tienen gran amplitud de su nicho (generalistas) que pueden verse beneficiadas por las modificaciones en el clima por lo que podrían responder aumentando sus poblaciones e incluso aumentando su área de distribución geográfica. Sin embargo, existen otras especies con una reducida amplitud de su nicho (especialistas) que potencialmente se verán afectadas más drásticamente por los cambios, es decir tienen una mayor sensibilidad al efecto del cambio climático (Vié *et al.*, 2009). Ninguna especie, por generalista que sea, presenta poblaciones en todos los lugares, siempre encontraremos a las especies en un conjunto espacialmente discontinuo de fragmentos de hábitat adecuado inmersos en fragmentos de hábitat inadecuado a las especies lo que demuestra que tienen límites de tolerancia a factores ambientales y a la exclusión competitiva (Vié *et al.*, 2009).

El éxito del proceso de migración radica en la ejecución de cuatro componentes básicos: fecundidad, dispersión, establecimiento (germinación y sobrevivencia) y reproducción de plantas adultas que sean fecundas. Los altos niveles de fragmentación, que se presentan en las altas montañas por el uso excesivo de los recursos forestales, dificultarán la emigración y quizá esto favorecerá a las especies invasoras o herbáceas (Neilson *et al.*, 2005).

El Eje Volcánico Transversal presenta una riqueza florística alta, ya que aquí convergen las regiones neártica y neotropical, lo que junto con otros factores contribuye a que sea una de las zonas con mayor riqueza biológica del país, el EVT tiene importancia tanto biológica, como geológica, ecológica, económica y social (Mota y Téllez, 2014). Las gramíneas se encuentran en prácticamente todos los ambientes, desde nivel del mar hasta la cima de las altas montañas. Se estima que hay alrededor de 700 géneros y 10000 especies de gramíneas en el mundo, 204 géneros y 1182 especies se encuentran en México, los pastos son de las plantas de más importancia ecológica por su capacidad de formar suelos, su diversidad y porque son elementos naturales de la vegetación primaria (Smith *et al.*, 2004)

Ante el escenario antes descrito y dado que la mayoría de las plantas en el límite arbóreo, son muy sensibles a perturbaciones relacionadas con la temperatura, se espera que sean uno de

los grupos biológicos terrestres donde puedan detectarse los cambios climáticos. Por lo que el objetivo del presente estudio será el de evaluar los efectos del cambio climático sobre cinco especies de Gramineae características de ambientes de alta montaña en el límite arbóreo.

En este trabajo se analizará los posibles efectos del cambio climático en la distribución geográfica de cinco especies de Gramineae que habitan en el límite arbóreo, mediante el uso de modelos de nicho ecológico que permitan identificar su distribución potencial para el presente y para escenarios de cambio climático en los años a) 2050, b) 2080. Así mismo, evaluar el papel de las áreas naturales protegidas en la conservación a largo plazo de estas especies, de acuerdo con Araújo *et al.* (2004), quien refiere que los efectos del cambio climático no están contemplados en los protocolos de selección de las ANP, y que debería estar enfocado a considerar el movimiento de las especies y a asegurar la conservación de estas.

Antecedentes.

Se ha modelado la distribución potencial de distintos grupos biológicos, incluyendo especies de plantas, pero los estudios sobre el impacto del cambio climático han sido más frecuentes en especies alpinas (Thuiller *et al.*, 2005). En México existen casos que abordan grupos de plantas de distintos ambientes, pero no los de alta montaña. Por ejemplo, sobre cactáceas en la Reserva de la biosfera Tehuacán-Cuicatlán bajo escenarios de cambio climático, en donde se muestra que para las especies endémicas de cactáceas puede reducirse la distribución en más del 50% (Tellez-Valdés y Dávila-Aranda, 2003). También se ha analizado la distribución pasada, presente y futura de diversas especies en el Desierto Chihuahuense, mostrando en las proyecciones futuras, que la fragmentación del hábitat aunado al calentamiento global pondrá en riesgo de extinción las especies de distribución restringida, poco vágiles y especialistas (Ballesteros-Barrera, 2000). Otros estudios, como el de Téllez *et al.* (2006), estudian el efecto del cambio climático sobre los patrones de distribución y abundancia del bosque de niebla en México usando como modelo *Fagus grandifolia* o haya americana ya que es una especie restringida y dominante de este tipo de vegetación. Asimismo, Villaseñor y Téllez (2004) determinaron la distribución potencial de cuatro especies del género *Jefea*, para esto evaluaron 19 parámetros climáticos y la distribución conocida de las especies, encontrando que su distribución abarca 26 regiones terrestres prioritarias de México aunque los registros de herbario solo registran su presencia en seis de ellas. Lira *et al.* (2008) modelaron dos posibles escenarios

de cambio climático en México utilizados para analizar los patrones de distribución de ocho cucurbitáceas silvestres, el modelo indica que los taxa no tienen muchas oportunidades de sobrevivir al cambio climático; sin embargo, la capacidad para mantener una densidad poblacional aislada por largos periodos puede ser mitigadora.

Son muy abundantes los trabajos realizados sobre el efecto del cambio climático en la flora y fauna, cada vez se hace más importante reconocer los riesgos que esto implica, es así que se ha optado por nuevas técnicas y metodologías para su estudio, este es el caso de Pottier *et al.* (2014), quienes utilizaron imágenes de espectroscopia aérea para predecir la distribución de los pastos alpinos en sistemas montañosos de Francia y Suiza, encontrando que los modelos de distribución y las imágenes espectroscópicas revelan resultados similares para ambos sitios, la ventaja de estas últimas radica en la resolución con la que se puede mapear una zona y la información que estas proporcionan.

Objetivo general

- Evaluar los efectos del cambio climático en la distribución potencial de cinco especies de Gramineae del límite arbóreo.

Objetivos particulares.

- Modelar la distribución potencial actual de 5 especies de plantas del límite arbóreo de la familia Gramineae en el Eje Volcánico Transversal.
- Modelar la distribución en proyecciones de cambio climático.
- Analizar la importancia de las áreas naturales protegidas en su conservación a largo plazo.

Área de estudio

El Eje Volcánico Transversal comprende la parte central del país, en esta zona se localizan los sistemas montañosos más altos del país el Popocatepetl, el Iztacihuatl, la Malinche, Cofre de Perote y Pico de Orizaba el cual es la cima más alta del país alcanzando los 5,610 m, el EVT corre aproximadamente 1000 km longitudinalmente de oeste a este hacia la latitud del paralelo 19° N, con ramales en torno al Anahuac que alcanzan el paralelo 20° N, extendiéndose con una anchura media de 180 km.

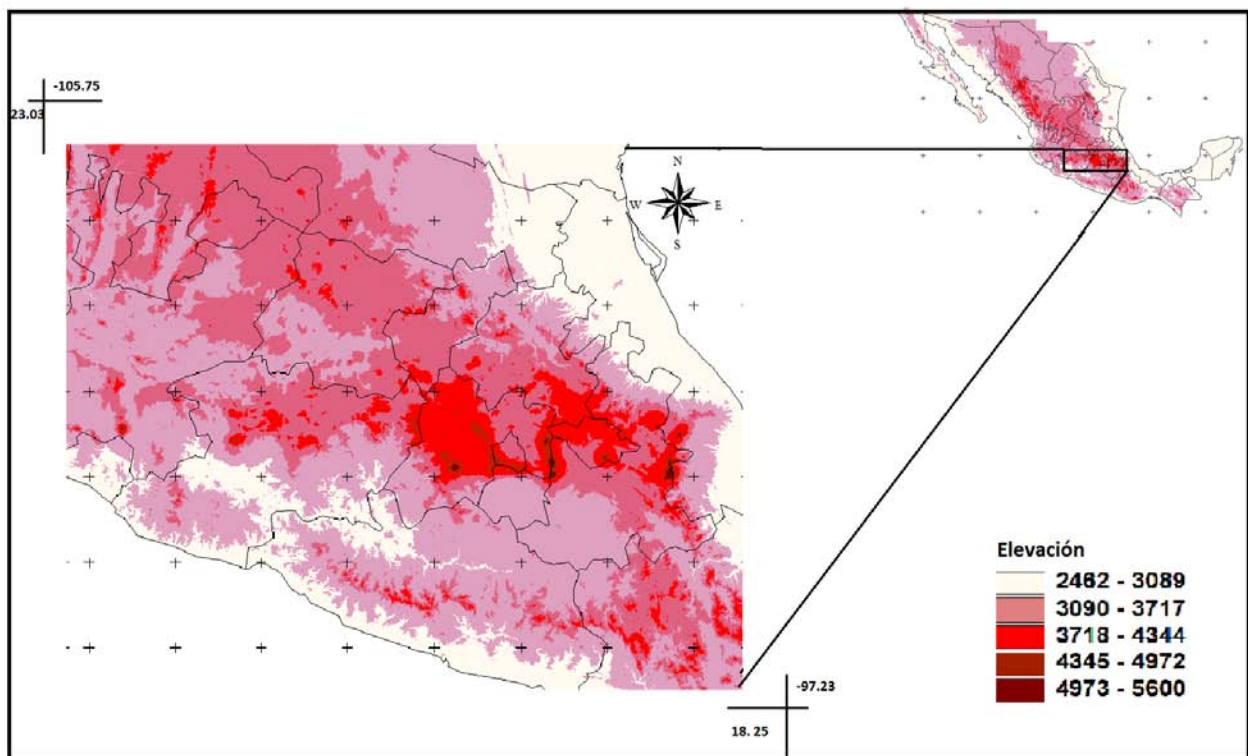


Figura 1: Zona central del país se muestra un cercamiento al EVT, en rojo intenso se muestra las mayores altitudes donde se centra este trabajo.

Material y métodos.

Estructuración de la base de datos.

Las bases de datos constaron de registros compilados de la REMIB (http://www.conabio.gob.mx/remib/doctos/remib_esp.html), y de la SNIB (CONABIO). Los errores de georeferenciación se corroboraron en Google Earth 7.0.3.8542. Las altitudes se obtuvieron con un modelo digital de elevación y la utilización del programa ArcView 3.2, Para restringir el estudio a las zonas del límite arbóreo se seleccionaron los registros de más de 2500 msnm de las montañas del Eje Volcánico Transversal ya que en algunas de estas las especies alcanzan su límite de distribución altitudinal inferior. Se seleccionaron especies de la familia Gramineae que es el grupo que domina en estos ambientes inhóspitos. Se caracterizan por ser herbáceas de porte pequeño, agrupadas en macollos generalmente, son polinizadas por viento, con dispersión anemócora, y comúnmente se propagan de forma vegetativa por medio de estolones (Smith *et al.*, 2004).

Modelado de la distribución potencial.

Para esta tesis se realizó un escalamiento estadístico que permitió generar a una mayor resolución los modelos, se requirió de tres condiciones climáticas mundiales: temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación. Con ayuda del modelador BIOCLIM se generaron los perfiles bioclimáticos, el programa requiere de un modelo digital de elevación del área de estudio (MDE) y de un conjunto de puntos georreferenciados que representen sitios donde se encuentra la especie, los métodos del programa han sido descritos con detalle por Nix (1986) y Lindenmayer *et al.* (1991).

Se determinó la distribución actual y futura de 5 especies de plantas del límite arbóreo mediante el programa MaxEnt 3.3.3k cuyo algoritmo es el de Máxima Entropía Phillips *et al.* (2006). En el cual se combinan superficies climáticas, interpoladas matemática y estadísticamente a partir de datos registrados en una red de estaciones meteorológicas estándar (Cuervo-Robayo *et al.*, 2013).

Para calibrar el modelado de las especies se utilizó el 80% de los registros para el entrenamiento y generación del modelo y el 20% restante para prueba. Los modelos tienen una resolución espacial de 90 m² y fueron generados con la configuración de 15 replicas, 2500

iteraciones, sin extrapolar y sin hacer clamping para evitar extrapolaciones o acotaciones artificiales en los valores extremos de las variables ecológicas (Elith *et al.*, 2011). Para conocer cuales variables influyeron mas en el desempeño de los modelos se uso la prueba de jack-knife que aplica el mismo programa MaxEnt. Los modelos resultantes se generaron bajo el formato logístico que utiliza un intervalo de idoneidad que va de 0 a 1 en una escala logarítmica, los modelos se editaron en ArcView tomando en cuenta el valor de corte de la escala cuando los valores de sensibilidad y sensibilidad de entrenamiento eran iguales, para obtener la superficie más aproximada de acuerdo con Phillips *et al.* (2006)

Los valores de los 19 parámetros climáticos (cuadro 1) utilizados por Maxent para generar los mapas de distribución potencial actuales y futuros estuvieron basados en aquellas capas reajustadas (downscaled) basadas en las capas de WorldClim (<http://www.worldclim.org/>). Estos son valores mensuales de temperatura y precipitación promedio mensuales que fueron ajustados en el programa BIOCLIM para las capas interpoladas por Cuervo-Robayo et al. (2103), para lograr tener una resolución final de celdas de ca. 1 ha (90 x 90 m).

Tabla 1: Listado de variables climáticas.

No.	Parámetros
1	Temperatura promedio anual (°C)
2	Oscilación diurna de la temperatura (°C)
3	Isotermalidad (°C) (cociente entre parámetros 2 y7)
4	Estacionalidad de la temperatura (coeficiente de variación, en %)
5	Temperatura máxima promedio del periodo más cálido (°C)
6	Temperatura mínima promedio del periodo más frío (°C)
7	Oscilación anual de la temperatura (°C) (cociente entre parámetros 5 y 6)
8	Temperatura promedio del trimestre más lluvioso (°C)
9	Temperatura promedio del trimestre más lluvioso (°C)
10	Temperatura promedio del trimestre más cálido (°C)
11	Temperatura promedio del trimestre mas frio (°C)
12	Precipitación anual (mm)
13	Precipitación del periodo más lluvioso (mm)
14	Precipitación del periodo más seco (mm)

15	Estacionalidad de la precipitación (coeficiente de variación, en %)
16	Precipitación del trimestre más lluvioso (mm)
17	Precipitación del trimestre más seco (mm)
18	Precipitación del trimestre ms cálido (mm)
19	Precipitación del trimestre más frío (mm)

Modelado del cambio climático.

Para evaluar los efectos del cambio climático, se desarrollaron proyecciones climáticas futuras, bajo el escenario A1B (mpi_echam5), elegido con base a la guía de escenarios de cambio climático a escala regional (Conde-Álvarez y Gay-García, 2008) y descargado desde el portal de Downscaling Global Circulation Model (GMC) (<http://www.ccafs-climate.org/>). Las capas fueron reescaladas a celdas de alta resolución de 90 x 90 m (ca. 1 ha), con ayuda del programa ANUCLIM 6.1 (Xu & hutchinson, 2011).

Resultados.

La base de datos consistió de 139 registros para las 5 especies, *Festuca lívida* (17), *Festuca toluensis* (21), *Festuca amplissima* (16), *Stipa ichu* (63) y *Muhlenbergia macroura* (22). Todas con una amplia distribución a lo largo del país, excepto *F. lívida* que solo se distribuye en Puebla, Veracruz y el D.F. Para este estudio los registros se restringieron a las zonas del límite arbóreo superiores a los 2500 msnm en las montañas del Eje Volcánico Transversal. Para todos los modelos de distribución potencial actual y de cambio climático, se estimó la superficie en kilómetros cuadrados y el valor de idoneidad (cuadros 1 - 5).

<i>Festuca lívida</i> /valor de idoneidad	Distribución potencial Actual (Km ²)	2050	2080
4	156.86	200.91	223.86
5	119.23	167.68	147.35
6	93.90	120.65	109.33
7	96.93	83.590	82.35
8	67.01	55.120	32.07
9	12.35	28.620	26.90

Cuadro 1. Se muestra el área expresada en km² para cada probabilidad de ocurrencia en la distribución potencial actual y de cambio climático de *Festuca lívida*.

Para *Festuca livida* se predice una tendencia en general variable a contraer y expandir su área para los años 2050 y 2080 (cuadro 1). En detalle en las áreas más idóneas la expansión es menor, mientras que es mucho mayor en áreas menos idóneas ambientalmente (Fig. 2).

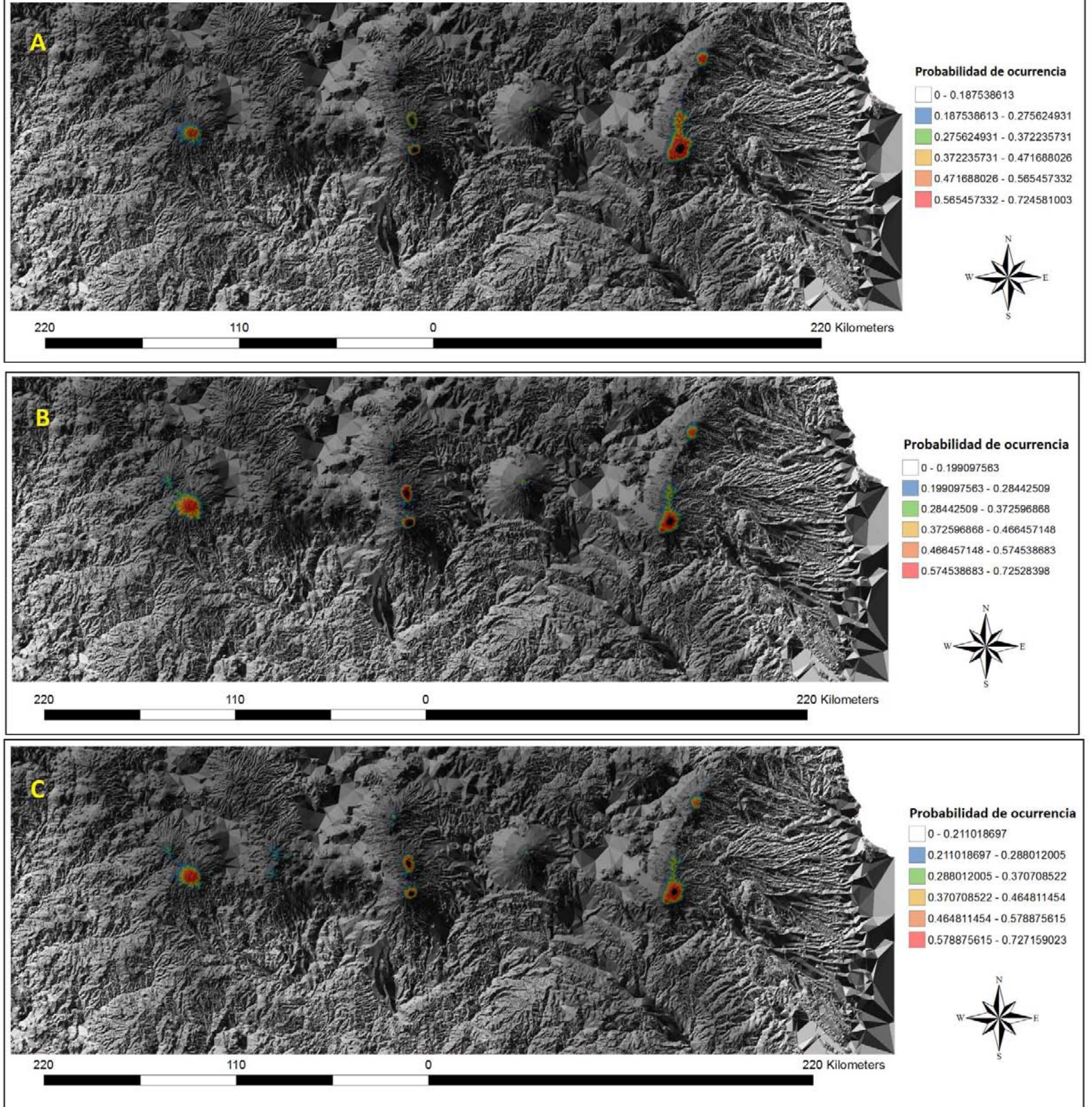


Fig. 2: Se muestra la distribución potencial actual (A) y potencial futura para los años 2050 (B) y 2080 (C) para el caso de *Festuca lúvida* en los principales volcanes del EVT.

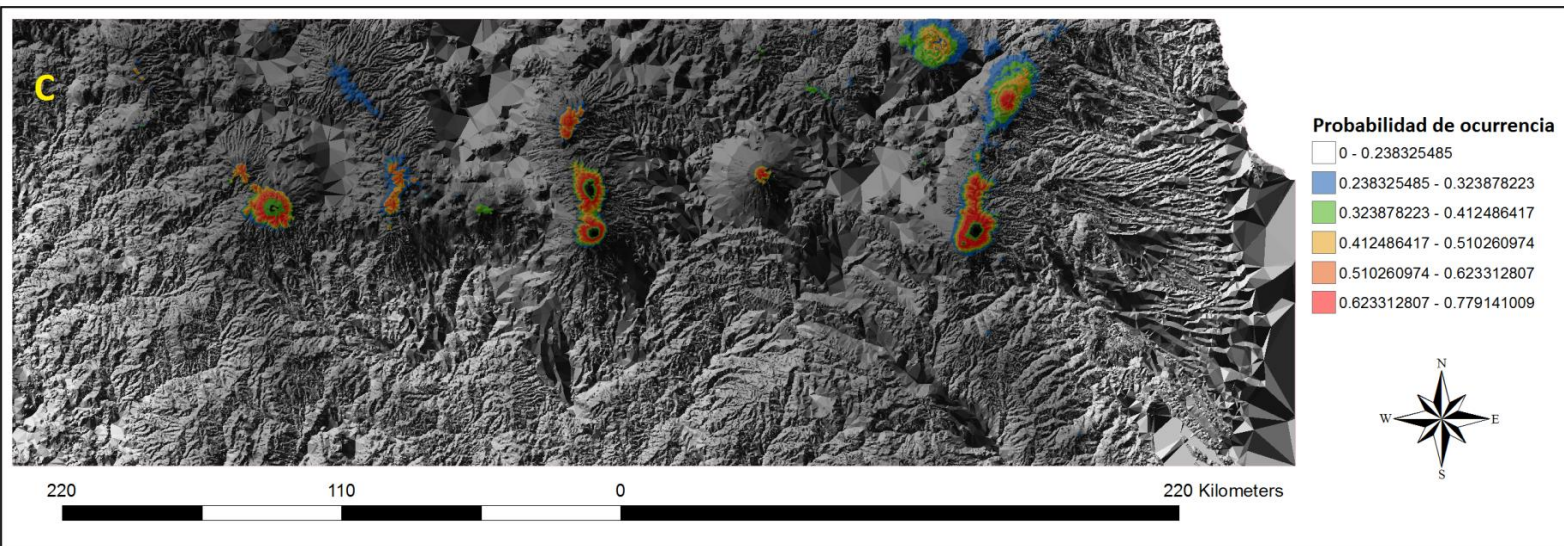
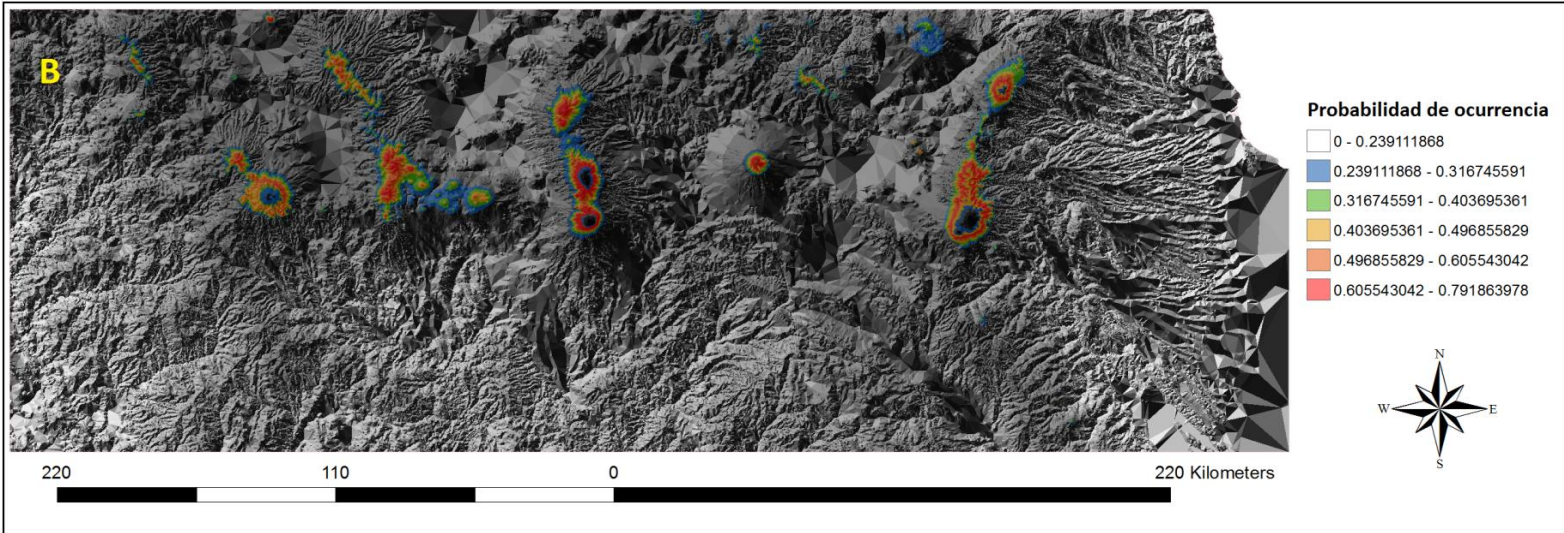
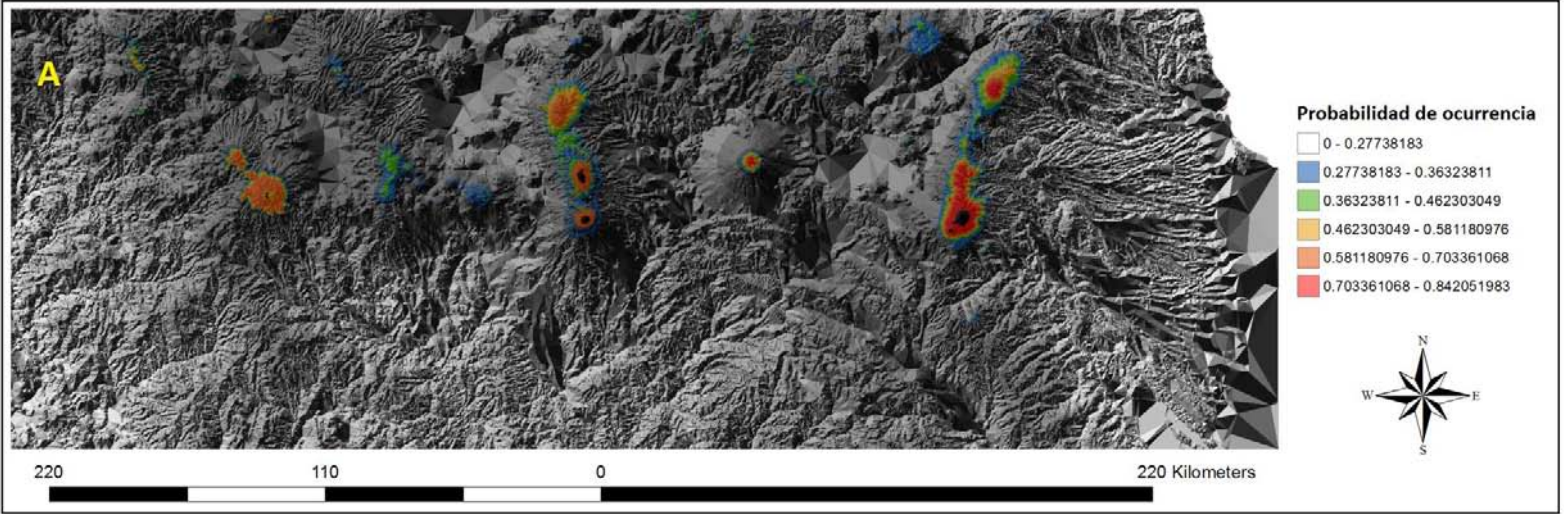


Fig. 3: Se muestra la distribución potencial actual (A) y potencial futura para los años 2050 (B) y 2080 (C) en el caso de *Festuca toluensis*, en los principales volcanes del EVT.

<i>Festuca toluensis</i> /valor de idoneidad	Distribución potencial Actual (Km ²)	2050	2080
5	569.84	675.07	801.61
6	300.59	606.89	633.80
7	343.48	373.02	425.34
8	321.79	231.05	298.20
9	130.71	71.060	238.05

Cuadro 2: Se muestra el área de en km² para *F. toluensis*, en los principales volcanes del EVT.

Los resultados para *F. toluensis* predicen que la especie encontrara sus requerimientos ambientales expandiendo su área de distribución en el modelo para el año 2050, sin embargo para el 2080 el área en donde se tenían registros, sus poblaciones desaparecen (Fig. 3).

<i>Festuca amplissima</i> /valor de idoneidad	Distribución potencial Actual (Km ²)	2050	2080
4	2893.6	2602.2	2801.3
5	2281.6	1988.8	1919.8
6	1194.6	1018.7	879.54
7	619.74	579.27	611.01
8	353.75	439.5	403.8
9	212.98	215.27	111

Cuadro 3: comparativo de el área en km² de la especie *F. amplissima*, en los principales volcanes del EVT.

Para *F. amplissima* se prevé en general una contracción en su área de distribución tanto para el año 2050 como para el 2080 (cuadro 3). Por otro lado los mapas de distribución potencial actual después del cambio climático (Fig. 4) muestran que no hay nuevas áreas que la especie pueda ocupar.

<i>Stipa ichu</i> /valor de idoneidad	Distribución potencial Actual (Km ²)	2050	2080
5	1125.6	1211.3	766.53
6	1308.2	1438.2	1028.8
7	1482.1	1228.3	1256.7
8	366.01	820.17	886.89
9	114.76	416.11	492.33

Cuadro 4: Se muestra en km² el área de distribución para *S. ichu*, en los principales volcanes del EVT.

La tendencia que muestran los resultados para *S. ichu* es a expandirse en el modelo de 2050 y contraerse en el de 2080 (cuadro 4), por otro lado los mapas de cambio climático predicen una mayor probabilidad de que la especie encuentre su nicho ecológico en algunos picos que en el modelo de distribución potencial actual no se mostraba (Fig. 5).

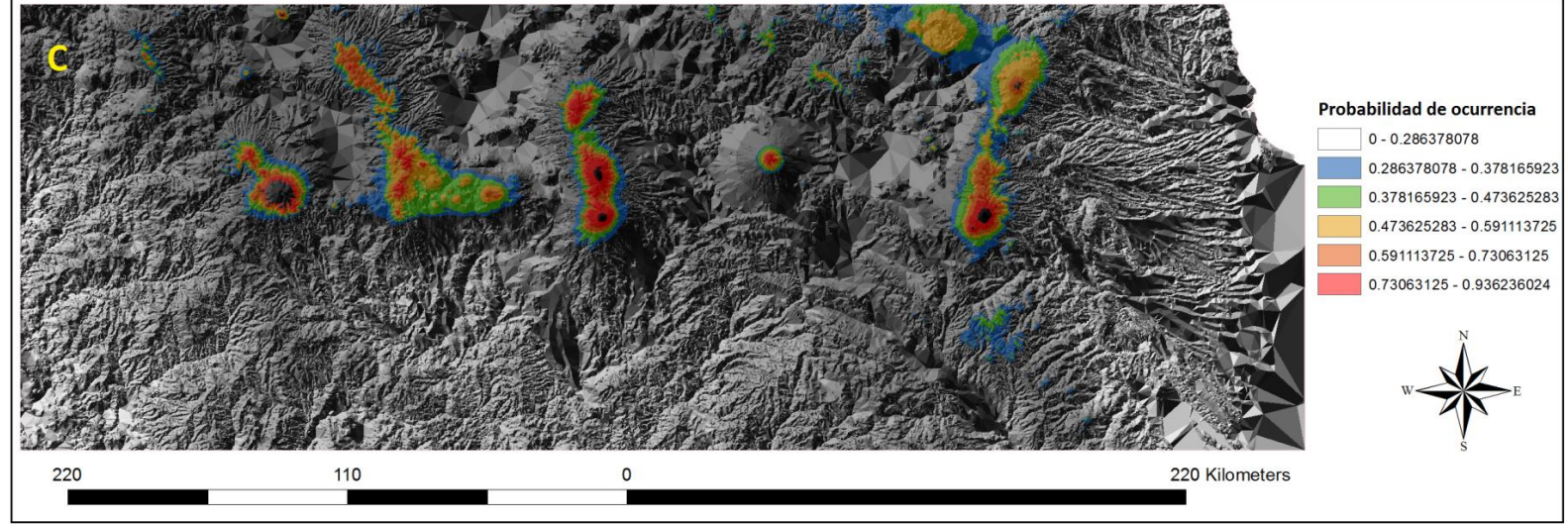
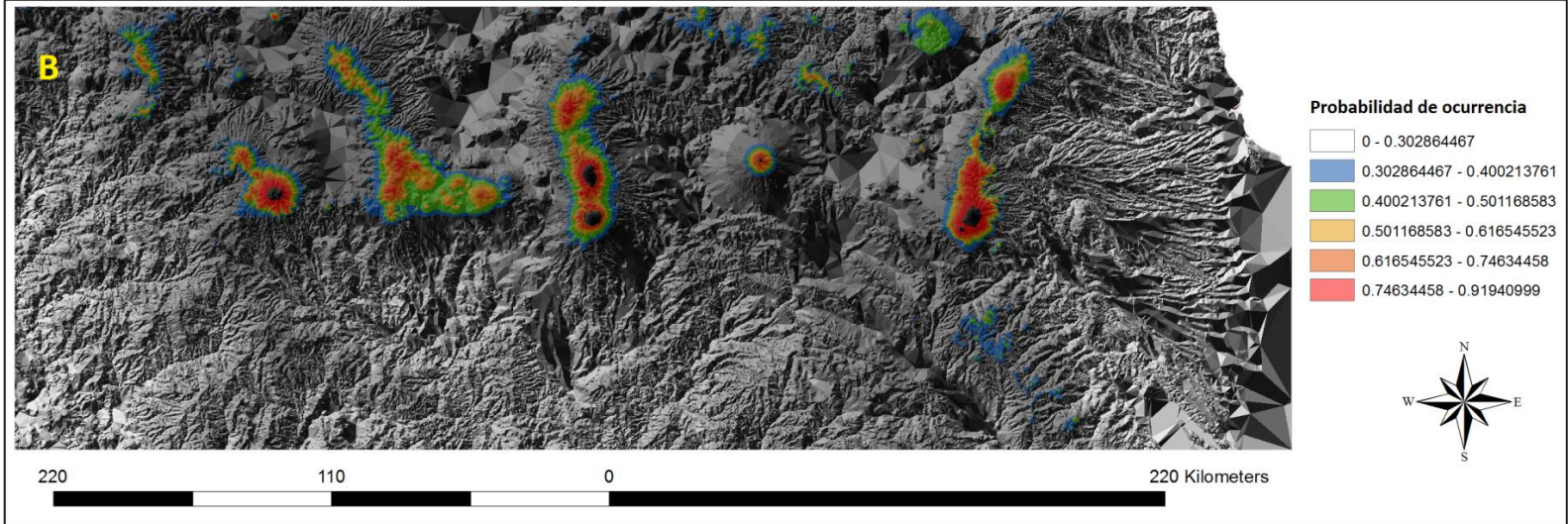
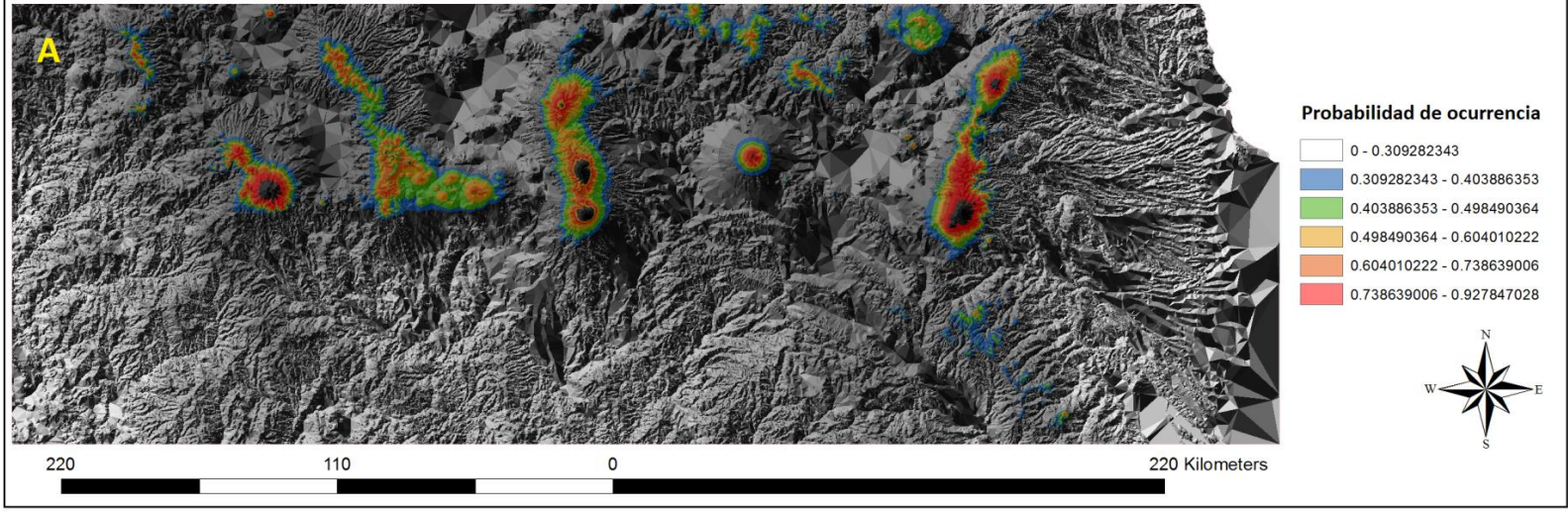


Figura 4: Se muestra la distribución potencial actual (A) y futura para los años 2050 (B) y 2080 (C) en el caso de Festuca amplissima, en los principales volcanes del EVT.

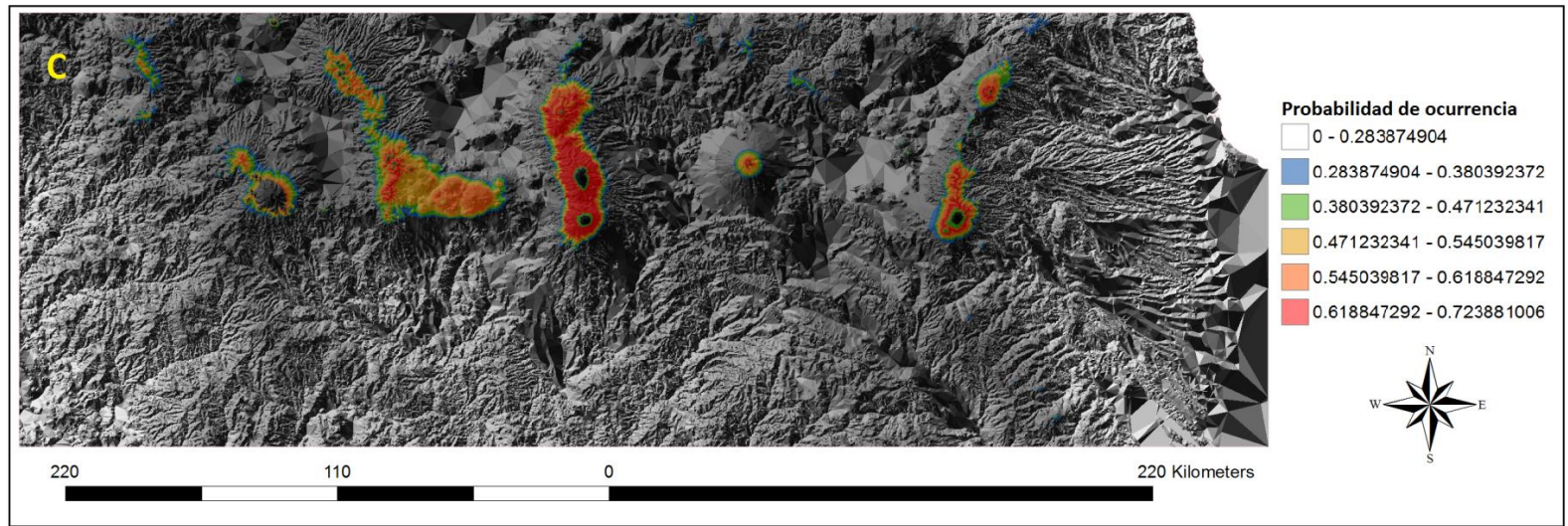
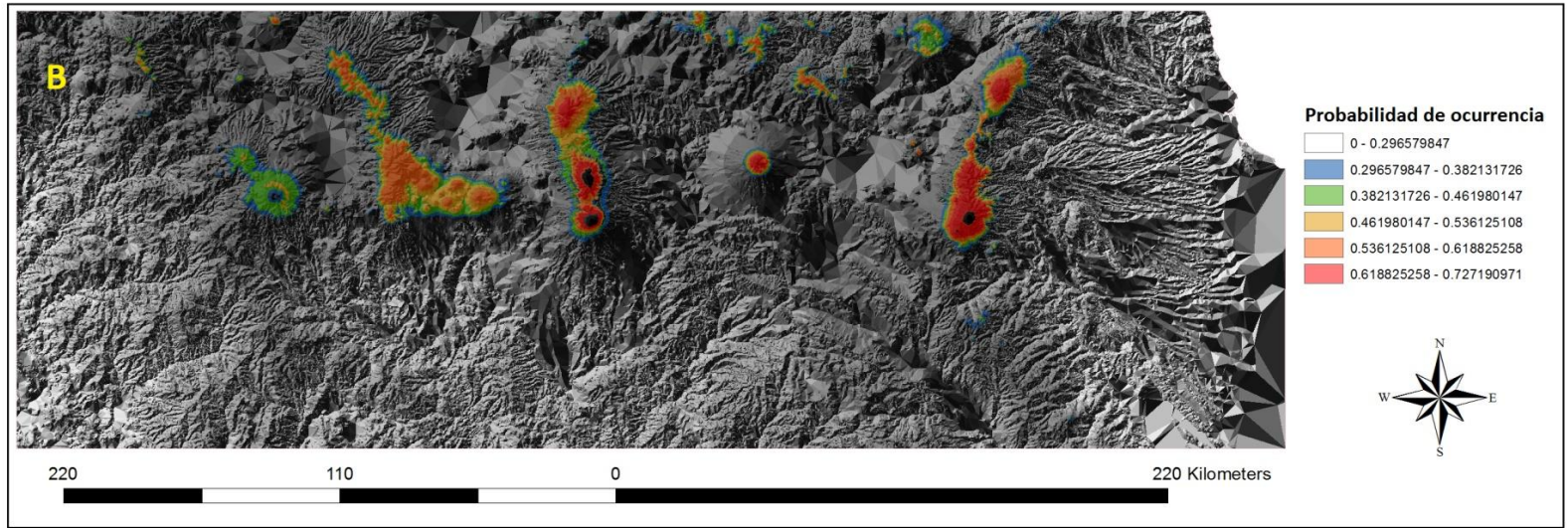
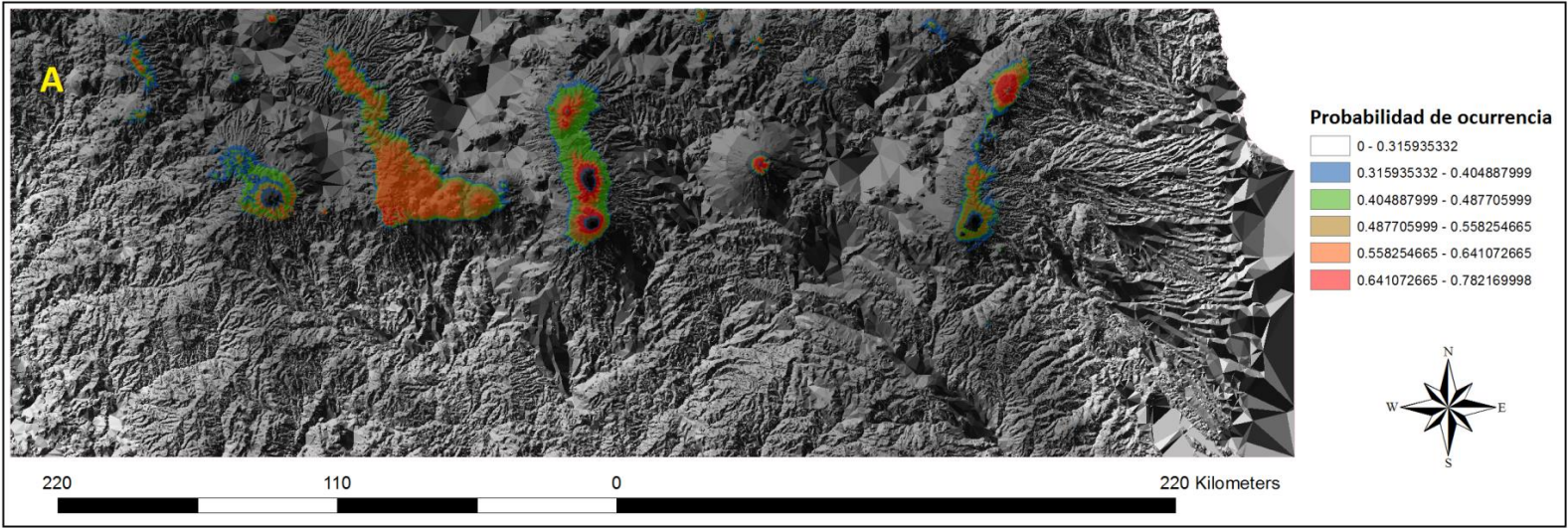


Figura 5: Se muestra la distribución potencial actual (A) y futura para los años 2050 (B) y 2080 (C) en el caso de *Stipa ichu*, en los principales volcanes del EVT

<i>Mulhermbergia macroua</i> /valor de idoneidad	Distribución potencial Actual (Km ²)	2050	2080
5	1611.6	1729.2	1563.7
6	1703.3	1637.2	1452.4
7	1008.3	1920.9	1625.1
8	523.400	975.65	1161.5
9	303.650	407.93	154.620

Cuadro 5: Se muestra el área de distribución en km² para *M. macroua* en los principales volcanes del EVT

El caso de *Muhlenbergia macroua* no se muestran nuevas áreas de territorio en ninguno de los casos de cambio climático, en cuanto a la probabilidad de que la especie encuentre su nicho ecológico, esta aumenta en algunas de las montañas estudiadas (Fig. 6). En cuanto a la superficie en la que la especie se distribuye la tendencia en general es expandir la superficie en el modelo del 2050 y disminuir para el 2080 (cuadro 5).

Especie	actual	50's	80's
<i>F. lívida</i>	0.994	0.992	0.995
<i>F. toluensis</i>	0.984	0.978	0.984
<i>S. ichu</i>	0.967	0.963	0.962
<i>F. amplissima</i>	0.968	0.972	0.965
<i>M. macroua</i>	0.979	0.974	0.968

Cuadro 6. Se muestran los valores de la grafica AUC, para cada uno de los modelos de las cinco especies.

Los resultados muestran una variación en el área de distribución así como en la probabilidad de ocurrencia de las cinco especies estudiadas. Los valores obtenidos por la prueba ROC y mostrados en la grafica AUC, indican que el modelo predice satisfactoriamente todos los modelos generados (cuadro 6).

En la figura 7 y 8 se muestra un ejemplo de una de las montañas estudiadas del EVT en el que se logra apreciar con más detalle los modelos.

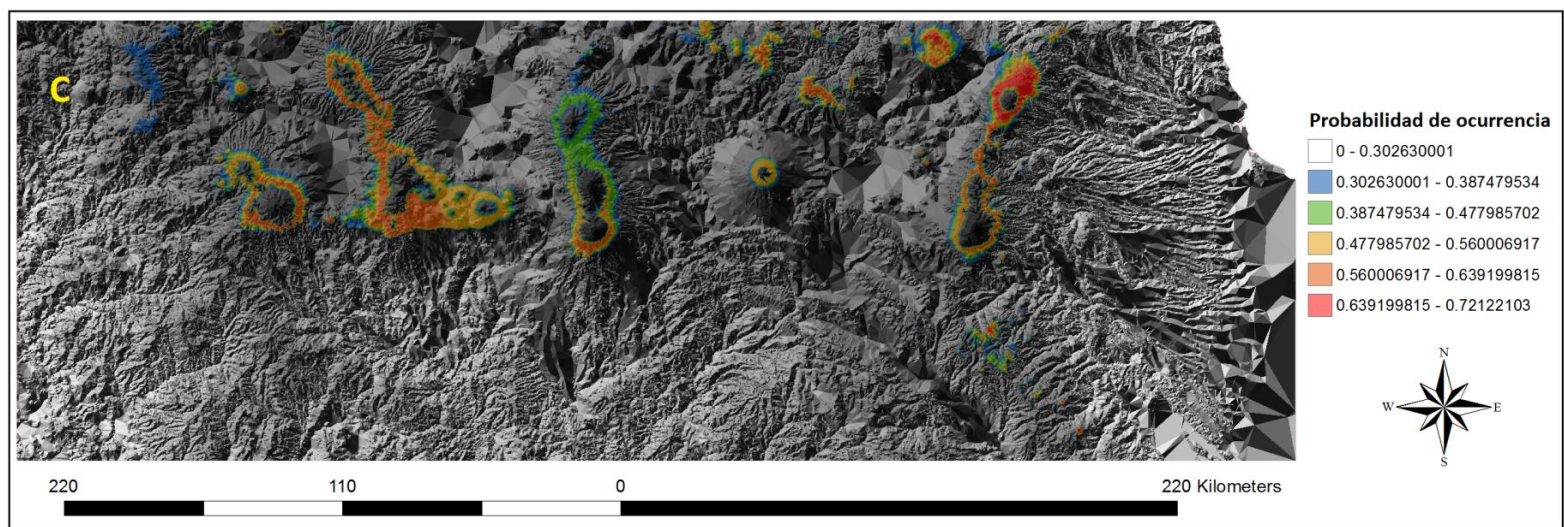
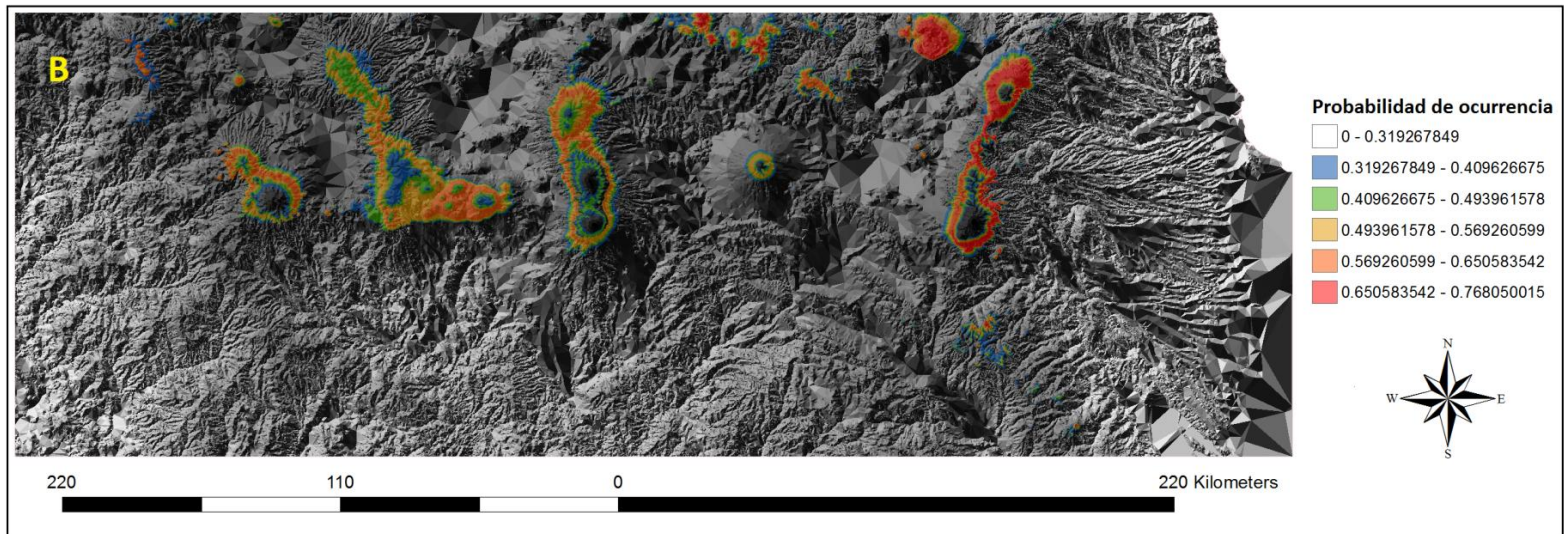
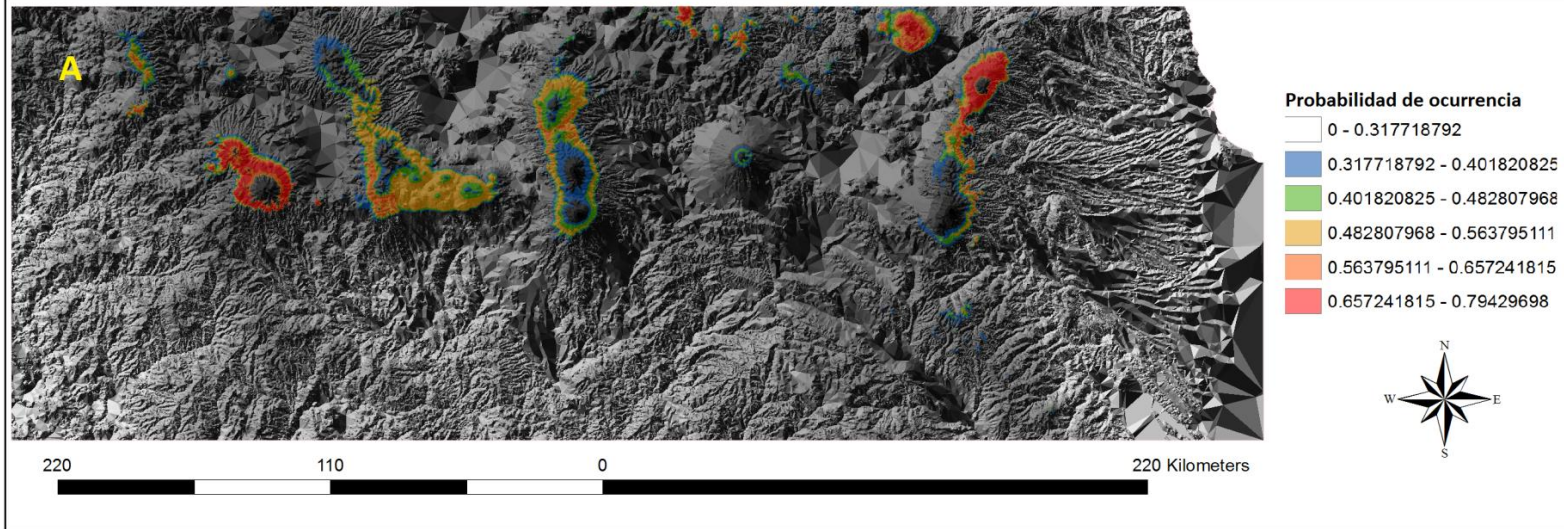


Figura 6: se muestra la distribución potencial actual (A) y futura para los años 2050 (B) y 2080 (C) en el caso de *Muhlebergia macroua*, en los principales volcanes del EVT.

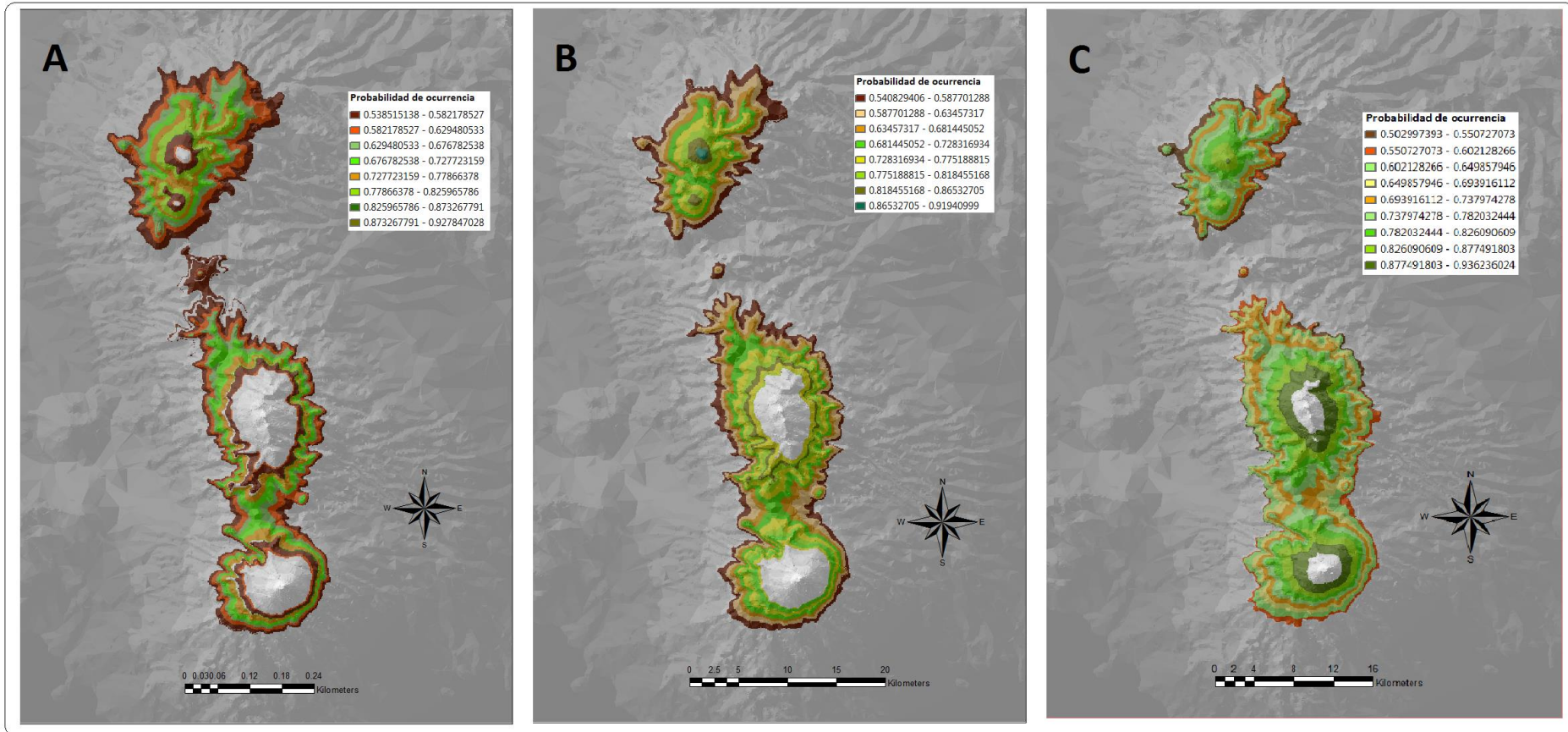


Figura 7: Se muestra la distribución potencial actual (A) y futura (B y C) de *F. amplissima* en una montaña del EVT (POPO-IZTA)

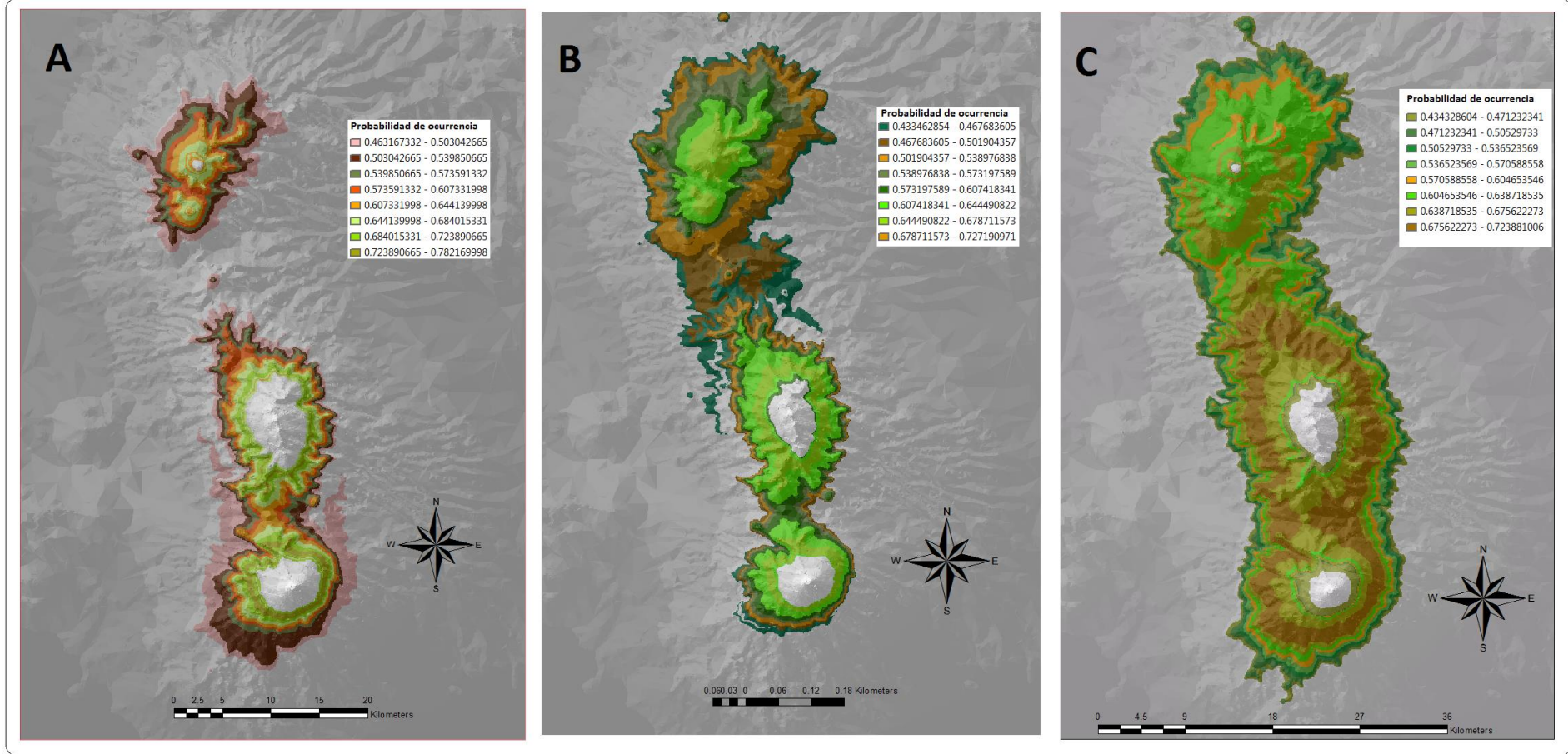


Figura 8: Se muestra la distribución potencial actual (A) y futura (B y C) de *S. ichu* en una de las montañas del EVT (IZTA-POPO)

Especie	ANP	2080
<i>F. lívida</i>	Nevado de Toluca	✓
	Izta – Popo	✓
	Malinche	✓
	Pico de Orizaba	✓
	Cofre de perote	✓
<i>F. tolucensis</i>	Mariposa monarca	✓
	Nevado de Toluca	✓
	Lagunas de zempola	x
	Cumbres de ajusco	✓
	Desierto de los leones	✓
	Izta – Popo	✓
	Malinche	✓
	Pico de Orizaba	✓
	Cofre de perote	✓
<i>S. ichu</i>	Cumbres de ajusco	✓
	Mariposa monarca	✓
	Nevado de Toluca	✓
	Desierto de los leones	✓
	El tepozteco	x
	Izta – Popo	✓
	Malinche	✓
	Pico de Orizaba	✓
	Cofre de perote	✓
<i>F. amplissima</i>	Cumbres de ajusco	✓
	Mariposa monarca	✓
	Nevado de Toluca	✓
	Desierto de los leones	✓
	El tepozteco	✓
	Cobio chichinautzin	✓
	Izta – Popo	✓
	Malinche	✓
	Pico de Orizaba	✓
	Cofre de perote	✓
	Cañón de rio blanco	✓
<i>M. macroura</i>	Cumbres de Ajusco	x
	Mariposa monarca	✓
	Nevado de Toluca	✓
	Desierto de los leones	✓
	El tepozteco	✓
	Cobio chichinautzin	✓
	Izta – Popo	✓
	Malinche	✓
	Pico de Orizaba	✓
	Cofre de perote	✓

Cuadro 7: Se muestran las ANP en donde se encuentran las cinco especies estudiadas, se marca con una “✓” para el caso en el que la especie aun se mantenga allí para el 2080 y con una “x” en caso de su ausencia.

Especie	Actual (km ²)	2080 (km ²)
<i>F. lívida</i>	43,577	52,522
<i>F. toluensis</i>	102,191	105,728
<i>S. ichu</i>	173,931	172,814
<i>F. amplissima</i>	203,062	190,968
<i>M. macroura</i>	142,206	138,224

Cuadro 8: Se muestra la extensión en km² que se predice, ocupara la especie dentro de las áreas naturales protegidas para el 2080 respecto al modelo actual.

El análisis con respecto a las áreas naturales protegidas revela que no hay cambios importantes ya que las especies se mantienen dentro de estas (cuadro 7), no obstante la extensión que ocupan si sufre cambios (cuadro 8), por ejemplo se predice que *F. lívida* y *F. toluensis* aumenten el área dentro de las ANPs, pero la de *F. amplissima* disminuirá.

Discusión.

Parece ser que en el caso de especies con distribución no amplia o restringida como ocurre con numerosas endémicas, el hecho de contar con suficientes registros que reflejen las condiciones ambientales dentro del espacio geográfico que habitan, es de gran ayuda para poder modelar confiablemente sus distribuciones, y no necesariamente como asumen Lindenmayer *et al.* (1996) y Peterson *et al.* (2000), quienes sugieren el uso de un mínimo de 50 localidades con sus coordenadas geográficas bien determinadas para efectuar el análisis.

En este caso la condición no se cumple debido al lugar espacial que ocupan estas especies. La escases de registros quizá se deba a las complicaciones que implica muestrear este tipo de organismos en zonas de alta montaña, este tipo de sistemas son especialmente sensibles al cambio climático y por lo mismo son un buen indicador de este. Es por eso que este estudio es importante por el riesgo que implica perder este tipo de flora y los servicios que esta brinda.

En este trabajo se esperaba una disminución gradual de la población en los modelos de cambio climático, sin embargo los resultados predicen un comportamiento muy variado, se sabe por estudios previos en zonas alpinas de Suiza que el cambio climático lejos de perjudicar a las especies alpinas está incrementando su crecimiento y por lo tanto su biomasa (Ramming *et al.*, 2010). Tal como se ve en el caso de *S. ichu* del modelo de cambio climático para el año 2080

hay un incremento de área en un 429% más que en la actualidad, esto predice el éxito de la especie en ese sistema montañoso que habita (Fig. 5).

Se sabe que la flora del límite arbóreo puede verse afectada si la temperatura excede los 3° C, sin embargo en algunos lugares este tipo de especies sobreviven con una temperatura de + 5° C (Grabherr *et al.*, 2010), esto se hace evidente en el caso de *F. toluensis* que lejos de contraer su distribución se predice que encuentre nuevos nichos ecológicos fuera de las ANP para los años 2050 y 2080 (Fig. 3).

Las especies estudiadas en este trabajo son restringidas y además, habitan en climas fríos es por eso que se podría pensar que el cambio climático les afecta más que a otros organismos que son de más amplia distribución y habitan climas más favorables, sin embargo este estudio demuestra que esto no es necesariamente aplicable a todos los casos. Thuiller *et al.* (2005) refieren que las especies con poca tolerancia a la temperatura pierden su hábitat al igual que las especies con un bajo número de ocurrencias. Pero de nuevo esta afirmación no se cumple en el modelo estudiado aquí.

Aunque se podría pensar que todas las montañas del EVT las cuales alcanzan y/o superan los 4000 m podrían tener las condiciones ambientales y una historia geológica similar para el desarrollo de las especies del límite arbóreo, los modelos generados muestran que solo en la parte oriental del sistema montañoso se presentan las condiciones idóneas. Esto coincide con lo que refieren Suarez-Mota *et al.* (2014), quienes encontraron que el EVT está en general dividido en dos grandes dominios climáticos, con una porción más húmeda y fría en su parte oriental en contra posición de un área más cálida y húmeda occidental.

El cambio climático prolonga la estación vegetativa como indican Ahas y Aasa (2006), quienes probaron que el ciclo fenológico de las plantas de Estonia se adelanta de 5 – 20 días, principalmente en primavera. En las plantas del límite arbóreo este adelanto puede inducir a una migración altitudinal ya que la competencia se incrementa a causa de las especies más productivas (Ramming *et al.*, 2010). Esto puede inducir a un cambio en la época reproductiva y en los mecanismos por los que se reproducen las plantas, no obstante las cinco especies estudiadas en este trabajo no solo permanecen, si no que en varios casos incrementan su área de distribución potencial.

Grabherr *et al.* (2010) indican que las gramíneas pueden formar poblaciones clones por muchos años (> 1000 años). Lo cual a la larga puede llegar a ser una desventaja para las plantas debido a que se pueden volver más susceptibles.

La distribución potencial de *F. toluensis* (Fig. 3) ocupa nuevas áreas de distribución hacia el futuro que no se muestran en el modelo actual, sin embargo para el año 2080, muchos de estos nuevos nichos desaparecen, en la distribución potencial actual se tiene una alta idoneidad de encontrar el nicho ecológico de la especie, pero para los siguientes modelos esta cambia (Fig. 2), aunque se predice el éxito de la especie, esta no es en las mejores condiciones.

Este trabajo predice una situación favorable con respecto a permanencia de las especies en las áreas naturales protegidas ya que las especies no desaparecen del área protegida y su extensión no se ve demasiado afectada; ya que si bien, estas se moverán no desaparecen dentro de las áreas que en teoría están protegidas, sin embargo es importante que se revisen el cómo se declara una extensión de territorio área protegida (Suarez *et al.*, 2014). Las diferencias entre los escenarios radican principalmente en el área de idoneidad que cambia entre las tres distintas proyecciones, es decir mientras que en el modelo actual, la probabilidad de que la especie encuentre el ambiente idóneo es alta, para el 2080 en la misma zona puede que esto cambie. Es importante recordar que al hacer una adecuada planificación para la conservación de una especie también se están incluyendo muchas más, puesto que las gramíneas son componentes de diversas comunidades, conservarlas significa la conservación de muchos otros organismos de las cuales dependen.

Cada vez se hace más importante el estudio sobre el comportamiento de las especies animales y vegetales frente al cambio climático, tanto así que se tienen nuevas metodologías para estudiar este fenómeno de predecir la migración, como imágenes aéreas de espectroscopia que además de proporcionar una alta resolución también tienen información fenológica la cual puede ayudar a saber la distribución de las poblaciones (Pottier *et al.*, 2014). Los pastos del límite arbóreo así como la demás flora son recursos importantes tanto para el hombre como para otras especies animales, su cuidado es importante como el de otros muchos organismos.

Conclusiones

- Los modelos muestran la persistencia de los registros y el aumento del área, esto indica que el pastizal del límite arbóreo podría tener la capacidad de adaptación a los cambios, gracias a su modo de dispersión y el crecimiento asexual de las poblaciones, lo que a la larga podría convertirse en un problema porque se pierde la capacidad de resistir el cambio climático y las enfermedades, sin embargo esto depende del estado de conservación de las áreas fuera de las ANP.
- Se necesitan más estudios para mejorar la base de datos en las zonas en el límite de la vegetación arbórea del país, y así ofrecer mejores modelos que ayuden a su conservación.
- Los modelos no contemplan las interacciones con otras especies, como la competencia ni la depredación.
- Los sistemas naturales son muy complejos y los modelos solo consideran la distribución geográfica, sin embargo hay muchos factores de por medio como el posible cambio evolutivo por lo tanto las predicciones pueden tener errores.

Literatura citada.

Ahas, R y Aasa, A. 2006. The effects of climate change on the phenology of selected Estonian plant, bird and fish populations. *Int J Biometeorol.* 51: 17–26.

Aitken, N. S., Sam Yeaman., Jason A. Holliday., Tongli Wang y Sierra CurtisMcLane. 2008. Adaptation, migration or extirpation: climate change outcomes for tree populations. *Journal compilation.* Blackwell Publishing Ltd. 95-111.

Araújo, M. B., Cabeza, M., Thuiller, W., Hannah, L. y Williams, P.H. 2004. Would climate change drive species out of reserves? An assessment of existing reserve-selection methods. *Global Change Biology* 10: 1618-1626.

Ballesteros - Barrera, C. 2008. Efecto del cambio climático global en la distribución de especies del Desierto Chihuahuense. Tesis de Doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ciencias. México D.F. 12-18.

Barradas, V, L., Landa, J, L y Pérez, J, C. 2011. Implicaciones del cambio climático en la fisiología ecológica de las plantas. *Cambio climático: aproximaciones para el estudio de su efecto sobre la biodiversidad.* 7: 71-80.

Bravo, C, J., Sánchez, R, G., Gelviz – Galvez, S, M. 2011. Estudio de la distribución de las especies frente al cambio climático. *Cuadernos de biodiversidad.* 12-14.

Cavieres, L. A., Papic, C., Castor, C. 1999. Variación altitudinal en los síndromes de dispersión de semillas de la vegetación andina de la cuenca del río molina, Chile central (33°S). *Gayana Botánica.* 56(2): 115-123.

Elith, J., Phillips J, S., Hastie, T., Dudi'k, M., En Chee, Y y Yates C, J. 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions, A Journal of Conservation Biogeography.* 17: 43–57.

Gay García Carlos (Compilador) (2000). México: una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México. Instituto Nacional de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, US Country Studies Program. México, 220 p. ISBN 968-36-7562-X.

Grabherr, G., Gottfried, M., y Harald, P. 2010. Climate Change Impacts in Alpine Environments. *Geography Compass.* 4(8): 1133-1153

Guisant, A y W. Thuiller. 2005. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology. Letters.* 8: 993-991.

Herrera, A.Y. y O.A. Cortes. 2009. Diversidad de las gramíneas de Durango, México. *Polibotánica* 28: 49-68.

Hutchinson, G.E. 1957. Concluding remarks. Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology 22: 415-427.

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 [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC.

Lawley, J., D. White, R. Neilson y A. Blaustein. 2006. Predicting climate-induced range shifts: model differences and model reliability. *Global Change Biology*. 12: 1568-1584.

Lindenmayer, D.B., B.G. Mackey y H.A. Nix. 1996. The bioclimatic domains of four species of commercially important eucalypts from south-eastern Australia. *Australian Forestry* 59: 74-89.

Lira, R., O. Téllez y P. Davila, 2008. The effects of climate change on the geographic distribution of Mexican wild relatives of domesticated Cucurbitaceae. *Genetic Resources and Crop Evolution*. 56: 691–703.

Neilson et al. 2005. Forecasting Regional to Global Plant Migration in Response to Climate Change. *BioScience* 55(9): 749-759.

Nix H .A. 1986. BIOCLIM, a bioclimatic analysis and prediction system. CSIRO Division Water and Land Resources Research Annual Report. CSIRO Publishing, Canberra, Australia.

Phillips S. J., R. P. Anderson, y R. E. Schapire. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*. 190: 231–259.

Pottier, J., Malenovsky, Z., Psomas, A., Homolova, L., Schaepman, E. E., Choler, P., Thuiller, W., Guisan, A y Zimmermann, N. E. 2014. Modelling plant species distribution in alpine grasslands using airborne imaging spectroscopy. *Biology letters*. 11(1): 1-4.

Rammig, A., Jonas, T., Zimmermann, N. E., y Rixen, C. 2010 Changes in alpine plant growth under future climate conditions. *Biogeosciences* 6: 10817–10847.

Rzedowski, J., 2006. Vegetación de México. 1ra. edición digital, Comisión nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad, México, 504pp.

Salas, J. S., Guerra, V. M. M., Domínguez, R. P., Arredondo, F. M. S., Hernández, S. S. O., Jurado, E. 2011. Cambio climático: ¿precursor de migración de especies vegetales en la montaña más alta del norte de México?. *Ciencia UANL / Vol. XIV, No. 2*.

Smith, N., Mori, A, S., Henderson, A., Stevenson, WM, D., Heald, V, S. 2004. Flowering plants of the neotropics. Princeton University press, the new York Botanical Garden. Princeton New Jersey. Pp 470-473.

Soberon, J y Peterson, T, A. 2005. Interpretation of models of fundamental ecological niches and species distributional areas. *Biodiversity Informatics* 1-10.

Suarez, M, M, E. y O. Tellez V. 2014. Red de áreas prioritarias para la conservación de la biodiversidad del eje volcánico transmexicano analizando su riqueza florística y variabilidad climática. *Polibotánica* 38: 67-93

SUÁREZ-MOTA, M, E., TÉLLEZ-VALDÉS, O., MARTÍNEZ, M, E. 2014. Dominios climáticos de las áreas naturales protegidas del eje volcánico transversal de México. *Revista internacional de ciencia y tecnología de la información geográfica*. 14: 120-143

Téllez-Valdés. O., P. Davila-Aranda y R. Lira-Saade. 2006. The effects of climate change on the long-term conservation of *Fagus grandifolia* var. *mexicana*, an important species of the Cloud Forest in Eastern Mexico. *Biodiversity and Conservation*. 15: 1095–1107.

Thuiller, W., Lavorel, S. y M.B. Araujo. 2005. Niche properties and geographical extent as predictors of species sensitivity to climate change. *Global Ecology and Biogeography* 14: 347-357.

Vié, J. C., C. Hilton-Tayson y S. N. Stuart. 2009. *Wildlife in a Changing World – An Analysis of the 2008 IUCN Red List of Threatened Species*. Gland, Switzerland: IUCN.

Villaseñor, J. L y O. Téllez, V. 2004. Distribución potencial de las especies del género *Jefea* (Asteraceae) en México. *Anales del Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Serie Botánica*. 75(2) pp. 205-220