

# BOSQUE MESÓFILO DE MONTAÑA Y ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO: UNA EVALUACIÓN EN HIDALGO, MÉXICO

## CLOUD FOREST AND CLIMATE CHANGE SCENARIOS: AN ASSESSMENT IN HIDALGO, MÉXICO

Alejandro I. Monterroso-Rivas<sup>1\*</sup>; Jesús D. Gómez-Díaz<sup>1</sup>; Juan A. Tinoco-Rueda<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. km 38.5 Carretera México-Texcoco. C. P. 56230. Chapingo, Texcoco, Estado de México.

Correo-e: aimrivas@correo.chapingo.mx (\* Autor para correspondencia).

<sup>2</sup>Centro Regional Universitario Oriente, Universidad Autónoma Chapingo. km. 6.5 Carretera Huatusco-Xalapa. C. P. 94100. Huatusco, Veracruz.

### RESUMEN

El hábitat de ocho especies forestales (*Liquidambar macrophylla*, *Alnus arguta*, *Carpinus caroliniana*, *Clethra mexicana*, *Pinus patula*, *Nectandra sanguínea*, *Podocarpus reichei* y *Quercus* spp.) representativas del bosque mesófilo de montaña en el estado de Hidalgo se evaluó en condiciones actuales y bajo escenarios de cambio climático. Se utilizó el marco conceptual de nicho ecológico y se evaluaron doce variables: una topográfica, cinco paisajísticas y seis climáticas. Se realizó un análisis factorial de nicho ecológico con el software Biomapper, que básicamente es un análisis estadístico de reducción de dimensiones. Para cada especie, se obtuvieron mapas de hábitat potencial al modificar seis variables climáticas por cada modelo de cambio climático aplicado, generando igual número de mapas para condiciones futuras. Se analizaron las diferencias en hábitat potencial para las condiciones actuales y aquellas previstas por cambio climático, encontrando que es posible que la superficie óptima de crecimiento para seis especies se reduzca. Las especies identificadas como amenazadas por el cambio climático son *L. macrophylla*, *A. arguta*, *C. caroliniana*, *C. mexicana*, *P. patula*, y *N. sanguínea*. Estas especies componen principalmente el estrato arbóreo alto del bosque mesófilo, por lo que se concluye que el ecosistema puede verse seriamente afectado como consecuencia del cambio climático.

PALABRAS CLAVE: Bosque niebla, nicho, impacto, vulnerabilidad.

### ABSTRACT

The habitat of eight forest species (*Liquidambar macrophylla*, *Alnus arguta*, *Carpinus caroliniana*, *Clethra mexicana*, *Pinus patula*, *Nectandra sanguínea*, *Podocarpus reichei* and *Quercus* spp.) representative of cloud forest in the state of Hidalgo was assessed under current and projected climate conditions. We used the ecological niche conceptual framework and considered twelve variables: one related to topography, five to landscape and six to climate. An ecological niche factorial analysis was carried out with Biomapper software. Habitat suitability maps were obtained for each forest species by changing six climatic variables for each climate change model applied, generating the same number of maps for future conditions. We analyzed the differences in suitable habitat for current conditions and those projected by climate change, finding that the optimal growth area for six species may be reduced. The species identified as threatened by climate change are *L. macrophylla*, *A. arguta*, *C. caroliniana*, *C. mexicana*, *P. patula*, and *N. sanguínea*, which comprise mainly the high tree layer of the cloud forest. We therefore conclude that the ecosystem can be seriously affected by climate change.

KEYWORDS: Fog forest, niche, impact, vulnerability.



Recibido: 26 de abril de 2012  
Aceptado: 20 de septiembre de 2012  
doi: 10.5154/r.rchscfa.2012.03.029  
<http://www.chapingo.mx/revistas>

## INTRODUCCIÓN

En México, se estima que menos de 1 % del territorio está ocupado por vegetación primaria de bosques mesófilos (Challenger, 1998; Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2005). La superficie original del ecosistema ha sido reemplazada hasta en el 50 % por otras actividades productivas y otros tipos de cobertura (Challenger, 1998), por lo que es un ecosistema frágil y amenazado. El estado de Hidalgo ocupa el tercer lugar del país con mayor superficie ocupada por bosque mesófilo después de Oaxaca y Chiapas, y no es carente a esta problemática (Ortega & Castillo, 1996). Según un estudio reciente de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO, 2010), los niveles de amenaza al ecosistema en Hidalgo son altos, debido principalmente a la ganadería extensiva, la construcción de caminos y la tala de rodales dentro del bosque.

Una característica importante de los bosques mesófilos es la presencia de niebla sobre la vegetación a lo largo del año. Además, se ha documentado la propiedad de extraer, de dicha neblina, una cantidad de agua adicional a la que llega en forma de lluvia, de tal manera que, aún en la época de estiaje, estos bosques proveen un aporte de agua muy importante a la hidrología local y regional (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2004). Por tanto, el bosque mesófilo es un ecosistema que requiere y aprovecha las condiciones climáticas que lo envuelven.

Los bosques mesófilos de México son ecosistemas poco estudiados por diversos motivos, entre ellos, su complejo funcionamiento. Sólo recientemente, quizás en las últimas dos décadas, se tienen estudios que han aportado información importante sobre su dinámica y conocimiento (Álvarez-Zuñiga, Sánchez-González, López-Mata & Tejero-Díez, 2012; Luna & Alcántara, 2004; Luna, Alcántara, Morrone, & Espinosa, 2000; Luna, Ocegueda, & Alcántara, 1994). Sin embargo, son reducidos los estudios que documentan los posibles impactos futuros del cambio climático sobre el ecosistema y sobre el estado de Hidalgo (Monterroso, 2009).

Por lo anterior, el objetivo del presente estudio fue evaluar el posible comportamiento futuro del ecosistema, a partir del análisis de algunas especies representativas, y los impactos que se podrían observar en su distribución al considerar escenarios de cambio climático. Para alcanzar el objetivo, se optó por utilizar una herramienta que permita obtener resultados rápidos y que oriente en estudios futuros más detallados y precisos, por lo que se aplicó el concepto de nicho ecológico de Hutchinson (1957) a través del software Biomapper (Hirzel, Hausser, & Perrin, 2002b). Hutchinson (1957) define el nicho ecológico como un conjunto de variables ambientales en una región determinada con valores límite dentro de los cuales una especie puede sobrevivir. Es posible incluir factores abióticos y bióticos en la evaluación, y cada punto donde se observe el nicho corresponderá un posible lugar donde la especie podrá existir indefinidamente. Una de las críticas

## INTRODUCTION

In Mexico, it is estimated that less than 1 % of the landbase is occupied by primary vegetation of cloud forests (Challenger, 1998; National Institute of Statistics and Geography [INEGI], 2005). The original ecosystem area has been replaced by up to 50 % by other productive activities and other types of cover (Challenger, 1998), so it is a fragile and threatened ecosystem. The state of Hidalgo ranks third in the country with the largest area occupied by cloud forest after Oaxaca and Chiapas, and it is not devoid of this problem (Ortega & Castillo, 1996). According to a recent study by the National Commission for the Knowledge and Use of Biodiversity (CONABIO, 2010), levels of threat to the ecosystem in Hidalgo are high, mainly due to extensive grazing, road construction and logging of stands within the forest.

An important feature of the cloud forests is the presence of fog on the vegetation throughout the year. In addition, the property of extracting from this fog an amount of water additional to that which comes in the form of rain has been documented, so that, even in the dry season, these forests provide an important water contribution to local and regional hydrology (Secretariat of Environment and Natural Resources [SEMARNAT], 2004). Therefore, the cloud forest is an ecosystem that requires and uses the weather conditions that surround it.

The cloud forests of Mexico are poorly studied ecosystems for various reasons, including their intricate workings. Only recently, perhaps in the last two decades, have there been studies that have provided important information about their dynamics and specific knowledge about them (Álvarez-Zuñiga, Sánchez-González, López-Mata & Tejero-Díez, 2012; Luna & Alcántara, 2004; Luna, Alcántara, Morrone, & Espinosa, 2000; Luna, Ocegueda, & Alcántara, 1994). However, there are only a few studies documenting potential future impacts of climate change on the ecosystem and the state of Hidalgo (Monterroso, 2009).

Therefore, the objective of this study was to evaluate the possible future behavior of the ecosystem, from the analysis of some representative species, and the impacts that could be seen on their distribution by considering climate change scenarios. To achieve this goal, we opted to use a tool that obtains quick results and that can guide more detailed and accurate future studies, so we applied Hutchinson's (1957) ecological niche concept using Biomapper software (Hirzel, Hausser, & Perrin, 2002b). Hutchinson (1957) defines ecological niche as a set of environmental variables in a given region with limit values within which a species can survive. Abiotic and biotic factors can be included in the assessment, and each point where the niche is observed will be a possible place where the species can exist indefinitely. One criticism that the concept has received is that it leaves competing species out of the analysis. Furthermore, it is argued that it ignores the changes that organisms can cause to the environ-

que ha tenido el concepto es que deja fuera del análisis a las especies competidoras. Además, se argumenta que ignora los cambios que los organismos provocan sobre el medio (Leibold & Geddes, 2005). Sin embargo, consideramos que el concepto cumple con nuestro objetivo debido a que el presente estudio se enfoca en evaluar la distribución geográfica potencial de algunas especies forestales y no la dinámica del ecosistema mismo. Es importante subrayar que se buscó dar prioridad a un análisis de distribución geográfica y del posible comportamiento de algunas especies representativas del bosque mesófilo al considerar escenarios de cambio climático. También se consideró que la herramienta utilizada en este estudio permite contar con información rápida de impactos del cambio climático, con el objetivo de identificar especies y territorios donde una alteración en el clima puede impactar. El siguiente paso será entonces encaminar estudios y recursos económicos de conservación sobre aquellas especies identificadas como más sensibles y/o aquellas regiones con mayores cambios identificados.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Una parte importante del trabajo consistió en aplicar Biomapper (Hirzel et al., 2002b), un software que trabaja bajo el concepto de nicho ecológico. La técnica utilizada por Biomapper consiste en encontrar los intervalos de las variables ambientales donde una especie puede vivir en condiciones óptimas. Entonces, el software evalúa el comportamiento de las variables ambientales a partir de los sitios donde la especie está presente (Hortal & Lobo, 2002). A diferencia de otros enfoques, como el software GARP, que requieren información de presencia y ausencia, Biomapper trabaja únicamente con información de presencia.

### Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en una porción del bosque mesófilo de montaña en el estado de Hidalgo, donde aún es posible encontrar relictos de vegetación natural, en los municipios de Calnalli, Lolotla, Huazalingo, Tlanchinol, Tianguistengo, Xochicoatlán y Zacualtipán de Ángeles. El área considerada cubrió poco más de 266,000 ha y se ubica dentro de las coordenadas 98° 19' y 98° 56' de longitud oeste y 20° 31' y 21° 14' de latitud norte (Figura 1).

### Variables ambientales

Las variables fueron seleccionadas a partir de dos criterios: información de fácil acceso (en internet o en gobiernos) y representativa de un bosque mesófilo (es decir, donde vive esta comunidad vegetal en el estado). De esta manera se consideró una variable topográfica, cinco paisajísticas y seis climáticas, para un total de doce variables. En el Cuadro 1 se muestra el listado de las variables utilizadas.

La variable topográfica se refiere a las topoformas presentes y sigue el criterio de INEGI (2003) en su mapa fisiográfico. Las variables paisajísticas fueron: tipos de suelo, usos del sue-

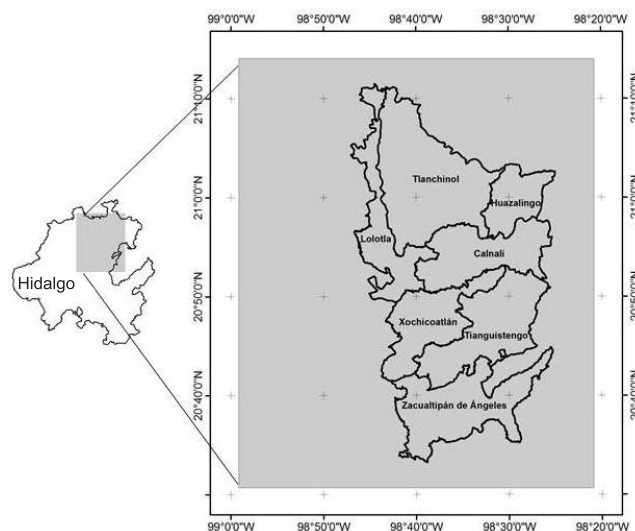


FIGURA 1. Ubicación del área de estudio y municipios colindantes.  
FIGURE 1. Location of the study area and adjacent municipalities.

ment (Leibold & Geddes, 2005). However, we believe that the concept meets our objective because this study focuses on assessing the potential geographical distribution of some forest species and not the dynamics of the ecosystem itself. It is important to emphasize that we sought to give priority to an analysis of geographical distribution and the possible behavior of some representative cloud forest species in considering climate change scenarios. It was also felt that the tool used in this study quickly provides information on climate change impacts, in order to identify species and areas where a change in the weather can have an impact. The next step will then be to direct conservation studies and economic resources on those species identified as being more sensitive and/or on regions with major changes identified.

## MATERIALS AND METHODS

An important part of the work was to apply Biomapper (Hirzel et al., 2002b), a software application that works under the concept of ecological niche. The technique used by Biomapper is to find the intervals of environmental variables where a species can live in optimal conditions. Then, the software evaluates the behavior of environmental variables from the sites where the species is present (Hortal & Lobo, 2002). Unlike other approaches, such as GARP software, which require presence and absence information, Biomapper works only with presence information.

### Study area

The study was conducted on a portion of the cloud forest in the state of Hidalgo, where it is still possible to find remnants of natural vegetation in the municipalities of Calnalli, Lolotla, Huazalingo, Tlanchinol, Tianguistengo, Xochicoatlán and Zacualtipán de Ángeles. The area considered covered just over 266,000 hectares and is located within the coordinates 98° 19' and 98° 56' west longitude and 20° 31' and 21° 14' north latitude (Figure 1).

CUADRO 1. Variables ambientales y abreviaturas utilizadas en el estudio.

Variable	Abreviatura
Sistema de topoformas	ST
Tipo de suelo	EDA
Uso del suelo y vegetación	US
Humedad almacenada en suelo	HSU
Vegetación natural y secundaria	VNS
Presencia de bosque mesófilo de montaña	BMM
Tipo de clima	CL
Precipitación total anual	PA
Precipitación horizontal	PHR
Temperatura media anual	TA
Evapotranspiración actual	ETA
Meses del año con demasías de agua	DA

TABLE 1. Environmental variables and abbreviations used in the study.

Variable	Abbreviation
Topoform system	TS
Soil type	ST
Land use and vegetation	LU
Stored soil moisture	SSM
Natural and secondary vegetation	NSV
Presence of cloud forest	CF
Climate type	CT
Total annual precipitation	TAP
Horizontal precipitation	HP
Average annual temperature	AAT
Actual evapotranspiration	AET
Months of the year with water excesses	WE

lo, humedad almacenada en el suelo, vegetación primaria y secundaria, así como las zonas donde predomina el bosque mesófilo de montaña. El mapa de tipos de suelos se tomó de los datos vectoriales de la carta edafológica de INEGI (2000). Los usos de suelo fueron tomados del inventario nacional forestal (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT]-Universidad Nacional Autónoma de México [UNAM], 2001) y los linderos se detallaron con ayuda de ortofotos digitales (INEGI, 2000). La humedad en el suelo (medida basada en el número de meses al año con humedad disponible) se tomó de Vermeersch (1992). Del mapa de uso del suelo se derivó otro denominado vegetación primaria y secundaria. La intención fue separar aquellas clases de vegetación que aún conservan relictos de vegetación primaria de las que tienen algún grado de perturbación. Similar al anterior, se hizo un mapa de superficie ocupado con bosque mesófilo de montaña, en el que se separó al ecosistema para otorgarle más peso. Dentro de esta cobertura se diferencié el bosque primario o natural de aquél que presenta vegetación secundaria y que es indicador de algún grado de perturbación. El último grupo de variables fueron climáticas. El primer mapa incluido fue el climático de acuerdo con Köppen modificado por García (2004). Además, se consideró la precipitación total anual, precipitación horizontal (aporte de humedad por la presencia de niebla), temperatura media anual, evapotranspiración actual y las demasías de agua en la región.

#### Distribución potencial de las especies

Las especies representativas (Ángeles, 2009; Luna & Alcántara, 2004) del bosque mesófilo que se analizaron en este estudio fueron: *Liquidambar macrophylla* Oerst., *Alnus arguta* Schl., *Carpinus caroliniana* Walt, *Clethra mexicana* DC, *Pinus patula* Schiede & Deppe, *Nectandra sanguinea* Rottb., *Podocarpus reichei* Buchholz et Gray, así como *Quercus eugeniifolia* Liebm., *Q. sapotifolia* Liebm. y *Q. sartorii*, consideradas en adelante como *Quercus* spp. Para cada especie se elaboró un mapa de distribución potencial en Biomapper, mediante la correlación espacial de la presencia de cada una

#### Environmental variables

Variables were selected based on two criteria: easily accessible information (on the Internet or from governments) and representative of a cloud forest (i.e., where the plant community lives in the state). In this manner a topographic variable and five climatic and six landscape ones were considered, for a total of twelve variables. Table 1 shows the list of variables used.

The topographic variable refers to the topoforms present and follows the criteria used by INEGI (2003) in its physiographic map. The landscape variables were: soil type, land use, stored soil moisture, primary and secondary vegetation, and areas where cloud forest predominates. The soils map was taken from the vector data of the INEGI edaphologic map (2000). The land uses were taken from the national forest inventory (Secretariat of the Environment and Natural Resources [SEMARNAT]-National Autonomous University of Mexico [UNAM], 2001) and the boundaries were detailed using digital orthophotos (INEGI, 2000). Soil moisture (measured based on the number of months per year with available moisture) was taken from Vermeersch (1992). The land use map was used to create another map showing primary and secondary vegetation. The intention was to separate those vegetation classes that still have remnants of primary vegetation from those which have some degree of disturbance. Similarly, a map of surface covered by cloud forest, which was separated from the ecosystem to give it more weight, was made. Within this coverage primary or natural forest was differentiated from that which presented secondary vegetation and which is indicative of some degree of disturbance. The last group of variables was climatic. The first map included was the climate one based on Köppen modified by García (2004). Other factors considered were total annual rainfall, horizontal precipitation (moisture intake due to the presence of fog), mean annual temperature, actual evapotranspiration and water excesses in the region.



de éstas con las variables ambientales seleccionadas. La información de presencia de cada especie se obtuvo en campo mediante una distribución al azar de 15 puntos de muestreo y parcelas de 250 m<sup>2</sup> ubicadas en las áreas con bosque mesófilo. En cada sitio se recabó información de las coordenadas de ubicación de cada especie y el diámetro normal a la altura del pecho. El muestreo se llevó a cabo en los meses de septiembre a noviembre de 2009, justo cuando había terminado la época de lluvias en la región.

#### Análisis factorial de nicho ecológico (AFNE)

El principio que sigue el AFNE es comparar la distribución actual de las variables ambientales con la información de presencia de una especie (o distribución) para toda el área de interés. El AFNE que realiza Biomapper es un análisis estadístico de reducción de dimensiones para extraer de un grupo amplio de variables, aquellas combinaciones lineales que mejor capturan el comportamiento del grupo. El análisis también es llamado análisis de componentes principales (ACP), donde es común encontrar que el primer componente principal extraído captura la mayor cantidad de información de todas las variables. Aunque es una técnica estadística que puede ser sujeta a cuestionamientos, como la posible baja correlación entre variables, se decidió continuar con su aplicación tal como lo realizaron Filmer y Pritchett (2001) y la Comisión Nacional de Población (CONAPO, 2005) en la obtención de índices de marginación. Así, al integrar todas las variables ambientales y todos los mapas de distribución potencial de las especies junto con el valor medio ( $m$ ), la desviación estándar ( $s$ ) y los pesos ( $f_n$ ) de cada indicador ( $i$ ), se obtiene un puntaje final del primer componente principal extraído ( $P$ ) como se muestra en la fórmula:

$$P = f_1(i_{1j} - m_1)/(s_1) + \dots + f_n(i_{nj} - m_n)/(s_n)$$

El puntaje final extraído por Biomapper se interpretó, en este estudio, como el análisis global o el nicho ecológico del bosque mesófilo de montaña, toda vez que se integraron las variables ambientales y todas las especies estudiadas.

Además de lo anterior, se obtienen dos factores importantes: uno de marginación y otro de especialización. El factor de marginación se refiere a qué tanto difiere el nicho de la especie, comparado con las condiciones ambientales del área estudiada. Un valor cercano a cero indica que la especie tiende a vivir en condiciones promedio, mientras que un valor cercano a uno indica una tendencia a vivir en hábitats más extremos, o marginales. El factor de marginalidad es calculado mediante la siguiente fórmula, donde  $M_i$  es el coeficiente del factor de marginalidad estimado:

$$M = \sqrt{(S_{i=1, v} M_i^2)/1.96}$$

El factor de especialización maximiza la varianza del área estudiada respecto de la distribución de la especie en cuestión. Es decir, en nuestro caso, mide qué tan amplio es el ni-

#### Potential species distribution

Representative cloud forest species (Ángeles, 2009; Luna & Alcántara, 2004) that were analyzed in this study were: *Liquidambar macrophylla* Oerst., *Alnus arguta* Schl., *Carpinus caroliniana* Walt, *Clethra Mexicana* DC, *Pinus patula* Schiede & Deppe, *Nectandra sanguinea* Rottb., *Podocarpus reichei* Buchholz et Gray, as well as *Quercus eugeniifolia* Liebm., *Q. sapotifolia* Liebm. and *Q. sartorii*, regarded henceforth as *Quercus* spp. For each species a potential distribution map was produced in Biomapper using the spatial correlation of the presence of each of these with the selected environmental variables. Presence information for each species was obtained in the field using a random distribution of 15 sampling sites and 250 m<sup>2</sup> plots located in areas with cloud forest. At each site, information was gathered on the location coordinates of each species and normal diameter at breast height. Sampling was conducted in the months of September to November 2009, just when the rainy season in the region had ended.

#### Ecological niche factor analysis (ENFA)

The principle behind ENFA is to compare the current distribution of environmental variables with the presence information of a species (or distribution) for the entire area of interest. The ENFA that Biomapper performs is a statistical analysis of reduced dimensions for extracting from a broad group of variables those linear combinations that best capture the behavior of the group. The analysis is also called principal component analysis (PCA), where it is common to find that the first principal component extracted captures the greatest amount of information from all variables. Although it is a statistical technique that may be open to question, regarding, for example, the possible low correlation between variables, it was decided to continue with its application, as was done by Filmer and Pritchett (2001) and the National Commission on Population (CONAPO, 2005) for obtaining marginalization indexes. Thus, by integrating all environmental variables and all potential distribution maps of the species along with the mean ( $m$ ), standard deviation ( $s$ ) and weights ( $f_n$ ) of each indicator ( $i$ ), we obtained a final score of the first principal component extracted ( $P$ ) as shown in the formula:

$$P = f_1(i_{1j} - m_1)/(s_1) + \dots + f_n(i_{nj} - m_n)/(s_n)$$

The final score extracted by Biomapper was interpreted, in this study, as the overall analysis or the ecological niche of the cloud forest, once the environmental variables and all species studied were integrated.

In addition to the above, two important factors are obtained: marginalization and specialization. The marginalization factor refers to how much the niche of the species differs from the environmental conditions of the study area. A value close to zero indicates that the species tends to live in average con-

cho ecológico de la planta. Un valor cercano a cero indicará que la planta es muy “especializada” o que tiende a requerir condiciones muy estrechas o limitadas. Un valor cercano a uno indica que no es “exigente” con el medio que la rodea. El factor de especialización es calculado a través de la siguiente fórmula, donde  $V$  es el número de variables ambientales y  $l_i$  son los autovalores:

$$S = \sqrt{(S_{i=1, v} (l_i)/V)}$$

Por último, también se estimó un valor de tolerancia global de la especie, que es lo inverso del factor de especialización, como se indica en la fórmula:

$$T = 1/S$$

Es importante recordar que en Biomapper (Hirzel et al., 2002b), la marginalidad y especialización dependen de la información referente al área de estudio. Una especie puede ser altamente marginal si el área de estudio es muy extensa o si se incluyen muchas regiones diferentes en el análisis; pero no mostrará marginalidad si el área de estudio se ajusta (o es igual) a la distribución espacial de la especie. Algunos autores sugieren que los valores pueden ser usados sólo para comparar muchas especies de una misma área o bien para estudiar cómo es la dinámica ecológica de una especie con el paso del tiempo en una región determinada (Hirzel, Hausser, Chessel, & Perrin, 2002a; Ureta, Martínez-Meyer, Perales, & Álvarez-Buylla, 2012).

#### Hábitat conveniente actual y futuro

La asignación de pesos para el conjunto de variables en el AFNE fueron utilizados para el mapeo del hábitat, en este caso, para cada especie estudiada del bosque mesófilo. El mapa obtenido por especie se decidió llamarlo mapa de “hábitat conveniente”. Biomapper requiere que se seleccione un algoritmo de integración (puntos medios, distancia media geométrica, distancia media armónica o distancia mínima), para lo cual se decidió probar todas las salidas. En donde se obtuvo mayor varianza explicada se decidió llamarlo “hábitat conveniente actual” y fue el escenario base. El “hábitat conveniente futuro” se construyó bajo el mismo criterio y con los métodos antes señalados, sólo cambiando algunos mapas con escenarios de cambio climático. Los mapas reemplazados fueron seis: temperatura, precipitación, precipitación horizontal, demasías de agua, evapotranspiración actual y humedad del suelo. En todos los casos se aplicaron valores medios anuales para dos modelos de cambio climático: el European Centre Hamburg Model (ECHAM5) y el Hadley Centre Global Environmental Model (HADGEM), bajo el escenario de emisiones A2 para el año 2050. Cabe señalar que los cambios fueron obtenidos del Atlas Climático Digital de México ([www.atlasclimatico.unam.mx](http://www.atlasclimatico.unam.mx)). Los dos modelos indicados se usaron dado que ya han sido aplicados en estudios anteriores en México, mostrando resultados aceptables (Instituto Nacional de Ecología [INE], 2006, 2009).

ditions, while a value close to one indicates a tendency to live in more extreme or marginal habitats. The marginality factor is calculated by the following formula, where  $M_i$  is the coefficient of the estimated marginality factor:

$$M = \sqrt{(S_{i=1, v} M_i^2)/1.96}$$

The specialization factor maximizes the variance of the study area with respect to the distribution of the species in question. That is, in our case, it measures how wide the ecological niche of the plant is. A value close to zero indicates that the plant is very “specialized” or that it tends to require very narrow or limited conditions. A value close to one indicates that it is not “demanding” in regards to its surrounding environment. The specialization factor is calculated through the following formula, where  $V$  is the number of environmental variables and  $l_i$  are the eigenvalues:

$$S = \sqrt{(S_{i=1, v} (l_i)/V)}$$

Finally, we also estimated an overall tolerance value of the species, which is the inverse of the specialization factor, as shown in the formula:

$$T = 1/S$$

It is important to remember that in Biomapper (Hirzel et al., 2002b), marginality and specialization depend on information relating to the study area. A species can be highly marginal if the study area is very extensive or if many different regions are included in the analysis, but it will not display marginalization if the study area is adjusted (or is equal) to the spatial distribution of the species. Some authors suggest that the values can be used only to compare many species in the same area or to study how the ecological dynamics of a species is over time in a given region (Hirzel, Hausser, Chessel, & Perrin, 2002a; Ureta, Martínez-Meyer, Perales, & Álvarez-Buylla, 2012).

#### Current and future suitable habitat

The weighting for the set of variables in the ENFA was used for habitat mapping, in this case, for each cloud forest species studied. It was decided to call the map obtained per species the “suitable habitat” map. Biomapper requires selecting an integration algorithm (midpoints, geometric mean distance, harmonic mean distance or minimum distance), for which it was decided to test all the outputs. Where higher explained variance was obtained, it was decided to call it “current suitable habitat” and it was the baseline scenario. The “future suitable habitat” map was built using the same criteria and the methods outlined above, only changing some maps with climate change scenarios. Six maps were replaced: temperature, precipitation, horizontal precipitation, water excesses, actual evapotranspiration and soil moisture. In all cases average annual values were applied for two climate change models: the European Centre Hamburg Model (ECHAM5) and the Had-

**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

**Variables ambientales**

En el Cuadro 2 se presenta la matriz de correlación entre las doce variables incluidas en el estudio. Las variables climáticas se encuentran altamente correlacionadas entre sí, incluso al compararse con otras variables. Por ejemplo, la variable precipitación y demasías de agua anual tienen una correlación del 90 %; y la primera junto con la humedad en el suelo de 83 %. Es importante resaltar el comportamiento de las variables en las zonas donde aún se conserva bosque mesófilo. La correlación mayor que encontramos fue de 79 % entre aquellas regiones que conservan bosque mesófilo con la variable que indica la presencia de precipitación horizontal o niebla. Como ha sido ampliamente documentado, a este tipo de comunidad también se le llama bosque de niebla o cloud forest, debido a la peculiar característica de observar presencia de niebla durante buena parte del año (Luna & Alcántara, 2004; Monterroso, 2009).

ley Centre Global Environmental Model (HADGEM) under the A2 emissions scenario for the year 2050. It should be noted that the changes were obtained from the Digital Climatic Atlas of Mexico ([www.atlasclimatico.unam.mx](http://www.atlasclimatico.unam.mx)). The two models indicated were used as they had already been applied in previous studies in Mexico, showing acceptable results (National Ecology Institute [INE], 2006, 2009).

**RESULTS AND DISCUSSION**

**Environmental variables**

Table 2 presents the correlation matrix for the twelve variables included in the study. The climatic variables are highly correlated with each other, even when compared to other variables. For example, the variable precipitation and annual water excesses have 90 % correlation, and the first together with soil moisture has 83 %. It is important to highlight the behavior of the variables in areas where cloud forest is still preserved. The highest correlation we found was 79 %,

**CUADRO 2. Matriz de correlación ( $P > 0.05$ ) entre las variables de estudio.**

	BMM	PHR	CL	DA	EDA	ETA	HSU	PA	ST	TA	US	VNS
BMM	1.000											
PHR	0.798	1.000										
CL	-0.005	-0.020	1.000									
DA	0.397	0.409	0.256	1.000								
EDA	0.036	0.068	-0.062	0.175	1.000							
ETA	0.017	-0.032	0.846	0.248	-0.163	1.000						
HSU	0.211	0.198	0.695	0.659	0.037	0.713	1.000					
PA	0.326	0.315	0.568	0.909	0.071	0.627	0.835	1.000				
ST	0.216	0.286	0.073	0.574	0.352	-0.005	0.327	0.459	1.000			
TA	-0.163	-0.212	0.503	-0.317	-0.403	0.669	0.230	0.032	-0.504	1.000		
US	0.566	0.479	-0.242	0.102	0.064	-0.226	-0.114	-0.015	0.084	-0.246	1.000	
VNS	0.512	0.394	-0.292	-0.023	-0.012	-0.289	-0.190	-0.143	-0.012	-0.210	0.816	1.000

BMM = Presencia de bosque mesófilo de montaña, PHR = Precipitación horizontal, CL = Tipo de clima, DA = Meses del año con demasías de agua, EDA = Tipo de suelo, ETA = Evapotranspiración actual, HSU = Humedad almacenada en suelo, PA = Precipitación total anual, ST = Sistema de topoformas, TA = Temperatura media anual, US = Uso del suelo y vegetación, VNS = Vegetación natural y secundaria.

**TABLE 2. Correlation matrix ( $P > 0.05$ ) of study variables.**

	CF	HP	CT	WE	ST	AET	SSM	TAP	TS	AAT	LU	NSV
CF	1.000											
HP	0.798	1.000										
CT	-0.005	-0.020	1.000									
WE	0.397	0.409	0.256	1.000								
ST	0.036	0.068	-0.062	0.175	1.000							
AET	0.017	-0.032	0.846	0.248	-0.163	1.000						
SSM	0.211	0.198	0.695	0.659	0.037	0.713	1.000					
TAP	0.326	0.315	0.568	0.909	0.071	0.627	0.835	1.000				
TS	0.216	0.286	0.073	0.574	0.352	-0.005	0.327	0.459	1.000			
AAT	-0.163	-0.212	0.503	-0.317	-0.403	0.669	0.230	0.032	-0.504	1.000		
LU	0.566	0.479	-0.242	0.102	0.064	-0.226	-0.114	-0.015	0.084	-0.246	1.000	
NSV	0.512	0.394	-0.292	-0.023	-0.012	-0.289	-0.190	-0.143	-0.012	-0.210	0.816	1.000

CF = Cloud forest, HP = Horizontal precipitation, CT = Climate type, WE = Months of the year with water excesses, ST = Soil type, AET = Actual evapotranspiration, SSM = Stored Soil Moisture, TAP = Total annual precipitation, TS = Topoform system, AAT = Average annual temperature, LU = Land use and vegetation, NSV = Natural and secondary vegetation.

CUADRO 3. Superficie estimada (%) por tipo de hábitat para condiciones actuales en el bosque mesófilo de montaña en el estado de Hidalgo.

TABLE 3. Estimated area (%) by habitat type for current conditions in the cloud forest in the State of Hidalgo.

Hábitat/ Habitat	<i>Podocarpus reichei</i>	<i>Alnus arguta</i>	<i>Liquidambar macrophylla</i>	<i>Carpinus caroliniana</i>	<i>Clethra mexicana</i>	<i>Nectandra sanguinea</i>	<i>Pinus patula</i>	<i>Quercus spp.</i>
Inconveniente/ Unsuitable	92.9	73.3	73.3	68.7	82.3	80.4	77.6	-
Marginal/Marginal	5.9	9.5	9.5	1.2	9.7	17.1	19.7	-
Conveniente/ Suitable	-	8.3	8.3	18.3	0.8	-	-	-
Óptimo/ Optimal	1.2	8.9	8.9	11.8	7.2	2.5	2.7	100

La variable vegetación natural y secundaria (VNS) -que se refiere a las zonas que aún conservan bosques mesófilos naturales o con algún grado de perturbación- se comparó con las otras doce variables resultando que tiene correlaciones positivas y negativas con tres y ocho variables, respectivamente. Lo anterior sugiere un comportamiento similar con el mapa de uso de suelo, con el mapa de presencia de bosque mesófilo y con el de precipitación horizontal. Por otro lado, no es posible encontrar correlación con las demás variables, como por ejemplo la humedad en el suelo o los climas. Aunque se reconoce la naturaleza estadística y documental del estudio, se decidió continuar usando Biomapper al observar que los resultados ayudan a explicar la presencia de bosque mesófilo en la zona y a su interrelación con las variables climáticas.

#### Distribución actual y potencial de las especies

Este estudio fue principalmente de análisis de la distribución geográfica de las especies y su posible comportamiento espacial al considerar escenarios de cambio climático. En la Figura 2 se muestra la distribución espacial de los hábitats para cada especie en condiciones base o actuales, así como aquellas al considerar cambio climático y, en el Cuadro 3 se presentan las superficies ocupadas para las condiciones actuales. Los mapas representan la idoneidad del hábitat e indican cómo la combinación de las variables ambientales satisfacen los requerimientos de dichas especies (Sattler, Bontadina, Hirzel, & Arlettaz, 2007). Cabe señalar que se decidió agrupar el hábitat en cuatro clases de igual representatividad: hábitat inconveniente (0-25), marginal (26-50), conveniente (51-75) y óptimo (76-100).

***Pinus patula*.** De todas las especies estudiadas, es la que requiere condiciones ambientales más particulares. La especie *P. patula*, para su crecimiento, requiere la presencia de precipitación horizontal, existencia de bosque mesófilo, tipo de suelo y sistema de topografías. Por el contrario, no se encontró correlación significativa con el tipo de clima, evapotranspiración actual y presencia de vegetación natural o secundaria. La marginalidad calculada fue 1, el valor más alto de todas las especies estudiadas. La marginalidad mide el hábitat de la especie y qué tanto difiere de las condiciones

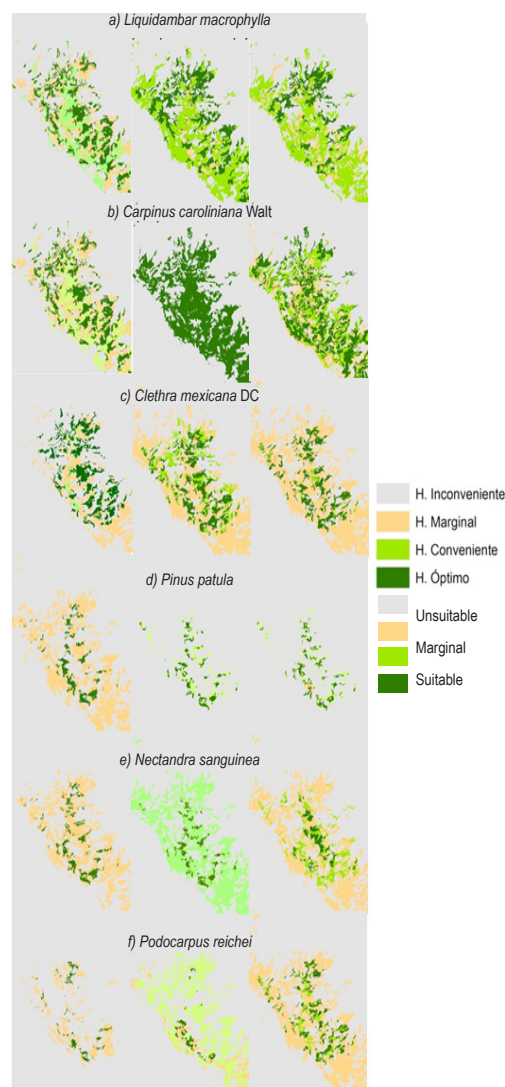


FIGURA 2. Distribución espacial del tipo de hábitat actual (primera columna) y futuro (2050: Modelo ECHAM segunda columna y modelo HADGEM tercera columna) para las especies evaluadas en el bosque mesófilo de montaña en el estado de Hidalgo.

FIGURE 2. Spatial distribution of the type of current habitat (first column) and future habitat (2050: ECHAM model second column and HADGEM model third column) for the species evaluated in the cloud forest in the State of Hidalgo.



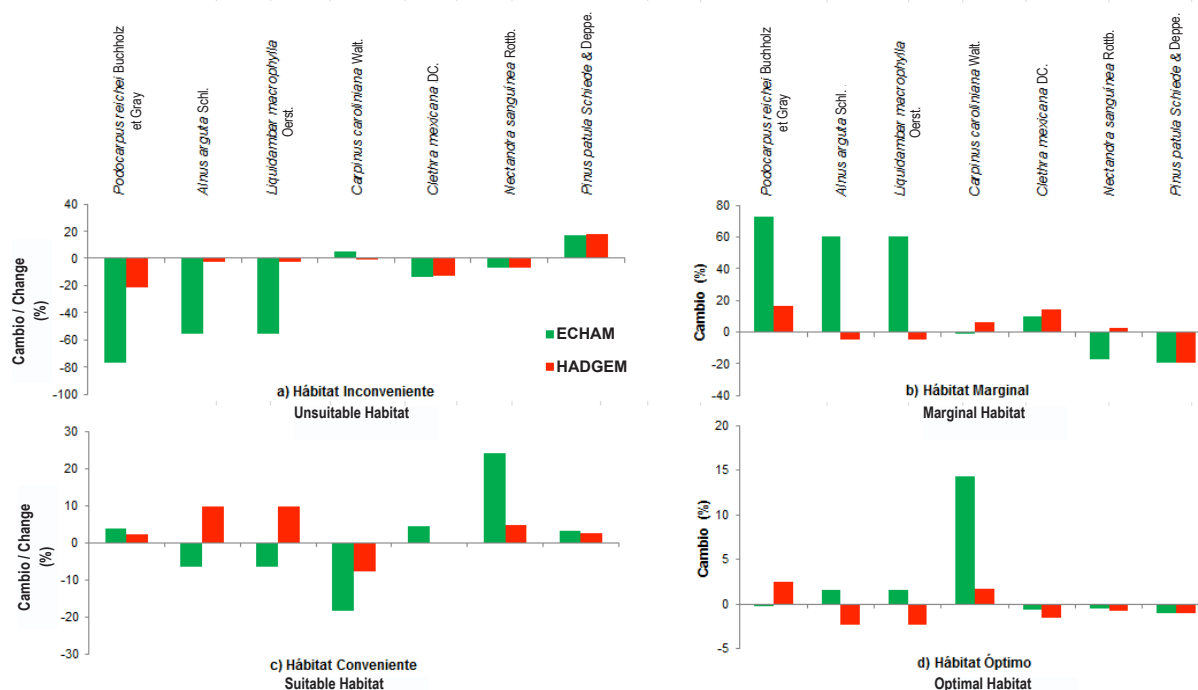


FIGURA 3. Cambio porcentual en el tipo de hábitat según especie y modelo de cambio climático aplicado para el año 2050.  
 FIGURE 3. Percentage change in the type of habitat by species and climate model applied for the year 2050.

ambientales disponibles en la zona de estudio, siendo el valor encontrado el máximo posible para una especie. Por su parte, la especialización mide qué tan amplio es el nicho ecológico de una especie, refiriéndose a que tan restringida se encuentra dentro de la región estudiada. En el caso de *Pinus*, la especialización encontrada fue 0, indicando las condiciones ambientales concretas que se requieren en la zona de estudio para el crecimiento y desarrollo de la planta. Por último, la tolerancia encontrada también fue 0, lo que refuerza la idea de que se trata de una especie muy “especializada”. Se encontró que únicamente el 2.7 % del área es óptima para la especie y el 77 % es inconveniente, en condiciones actuales. Los dos escenarios de cambio climático concuerdan en que la superficie será de 1.6 % para el primero y poco más del 95 % para el segundo; es decir, los modelos sugieren que la superficie en condiciones óptimas disminuirá 1 %, mientras que la superficie sin aptitud aumentará al menos 18 %.

**Podocarpus reichei.** Las variables que resultaron más relevantes para comprender el hábitat de la especie fueron la precipitación horizontal y las regiones con bosque mesófilo de montaña. No se encontró correlación con el tipo de suelo y con la evapotranspiración actual. Como resultado del análisis de nicho ecológico se obtuvo que la marginalidad de la especie fue de 0.62 mientras que su especialización fue de 0.38. De lo anterior, se definió que *Podocarpus* tiende a crecer en condiciones particulares y que en la zona de estudio son bien conocidas. *Podocarpus* es una planta especializada; es decir, el olivo o palmillo como también se le conoce, es una especie selectiva con el medio donde se desarrolla. De acuerdo con los resultados de hábitat actual, *P. reichei* tuvo la menor superficie óptima estimada por Biomapper con 1.2 % en el área

which was between preserved cloud forest regions and the variable indicating the presence of horizontal precipitation or fog. As has been widely documented, this type of community is also called a fog forest, due to the particular feature of having fog for much of the year (Luna & Alcántara, 2004; Monterroso, 2009).

The variable natural and secondary vegetation (NSV), which refers to areas that still have natural cloud forests or with some degree of disturbance, was compared with the other twelve variables, finding that it has positive and negative correlations with three and eight variables, respectively. This suggests a similar behavior to the land-use map, the cloud forest presence map and the horizontal precipitation one. On the other hand, it is not possible to find correlation with the other variables, such as soil moisture or the climatic ones. While recognizing the statistical and documentary nature of the study, it was decided to continue using Biomapper upon observing that the results help to explain the presence of cloud forest in the area and its relationship with the climatic variables.

**Current and potential species distributions**

This study was mainly conducted to analyze the geographical distribution of the species and their possible spatial behavior when considering climate change scenarios. Figure 2 shows the spatial distribution of habitats for each species in base or current conditions, as well as those when considering climate change, while Table 3 shows the areas occupied for the current conditions. The maps represent habitat suitability and indicate how the combination of environmental

estudiada. Por lo mismo, su hábitat inconveniente fue estimado en poco más de 92 %. Para esta especie, los escenarios de cambio climático son inciertos; el modelo ECHAM apunta que el hábitat óptimo se reducirá a 0.8 % mientras que el modelo HADGEM apunta que aumentará a 3.6 %. El modelo ECHAM señala que el hábitat inconveniente disminuirá el 76 % de su superficie, pasando de 92 % en condiciones actuales a 16 % para el año 2050. El modelo HADGEM también sugiere que la superficie será de 70 % (Figura 3). Los escenarios de cambio climático indican que la especie podría verse beneficiada, no lo suficiente para condiciones óptimas pero sí para condiciones marginales o convenientes.

**Liquidambar macrophylla y Alnus arguta.** Estas dos especies se agruparon dado que fueron encontradas en los mismos sitios. Las variables ambientales más relevantes para explicar el nicho de estas especies fueron la precipitación horizontal, demasías de agua y la presencia de bosque mesófilo. Por el contrario, no se encontró correlación significativa con el tipo de clima, temperatura anual y los sistemas terrestres. Además, se obtuvo un valor de marginalidad de 0.33, muy cercano al promedio en las cuales *L. macrophylla* Oerst. y *A. arguta* encuentran condiciones adecuadas para vivir, de ahí su amplia presencia en la zona de estudio. El valor de tolerancia fue 1.42, lo que sugiere la flexibilidad de hábitat requerido por las especies, es decir, son más tolerantes con su medio. Poco más de 73 % de la superficie es inconveniente, mientras que poco menos de 9 % es hábitat óptimo. Los escenarios de cambio climático sugieren que, para el año 2050, la superficie inconveniente abarcará 70 % según el modelo HADGEM y 18 % según el modelo ECHAM. Las categorías marginal y conveniente incrementarían superficie, hasta en 60 % (según ECHAM) y 8 % (según HADGEM), respectivamente (Figura 3). Por lo anterior, es posible señalar que las especies podrían ver aumentados sus hábitats marginales, a expensas de aquellos óptimos o incluso inconvenientes. Además, hay que considerar que ambas especies se desarrollan bien en ambientes perturbados.

**Carpinus caroliniana.** Las variables con correlación significativa para el nicho de la especie fueron la precipitación horizontal, la presencia del bosque mesófilo de montaña y las demasías de agua. Las variables con menor correlación fueron la humedad en el suelo y el tipo climático. Para esta especie, encontramos valores de 1.36 en marginalidad y 0.58 de especialización. Lo anterior denota que en la zona de estudio, *C. caroliniana* es una especie marginal pero no especializada, su nicho ecológico se encuentra ampliamente distribuido pero hay algunas variables que deben ser consideradas para completar su hábitat. Esta especie, después de *Quercus*, tuvo la mayor superficie de hábitat óptimo en el escenario actual, con 11.8 % del área. Poco menos de 69 % es hábitat inconveniente. Al aplicar cambio climático se observó una tendencia irregular y extremista, difícil de corroborar únicamente con datos estadísticos. Los dos modelos sugieren que el hábitat óptimo aumentará a 13.5 %

variables satisfies the requirements of these species (Sattler, Bontadina, Hirzel, & Arlettaz, 2007). It should be noted that it was decided to group habitat into four classes of equal representativeness: unsuitable (0-25), marginal (26-50), suitable (51-75) and optimal (76-100) habitat.

**Pinus patula.** Of all the species studied, it is one that requires the most specific environmental conditions. For growth, the species *P. patula* requires the presence of horizontal precipitation, existence of cloud forest, soil type and topoform system. By contrast, no significant correlation was found with climate type, actual evapotranspiration and presence of natural or secondary vegetation. The marginality calculated was 1, the highest value of all species studied. Marginality measures the habitat of the species and how much it differs from the environmental conditions in the study area, with the value found being the maximum possible for a species. For its part, specialization measures how wide the ecological niche of a species is, referring to how restricted it is within the region studied. In the case of *Pinus*, the specialization found was 0, indicating the specific environmental conditions required in the study area for the growth and development of the plant. Finally, tolerance was also found to be 0, which reinforces the idea that this is a very “specialized” species. It was found that only 2.7 % of the area is optimal for the species and 77 % is unsuitable, under current conditions. The two climate change scenarios agree that the area will be 1.6 % for the first and just over 95 % for the second; that is, the models suggest that the area in optimal conditions will decrease by 1 %, while the unsuitable area will increase by at least 18 %.

**Podocarpus reichei.** The variables that were the most relevant to understanding the habitat of this species were horizontal precipitation and regions with cloud forest. There was no correlation with soil type and actual evapotranspiration. As a result of ecological niche analysis, the marginality of the species obtained was 0.62, while its specialization was 0.38. From the above, it was determined that *Podocarpus* tends to grow in particular conditions which are well-known in the study area. *Podocarpus* is a specialized plant; that is, the *olivo* or *palmillo*, as it is also known in Mexico, is a species selective with the environment where it grows. According to the current habitat results, *P. reichei* had the lowest optimal area estimated by Biomapper with 1.2 % in the study area, and its unsuitable habitat was estimated at just over 92 %. For this species, climate change scenarios are uncertain; the ECHAM model indicates that the optimal habitat will decrease to 0.8 %, while the HADGEM model shows that it will increase to 3.6 %. The ECHAM model indicates that the unsuitable habitat will decrease in area by 76 %, from 92 % in current conditions to 16 % by the year 2050. The HADGEM model also suggests that the area will decrease by 70 % (Figure 3). Climate change scenarios indicate that the species could benefit, not enough for optimal conditions but for marginal or suitable conditions.

(HADGEM) o 26.2 % (ECHAM). El hábitat no apto o inconveniente se mantendrá igual según HADGEM o aumentará a 74 % según ECHAM (Figura 3). Lo anterior a expensas de los hábitats marginales o convenientes; es decir, en la región habrá condiciones óptimas o no óptimas, pero no intermedias. Los escenarios de cambio climático apuntan a que las condiciones se volverán más extremas para la especie.

***Clethra mexicana***. También es conocida como marangola y es un árbol abundante que forma parte del dosel superior del bosque. Las variables que definen su hábitat son amplias y señalamos la precipitación horizontal, la presencia de bosque mesófilo y la existencia de demasías de agua. Se observó baja correlación con la humedad en el suelo, evapotranspiración y grupo climático. La marginalidad estimada fue 0.73, lo que sugiere un valor por encima de la media en las especies y zona de estudio, de ahí su abundancia. La especialización fue 0.74 que también sugiere la amplitud del nicho de la especie en la región de estudio. La especie es tolerante (valor de 1.42) a las condiciones ambientales en el área estudiada, presenta poco más del 80 % de la superficie como hábitat inconveniente, mientras que 7.7 % fue definido como hábitat óptimo. Este último es considerado en disminución por los escenarios de cambio climático, al pasar a 6.5 % según el modelo ECHAM y a 5.5 % según HADGEM; es decir, disminución de 1.2 % y de 2.2 %, respectivamente. Los tipos de hábitat intermedios (marginal y conveniente) serán los que tendrán incremento mayor en la superficie, pudiendo ir de 5 % a incluso 15 %, dependiendo del modelo a considerar. Los escenarios de cambio climático concuerdan en que el hábitat inconveniente también disminuirá su superficie, en 14 % según ECHAM y 13 % según HADGEM (Figura 3). Por tanto, es posible señalar que, para la especie, se prevé que disminuirán las condiciones óptimas, aumentando las marginales.

***Nectandra saligna***. El nicho de la especie está explicado por la presencia de demasías de agua, precipitación horizontal y el tipo de suelo, mientras que es limitado por la humedad en el suelo. La marginalidad y especialización calculadas fueron 0.84 y 0, respectivamente, lo que indica un nivel elevado de especialización. Poco más de 80 % del área es inconveniente y el 2.5 % es hábitat óptimo. Al aplicar cambio climático observamos una tendencia a disminuir el hábitat óptimo, al pasar a 2.2 % según ECHAM y a 1.8 % según HADGEM. El hábitat inconveniente disminuye a 73 % según los dos modelos; es decir, una disminución de alrededor de 7 %. Las condiciones marginales son las que pueden incrementar superficie en 3 % según HADGEM y disminuir 7 % según ECHAM. La especie en el futuro dejará de tener condiciones óptimas, aumentando sus hábitats marginales a la vez que disminuyen los no aptos.

***Quercus spp.*** La correlación de las variables ambientales es uniforme en el área de estudio para las tres especies incluidas (*Q. eugeniifolia*, *Q. sapotifolia*, y *Q. sartorii*) en la evaluación. A diferencia del resto de las especies estudiadas, la marginalidad estimada fue 0 y la especialización fue 1.

***Liquidambar macrophylla* and *Alnus arguta***. These two species were grouped together since they were found at the same sites. The most relevant environmental variables to explain the niche of these species were horizontal precipitation, water excesses and the presence of cloud forest. By contrast, no significant correlation was found with climate type, annual temperature and terrestrial systems. In addition, we obtained a marginality value of 0.33, very close to the average in which *L. macrophylla* Oerst. and *A. arguta* find suitable living conditions, hence its wide presence in the study area. The tolerance value was 1.42, suggesting the habitat flexibility required by the species, i.e., they are more tolerant with their environment. Just over 73 % of the area is unsuitable, while just less than 9 % is optimal habitat. Climate change scenarios suggest that by 2050, the unsuitable area will cover 70 % according to the HADGEM model and 18 % according to the ECHAM model. The marginal and suitable categories will increase in area, up to 60 % (according to ECHAM) and 8 % (according to HADGEM), respectively (Figure 3). Therefore, it is possible to say that the species might increase their marginal habitat at the expense of those optimal or even unsuitable areas. It should also be noted that both species thrive in disturbed environments.

***Carpinus caroliniana***. Variables with significant correlation for the niche of this species were horizontal precipitation, the presence of cloud forest and water excesses. The variables with the least correlation were soil moisture and climate type. For this species, we find values of 1.36 in marginality and 0.58 in specialization. This indicates that in the study area, *C. caroliniana* is a marginal but not specialized species; its ecological niche is widely distributed but there are some variables that must be considered to complete its habitat. This species, after *Quercus*, had the largest area of optimal habitat in the current scenario, with 11.8 % of the area. Just less than 69 % is unsuitable habitat. By applying climate change, we observed an uneven and extreme trend, which is difficult to corroborate only with statistical data. Both models suggest that the optimal habitat will increase to 13.5 % (HADGEM) or 26.2 % (ECHAM). The unsuitable habitat will remain the same according to HADGEM or rise to 74 % according to ECHAM (Figure 3). The above will be at the expense of marginal or suitable habitats, i.e., in the region there will be optimal or unsuitable conditions, but no intermediate ones. Climate change scenarios suggest that conditions will become more extreme for the species.

***Clethra mexicana***. It is also known as marangola in Mexico and it is an abundant tree that forms part of the upper forest canopy. The variables that define its habitat are numerous and we only took into account horizontal precipitation, the presence of cloud forest and the existence of water excesses. Low correlation was observed with soil moisture, evapotranspiration and climate group. The marginality estimated was 0.73, suggesting a value above the average in the species and study area, hence its abundance. The specialization was 0.74, which also suggests the breadth of the species' niche in

Lo que se traduce en que el género se distribuye por toda el área de estudio y se trata de una planta no especializada, en otras palabras, no es selectiva en su medio. Como los encinos están ampliamente distribuidos en la zona de estudio, su hábitat fue determinado como óptimo en la región, tanto para condiciones actuales como para aquéllas señaladas por los dos modelos de cambio climático. Esta especie será tolerante a los cambios previstos (al menos a los aquí evaluados) por cambio climático.

En el ecosistema del bosque mesófilo es posible identificar tres estratos arbóreos: alto, medio y bajo (Luna et al., 1994; Ponce-Vargas, Luna-Vega, Alcántara-Ayala, & Ruiz-Jiménez, 2006). Algunos árboles representativos del estrato alto son *Clethra*, *Liquidambar* y algunas especies de *Quercus* (es posible encontrar individuos de más de 20 m de altura). En el estrato medio se han encontrado *Carpinus* y *Quercus*, con alturas promedio de 10 a 20 m. De los ejemplos anteriores, los resultados muestran que las especies del estrato alto y medio podrían verse afectadas bajo condiciones futuras de cambio climático. Si estas especies se verán impactadas por algún cambio en el clima futuro, entonces es posible discernir otros impactos potenciales para las especies de flora y fauna que habitan en este ecosistema y que dependen de los estratos altos para poder crecer y desarrollarse. De las especies estudiadas sólo *C. caroliniana* se encuentra en la Norma Oficial Mexicana NOM-059 (Diario Oficial de la Federación [DOF], 2010) en la categoría de amenazada. Los resultados permiten sostener que en el futuro, la variable de cambio climático deberá incluirse para enriquecer los criterios considerados que definan algún estatus de riesgo. De las ocho especies estudiadas, seis resultaron con algún impacto negativo en su posible distribución futura al considerar los escenarios de cambio climático descritos. Si en el futuro se reducen las áreas con hábitats adecuados, entonces el cambio climático debería ser un criterio más que permita establecer el estado de riesgo para las especies (Ureta et al., 2012).

Las laderas expuestas al norte conservan mayor humedad que aquéllas hacia el sur, encontrando ejemplares arbóreos mejor desarrollados en la cara norte de las montañas (Luna et al., 1994). Esta variable no fue incluida en el presente estudio, pero se considera importante dejar asentada la importancia que tiene en la región y que debería ser incluida en estudios futuros.

Los bosques mesófilos se caracterizan por la presencia de nubes a nivel de la vegetación (Hamilton, Juvik, & Scatena, 1995), de ahí la importancia de la niebla para la ecología de este ecosistema. Consideramos que el presente estudio es una aproximación más detallada en la evaluación de estas condiciones climáticas particulares del ecosistema. La fortaleza que se subraya es la inclusión de esta variable (niebla), tanto en condiciones actuales como aquellas modeladas al futuro, en un análisis de distribución potencial y evaluación de posibles impactos por cambio climático.

the study region. The species is tolerant (value of 1.42) to the environmental conditions in the study area and has just over 80 % of the area as unsuitable habitat, while 7.7 % was identified as optimal habitat. The latter is projected to decrease by climate change scenarios, to 6.5 % according to the ECHAM model ECHAM and 5.5 % according to the HADGEM one, that is, a decrease of 1.2 % and 2.2 %, respectively. Intermediate habitat types (marginal and suitable) will increase the most in area, possibly rising from 5 % to 15 %, depending on the model used. Climate change scenarios agree that the unsuitable habitat will also decrease in area, by 14 % according to ECHAM and 13 % according to HADGEM (Figure 3). Therefore, it is possible to state that, for the species, optimal conditions are expected to decrease and marginal ones to increase.

***Nectandra saligna*.** The niche of this species is explained by the presence of water excesses, horizontal precipitation and soil type, whereas it is limited by soil moisture. The marginality and specialization calculated were 0.84 and 0, respectively, indicating a high level of specialization. Just over 80 % of the area is unsuitable and 2.5 % is optimal habitat. By applying climate change, we observed a downward trend for optimal habitat, dropping to 2.2 % according to ECHAM and 1.8 % according to HADGEM. Unsuitable habitat decreases to 73 % according to the two models, i.e., a reduction of about 7 %. Marginal conditions may increase in area by 3 % according to HADGEM or decrease by 7 % according to ECHAM. In the future the species will have optimal conditions, as its marginal habitats will increase while its unsuitable ones will decrease.

***Quercus spp.*** The correlation of environmental variables is uniform in the study area for the three species included (*Q. eugeniifolia*, *Q. sapotifolia*, and *Q. sartorii*) in the evaluation. Unlike the rest of the species studied, the estimated marginality was 0 and specialization was 1, which means that the genus is distributed throughout the study area and that it is a non-specialized plant; in other words, it is not selective with its environment. As the oaks are widely distributed in the study area, their habitat was determined to be optimal in the region, both for current conditions and those identified by the two climate change models. This species will be tolerant to the expected changes (at least those evaluated here) due to climate change.

In the cloud forest ecosystem it is possible to identify three tree strata: high, medium and low (Luna et al., 1994; Ponce-Vargas, Luna-Vega, Alcántara-Ayala, & Ruiz-Jiménez, 2006). Some trees representative of the upper stratum are *Clethra*, *Liquidambar* and some species of *Quercus* individuals over 20 m in height can be found). In the middle stratum *Carpinus* and *Quercus* have been found, with average heights of 10-20 m. In the examples above, the results show that species in the high and middle strata could be affected under future climate change conditions. If these species are impacted by any future climate change, then it is possible to



En estudios recientes (CONABIO, 2000, 2010), la región hidalguense se identifica como prioritaria, según criterios ambientales y de conservación. Si se suman los resultados aquí obtenidos, entonces habrá otro criterio más que lleva a concluir que los bosques mesófilos deben ser sujetos a más estudios y esfuerzos de conservación (Ponce et al., 2012). Los niveles de amenaza al ecosistema son altos (CONABIO, 2010) y hay que sumar lo que el cambio climático significa. Los resultados aquí presentados se suman a trabajos anteriores (López-Mata, Villaseñor, Cruz-Cárdenas, Ortiz, & Ortiz-Solorio, 2012) y significan un acercamiento más en su comprensión.

## CONCLUSIONES

De las ocho especies estudiadas encontramos que es posible que los nichos de *Podocarpus* y *Quercus* se modifiquen en el futuro por cambio climático para mejorar sus condiciones actuales. La “posible mejora” debe tomarse con cautela y marca necesidades futuras de investigación. Para las otras seis especies: *L. macrophylla*, *A. arguta*, *C. caroliniana*, *C. mexicana*, *P. patula*, y *N. sanguinea*; los resultados indican que sus condiciones actuales se verán afectadas y, por tanto, las superficies óptimas para su crecimiento disminuirán. Si las especies forestales se verán afectadas por cambios en el clima, entonces también lo será el bosque mesófilo como ecosistema. Extrapolando los resultados de la evaluación de las especies, se refuerza la idea de lo sensible que es el ecosistema a los posibles impactos del cambio climático. Las características ecológicas son tan particulares que su grado de especialización es alto y su marginalidad en la región también es elevada. Se requiere que nuevas investigaciones incorporen el tema de escenarios futuros, con objeto de comprender mejor el posible impacto y distribución del ecosistema.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento parcial del CONACYT-Gobierno del estado de Hidalgo a través de los proyectos de fondos mixtos 73654 y 98157; así como a los revisores anónimos cuyas valiosas sugerencias ayudaron a mejorar el manuscrito.

## REFERENCIAS

- Álvarez-Zuñiga, E., Sánchez-González, A., López-Mata, L., & Tejero-Díez, J. D. (2012). Composición y abundancia de las pteridofitas en el bosque mesófilo de montaña del municipio de Tlanchinol, Hidalgo, México. *Botanical Sciences*, 90(2), 163–177. Obtenido de [http://www.ibiologia.unam.mx/sociedad/www/pdf/BSBM%2090\\_2/BS90\\_2\\_163-177.pdf](http://www.ibiologia.unam.mx/sociedad/www/pdf/BSBM%2090_2/BS90_2_163-177.pdf)
- Ángeles, P. G. (2009). El bosque mesófilo de montaña en el estado de Hidalgo. In Monterroso, A. (Ed.), *El bosque mesófilo de montaña en el estado de Hidalgo: Perspectiva ecológica frente al cambio climático* (1a ed., pp. 39–54). México: Universidad Autónoma Chapingo.

discern other potential impacts to species of flora and fauna that inhabit this ecosystem and that depend on the upper strata in order to grow and develop. Of the species studied only *C. caroliniana* is in the Mexican Official Norm NOM-059 (Official Journal of the Federation [DOF], 2010) in the category of threatened. The results support the view that in the future the climate change variable should be included to enrich the criteria considered to define a risk status. Of the eight species studied, six were projected to experience some negative impact on their possible future distribution based on the climate change scenarios described. If suitable habitat areas are reduced in the future, then climate change should be a criterion for establishing the state of risk for the species (Ureta et al., 2012).

The north-facing slopes retain more moisture than those facing the south, with better-developed tree specimens being found on the north side of the mountains (Luna et al., 1994). This variable was not included in this study, but it is considered important to state the importance that it has in the region and that it should be included in future studies.

Cloud forests are characterized by the presence of clouds at the vegetation level (Hamilton, Juvik, & Scatena, 1995), hence the importance of the fog to the ecology of this ecosystem. We believe that this study is a more detailed approach to the assessment of these particular climatic conditions of this ecosystem. The main strength of our study the inclusion of this variable (fog), both in current and projected future conditions, in an analysis of potential distribution and evaluation of possible climate change impacts.

Recent studies (CONABIO, 2000, 2010) have identified the Hidalgo region as a priority, based on environmental and conservation criteria. If the results obtained here are added to this knowledge, then there will be another criterion that leads to the conclusion that cloud forests should be subject to further study and conservation efforts (Ponce et al., 2012). The threat levels to the ecosystem are high (CONABIO, 2010) and must be added to what climate change means. The results presented here add to previous work on this ecosystem (López-Mata, Villaseñor, Cruz-Cárdenas, Ortiz, & Ortiz-Solorio, 2012) and represent an additional approach to understanding it.

## CONCLUSIONS

Of the eight species studied, we find that the niches of *Podocarpus* and *Quercus* may be improved by future climate change. The “possible improvement” should be taken with caution and guide future research. For the other six species (*L. macrophylla*, *A. arguta*, *C. caroliniana*, *C. mexicana*, *P. patula*, and *N. sanguinea*), the results indicate that their current conditions will be affected and that their optimal areas for growth will decrease. If forest species are affected by climate changes, then so also will be the cloud forest as an ecosystem. Extrapolating the results of the species eva-

- Challenger, A. (1998). La zona ecológica templada húmeda (el bosque mesófilo de montaña). In Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Ed.), *Utilización y conservación de los ecosistemas terrestres de México, pasado, presente y futuro* (pp. 443–518). México: CONABIO.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2000). *Regiones terrestres prioritarias*. México: Autor.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2010). *El bosque mesófilo de montaña en México: Amenazas y oportunidades para su conservación y manejo sostenible*. México D.F.: Autor.
- Consejo Nacional de Población (CONAPO). (2005). *Grados de marginación en México 2005* (1a ed.). México, D.F.: Autor.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (30 de diciembre de 2010). Norma Oficial Mexicana 059-SEMARNAT. Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo, p. 78.
- Filmer, D., & Pritchett, H. (2001). Estimating wealth effects without expenditure data -or tears: An application to educational enrolments in States of India. *Demography*, 38, 115–131.
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen* (5a ed.). México: Instituto de Geografía, UNAM.
- Hamilton, L., Juvik, J., & Scatena F. (1995). *Tropical montane cloud forests*. New York, USA: Springer Verlag.
- Hirzel, A., Hausser, J., Chessel, D., & Perrin, N. (2002a). Ecological-niche factor analysis: How to compute habitat suitability maps without absence data? *Ecology*, 83, 2027–2036. doi: 10.1890/0012-9658(2002)083[2027:ENFAHT]2.0.CO;2
- Hirzel, A., Hausser, J., & Perrin, N. (2002b). Biomapper 3.1. Lausanne Univ. Laboratory for Conservation Biology. Obtenido de <http://www.unil.ch/biomapper>
- Hortal, J., & Lobo, J. (2002). Una metodología para predecir la distribución espacial de la diversidad biológica. *Ecología*, 16, 151–178. Obtenido de [http://www.magrama.gob.es/es/organismo-autonomo-parques-nacionales-oapn/publicaciones/ecologia\\_16\\_23\\_tcm7-45749.pdf](http://www.magrama.gob.es/es/organismo-autonomo-parques-nacionales-oapn/publicaciones/ecologia_16_23_tcm7-45749.pdf)
- Hutchinson, G. (1957). Concluding remarks. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*, 22, 415–427. doi:10.1101/SQB.1957.022.01.039
- Instituto Nacional de Ecología (INE). (2006). *México tercera comunicación nacional ante la convención marco de naciones unidas sobre cambio climático*. México: INE, SEMARNAT.
- Instituto Nacional de Ecología (INE). (2009). *Cuarta comunicación nacional ante la convención marco de naciones unidas sobre cambio climático*. México: INE, SEMARNAT.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2000). *Edafología. Conjunto de datos vectoriales de la carta edafológica escala 1:250000. Serie I. Aguascalientes*, México: Autor.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2003). *Carta fisiográfica escala 1:1 000 000*. Aguascalientes, México: Dirección General de Geografía, INEGI.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2005). *Serie III de uso de suelo y vegetación. Cartografía escala 1:250 000*. Aguascalientes, México: Autor.

luation reinforces the idea of how sensitive the ecosystem is to possible climate change impacts. The ecological characteristics are so particular that their degree of specialization and marginalization in the region are both high. Further research must incorporate the issue of future scenarios in order to better understand the possible impacts on the distribution of the ecosystem.

#### ACKNOWLEDGMENTS

The authors gratefully acknowledge the partial funding from CONACYT-Hidalgo State Government through mixed funds projects 73654 and 98157, and the anonymous reviewers whose valuable suggestions helped to improve the manuscript.

#### End of English Version

- Leibold, M., & Geddes, P. (2005). El concepto de nicho en las metacomunidades. *Ecología Austral*, 15, 117–129. Obtenido de [http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1667-782X2005000200003&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1667-782X2005000200003&script=sci_arttext)
- López-Mata, L., Villaseñor, J. L., Cruz-Cárdenas, G., Ortiz, E., & Ortiz-Solorio, C. (2012). Predictores ambientales de la riqueza de especies de plantas del bosque húmedo de montaña de México. *Botanical Sciences*, 90(1), 27–36. Obtenido de [http://www.ibiologia.unam.mx/sociedad/www/pdf/BSBM%2090/Botanical%20Sciences%2090\\_27-36.pdf](http://www.ibiologia.unam.mx/sociedad/www/pdf/BSBM%2090/Botanical%20Sciences%2090_27-36.pdf)
- Luna, I., & Alcántara, O. (2004). Florística del bosque mesófilo de montaña de Hidalgo. In Luna I., Morrone, J., & Espinosa, D. (Eds.), *Biodiversidad de la Sierra Madre Oriental* (pp. 169–192). México: CONABIO, UNAM.
- Luna, I., Ocegueda, C., & Alcántara, O. (1994). Florística y notas biogeográficas del bosque mesófilo de montaña del municipio de Tlanchinol, Hidalgo, México. *Anales del Instituto de Biología, Serie Botánica*, 65(1), 31–62. Obtenido de <http://www.ejournal.unam.mx/bot/065-01/BOT65104.pdf>
- Luna-Vega, I., Alcántara, O., Morrone, J., & Espinosa, D. (2000). Track analysis and conservation priorities in the cloud forests of Hidalgo, Mexico. *Diversity and Distributions*, 6, 137–143. Obtenido de [http://osuno.fcencias.unam.mx/bioevol/ilv/Articulos/2000\\_Lunaetal\\_trackhgo.pdf](http://osuno.fcencias.unam.mx/bioevol/ilv/Articulos/2000_Lunaetal_trackhgo.pdf)
- Monterroso, A. (2009). *El bosque mesófilo de montaña en el estado de Hidalgo: Perspectiva ecológica frente al cambio climático*. México: Universidad Autónoma Chapingo.
- Ortega, F., & Castillo C. (1996). El bosque mesófilo de montaña y su importancia forestal. *Ciencias*, 43, 32–39. Obtenido de <http://www.ejournal.unam.mx/cns/no43/CNS04305.pdf>
- Ponce, R. R., Reynoso, R. V. H., Watson, M. J., VanDerWal, J., Fuller, R., Pressey, R., & Possingham, H. (2012). Vulnerability of cloud forest reserves in Mexico to climate change. *Nature Climate Change*, 2(6), 448–452. doi:10.1038/nclimate1453
- Ponce-Vargas, A., Luna-Vega, I., Alcántara-Ayala, O., & Ruiz-Jiménez, C. (2006). Florística del bosque mesófilo de montaña de monte Grande, Lolotla, Hidalgo, México. *Revista*

- Mexicana de Biodiversidad*, 77, 177–190. Obtenido de <http://www.ejournal.unam.mx/bio/BIOD77-02/BIOS770204.pdf>
- Sattler, T., Bontadina, F., Hirzel, H., & Arlettaz, R. (2007). Ecological niche modeling of two cryptic bat species calls for a reassessment of their conservation status. *Journal of Applied Ecology*, 44(6), 1188–1199. doi: 10.1111/j.1365-2664.2007.01328.x
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2004). *Introducción a los servicios ambientales*. México D.F.: Autor.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)- Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). (2001). *Inventario nacional forestal*. México: Autor.
- Ureta, C., Martínez-Meyer, E., Perales, H. R., & Álvarez-Buylla, E. R. (2012). Projecting the effects of climate change on the distribution of maize races and their wild relatives in Mexico. *Global Change Biology*, 18(3), 1073–1082. doi: 10.1111/j.1365-2486.2011.02607.x
- Vermeersch, M. (1992). Regímenes de humedad del suelo. In Hidrogeografía IV.6.2 Atlas Nacional de México. Vol. II. Escala 1:4000000. México: Instituto de Geografía, UNAM. Consultado 07-01-12 en <http://www.conabio.gob.mx>