

Sensibilidad de grupos funcionales al cambio climático en la Sierra Norte de Oaxaca, México

Recibido: 11 de septiembre de 2007. Aceptado en versión final: 24 de marzo de 2008.

Leticia Gómez-Mendoza*

Leopoldo Galicia*

Remedios Aguilar-Santelises**

Resumen. Los incrementos de temperatura y los cambios en la precipitación esperados bajo los escenarios de cambio climático impactarán la actual distribución de especies a nivel regional y global. Sin embargo, en México existen pocos estudios sobre la vulnerabilidad de especies de plantas al cambio climático. Los objetivos de este estudio fueron: *a)* determinar grupos funcionales de plantas por formas de vida y distribución biogeográfica; *b)* caracterizar los gradientes climáticos y altitudinales de los grupos funcionales de plantas, y *c)* definir la vulnerabilidad de los grupos funcionales bajo escenarios de cambio en la Sierra Norte de Oaxaca (SNO). La determinación de las posibles respuestas de los grupos funcionales se basó en la construcción de un ensamble de ocho modelos de circulación general con cuatro escenarios de emisiones de escala global, y un modelo japonés de alta resolución regional (20x20 km). Para caracterizar los grupos de respuesta climática se identificaron las especies dominantes fisiológicas de siete tipos de

vegetación dominantes en la SNO. El ensamble de escenarios de cambio climático sugiere que para el 2050 la temperatura de la región aumentará entre 1.5 y 2.5°C, y la precipitación variará entre +5 y -10% en relación con la precipitación total anual actual. Los análisis de sensibilidad sugirieron que para el escenario de cambio climático en el 2050 géneros como *Abies* y *Pinus* restringirán su distribución en la región; en contraste, géneros herbáceos o de matorrales xerófilos probablemente aumentarán su distribución geográfica. Los resultados de este trabajo pueden contribuir a definir estrategias de protección y manejo de aquellas especies menos tolerantes a las perturbaciones del clima actual y futuro en escalas regionales.

Palabras clave: Cambio climático, escenarios de cambio climático, grupos funcionales de plantas, modelos de cambio climático, Sierra Norte de Oaxaca.

Functional types sensitivity to climate change in Sierra Norte of Oaxaca, Mexico

Abstract. Temperature raise and changes in precipitation expected under climate change scenarios will impact on species distribution at regional to global level; although in Mexico few studies of plant species vulnerability exist. The objectives of this study were: *a)* to determine plant functional types of plants based on life forms; *b)* to determine biogeography

distribution and actual climate and altitude gradients and, *c)* to define vulnerability of plant functional types under climate change scenarios in Sierra Norte of Oaxaca (SNO). Potential response of functional groups was based on an ensemble of eight general circulation models with four emissions scenarios at global scale and, a Japanese model of

*Departamento de Geografía Física, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, 04510, Coyoacán, México, D. F. E-mail: lgalicia@igg.unam.mx

**Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral (CIIDIR), Unidad Oaxaca, Hornos No. 1003, Col. Noche Buena, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México.

very high regional resolution (20x20 km). To characterize groups of climate response, dominant species were defined for seven vegetation types in SNO. Climate change scenarios ensemble suggested an increment of temperature between 1.5 and 2.5°C, and a change in precipitation between +5 and -10%. Sensitivity analysis suggested that for climate change scenarios in 2050 genera like *Abies* and *Pinus* would diminish their geographic distribution. Results of this study can help to define conservation strategies and manage of those species less tolerant to perturbation in actual and future climate at regional scales.

Key words: Climate change, climate change scenarios, plant functional groups, climate change models, Sierra Norte of Oaxaca.

INTRODUCCIÓN

Diversos estudios han proyectado el efecto del calentamiento global a escala de grandes zonas climáticas del planeta (Dunn y Winkler, 1999; Both *et al.*, 2004; Thomas, 2005). Se ha sugerido también que ante modificaciones del clima los ecosistemas terrestres se expandirán o contraerán, ubicándose en zonas con climas que permitan su establecimiento y permanencia (Parmesan y Yohe, 2003). Sin embargo, de acuerdo con el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2007), estas aproximaciones son poco realistas porque no contemplan cambios en la composición, el funcionamiento y la estructura actual de los ecosistemas. Asimismo, no contemplan la variedad de respuestas regionales ante el cambio en el clima. Una aproximación más realista del efecto del cambio climático en los sistemas naturales requiere de estudios con modelos regionales del clima y la consideración de otros factores ambientales que producirán cambios no sólo a nivel de ecosistemas, sino también a nivel de la composición y dominio de las especies *in situ* (*Ibid.*). De acuerdo con esta perspectiva, el término de grupos funcionales permite identificar la tolerancia al cambio climático a nivel de grandes grupos de especies.

Un grupo funcional es un conjunto de especies que exploran la misma clase de recursos ambientales de manera similar, es decir, que sobrepone su nicho ecológico (Root, 1967; Grime *et al.*, 1988; Gitay y Noble, 1997; Westoby y Leishman, 1997). Algunos estudios clásicos (Rietz, 1931; Box, 1981)

y recientes (Carey *et al.*, 1995; Cornelissen *et al.*, 2003; Retuerto y Carballeira, 2004) coinciden en que la respuesta climática sería la base para dividir especies en grupos funcionales, ya que algunos de los parámetros climáticos son descriptores de la distribución de especies (Myklestad y Birks, 1993; Carey *et al.*, 1995). En la aproximación de Woodward (1993), la definición de grupos funcionales, de acuerdo con un filtro de variables del clima, se llaman *grupos de respuesta climática*. Para predecir la respuesta de la vegetación a los cambios climáticos se requiere cierto grado de simplificación para parametrizar estos procesos en un modelo de cambio climático. Es por ello que los valores de las temperaturas máximas y mínimas se han utilizado frecuentemente para definir los grupos de respuesta climática, ya que estos parámetros definen la permanencia de las especies (Woodward, 1993; Retuerto y Carballeira, 2004). La respuesta fisiológica de las plantas a los parámetros ambientales es compleja y difiere en cada jerarquía taxonómica y aun de especie a especie. Sin embargo, ante parámetros climáticos en escalas geográficas amplias, la respuesta de las especies presenta coincidencias. Es por ello que la definición de la respuesta climática de las especies se realiza a nivel de género o de familia, ya que ciertos mecanismos fisiológicos son comunes en ellos (Woodward, 1993). Otros autores, como Laurent y Vilá (2003), utilizan algunas variables climáticas como la precipitación, temperatura, insolación, frecuencia de suelo congelado y el número de día de crecimiento para identificar las tolerancias de las especies en grandes regiones. El resultado de este tipo de análisis son grupos de formas de vida asociados a sus rangos de tolerancia climática actual (Retuerto y Carballeira, 2004). La tolerancia climática actual puede compararse con escenarios de cambio climático para evaluar la vulnerabilidad de los grupos funcionales en el futuro (Westoby y Leishman, 1997). Sin embargo, este tipo de ejercicios no se encuentran reportados para México. La vulnerabilidad del cambio climático debe considerar un análisis espacial de escalas geográficas amplias que sólo puede ser obtenido de la distribución de grandes tipos de vegetación y clima, debido a que no existen modelos de cambio

climático a la resolución de especies. Por lo tanto, para este estudio, se identificaron los tipos de vegetación de la Sierra Norte de Oaxaca como marco de referencia de la vulnerabilidad de un conjunto de especies de plantas.

La determinación de las posibles respuestas de los grupos funcionales ante el cambio global, requiere de escenarios regionales (*Ibid.*), ya que es importante verificar si bajo las condiciones climáticas futuras las especies podrán cambiar de distribución geográfica y, de esta manera, evaluar su vulnerabilidad a la variabilidad climática en el largo plazo (GCTE, 1997). Algunos trabajos sugieren que, bajo escenarios de cambio climático, las comunidades vegetales en regiones montañosas pueden presentar mecanismos de adaptación autónoma, como migrar de una montaña a otra, o bien hacia mayores altitudes (Fagre *et al.*, 2003). Dicha adaptación dependerá del grado de tolerancia de las especies, de su capacidad de dispersión, colonización y establecimiento en nuevos hábitats. Sin embargo, la gran mayoría de los estudios de cambio climático en áreas montañosas han sido llevados a cabo en regiones de latitudes frías y templadas, pero pocos esfuerzos se han realizado en montañas tropicales, particularmente en México, donde las regiones montañosas serán las más afectadas por el cambio climático (Villers y Trejo, 1998).

Oaxaca es el segundo estado en riqueza de especies de México, después de Chiapas (García-Mendoza, 2004). En total, Oaxaca cuenta con 251 familias, 1 824 géneros y 7 399 especies, alrededor del 35 % de las angiospermas de México (Villaseñor, 2003) y 33 % de las gimnospermas (Medina y Dávila, 1997). La Sierra Norte de Oaxaca (SNO) ha sido descrita como un centro de diversidad de plantas (Dávila *et al.*, 1997) y como región terrestre prioritaria para la conservación (Arriaga *et al.*, 2000). La Sierra de Juárez representa el límite septentrional de muchos *taxa* mesoamericanos de montaña y son de importancia para los géneros *Begonia*, *Quercus*, *Miconia* y *Piper* y aunque no es una región suficientemente colectada, se calcula que existen 2 000 especies con alto grado de endemismo (Dávila *et al.*, 1997). Por otro lado, la amplitud de gradientes ambientales en la SNO ha dado origen a una variedad de tipos de vegetación y

de climas (INEGI, 2001; Trejo, 2004; Vidal, 2005), lo cual la convierte en un modelo para evaluar la vulnerabilidad de los grupos funcionales al cambio climático en el sureste de México. Los objetivos particulares de este estudio fueron: *a)* determinar grupos funcionales de plantas por formas de vida y distribución biogeográfica; *b)* caracterizar los gradientes climáticos y altitudinales de los grupos funcionales de plantas, y *c)* definir la vulnerabilidad de los grupos funcionales bajo escenarios de cambio climático en la región.

METODOLOGÍA

Sitio en estudio

La Sierra Norte de Oaxaca se encuentra ubicada en el sur de México entre los 16° y 18° de latitud norte y entre los 96° y 98° de latitud oeste, y su altitud varía de 30 a 3 200 m. La delimitación de dicha región fue con base en criterios morfológicos e hidrológicos de acuerdo con Ortiz *et al.* (2002). Entonces, el límite oeste coincide con el cauce del río Santo Domingo, que divide la Sierra Mazateca de la Sierra Norte de Oaxaca, al este y noreste limita sobre el trazo de la curva de los 200 m. Hacia el sureste, limita con la cota de los 400 m hacia todo el flanco sur de la sierra sobre la división de la Sierra Mixe, sobre el cauce del río Borrego. Al oeste sobre las curvas de 1 000 m en el pie de monte de la Sierra, rodeando los Valles Centrales de Oaxaca y continúa al este sobre el río Tehuantepec-río Quiechapa.

Dicho gradiente altitudinal da origen a ecosistemas como las selvas altas perennifolias, los bosques de pino, selvas bajas, pastizales y bosques mesófilos de montaña (INEGI, 2001). Asimismo, la región tiene una variedad de pisos climáticos, desde los cálidos y semicálidos a los húmedos, subhúmedos y templados (Trejo, 2004). Las actividades principales son la extracción forestal de productos maderables y no maderables en el 15 % de sus unidades de producción rural y la agricultura y recolección en el resto del territorio (INEGI, 1991). Sin embargo, el avance no planificado de las actividades agrícolas y pecuarias en el sureste de la SNO ha ocasionado el avance de la fragmentación en zonas de bosques y

selvas (Gómez *et al.*, 2006), lo que constituye una amenaza más a su biodiversidad.

Bases de datos biológicos

Para caracterizar los grupos funcionales se obtuvo un inventario de las especies de plantas presentes en la SNO. Dicha base se conformó de 149 059 registros de sitios de colecta provenientes de los bancos de información tanto de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), como del herbario del Centro de Investigaciones Interdisciplinarias Regionales de Oaxaca (CIIDIR-Oaxaca). Las coordenadas geográficas de los sitios de colecta fueron verificadas en la CONABIO mediante el método de georreferenciación de Proctor *et al.* (2001) y CONABIO (2006; Figura 1). Del total de registros de ambas instituciones se obtuvieron 671 especies agrupadas en 267 géneros.

La clasificación de cada género por forma de vida (árbol, arbusto y herbáceas) se realizó con base en la metodología propuesta por Mabberly (1982) y Standley (1982). La distribución biogeográfica se realizó con base en MacDonald (2003) para definir aquellas especies de afinidad neártica, neotropical, paleárticas, etiópicas, orientales, australianas o cosmopolita. De esta forma, la base de datos final se integró con las siguientes variables: número de identificación del registro, institución, localización geográfica del sitio de colecta, fecha de colecta, colector, colección y/o herbario, forma de vida y distribución biogeográfica; así como familia, género, especie, subespecie y autoridad.

Grupos climáticos

Para caracterizar los grupos climáticos o grupos de respuesta climática (Leishman y Westoby, 1997),

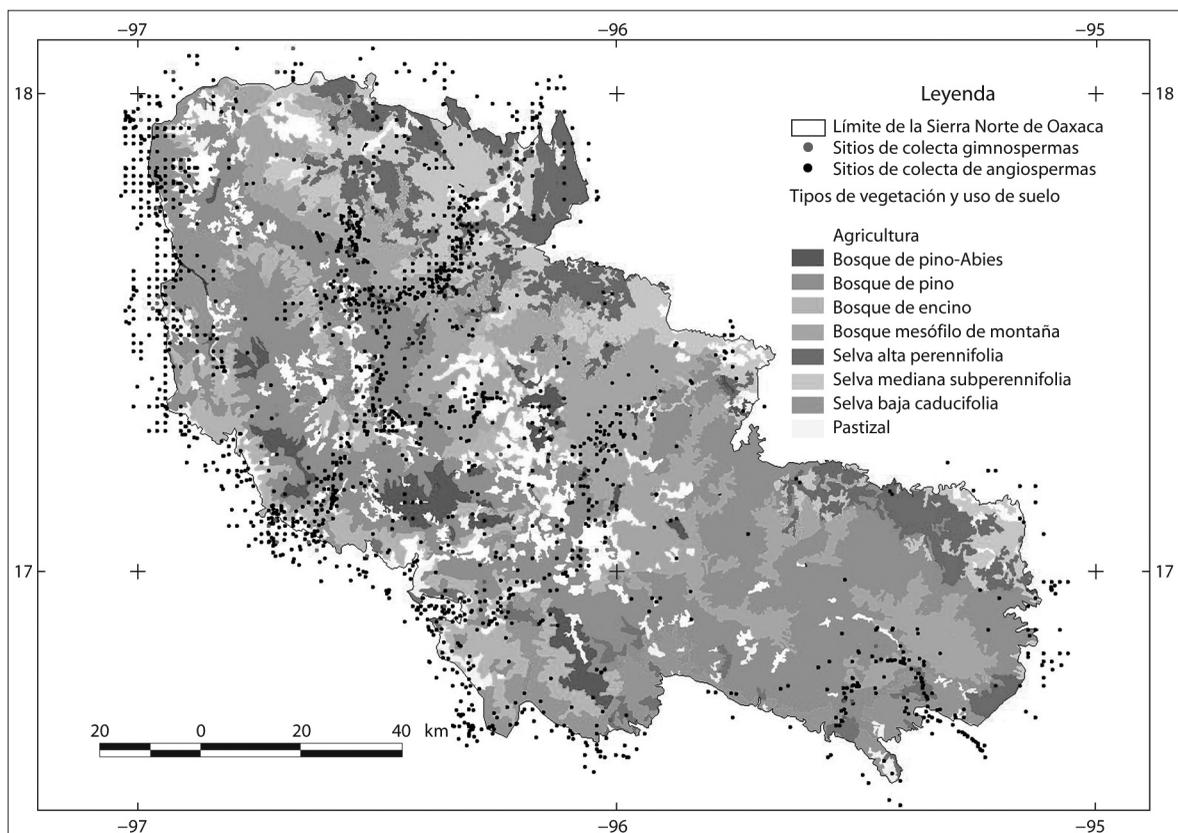


Figura 1. Distribución de sitios de colecta de especies de plantas en SNO (fuente: CIIDIR-CONABIO).

se siguió la metodología de Laurent y Vilá (2003). Dichos autores proponen identificar las especies dominantes fisonómicas, ya que de acuerdo con Díaz *et al.* (1999) y Kahmen y Poschlod (2004) tienen la característica de sobrevivir a variaciones del clima por largos periodos, por lo que son un excelente grupo para estudiar efectos del cambio climático. Para este estudio se obtuvo una lista de las especies dominantes fisonómicas de los siete tipos de vegetación de mayor cobertura en la Sierra Norte de Oaxaca, y que se distribuyen de acuerdo con un gradiente climático altitudinal en la zona (Dávila *et al.*, 1997) constituido por bosque de pino y *Abies*, bosque de encino, bosque mesófilo de montaña, matorral, selva alta perennifolia, selva baja caducifolia y selva mediana subperennifolia (INEGI, 2001). Las especies dominantes para la región se definieron con base en varias fuentes: INEGI (1973), Campos *et al.* (1992) y Torres-Colín (2004).

Determinación de grupos funcionales y gradientes ambientales

La determinación de los grupos funcionales se inició mediante una clasificación *a priori* de las especies dominantes de acuerdo con Paine (1980). Para este propósito se identificaron las formas de vida (árboles y arbustos) y tipos de vegetación de la región en estudio. Posteriormente, se integraron las características climáticas y ambientales de las especies presentes en la zona en estudio, mediante una clasificación de grupos de especies de acuerdo con la propuesta de Leishman y Westoby (1992). Se seleccionó inicialmente un grupo de parámetros ambientales que definen la distribución de la vegetación en la Sierra Norte de Oaxaca basado en Campos *et al.* (1992) y Torres (2004). Entre las variables consideradas se encuentran: altitud, tipos de vegetación, precipitación y temperatura. Dichos parámetros fueron caracterizados a nivel espacial por medio de cartografía digital ya existente para la zona: mapa hipsométrico escala 1:250 000 (Lugo *et al.*, 1990), precipitación total anual, temperatura media anual, temperatura máxima y temperatura mínima escala 1:1 000 000 (García 1998a-d).

De esta manera, la tolerancia ambiental de las especies se definió mediante una sobreposición

cartográfica entre los sitios de colecta georreferenciados de la base de datos de especies y los parámetros ambientales por medio de Arc-View.¹ Los rangos de cada variable ambiental corresponden a la establecida en la cartografía y a los gradientes ambientales. Para la altitud se establecieron seis intervalos de clase (de 0 a 200, 200 a 500, 500 a 1 000, 1 000 a 2 000, 2 000 a 3 000 y $\geq 3 000$ m). Las categorías de vegetación fueron bosque de pino-*Abies*, bosque de encino, bosque de pino-encino, bosque de encino-pino, bosque mesófilo de montaña, selva alta perennifolia, selva baja caducifolia, selva mediana subperennifolia y agricultura. La precipitación total anual se clasificó en ocho intervalos de clase (300 a 500, 500 a 800, 800 a 1 200, 1 200 a 1 800, 1 800 a 2 000, 2 000 a 3 000, 3 000 a 4 000 y 4 000 a 5 000 mm), los cuales corresponden a gradientes pluviométricos altitudinales. La temperatura media se definió en ocho intervalos (10 a 12, 12 a 14, 14 a 16, 16 a 18, 18 a 20, 20 a 22, 22 a 24 y 24 a 26°C); mientras que la temperatura máxima se categorizó en 13 intervalos (18 a 20, 20 a 22, 22 a 26, 26 a 28, 28 a 30, 30 a 32, 32 a 34, 36 a 38, 38 a 40, 40 a 42 y 42 a 44°C). Finalmente, la temperatura mínima se ordenó en nueve intervalos de clase (-2 a 0, 0 a 2, 2 a 4, 4 a 5, 5 a 6, 6 a 8, 8 a 10, 10 a 12 y 12 a 14°C). Ambos rangos de temperaturas extremas (máxima y mínima) corresponden con los pisos térmicos de acuerdo con la altitud.

El resultado de la sobreposición se introdujo en matrices género-variable (Laurent y Vilá, 2003). Dichas matrices caracterizan los rangos de tolerancia ambiental de cada género con base en su presencia (Montaña y Greig, 1990). Las matrices fueron ordenadas por géneros (renglones) y por variables ambientales (columnas). El interior de cada matriz indicó la presencia del género de valor igual a uno o ausencia igual a cero. Con base en esta matriz se identificaron los rangos de tolerancia ambiental de los tipos de vegetación dominantes en la zona en estudio: bosque de pino y *Abies*, bosque de encino, bosque mesófilo de montaña,

¹ Véase "Distribución de especies en gradientes de altitud y temperaturas mínimas y máximas".

matorral, selva alta perennifolia, selva mediana subperennifolia y selva baja caducifolia. Para cada uno de estos tipos de vegetación, se identificaron los géneros que cumplieran con todos los rangos ambientales, de acuerdo con el método de filtros (Woodward, 1993). Finalmente, con las matrices género-variable se construyeron gráficas de número de registros por rangos ambientales para cada uno de los siete tipos de vegetación por cada variable climática (temperatura media, máxima, mínima y precipitación total anual) para precisar su rango de distribución.

Vulnerabilidad de grupos funcionales bajo escenarios de cambio climático

Para caracterizar el efecto del cambio climático en los grupos funcionales se obtuvo el ensamble de Modelos de Circulación General de la Atmósfera (MCG) para la zona de estudio de acuerdo con el Tyndall Centre (Mitchell *et al.*, 2004), el cual registró los cambios en la temperatura y precipitación para 2020, 2050 y 2080. Dicho ensamble permitió identificar las tendencias regionales del cambio climático. Los ensambles de modelos MCG permiten distinguir, mediante un diagrama de dispersión, los cambios esperados en temperatura y precipitación entre diversos modelos y escenarios de emisión (A1, A2, B1 y B2; IPCC, 2002) y con ello se facilita la identificación de los valores de cambio en el clima con mayor probabilidad de ocurrencia (Semarnat, 2006). Por otra parte, para determinar con mayor detalle las tendencias de la temperatura y precipitación bajo escenarios de cambio climático, se seleccionaron los cuatro tipos de vegetación de mayor representación espacial a la resolución del MCG, es decir, para píxeles no limítrofes (bosques de encino, bosque de pino y *Abies*, selva alta perennifolia y selva baja caducifolia) se obtuvieron tanto el escenario base como los cambios de temperatura y precipitación para el 2050 derivados del MCG japonés (Mizuta *et al.*, 2006) a una resolución de 20 x 20 km. Con los resultados del ensamble de modelos y del modelo japonés se identificó la tolerancia de los grupos funcionales por tipo de vegetación a cambios en el clima en función a su preferencia climática actual.

RESULTADOS

Biogeografía de las especies

La SNO presenta una gran riqueza de especies derivadas de su amplia variedad de ambientes físicos. De los 267 géneros de plantas registrados, 26 correspondieron a formas de vida arbóreas, 50 arbustivas y 191 herbáceas (no consideradas en este estudio). La historia geológica y climática de la zona ha dado origen a que en ella se presenten especies de diversas afinidades biogeográficas: 93 especies son neárticas, 188 neotropicales, 42 paleárticas, 21 etiópicas, 24 orientales, 15 australianas, 32 cosmopolitas y 24 especies herbáceas sin afinidad (*sensu* Standley, 1982). De la depuración de dicha base de datos se obtuvo un listado final de 55 especies arbóreas y 33 arbustivas dominantes fisonómicas para siete tipos de vegetación derivados de la información bibliográfica señalada arriba (Tabla 1). Por ejemplo, el bosque de pino y *Abies* tuvo 11 especies, el bosque de encino seis especies, la selva alta perennifolia y la selva baja tuvieron 5 y 13 especies. Del total de 87 especies dominantes fisonómicas, sólo 40 están representadas en las bases de datos de sitios de los herbarios consultados en este estudio (Tabla 1).

Distribución de especies en gradientes de altitud y temperaturas mínimas y máximas

Las especies fueron ordenadas en función de los intervalos altitudinales que corresponden con los pisos de vegetación (Tabla 2). *Abies*, *Pinus*, *Juniperus*, *Quercus*, *Litsea* y *Bejaria* constituyen dominantes fisonómicos de bosques de pino y abetos en elevaciones por arriba de los 2 000 m (Tabla 2). *Abies*, *Pinus* y *Quercus* también son géneros compartidos con los bosques mesófilos, los cuales se distribuyen entre los 800 y 2 500 m. Los géneros de *Acacia*, *Mimosa* y *Brabea* se distribuyen tanto en matorrales como en selvas bajas caducifolias debido a que se ubican en los mismos rangos altitudinales (entre 800 y 1 000 m; Tabla 2). Las especies de bosque mesófilo como *Clethra*, *Dendropanax*, *Miconia* y *Persea* e incluso *Quercus* se distribuyen entre 0 y 1 000 m (Tabla 2).

La mayor frecuencia de distribución de registros para los tipos de vegetación se presentó entre los

Tabla 1. Especies dominantes fisonómicas por tipo de vegetación de la Sierra Norte de Oaxaca

Tipo de vegetación	Especies dominantes fisonómicas	
	Árbóreas	Arbustivas
Bosque de pino y <i>Abies</i>	<i>Abies hickelii</i> * <i>Juniperus flaccida</i> * <i>Pinus ayacahuite</i> * <i>Pinus devoniana</i> * <i>Pinus hartwegii</i> * <i>Pinus oocarpa</i> * <i>Pinus patula</i> * <i>Pinus teocote</i> * <i>Quercus crassifolia</i> * <i>Quercus elliptica</i> * <i>Quercus laeta</i> *	<i>Amelanchier denticulata</i> * <i>Arteostaphylus pungens</i> <i>Baccharis heterophylla</i> * <i>Bejaria aestuans</i> * <i>Calliandra grandifolia</i> * <i>Gaultheria acuminata</i> * <i>Rhus virens</i> <i>Arbutus xalapensis</i> * <i>Comarostaphylis discolor</i> <i>Litsea neesiana</i> * <i>Roldana sartorio</i>
Bosque de encino	<i>Carpinus caroliniana</i> <i>Quercus elliptica</i> * <i>Quercus laeta</i> * <i>Quercus rugosa</i> * <i>Quercus scytophylla</i> * <i>Styrax argenteus</i> *	<i>Comarostaphylis discolor</i> <i>Gaultheria acumina</i> <i>Listea glaucescens</i> * <i>Lyibua squamulosa</i> <i>Myrica cerifera</i>
Bosque mesófilo de montaña	<i>Clethra sp</i> * <i>Dendropanax populifolius</i> * <i>Ilex discolor</i> <i>Liquidambar styraciflua</i> <i>Persea americana</i> * <i>Pinus patula</i> * <i>Podocarpus matudae</i> <i>Quercus candicans</i> * <i>Saurauia spp</i> * <i>Styrax glabrescens</i> * <i>Weinmannia pinnata</i>	<i>Calyotranthes schiedeana</i> <i>Miconia lonchophylla</i>
Matorral		<i>Acacia farnesiana</i> * <i>Bursera sp.</i> <i>Haematoxlon brasiletto</i> <i>Mimosa sp.</i> * <i>Prosopis laevigata</i> <i>Brahea dulcis</i> * <i>Ipomea murucoides</i> *

Selva alta perennifolia	<i>Calophyllum brasiliense</i> <i>Cordia alliodora</i> <i>Dialium guianense</i> <i>Tapirira mexicana</i> <i>Terminalia amazonia</i>	<i>Cymbopetalum bailloni</i> <i>Ficus sp</i> <i>Guatteria galeottiana</i> <i>Miconia sp.*</i>
Selva mediana subperennifolia	<i>Albizia guachapele</i> <i>Aspidosperma megalocarpon</i> <i>Brosimum alicastrum</i> <i>Cedrela odorata</i> <i>Mankara chicle</i> <i>Protium copal</i> <i>Schizolobium parahyba</i> <i>Tabebuia rosea</i> <i>Heliocarpus appeduncularis*</i>	<i>Dioon spinulosum</i> <i>Sabal mauritiformis</i>
Selva baja caducifolia	<i>Astronium graveolens</i> <i>Bursera simaruba</i> <i>Ceiba aesculifolia</i> <i>Conzzatia multiflora</i> <i>Cordia alegnoides</i> <i>Euphorbia schlechtendalli*</i> <i>Gyrocarpus mocinmol</i> <i>Havaridia campylacantha</i> <i>Jacaratia mexicana</i> <i>Lonchocarpus emarginatus</i> <i>Lysiloma acapulcense</i> <i>Plumeria rubra</i> <i>Pseudobombax ellipticum</i>	<i>Acacia sp*.*</i> <i>Ipomoea sp*</i>

*Especies que aparecen en la base de datos de CIIDIR y CONABIO
 Fuentes: INEGI (1973), Campos *et al.* (1992) y Torres-Colín (2004).

Tabla 2. Grupos funcionales de la Sierra Norte de Oaxaca

Tipo de vegetación	Rangos de variables ambientales		Géneros
Bosque de pino y <i>Abies</i>	Temperatura media (°C)	14 a 22	<i>Abies</i>
	Temperatura máxima (°C)	26 a 34	<i>Pinus</i>
	Temperatura mínima (°C)	-2 a 5	<i>Arbutus</i>
	Precipitación (mm)	500 a 2000	<i>Bejaria</i>
	Altitud (m)	2500 a 3500	<i>Juniperus</i>
			<i>Quercus</i>
			<i>Litsea</i>
Bosque de encino	Temperatura media (°C)	18 a 22	<i>Abies</i>
	Temperatura máxima (°C)	26 a 36	<i>Pinus</i>
	Temperatura mínima (°C)	0 a 6	<i>Juniperus</i>
	Precipitación (mm)	500 a 1800	<i>Amelanchier</i>
	Altitud (m)	800 a 2000	<i>Bejaria</i>
			<i>Quercus</i>
			<i>Litsea</i>
Bosque mesófilo de montaña	Temperatura media (°C)	18 a 24	<i>Abies</i>
	Temperatura máxima (°C)	28 a 38	<i>Pinus</i>
	Temperatura mínima (°C)	0 a 12	<i>Clethra</i>
	Precipitación (mm)	800 a 2500	<i>Dendropanax</i>
	Altitud (m)	1000 a 2500	<i>Miconia</i>
			<i>Persea</i>
			<i>Saurauia</i>
			<i>Quercus</i>
Matorral	Temperatura media (°C)	18 a 26	<i>Acacia</i>
	Temperatura máxima (°C)	28 a 36	<i>Brahea</i>
	Temperatura mínima (°C)	2 a 10	<i>Mimosa</i>
	Precipitación (mm)	500 a 800	<i>Ipomoea</i>
	Altitud (m)	800 a 1000	
Selva alta perennifolia	Temperatura media (°C)	22 a 26	<i>Clethra</i>
	Temperatura máxima (°C)	26 a 44	<i>Dendropanax</i>
	Temperatura mínima (°C)	6 a 14	<i>Miconia</i>
	Precipitación (mm)	3000 a 4000	<i>Persea</i>
	Altitud (m)	0 a 100	
Selva mediana subperennifolia	Temperatura media (°C)	22 a 26	<i>Heliocarpus</i>
	Temperatura máxima (°C)	32 a 40	<i>Clethra</i>
	Temperatura mínima (°C)	6 a 14	<i>Dendropanax</i>
	Precipitación (mm)	2000 a 2500	<i>Miconia</i>
	Altitud (m)	200 a 400	<i>Persea</i>
Selva baja caducifolia	Temperatura media (°C)	18 a 26	<i>Ipomoea</i>
	Temperatura máxima (°C)	34 a 44	<i>Acacia</i>
	Temperatura mínima (°C)	6 a 4	<i>Mimosa</i>
	Precipitación (mm)	500 a 1800	<i>Brahea</i>
	Altitud (m)	600 a 800	

18 y 20°C (Figura 2). Las especies de arbustos y algunos árboles de zonas de bosques templados tienen una amplia tolerancia térmica en la SNO, con la excepción de *Abies*, *Pinus* y *Quercus* (Tabla 2). Dichos géneros se distribuyen tanto desde los bosques mesófilos de montaña con temperaturas entre los 18 y 24°C hasta los bosques de pino y *Abies* con temperaturas entre los 14 y 22°C. Los géneros compartidos entre los bosques mesófilos y los bosques templados pueden estar presentes desde los 10 a los 26°C (Figura 2). Los géneros como *Acacia*, *Brahea*, *Mimosa* e *Ipomea* de los matorrales se distribuyen entre los 18 y 26°C. Las especies de selvas altas y medianas se distribuyen en el mismo rango térmico entre los 22 y 26°C, pero no incluyeron los mismos géneros (Tabla 2). Por otra parte, géneros de matorrales, selvas altas perennifolias y selvas bajas caducifolias pueden distribuirse desde los 18 a los 26°C (Figura 2).

Los géneros como *Abies*, *Pinus*, *Quercus*, *Juniperus* y *Bejaria* en bosque de pino y *Abies* y encino se distribuyeron entre los -2 a 6°C de temperatura mínima y entre los 26 a 36°C de temperatura máxima (Tabla 2). Las especies que sólo se registraron en un tipo de vegetación fueron *Arbutus* en bosque de pino y *Abies*, *Amelanchier* en bosque de encino, y *Saurauia* en bosque mesófilo (Tabla 2). Las selvas altas y los bosques mesófilos presentaron géneros compartidos: *Percea*, *Dendropanax*, *Miconia* y *Percea* y se distribuyen entre los 0 y 10°C de temperatura mínima y los 28 a 44°C de temperatura máxima. La mayor parte de los registros de especies dominantes en todos los tipos de vegetación se presentó entre los 30 y 34°C de temperatura máxima (Figura 3). El matorral fue el tipo de vegetación con menor número de registros de especies (Figura 3). Para el caso de la temperatura mínima, el mayor número de registros en bosques de pino, encino y mesófilo se distribuyeron entre los 0 y 5°C, para el matorral entre los 6 y 14°C, para las selvas altas y medianas entre los 0 y 5°C y para las selvas bajas entre 6 y 14°C (Figura 4).

Distribución de especies en gradientes de precipitación

De acuerdo con la precipitación, los géneros como *Quercus*, *Pinus* y *Abies* presentes en bosques

templados y mesófilos se distribuyen entre los 1 000 y 2 500 mm anuales (Tabla 2). Los géneros de *Acacia*, *Mimosa* y *Brahea* presentes tanto en matorrales como en selvas bajas caducifolias, se distribuyeron en rangos de precipitación entre los 500 y 800 mm. Entre los 2 000 y 4 000 mm se distribuyeron los géneros típicos de bosques mesófilos (*Clethra*, *Dendropanax*, *Miconia* y *Percea*) (Tabla 2). El mayor número de registros de sitios de colecta en los bosques templados y mesófilos se distribuyó entre los 500 y 1 800 mm, mientras que para las zonas de matorrales y selvas secas, éste se presentó entre los 800 y 1 200 mm (Figura 5). Los géneros de selvas altas y medianas presentaron mayores registros entre los 500 y 4 000 mm (Figura 5). Estos resultados sugieren que las especies de arbustos y árboles de bosques de pino y abetos, bosques de encino y bosques mesófilos, comparten tolerancias pluviométricas.

Vulnerabilidad bajo escenarios de cambio climático

El ensamble de escenarios de cambio climático para la zona en estudio obtenido del Tyndall Centre con 8 MCG y cuatro escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero, indica que para 2050 la temperatura aumentará entre 1.5 y 2.5°C, y la precipitación variará entre +5 y -10% en relación con la precipitación total anual actual (Figura 6). Estas aproximaciones pueden variar dependiendo del modelo (CGCM, HadCM2, HadCM3, ECHAM, CSIRO, ENCARPOM, COSMIES y GFDL) y el escenario utilizado (A1, A2, B1 y B2). Los escenarios menos conservadores (A1 y A2) indican un aumento de temperatura entre 1.5 y 3.0°C, y una disminución de la precipitación de aproximadamente 15%. Mientras que los escenarios más conservadores (B1 y B2) indican un aumento de 1.5 a 2°C de temperatura y un cambio de la precipitación de $\pm 5\%$ (Figura 6).

De acuerdo con el escenario japonés (Mizuta *et al.*, 2006) con resolución de 20 x 20 km para el 2050, las temperaturas mínimas presentarán un mayor aumento en abril y noviembre, y menores incrementos en marzo y diciembre. Los bosques de encino y pino presentarán mayor aumento en las temperaturas mínimas (entre 2.5 y 3.0°C) que

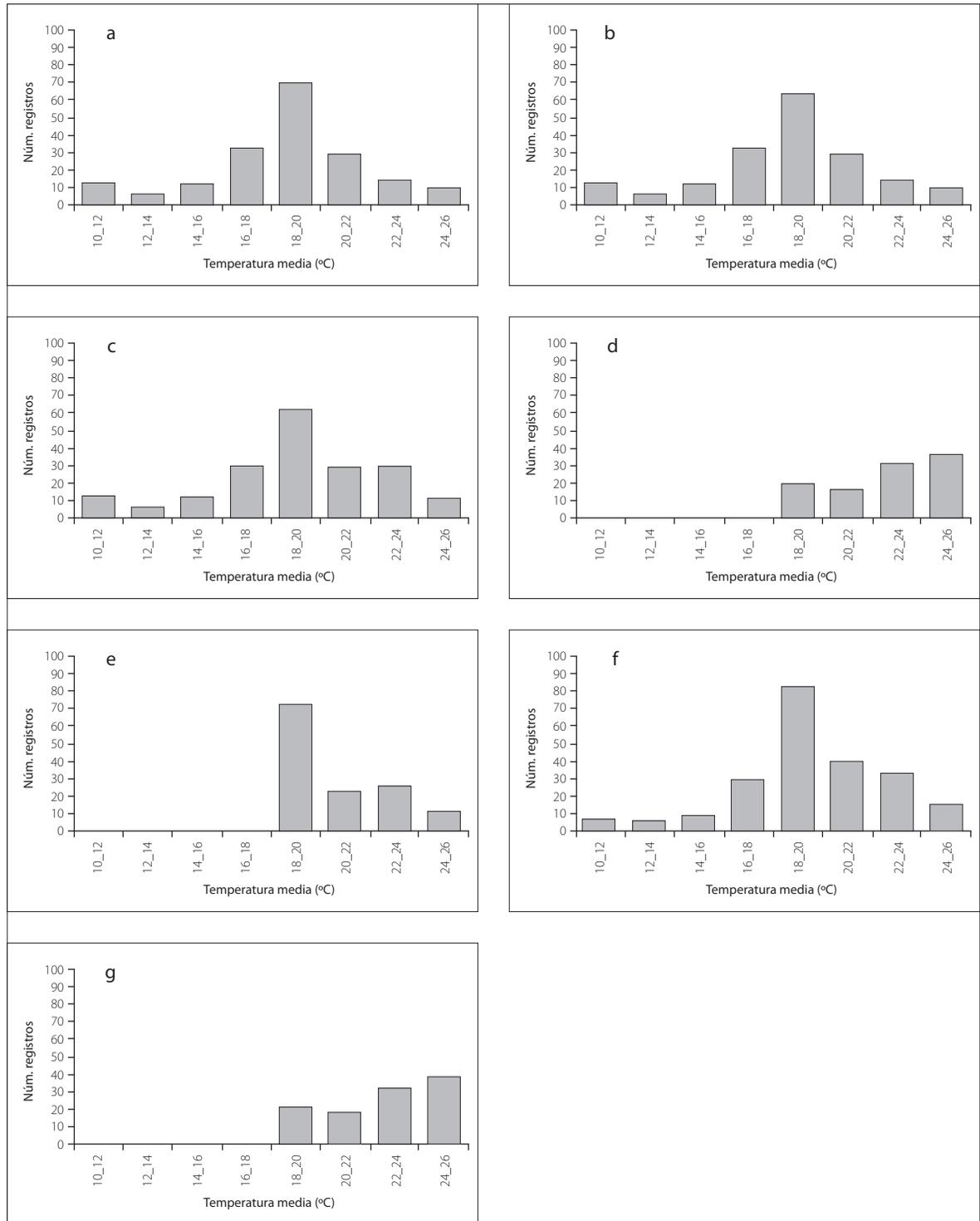


Figura 2. Grupos funcionales por tipo de vegetación de acuerdo con la temperatura media: a) bosque de pino y *Abies*; b) bosque de encino; c) bosque mesófilo de montaña; d) matorral; e) selva alta perennifolia; f) selva mediana subperennifolia y g) selva baja caducifolia. Para detalles de los géneros véase la Tabla 2.

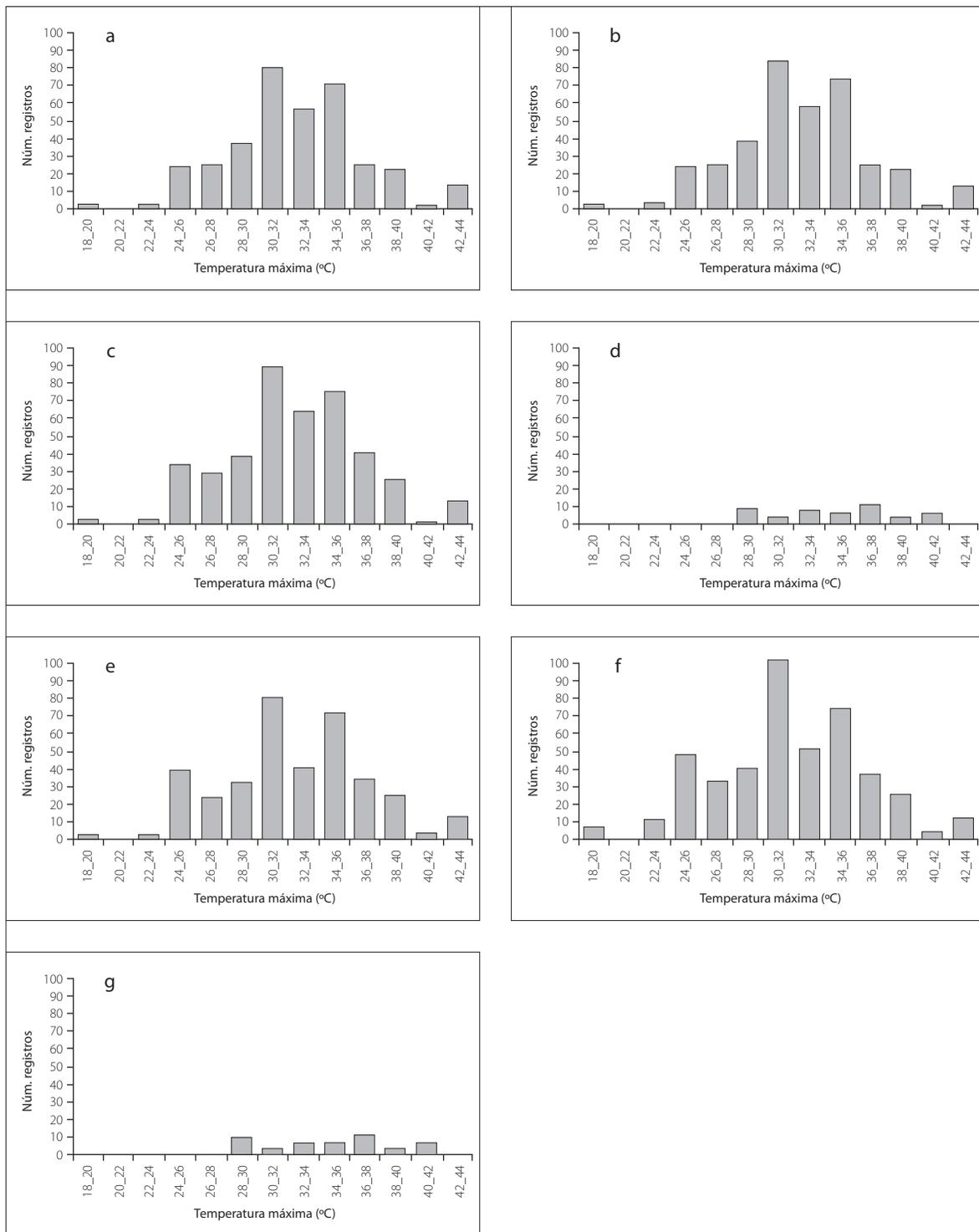


Figura 3. Grupos funcionales por tipo de vegetación de acuerdo con la temperatura máxima: a) bosque de pino y *Abies*; b) bosque de encino; c) bosque mesófilo de montaña; d) matorral; e) selva alta perennifolia; f) selva mediana subperennifolia y g) selva baja caducifolia. Para detalles de los géneros véase la Tabla 2.

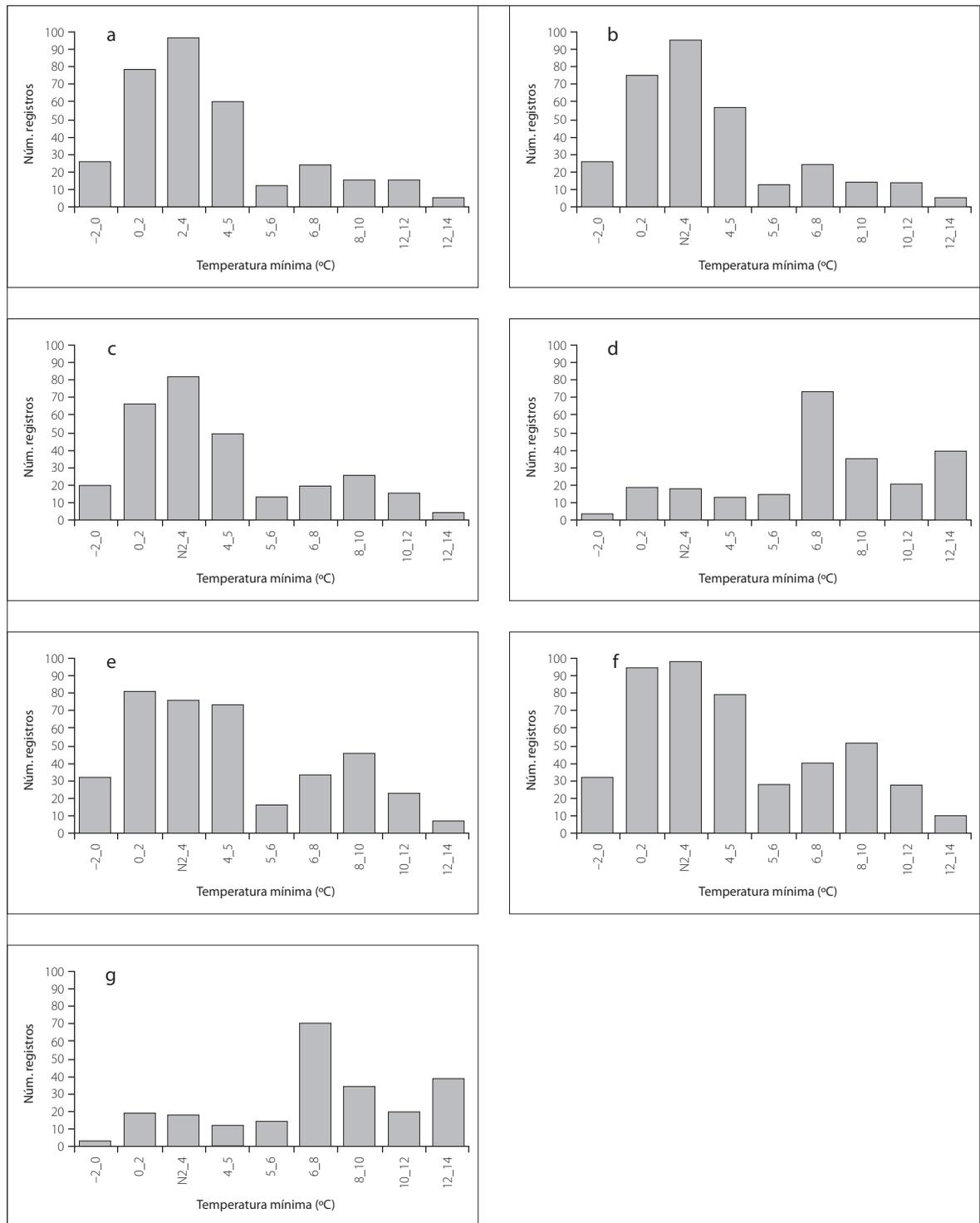


Figura 4. Grupos funcionales por tipo de vegetación de acuerdo con la temperatura mínima: a) bosque de pino y *Abies*; b) bosque de encino; c) bosque mesófilo de montaña; d) matorral; e) selva alta perennifolia; f) selva mediana subperennifolia y g) selva baja caducifolia. Para detalles de los géneros véase la Tabla 2.

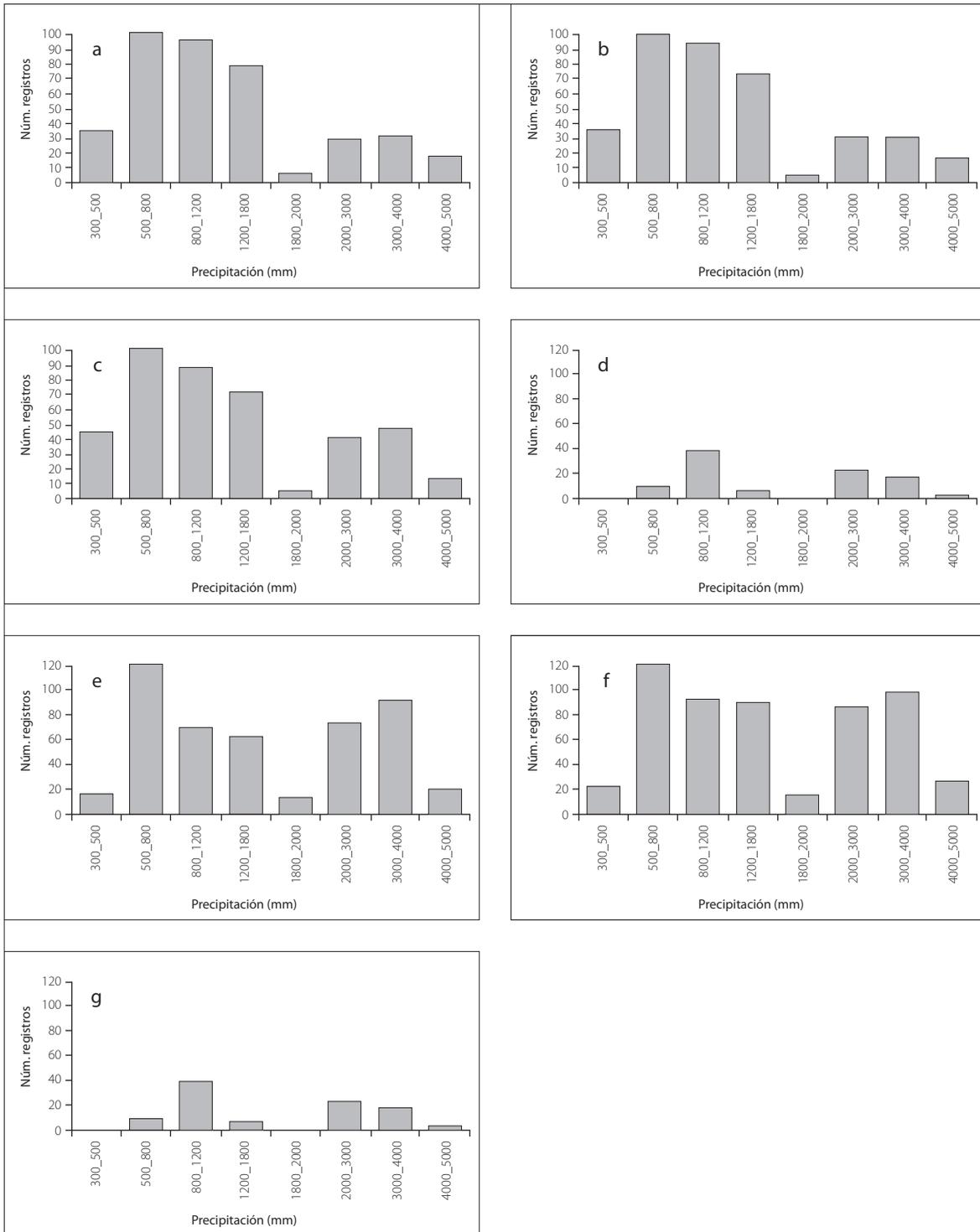


Figura 5. Grupos funcionales por tipo de vegetación de acuerdo con la precipitación total anual: a) bosque de pino y *Abies*; b) bosque de encino; c) bosque mesófilo de montaña; d) matorral; e) selva alta perennifolia; f) selva mediana subperennifolia y g) selva baja caducifolia. Para detalles de los géneros véase la Tabla 2.

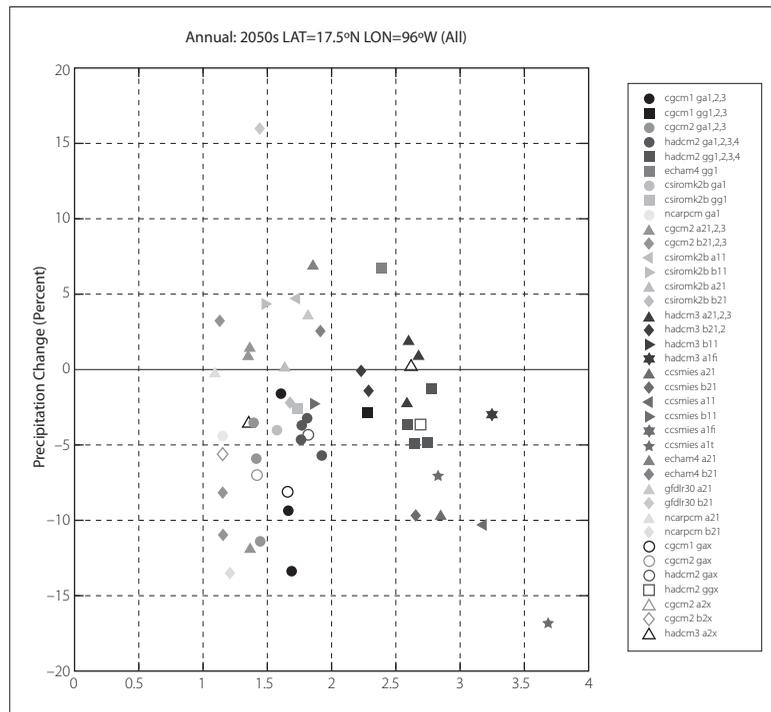


Figura 6. Ensamble de escenarios de cambio climático para la porción central de la Sierra Norte de Oaxaca de acuerdo con ocho modelos de circulación general (CGCM, HadCM2, HadCM3, ECHAM, CSIRO, ENCARPOM, COSMIES y GFDL) con resolución espacial diversa y con escenarios de emisión A1, A2, B1 y B2 (Mirchell *et al.*, 2004).

las selvas bajas y selvas altas perennifolias (de 1.5 a 2.5°C; Figuras 7a y 9). Las temperaturas máximas se incrementarán entre 1.5 y 4°C para 2050 y los mayores aumentos (>2.5°C) se presentarán en los bosques de encino y las selvas bajas caducifolias. En contraste, los menores aumentos (entre los 1.2 y 2.5°C) se presentarán en los bosques de pino y las selvas altas perennifolias (Figuras 7b, 8a y 8c). En relación con la época del año, los mayores aumentos de temperatura máxima se presentarán en abril y noviembre y los menores en marzo y diciembre (Figuras 7a y 8). Los cambios en la precipitación se caracterizaron por decrementos significativos en invierno (hasta menos de 100 mm por mes) de noviembre a marzo, y aumentos de hasta 150 mm en julio (Figuras 7c y 10). Las mayores precipitaciones ocurrirán en julio en los bosques de encino en el verano, y en agosto en las selvas bajas y en julio en las selvas altas, observándose, en general, veranos más secos (Figura 7c, 10). Los bosques de pino sufrirán un descenso en la precipitación invernal (Figura 7c, 10a).

De acuerdo con los escenarios de cambio climático al aumentar las temperaturas mínimas,

particularmente en abril y diciembre hasta 3°C (Figura 7 y 9), géneros como *Abies*, *Pinus*, *Juniperus* y *Quercus* podrían tolerar este cambio, ya que pueden habitar en zonas de hasta 14°C (Figura 4). Probablemente *Arbutus* en bosque de pino, y *Abies* y *Amelanchier* en bosques de encino no pueden tolerar este aumento en las temperaturas mínimas ya que se encuentran acotadas entre los -2 a 5°C y de 0 a 6°C, respectivamente. Por otra parte, géneros de bosques mesófilos, selvas altas y selvas medianas como *Clethra*, *Dendopanax*, *Miconia* y *Persea* tienen una tolerancia de entre los 0 y 14°C de temperatura mínima (Figura 4). Finalmente, géneros de matorrales y selvas bajas (*Mimosa*, *Acacia* y *Brahea*) también podrían tolerar estos cambios, ya que se distribuyen entre los -2 y 14°C (Figura 4).

Los escenarios de temperaturas máximas señalaron un aumento entre 1.5 y 3°C en general para la SNO, siendo las zonas de bosque de encino y selvas bajas las que sufrirán mayores aumentos (2.5°C en promedio; Figura 7b). La mayor parte de las especies dominantes de todos los tipos de vegetación se distribuyen entre los 24 y 40°C

de temperatura máxima, por lo que un aumento en la temperatura afectaría a los géneros con tolerancias más restringidas como *Abies* y algunos *Pinus*, entre los 30 a 36°C (Figura 3).

Los escenarios de cambio en la precipitación para 2050 mostraron diferencias por tipos de vegetación. La precipitación en los bosques de pino en el otoño e invierno disminuirá, mientras que para el verano se mantendrá semejante al escenario base (Figura 10a). En los bosques de encino se presentará un aumento en la precipitación en el verano (Figura 10b). Para las selvas altas la cantidad de precipitación disminuirá para todos los meses excepto para mayo y junio, cuando se observará un aumento (Figura 10c). En selvas bajas la precipitación aumentará en verano para 2050 (Figura 10d). Así, en el futuro, los bosques de pino de la SNO serán más secos, los bosques de encino más húmedos, las selvas altas serán menos húmedas y las selvas bajas serán más húmedas. Esta modificación de los patrones climáticos sugiere que, aunque la temperatura presente una tendencia al aumento general en la SNO, la diferenciación de la anomalía de precipitación podría modificar la distribución de los géneros. Entonces especies que requieren mayores rangos de precipitación en bosque de pino como *Abies* podrían verse afectadas.

Posibles cambios altitudinales de la vegetación bajo escenarios de cambio climático

Los escenarios de cambio climático regional también sugieren cambios altitudinales en los pisos de vegetación. El gradiente altitudinal actual de las coníferas en la SNO se distribuye por encima de los 1 500 m. Las coníferas con una elevación inferior son del género *Pinus*: *P. patula* y *P. oocarpa*. *P. chiapensis*, *P. oocarpa* y *P. lawsonii*, después *P. pringlei*, *P. leiophylla* y *P. montezumae* seguidos por *Pinus patula* y *P. douglasiana*; en una siguiente franja altitudinal se encuentran *P. ayacahuite*, *P. devoniana* y *P. teocote*. *P. ayacahuite*, *P. Pseudostrobus* y *P. teocote* y, finalmente, *P. hartwegii* por arriba de los 3 500 m (Castillo *et al.*, 2004). La especie *Pinus hartwegii* es especialmente vulnerable al aumento de temperaturas, ya que se ve afectada por plagas por falta de suficiente frío para eliminarlas. El género *Quercus* se distribuye desde los 150 hasta los 3 500 m en

Oaxaca. De esta manera, *Quercus candicans* y *Q. sapotifolia* se distribuyeron entre los 150 y 500 m de elevación, mientras que *Q. rugosa* y *Q. scythophylla*, *Q. glaucescens*, *Q. magnolifolia*, *Q. peduncularis*, *Q. elliptica* se distribuyeron entre los 150 y 1 000 m. Las especies que se distribuyen a mayor elevación (más de 2 700 m) son *Q. crassifolia*, *Q. laurina*, *Q. elíptica*, dichas especies probablemente son las más vulnerables al cambio climático.

El cambio climático constituye una amenaza también desde el punto de vista biogeográfico, ya que el incremento térmico modificará los límites latitudinales de las especies ocasionando un corrimiento hacia el norte de especies no tolerantes a las altas temperaturas (Parmesan, 2006). Nueve especies de coníferas de origen neártico tienen su límite meridional en Oaxaca: *Abies hickelii*, *Juniperus deppeana*, *J. flaccida*, *Pinus douglasiana*, *P. lawsonii*, *P. leiophylla*, *P. patula*, *P. pringlei*, *P. menziesii* y *P. pseudotsuga*. Por otra parte, los géneros eminentemente neotropicales son: *Alchemilla*, *Bejaria*, *Calliandra*, *Dendropanax*, *Lamourouxia*, *Lobelia*, *Miconia*, *Mimosa*, *Peperomia*, *Saurauia* y *Tillandsia* (algunos de ellos no se incluyeron en este estudio) y también habitan bosques templados y mesófilos (Castillo *et al.*, 2004) adaptados a condiciones más tropicales, por lo que serían menos vulnerables al cambio climático.

DISCUSIÓN

Tolerancias ambientales

Se ha sugerido que las especies de plantas experimentarán cambios en su distribución y dominancia bajo cambio climático (Iverson y Prasad, 2002; Retuerto y Carballeira, 2004, Fossa *et al.*, 2004). Los parámetros climáticos (temperaturas máximas, mínimas y precipitación total anual) actuales y futuros en la Sierra Norte de Oaxaca están asociados a los gradientes altitudinales; los cuales a su vez determinan el patrón de distribución de las especies de plantas. En este sentido, la vulnerabilidad de las especies al cambio climático puede ser evaluada a partir de su envolvente climática actual. Para el caso de la SNO, y de acuerdo con los resultados, el nicho fundamental de los géneros se ve restringido por las

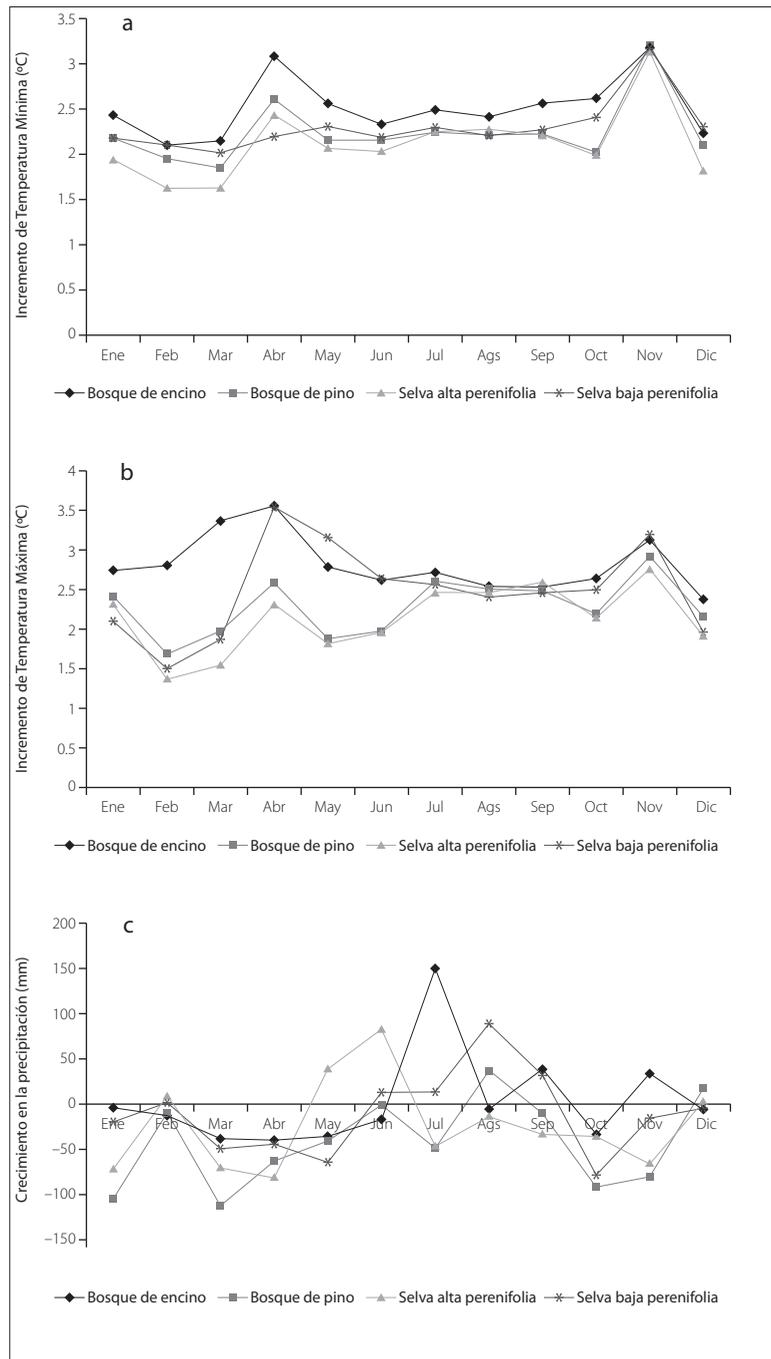


Figura 7. a) Cambios en la temperatura mínima para 2050; b) cambios en la temperatura máxima; c) cambios en la precipitación para 2050 en SNO, México.

franjas de temperatura media y extremas (Castillo *et al.*, 2004). Por ejemplo, las especies se distribuyeron claramente por su envolvente climática en tres grupos principales: 10 a 18°C, 18 a 22°C y 22 a 26°C; por lo que cualquier alteración en el

clima actual repercutirá en la configuración espacial de las comunidades vegetales de la zona. En situaciones extremas se ha reportado que cambios en temperatura y precipitación en latitudes medias han llevado a la extinción de especies de plantas

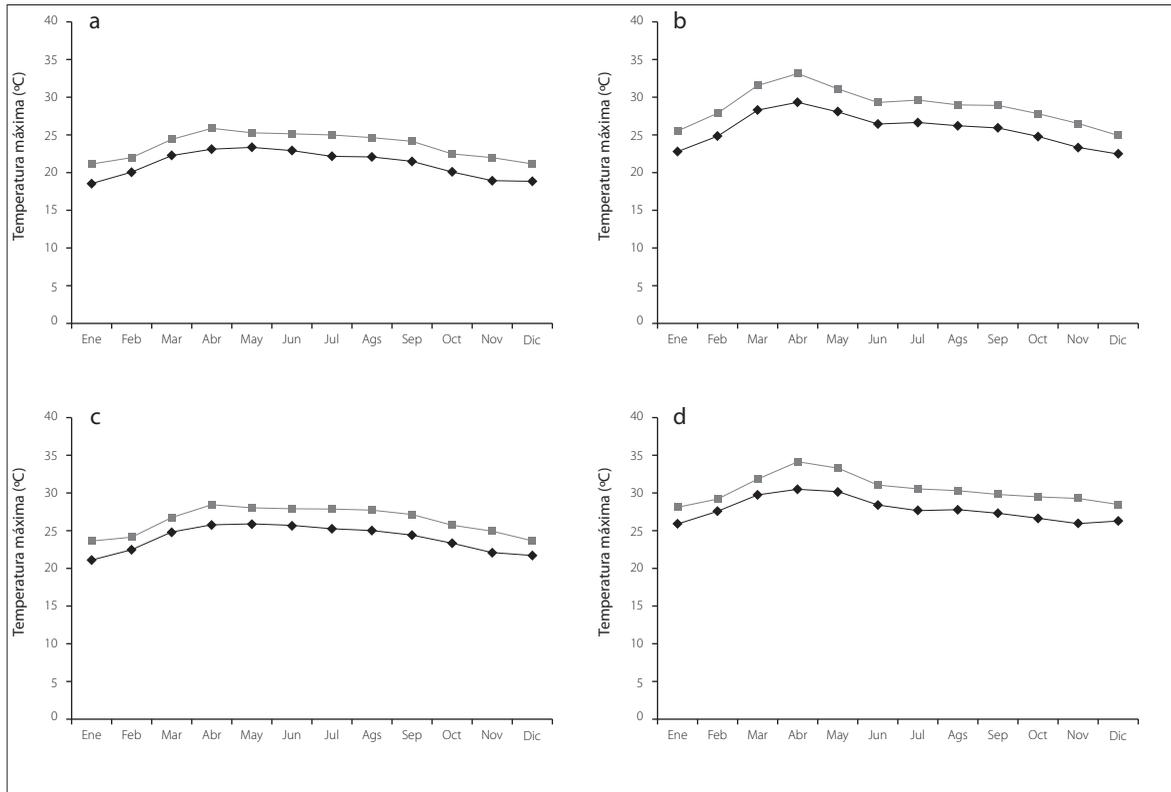


Figura 8. Escenario base de temperatura máxima media mensual en grados centígrados (línea continua) y escenario para 2050 (línea punteada) en la SNO: a) bosque de pino; b) bosque de encino; c) selva alta perennifolia y d) selva baja caducifolia, de acuerdo con el modelo de Mizuta *et al.*, 2006.

de altas altitudes y latitudes (Williams *et al.*, 2007; Nuutinen *et al.*, 2006).

La vulnerabilidad de las especies al cambio climático aumenta si sus poblaciones son reducidas o son sensibles a cambios en su distribución geográfica (IPCC, 2002). En el caso específico de la SNO, *Abies*, *Cupressus lusitanica*, *Pseudotsuga menziesii* y *Pinus chiapensis* son vulnerables a cambio climático debido a su baja tolerancia térmica. Además, 8% de los géneros de la zona en estudio que presentan nichos ambientales restringidos, básicamente por temperatura y precipitación como es el caso de los géneros *Pinus*, *Quercus*, *Abies* (en bosques templados) y *Euphorbia*, *Mimosa* y *Acacia* (en selvas bajas y matorrales); por lo que los hace vulnerables a la extinción debido a cambios en el clima futuro. Este tipo de fenómenos ya han sido reportados por Fossa *et al.*, (2004), quienes sugieren que las especies de plantas más vulnerables a la extinción

y cambios en su distribución fueron aquellas con bajas tolerancias climáticas en las islas Faroe. Si las condiciones ambientales cambian, se facilita la colonización de otras especies modificando la distribución espacial y la composición de estos tipos de vegetación (Cramer, 2001). De hecho, se ha sugerido que las zonas alpinas tienen mayor oportunidad de ser colonizadas que las zonas de menores altitudes debido a la susceptibilidad de suelos desnudos y menor competencia (Fossa *et al.*, 2004; Retuerto y Carballeira, 2004).

En contraste, *Bejaria*, *Litsea*, *Miconia* e *Ipomoea* son arbustos dominantes fisonómicos de los bosques templados y mesófilos y presentan alta tolerancia climática dentro de los tipos de vegetación de la SNO, por lo que podrían adaptarse a condiciones diferentes de clima (Retuerto y Carballeira, 2004; Laurent y Vilá, 2003). A reserva de considerar investigaciones más profundas al

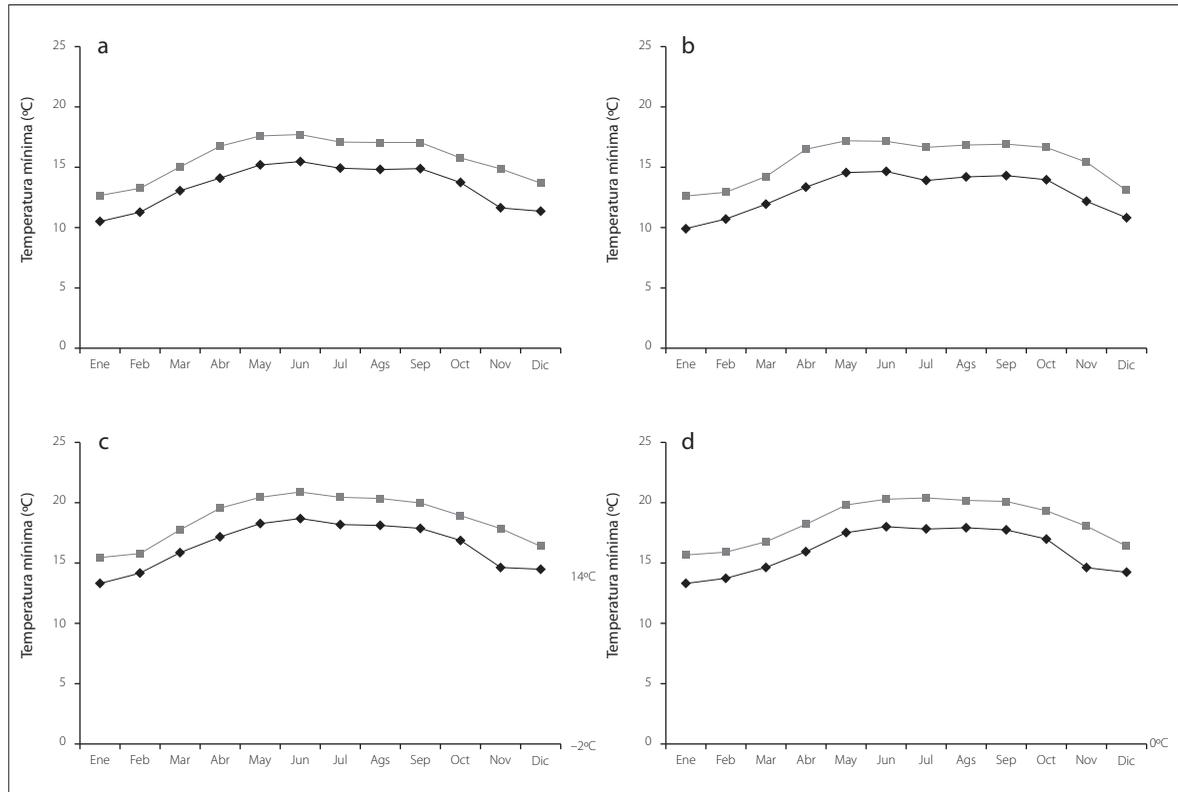


Figura 9. Escenario base de temperatura mínima media mensual en grados centígrados (línea continua) y escenario para 2050 (línea punteada) en la SNO: a) bosque de pino; b) bosque de encino; c) selva alta perennifolia y d) selva baja caducifolia, de acuerdo con el modelo de Mizuta *et al.*, 2006.

respecto y bajo condiciones de cambio climático, lo anterior sugiere que basándose solamente en la envolvente climática (parámetros del clima que explican la distribución actual de especies o ecosistemas), las especies arbustivas tolerantes a temperaturas más altas aumentarán su presencia en bosques templados, mesófilos y selvas bajas; por el contrario, las especies arbóreas disminuirán probablemente su distribución, cuya consecuencia puede ser un cambio en la composición de las comunidades.

En relación con la distribución biogeográfica, la mayoría de las especies dominantes fisonómicas presentes en la Sierra Norte de Oaxaca son eminentemente neotropicales y están adaptadas a condiciones tropicales; sin embargo, los géneros neárticos como *Amelanchier*, *Arbutus* y *Clethra*, habitan bosques de pinos, encinos y mesófilos de montaña y otros ecosistemas, cuyo límite meridional

se encuentra en Oaxaca (*Abies hickelli*, *Juniperus deppeana*, *J. flaccida*, *Pinus douglasiana*, *P. lawsonii*, *P. leiophylla*, *P. patula*, *P. pinglei* y *P. pseudotsuga* (Zononi y Adams, 1979) podrían considerarse como los más amenazados por el aumento en la temperatura. Retuerto y Carballeira (2004) han sugerido que las especies más sensibles a cambio climático son aquellas que se encuentran en las márgenes geográficas de su distribución.

Sensibilidad al cambio climático

IPCC (2002), Laurent y Vilá (2003) y GCTE (1997) indican que las formas de vida más vulnerables serán las arbóreas tales como *Pinus*, *Quercus*, *Abies* y *Juiperus*, debido a su rango estrecho de tolerancia térmica. Las menos vulnerables serán las herbáceas que suelen distribuirse a lo largo de gradientes térmicos amplios (Laurent y Vilá, 2003). Sin embargo, en la SNO, algunas especies arbóreas

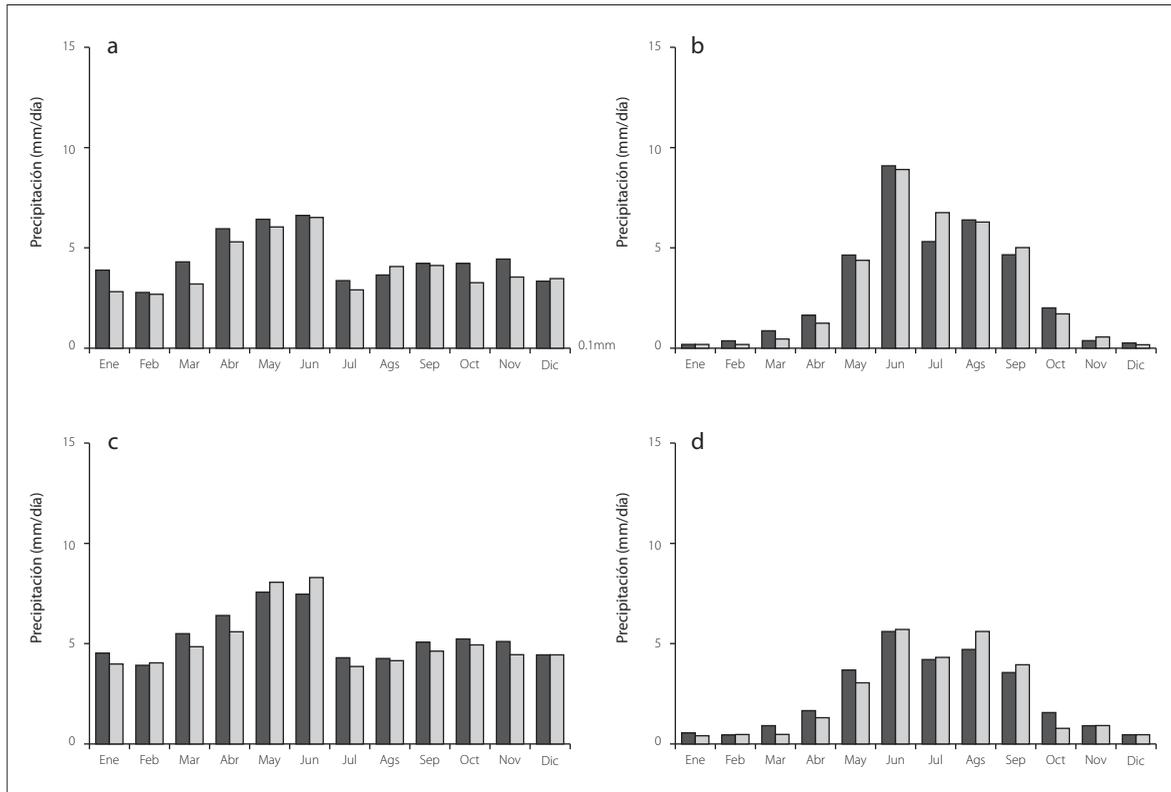


Figura 10. Escenario base de precipitación media mensual en mm/día (línea continua) y escenario para 2050 (línea punteada) en la SNO: a) bosque de pino; b) bosque de encino; c) selva alta perennifolia y d) selva baja caducifolia, de acuerdo con el modelo de Mizuta *et al.*, 2006.

dominantes en el bosque mesófilo de montaña como las de los géneros *Dendropanax*, *Persea*, y *Clethra* no parecen limitar su presencia por condiciones climáticas. Esto último puede tener una explicación debido al hecho de que las especies de los mesófilos se encuentran entremezclados con aquellas de los bosques templados en las porciones centrales de la SNO, lo cual se atribuye a la complejidad topográfica de la zona (Castillo *et al.*, 2004). Cabe mencionar que las especies arbóreas *Pinus* y *Quercus* a pesar de que se encuentran en bosques templados presentan amplias diferencias térmicas y esto se debe a la gran diversidad de especies dentro de estos géneros. Para la zona en estudio, los pinos no toleran temperaturas máximas superiores a 32°C, mientras que los encinos pueden vivir en zonas con 38 o 40°C. No existe información sobre tolerancias térmicas de los encinos mexicanos, sin embargo, se ha reportado que *Q. alba* y *Q. rubra*

pueden soportar condiciones de sequía prolongadas (Lee *et al.*, 2005).

Diversos estudios indican que un incremento en las temperaturas implicará un corrimiento de la franja de bosques templados hacia mayores altitudes, de este modo, la presencia de especies (herbáceas) tolerantes a las temperaturas máximas aumentaría (Foster, 2001; Parmesan, 2006). De acuerdo con este análisis, géneros de árboles como *Juniperus*, *Clethra* y *Styrex* de zonas de bosques mesófilos y pino-encino podrían resistir un aumento de temperatura, sin necesidad de migrar a mayor altura, ya que son de amplia tolerancia térmica. Por otra parte, los géneros arbustivos dominantes fisonómicos de las selvas bajas caducifolias y altas perennifolias como *Acacia*, *Ipomoea* y *Miconia* podrían tolerar temperaturas más altas, ya que presentan elevada tolerancia térmica. Esto coincide con lo reportado por Villers y Trejo (1998)

que indican que bajo cambio climático las selvas secas aumentarán su área de distribución, al igual que los matorrales (Gay-García *et al.*, 1996; IPCC, 2002). De acuerdo con la perspectiva de nuestros resultados, las selvas altas perennifolias también podrían resistir un aumento de temperatura y con ello incrementar su área de distribución debido a su tolerancia térmica (Villers y Trejo, 1998) y de las selvas centro y sur de América (IPCC, 2002). Tejada (1999) reporta un posible aumento del 9% en la distribución de las selvas altas perennifolias en Bolivia para 2050, como consecuencia de un aumento de las temperaturas y la precipitación que favorecerán el crecimiento de las especies que allí habitan. Sin embargo, en las selvas altas de la SNO se presentarán condiciones de disminución de la precipitación en todo el año con excepción de mayo y junio. Estos resultados muestran correspondencia con las predicciones nacionales para las selvas altas de México bajo cambio climático (Semarnat, 2006) que indican un decremento del 30% de las selvas altas de nuestro país dadas condiciones de climas más secos. No obstante que la combinación de condiciones térmicas y de precipitación para escenarios de clima en el futuro y su efecto en selvas en México no ha sido estudiada, es posible que para los grupos funcionales de la SNO se presenten condiciones limitantes para los géneros que habitan estas zonas.

En el este de Estados Unidos (Iverson y Prasad, 1998 y 2002), Australia (Lexer *et al.*, 2002) y China (Chen, 2002) estudios de tolerancias climáticas de especies dominantes, prevén una reducción del área de distribución actual de comunidades de bosques templados. De acuerdo con los resultados de este estudio, las comunidades de bosques templados y bosques mesófilos comparten especies de manera importante, lo que sugiere que su vulnerabilidad al cambio climático es similar, no obstante de grados de amenaza diferente. Por ello, la evaluación de la respuesta de los ecosistemas regionales ante el cambio climático debe incluir la sensibilidad particular de cada especie o grupo funcional. Se han efectuado diversas aproximaciones del efecto del cambio climático en la distribución de bosques templados en latitudes medias, pero aún falta información sobre las consecuencias de este efecto en bosques de lati-

tudes tropicales como los de Oaxaca. Los resultados de este estudio apuntan a un mayor aumento de las temperaturas mínimas en los bosques de encino-pino que en las selvas bajas, pero el aumento en las temperaturas máximas será igual en ambos tipos de vegetación. Dichas variaciones no se presentan en los bosques de pino. Esto sugiere que la oscilación térmica diurna en los bosques de encino-pino serán semejantes a las de las selvas secas ocasionando así posibles cambios en la composición de especies, sobre todo aquellas especies de *Quercus* de climas semifríos (*i.e.* *Q. crassifolia*). Por otro lado, las selvas secas estarán la mayor parte del año por debajo de la normal de precipitación, por lo que las especies que requieren mayor cantidad de lluvia pueden modificar su funcionamiento.

Limitaciones de los resultados

La base de datos de especies recopilada para este análisis sugiere una mayor intensidad de muestreo para regiones de bosques templados y selvas altas que para las selvas bajas; sin embargo, la mayor parte de las especies dominantes fisonómicas están representadas en todos los tipos de vegetación de la Sierra Norte de Oaxaca, por lo que los resultados son confiables. La información de sitios de colecta utilizada para este estudio presenta pocos registros para especies típicas de bosques mesófilos como *Ilex discolor*, *Liquidambar styraciflua* o *Bursera* spp; *Prosopis laevigata* de matorrales y, las palmas, *Cedrela odorata* y *Tabebuia rosea* de las selvas medianas y altas, respectivamente, por lo que nuestros resultados para estos géneros pueden variar con una mayor disponibilidad de datos. El análisis espacial de la presencia de especies *versus* las variables ambientales permitió construir una base de datos con tolerancias ambientales por género para la Sierra Norte de Oaxaca, lo cual difícilmente se podría haber obtenido con información bibliográfica o con un trabajo de campo para verificar rasgos de respuesta a las perturbaciones. No obstante lo anterior, no se descarta el análisis de otros mecanismos no climáticos que intervienen en la distribución de especies tales como las interacciones bióticas, la variación genética adaptativa y las limitantes de dispersión (Parmesan, 2006). La proyección de los impactos del cambio climático regional debe ser complementada con estudios más

profundos sobre las respuestas ecológicas y evolutivas específicas para las especies amenazadas o en peligro de extinción.

CONCLUSIONES

La construcción de bases de datos de grupos funcionales contribuye en la modelación de los rasgos de adaptación y respuesta de la vegetación ante el cambio climático a nivel de grandes biomas. En este trabajo se presentó la selección de los grupos funcionales basados en tolerancias climáticas básicas que son la base de los modelos biogeográficos partiendo de las formas de vida dominantes de la SNO. La identificación de los grupos funcionales definidos por las principales variables biofísicas, indica que la temperatura media y las temperaturas extremas serán en el futuro, algunos de los principales factores de la distribución de especies. La agrupación de géneros de plantas dominantes fisionómicas se presenta como un posible insumo para la toma de decisiones en materia de adaptación al cambio climático en ecosistemas. Los resultados de este trabajo pueden contribuir a definir estrategias de protección y manejo de aquellas especies menos tolerantes a las perturbaciones del clima actual y futuro.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al personal de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Enrique Muñoz y Laura Herrera, por el apoyo técnico brindado en la georreferenciación de sitios de colecta, así como a Elizabeth Moreno por el trabajo de validación de la taxonomía de las especies. Especialmente, agradecemos a la CONABIO y al CIIDIR-Oaxaca las bases de datos utilizadas en este estudio. El manuscrito mejoró notablemente con la revisión y atinadas sugerencias del Dr. Lorenzo Vázquez (Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México), del Dr. José Villanueva (CENID-RASPA, INIFAP, campus Gómez Palacio, Durango), y la Dra. Laura Arriaga (CIBNOR, B.C.S.). Asimismo, agra-

decemos a los dos revisores anónimos que con sus atinadas sugerencias permitieron mejorar notablemente el manuscrito. La primera autora agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y a la Universidad Nacional Autónoma de México, el apoyo brindado para este estudio mediante la beca de estudios de Posgrado.

REFERENCIAS

- Arriaga, L., J. M. Espinosa, C. Aguilar, E. Martínez, L. Gómez y E. Loa (2000), *Regiones terrestres prioritarias de México*, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, CONABIO, México.
- Both, C., A.V. Artemyev, B. Blaauw, R. J. Cowie and A. J. Dekhuijzen (2004), "Large scale geographical variation confirms that climate change causes birds to lay earlier", *Proceedings of the Royal Society B.*, 271(1549), pp. 1657-1662.
- Box, E. O. (1981), *Macroclimate and Plant Forms*, W. Junk, La Haya.
- Campos, A., P. Cortés, P. Dávila, A. García, G. Reyes, G. Toriz, L. Torres y R. Torres (1992), *Plantas y flores de Oaxaca*, Cuadernos Núm 18, Instituto de Biología, UNAM, México.
- Carey, P. D., C. D. Preston, M. O. Gill, M. B. Usher and S. M. Wright (1995), "An environmentally defined biogeographical zonation of Scotland designed to reflect species distribution", *Journal of Ecology*, 88(5), pp. 833-845.
- Castillo, R., J. Pérez de la Rosa, G. Vargas y R. Rivera, (2004), "Coníferas", en García-Mendoza, A., M. J. Ordóñez y M. Briones-Salas (coords.), *Biodiversidad de Oaxaca*, Instituto de Biología, UNAM, Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza-World Wildlife Fund, México, pp. 141-158.
- CONABIO (2006), *Manual de procedimientos para georreferenciar localidades de Colecciones Biológicas*, Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad, México.
- Cornelissen, J. H., B. Ceraboli, P. Castro-Díaz, P. Villar-Salvador, G. Montserrat-Martí, J. P. Puyravaud, M. Maestro, M. J. A. Werger and R. Aerts (2003), "Functional traits of woody plants: correspondence of species rankings between field adults and laboratory-grown seedling", *Journal of Vegetation Science*, 14(3), pp. 311-322.
- Chen, X. (2002), "Modelling the effects of global climatic change at the ecotone of boreal larch forest and temperate forest in northeast China", *Climatic Change*, 55(1-2), pp. 77-97.

- Dávila, P., L. Torres, R. Torres y O. Herrera (1997), "Sierra de Juárez, Oaxaca", en Heywood, V. H. y S. Davis (coords.), *Centers of plant diversity. A guide and strategy for their conservation*, World Wildlife Fund, pp. 135-138.
- Díaz, S., M. Cabido, M. Zak, E. B. Carretero and J. Aranibal (1999), "Plant functional traits, ecosystem structure and land-use history along a climatic gradient in central-western Argentina", *Journal of Vegetation Science*, 10(5) pp. 651-660.
- Dunn, P. O. and D. W. Winkler (1999), "Climate change has affected the breeding date of tree swallows throughout North America", *Proceedings of the Royal Society B*, 266(1437), pp. 2487-2490.
- Fagre, D., D. Peterson and A. Hessel (2003), "Taking the pulse of mountains ecosystem responses to climatic variability", *Climatic Change*, 59(1-2), pp. 263-282.
- Foster, P. (2001), "The potential negative impacts of global climate change on tropical montane cloud forests", *Earth- Science Reviews*, 55(1-2), pp. 73-106.
- Fossa, A. M. (2004), "Biodiversity patterns of vascular plant species in mountain vegetation in the Faroe Islands", *Diversity and Distribution* (10), pp. 217-223.
- García, E. (1998a), *Precipitación total anual*, escala 1:1 000 000, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México.
- García, E. (1998b), *Temperaturas mínimas extremas*, escala 1:1 000 000, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México.
- García, E. (1998c), *Temperaturas máximas extremas*, escala 1:1 000 000, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México.
- García, E. (1998d), *Isotermas medias anuales*, escala 1:1 000 000, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México.
- García-Mendoza, A. (2004), "Integración del conocimiento florístico", en García-Mendoza, A., M. J. Ordóñez y M. Briones-Salas (coords.), *Biodiversidad de Oaxaca*, Instituto de Biología, UNAM, Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza, World Wildlife Fund, pp. 305-325.
- Gay-García, C. and L. G. Ruiz Suárez (1996), *Preliminary inventory of GHG emissions: Mexico*, PNUD, México.
- GCTE, (1997), *A global key of plant functional types (PFT) for modelling ecosystem responses to global change*, Report 10, Global Change and Terrestrial Ecosystems, Camberra.
- Gitay, H. and I. R. Noble (1997), "What are functional types and how should we select them", en Smith, T., H. H. Shugart and F. I. Woodward (eds.), *Plant functional types: their relevance to ecosystem properties and global change*, International Geosphere-Biosphere Programme Book Series, Cambridge, pp. 3-17.
- Gómez-Mendoza, L. E. Vega-Peña, M. I. Ramírez, J. L. Palacio-Prieto and L. Galicia (2006), "Projecting land-use change processes in the Sierra Norte of Oaxaca, Mexico", *Applied Geography*, 26(3-4), pp. 276-290.
- Grime, J., J. G. Hodgson and R. Hunt (1988), "Comparative plant ecology. A functional approach to common British species", *The Journal of Applied Ecology*, 26(1), pp. 361-362.
- INEGI (1973), *Puntos de verificación de las cartas de uso de suelo y vegetación*, escala 1:250 000, México, extraído de los reportes de campo y las cartas de Uso de suelo y Vegetación, México.
- INEGI (2001), *Conjunto de datos vectoriales de la carta de Uso de Suelo y Vegetación. Serie II (continuo nacional)*, escala 1:250 000, México.
- INEGI (1991), "Oaxaca", *Resultados definitivos. Censo General de Población y Vivienda 1990*, Aguascalientes, México.
- IPCC (2002), *Cambio climático y biodiversidad*, documento técnico V del IPCC, Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, OMM-PNUD, Ginebra.
- IPCC (2007), *Impacts, adaptation and vulnerability, Working Group II, Contributions to the Intergovernmental Panel of Climate Change*, Fourth Assessment Report, Summary for Policymakers, Intergovernmental Panel of Climate Change, WMO-UNEP, Geneva.
- Iverson, L. and A. Prasad (1998), "Predicting abundance of 80 tree species following climate change in the eastern United States", *Ecological Monographs*, 68(4), pp. 465-485.
- Iverson, L. and A. Prasad (2002), "Potential redistribution of tree species habitat under five climate change scenarios in the eastern US", *Forest Ecology and Management*, (155), pp. 205-222.
- Kahmen, S. and P. Poschold (2004), "Plant functional traits responses to grassland succession over 25 years", *Journal of Vegetation Science*, 15(1), pp. 21-32.
- Laurent, F. and M. Vilá (2003), "Diversity patterns of plant functional types in relation to fire regime and previous land use in Mediterranean woodlands", *Journal of Vegetation Science*, 14(3), pp. 389-398.
- Lee, T. D., P. B. Reich and P. V. Bolstad (2005), "Acclimation of leaf respiration to temperature is rapid and related to specific leaf area, soluble sugars and leaf nitrogen across three temperate deciduous tree species", *Functional Ecology*, 19(4), pp. 640-647.
- Leishman, M. R. and M. Westoby (1992), "Classifying plants into groups on the basis of association of individual traits: evidence from Australian semi-arid woodlands", *Journal of Ecology*, 80(3), pp. 417-424.

- Lexer, M. J. (2002), "The sensitivity of Austrian forests to scenarios of climatic change: a large-scale risk assessment based on a modified gap model and forest inventory data", *Forest Ecology and Management*, 162(1), pp. 53-72.
- Lugo-Hupb, J., R. Vidal-Zepeda, A. Fernández-Equiarte, A. Gallegos-García y H. J. Zavala (1990), "Hipsometría y Batimetría", Hoja I.1.1, *Atlas Nacional de México*, vol. I, escala 1:4 000 000, Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Mabberly, D. J. (1982), *The Plant-Book. A portable dictionary of the vascular plants*, 2a ed., Cambridge University Press, Reino Unido.
- MacDonald, G. (2003), "Biogeography introduction to space, time and life", in MacDonald, G. (ed.), *Transitions of the Institute of British Geographers*, Wiley, London.
- Medina L. R. y P. Dávila (1997), *Flora del Valle de Tehuacan*, Fascículo 12, Instituto de Biología, UNAM, México.
- Mitchell, T. D., T. R. Carter, P. D. Jones, M. Hulme and M. G. New (2004), *A comprehensive set of high-resolution grids of monthly climate for Europe and the globe: the observed record (1901-2000) and 16 scenarios (2001-2100)*, Thyndall Centre Working Paper No. 55, Thyndall Centre, U.K.
- Montaña, C. and P. Grieg-Smith (1990), "Correspondence analysis of species by environmental variable matrices", *Journal of Vegetation Science* (1), pp. 453-460.
- Mizuta, K., H. Yoshimura, K. Katayama, S. Yukimoto, M. Hosaka, S. Kusonoky, H. Kawai and M. Nakagawa (2006), "20 km mesh global climate simulation using JMA-GSM model", *Journal of Meteorological Society of Japan*, 84(1), pp. 165-185.
- Myklestad, Å. and H. E. J. B. Birks (1993), "A numerical analysis of the distribution of *Salix* L. species in Europe", *Journal of Biogeography*, (20), pp. 1-32.
- Nuutinen, T., J. Matala, H. Hirvelä, K. Härkönen, H. Peltola, H. Väisänen and S. Kellomäki (2006), "Regionally optimized forest management under changing climate", *Climatic Change*, 79(3-4), pp. 315-333.
- Ortiz P., M. A., J. M. Figueroa y M. S. Mendoza P. (2002), "Cuencas Hidrográficas", *Diagnóstico para el Ordenamiento Territorial del Estado de Oaxaca*, Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) y Plan Estatal por el Comité de Planeación para el Desarrollo del Estado de Oaxaca (COPLADE) e Instituto de Geografía-UNAM, Sección Naturaleza, hoja 2.2.1, escala 1:500 000.
- Paine, R. T. (1980), "Food webs: linkage interaction strength and community infrastructure", *Journal of Animal Ecology*, 49(3), pp. 667-685.
- Parmesan, C. (2006), "Ecological and evolutionary responses to recent climate change", *Annual Review in Ecology and Evolution*, (37), pp. 20-40.
- Parmesan, C. y G. Yohe (2003), "A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems", *Nature*, 421, pp. 37-42.
- Proctor, E., S. Blum and G. Chaplin (2001), "A software tool for retrospectively georeferencing specimen localities using ArcView", *Georeferencing Natural History Collection Localities*, California Academy of Sciences, California.
- Retuerto, R. and A. Carballeira (2004), "Estimating plant responses to climate by direct gradient analysis and geographic distribution analysis", *Plant Ecology*, 170(2), pp. 185-202.
- Rietz, G. E. (1931), "Life forms of terrestrial flowering plants", *Acta Phytogeographica Suecica*, 80(3), pp. 1-95.
- Root, R. (1967), "The niche exploration pattern of a blue grey gnatcatcher", *Ecology Monographs*, 37, pp. 317-350.
- Semarnat (2006), *México tercera comunicación nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*, Instituto Nacional de Ecología, México.
- Standley, P. (1982), *Trees and shrubs of Mexico. Contributions from the United States National Herbarium*, vol 23, Smithsonian Institution, Washington.
- Tejada, F. (1999), *Evaluación de la vulnerabilidad de los bosques al cambio climático en Bolivia*, Programa Nacional sobre el Cambio Climático, Ministerio de Desarrollo Sostenible y del Medio Ambiente, La Paz, Bolivia.
- Thomas, C. (2005), "Recent evolutionary effects of climate change", in Lovorejoy, T. and L. Hannanh (eds.), *Climate Change and Biodiversity*, Yale University Press, New Haven.
- Torres-Colín, R. (2004), "Tipos de vegetación", en García Mendoza, A. J., M. J. Ordóñez y M. Briones-Salas (coords.), *Biodiversidad de Oaxaca*, Instituto de Biología, UNAM, Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza, World Wildlife Fund, México.
- Trejo, I. (2004), "Clima", en García Mendoza, A. J., M. J. Ordóñez y M. Briones, (coords.), *Biodiversidad de Oaxaca*, Instituto de Biología, UNAM, Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza y World Wildlife Fund, México.
- Vidal, R. (2005), *Las regiones climáticas de México*, Temas Selectos de Geografía de México (I.2.2), Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Villaseñor, J. L. (2003), "Diversidad y distribución de las Magnoliophyta de México", *Interciencia*, 28(3), pp. 160-167.

- Villers, L. e I. Trejo (1998), "El impacto del cambio climático en los bosques y áreas naturales protegidas de México", *Interciencia*, 23, pp.10-19.
- Westoby, M. y M. Leishman (1997), "Categorizing plant species into functional types", in Smith (ed.), *Plant functional types: their relevance to ecosystem properties and global change*, International Geosphere-Biosphere Programme Book Series.
- Williams, J. W., S. T. Jackson and R. Kutzbach (2007), "Projected distributions of novel and disappearing climates by 2100 A.D", *Proceedings of National Academy Science*, 104, pp. 5738-5742.
- Woodward, F. I. (1993), "How many species are required for functional ecosystem?", in Ernst-Detlef Schulze and H. A. Mooney (eds.), *Biodiversity and Ecosystem Function*, Springer-Verlag, Berlin, pp. 215-228.
- Zononi, T. A. and R. Adams (1979), "The genus *Juniperus* (Cupressaceae) in Mexico and Guatemala: Synonymus, key, and distribution of the taxa", *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 38, pp. 83-121.