

# Impacto del cambio climático en zonas bioclimáticas de México

## Reporte Técnico Final

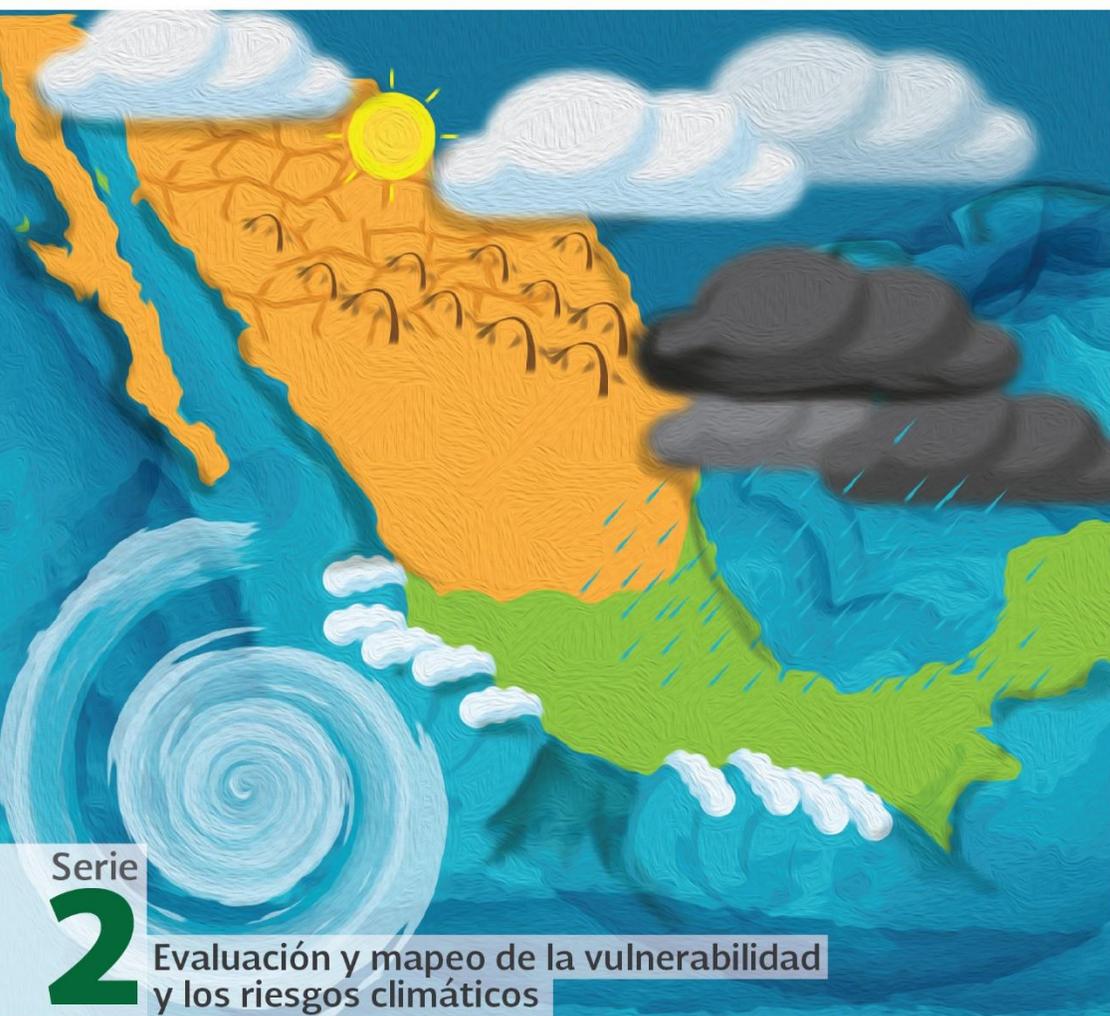
2016

Rosa Irma Trejo y  
Salvador Sánchez Colón

Serie

**2**

Evaluación y mapeo de la vulnerabilidad  
y los riesgos climáticos



## DIRECTORIO

## Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo

Antonio Molpeceres  
*Coordinador Residente del Sistema de las Naciones Unidas y  
 Representante Residente*  
 Katyna Argueta  
*Directora de país*  
 Gerardo Arroyo O'Grady  
*Director del Programa de Desarrollo Sustentable*  
 Alejandro Ismael Monterroso Rivas  
*Coordinador de la Plataforma de Colaboración sobre cambio  
 climático y crecimiento verde entre Canadá y México*  
 Francisco Hernández Estens  
*Gerente del Programa de Desarrollo Sustentable*  
 Itzel Nayeli Jiménez García  
*Administradora de la Plataforma de Colaboración sobre cambio  
 climático y crecimiento verde entre Canadá y México*

## Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático

María Amparo Martínez Arroyo  
*Directora General*  
 Cecilia Conde Álvarez  
*Coordinadora General de Adaptación al Cambio Climático*  
 Jorge López Blanco  
*Director de Gestión de Riesgos y Adaptación*  
 Daniel Iura González Terrazas  
*Director de Manejo de Cuencas y Adaptación*  
 Margarita Caso Chávez  
*Directora de Vulnerabilidad y Adaptación Ecológica*

Derechos Reservados © 2016

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD)

Montes Urales 440, Colonia Lomas de Chapultepec, Delegación Miguel Hidalgo, CP.11000, Ciudad de México.

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC)

Periférico Sur 5000, Colonia Insurgentes Cuicuilco, Delegación Coyoacán, CP. 04530, Ciudad de México

Todos los derechos están reservados. Ni esta publicación ni partes de ella pueden ser reproducidas, almacenadas mediante cualquier sistema o transmitidas, en cualquier forma o por cualquier medio, sea éste electrónico, mecánico, de fotocopiado, de grabado o de otro tipo, sin el permiso previo del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo y el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.

Producción editorial: Elsa Barrera / Diseño: sonideas

Se sugiere citar como:

PNUD-INECC. 2016. *Actualización y análisis del impacto del cambio climático en zonas bioclimáticas de México con nuevos escenarios de cambio climático*. Informe Final (Reporte). Autor y responsable técnico: Rosa Irma Trejo y Salvador Sánchez Colon. Seguimiento técnico por INECC: José Machorro Reyes. Elaborado en el marco del proyecto #86487 “Plataforma de Colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá y México”, Coordinador: Alejandro Monterroso Rivas. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Ciudad de México. 25p.

Esta publicación fue desarrollada en el marco del proyecto #86487 “Plataforma de Colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá y México”. El análisis y las conclusiones aquí expresadas no reflejan necesariamente las opiniones del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, de su Junta Ejecutiva, de sus Estados Miembros, o del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.

**AGRADECIMIENTO:** Al Gobierno de Canadá a través de *Environment Canada* por el apoyo financiero recibido para el desarrollo de la *Plataforma de Colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá y México*, durante 2014-2017. Así mismo, al Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático por el apoyo prestado para el buen desarrollo de la Plataforma.

**CONTENIDO**

<b>RESUMEN</b> .....	4
<b>ESQUEMA CONCEPTUAL DEL PROCESO DE ANÁLISIS COMPARATIVO</b> .....	4
4.2 EL ESCENARIO BASE .....	5
4.3 LOS ESCENARIOS FUTUROS .....	7
4.3.1 <i>Impactos generales en la distribución de las zonas bioclimáticas</i> .....	7
4.3.2 <i>Impactos sobre la distribución altitudinal y latitudinal de las zonas bioclimáticas</i> .....	12
4.3.3 <i>Impactos sobre la extensión de las zonas bioclimáticas</i> .....	15
4.3.4 <i>Distribución espacial de los cambios en las zonas bioclimáticas</i> .....	19
4.5 CONCLUSIONES .....	25

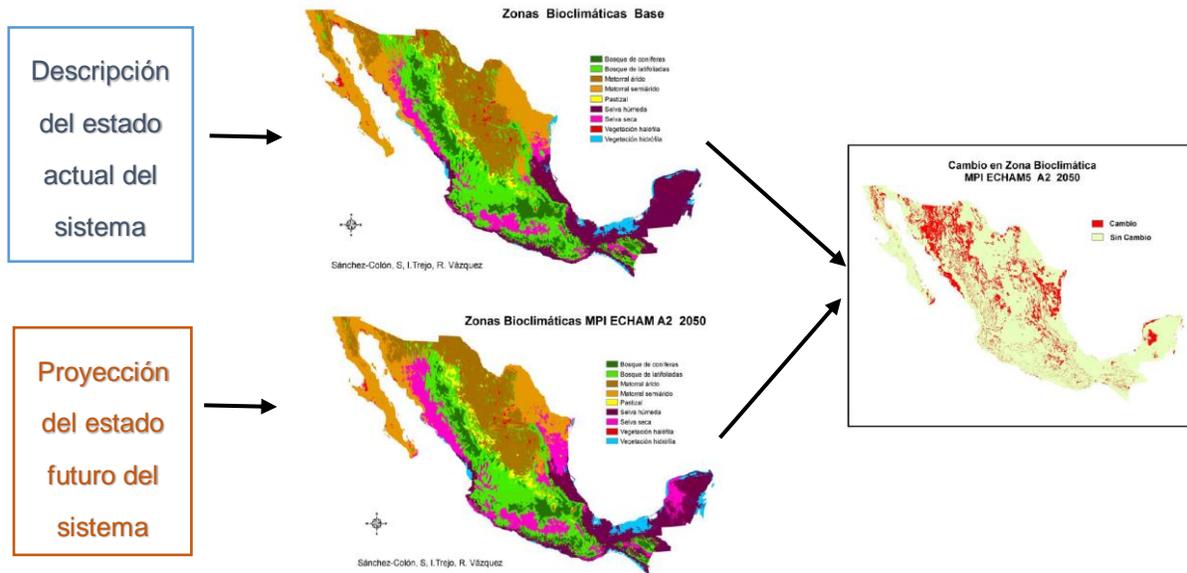
## RESUMEN

En este documento se presentan los resultados del análisis comparativo de las proyecciones del modelo estadístico que relaciona la distribución geográfica de las principales zonas bioclimáticas del país bajo las condiciones bioclimáticas prevalecientes en las últimas cuatro décadas (escenario base), con las proyecciones (escenarios futuros) del mismo modelo para las condiciones climáticas que podrían presentarse en el país hacia el final del siglo XXI, de acuerdo con seis escenarios de cambio climático considerados. Las diferencias entre las proyecciones, base *v.* futuras, dan una idea del posible impacto que tendría el cambio climático sobre la distribución de los principales ecosistemas terrestres del país. Dado que el modelo es espacialmente explícito, permite examinar también tanto la extensión como la ubicación geográfica de tales impactos y su relación con otros rasgos relevantes del territorio.

## Esquema conceptual del proceso de análisis comparativo

Como se estableció en este proyecto, en la etapa de **análisis** las proyecciones del modelo que relaciona, de manera espacialmente explícita, la distribución geográfica de las principales zonas bioclimáticas del país tanto bajo las condiciones climáticas actuales (escenario base) como para las condiciones futuras, se trasladan primero a un sistema de información geográfica para representarlas en forma de mapas. En el análisis propiamente dicho se comparan diversos aspectos relevantes del sistema bajo las condiciones actual y futura. Las diferencias entre ambas condiciones dan una idea del posible impacto del cambio climático sobre el sistema modelado (la distribución de las zonas bioclimáticas) y su representación cartográfica permite estimar su extensión, visualizar su probable ubicación geográfica y relacionarlo con rasgos relevantes del territorio, como la elevación y la ubicación latitudinal. Este proceso se describe, de manera esquemática, en la figura siguiente:

## ANÁLISIS



### 4.2 El escenario base

El escenario base (Fig.1a) muestra el tipo de formación vegetal que es más probable que ocurra en cada punto del país, bajo las condiciones ambientales actuales o históricas (1961-2000). Omitiendo a las zonas del país que el modelo es incapaz de predecir debido a las limitaciones de los datos usados para su construcción, el mapa del Escenario Base concuerda en un 63.2% con la Carta de Vegetación Potencial de INEGI (Fig.1b). A pesar de este nivel relativamente bajo de concordancia, una comparación visual de ambos muestra que el modelo sí es capaz de capturar los principales rasgos de la distribución conocida de los ecosistemas terrestres del país y, sobre todo, de su relación con las variables ambientales de las que se tiene información disponible, a saber:

Las zonas bioclimáticas que favorecen el desarrollo de los bosques de coníferas ocurren principalmente en las partes altas de las sierras, predominantemente en la Sierra Madre Occidental, el Eje Volcánico Transversal, Sierra Madre Occidental, Sierra Madre del Sur y en el estado de Chiapas. La zona de bosques de latifoliadas (incluyendo al bosque mesófilo de montaña) ocupa el nivel altitudinal inmediato inferior de las sierras. Los pastizales naturales se presentan principalmente en la zona de transición entre los bosques de latifoliadas de la Sierra Madre Occidental y los matorrales áridos del altiplano central. Los matorrales áridos predominan en el Altiplano Central y la Península de Baja California. La zona de selvas húmedas ocupa gran parte de la planicie costera del Golfo de México, así como mucho de la Península de Yucatán. La zona de selvas secas se presenta principalmente en la vertiente pacífica de la Sierra Madre Occidental y la Sierra Madre del Sur y, sobre todo, la mayor parte de la Cuenca del Río Balsas. Las condiciones bioclimáticas que permiten la presencia de vegetación hidrófila (manglares, tulares, popales,

etc.) ocurren en la parte de la planicie costera del Golfo de México correspondiente a los estados de Tabasco y Campeche y, de manera importante, en la zona litoral de la Península de Yucatán.

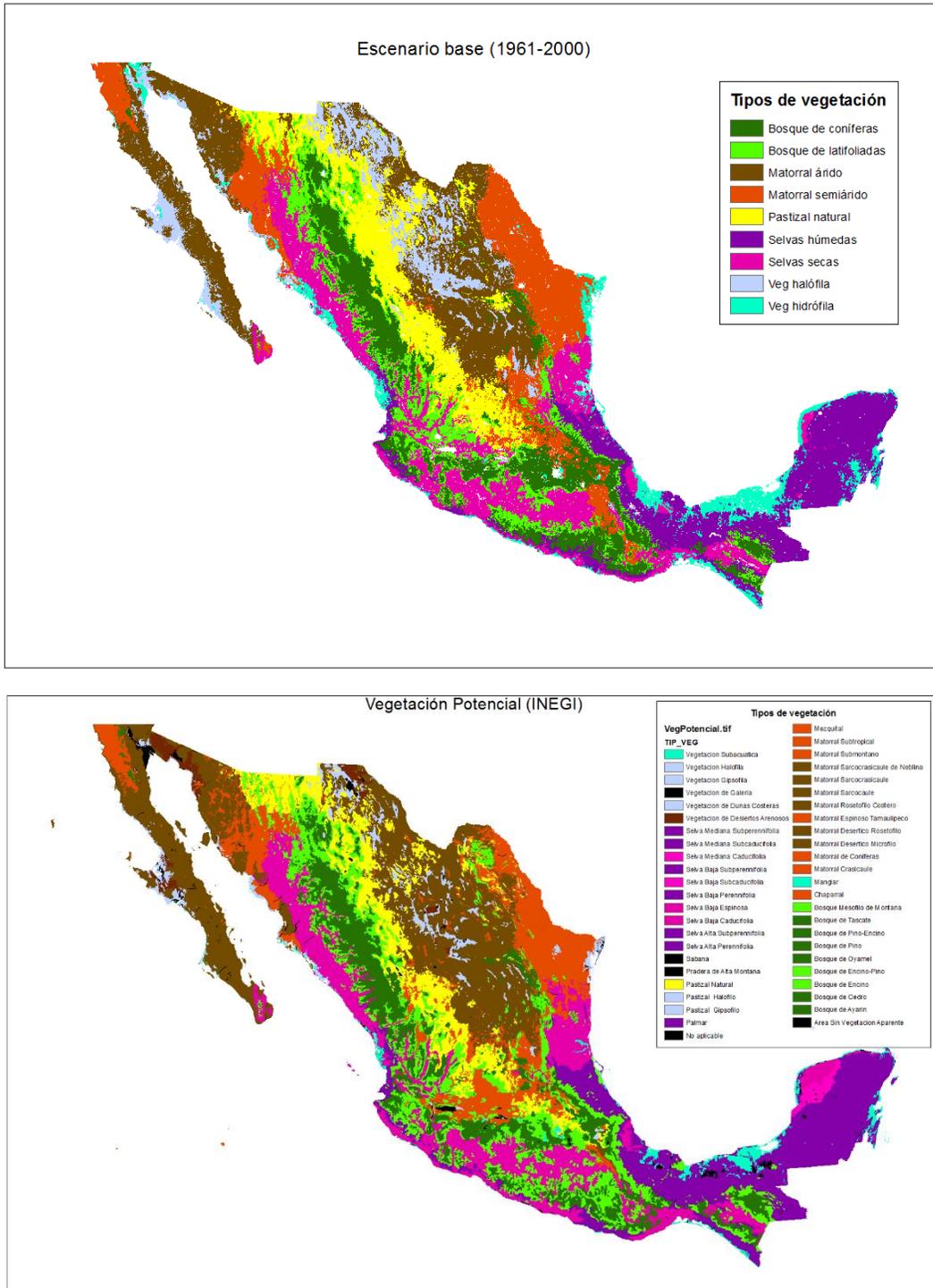


Figura 1.  
a)

Distribución espacial predicha por el modelo logit multinomial para las nueve principales formaciones vegetales de México bajo las condiciones bioclimáticas actuales o históricas (Escenario base 1961-2000). **b)** Carta de vegetación potencial de INEGI; la paleta de colores ha sido adecuada para reflejar la reagrupación de los 47 tipos de vegetación que reconoce la carta de INEGI en las nueve formaciones vegetales consideradas en el Escenario Base.

Más aún, si se omite a las zonas del país que el modelo es incapaz de predecir debido a las limitaciones de los datos usados para su construcción, la extensión predicha por el modelo del Escenario Base para las nueve formaciones vegetales también concuerda, razonablemente bien, con su extensión en la Carta de Vegetación Potencial de INEGI (ver las dos primeras columnas del Cuadro 1 más abajo). El modelo predice de manera particularmente cercana la extensión de las zonas bioclimáticas correspondientes a los bosques de coníferas, los matorrales semiáridos, las selvas húmedas y las selvas secas; sobreestima notablemente la extensión de los pastizales y la vegetación hidrófila y subestima de manera importante la extensión de los matorrales áridos.

### 4.3 Los escenarios futuros

#### 4.3.1 Impactos generales en la distribución de las zonas bioclimáticas

Como se estableció en el Producto 2, para este estudio se consideraron los seis escenarios regionales de cambio climático resultantes de forzar tres Modelos Generales de Circulación Global (GFDL-CM3, HADGEM2-ES y MPI-ESM-LR) con dos Rutas Representativas de Concentración (RCP 4.5 y RCP 8.5). El mismo Modelo Logístico Multinomial construido para el escenario base se aplicó a las cartas de las variables correspondientes a estos seis escenarios regionales para el período 2075-2099 (junto con las cartas de Elevación, Inclinación de la pendiente, Tipo de suelo y Sustrato geológico, las cuales se consideraron como invariantes hasta el final del siglo), para obtener las probabilidades de ocurrencia de las zonas bioclimáticas correspondientes a los nueve tipos de formaciones vegetales consideradas, bajo cada uno de los seis escenarios de clima cambiado.

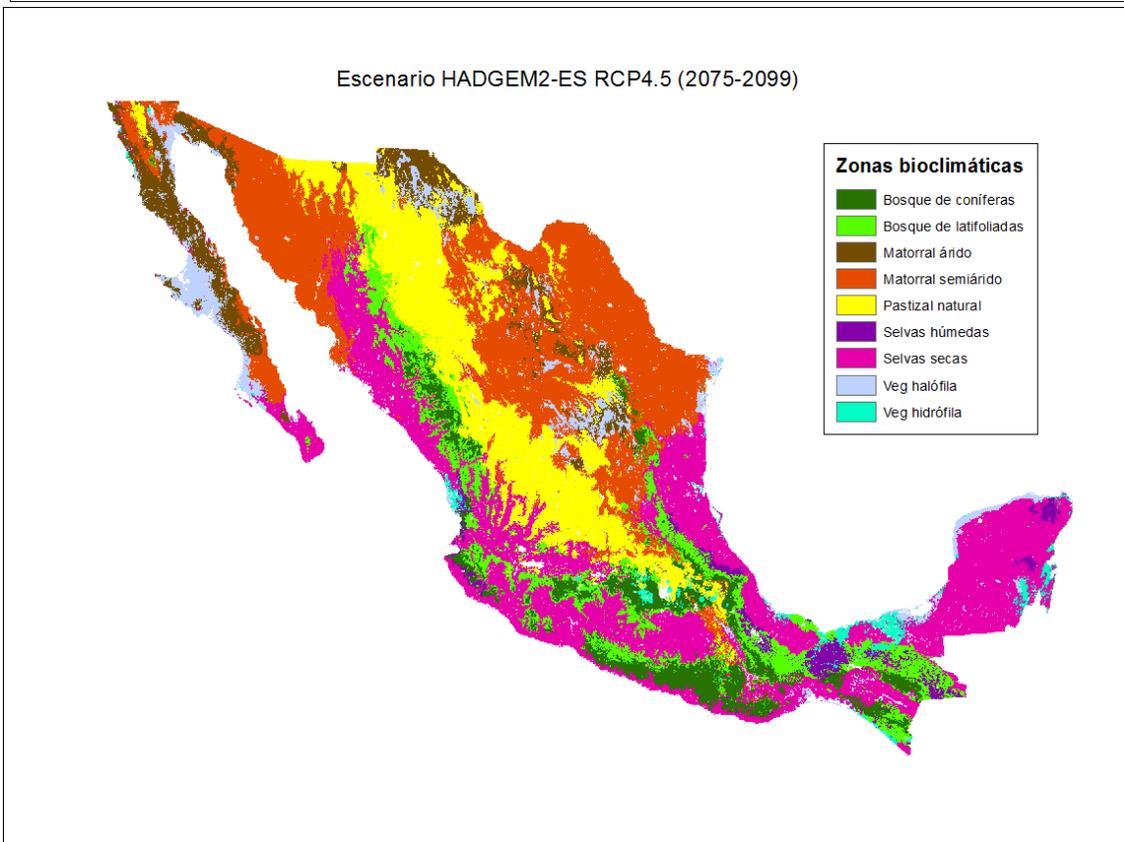
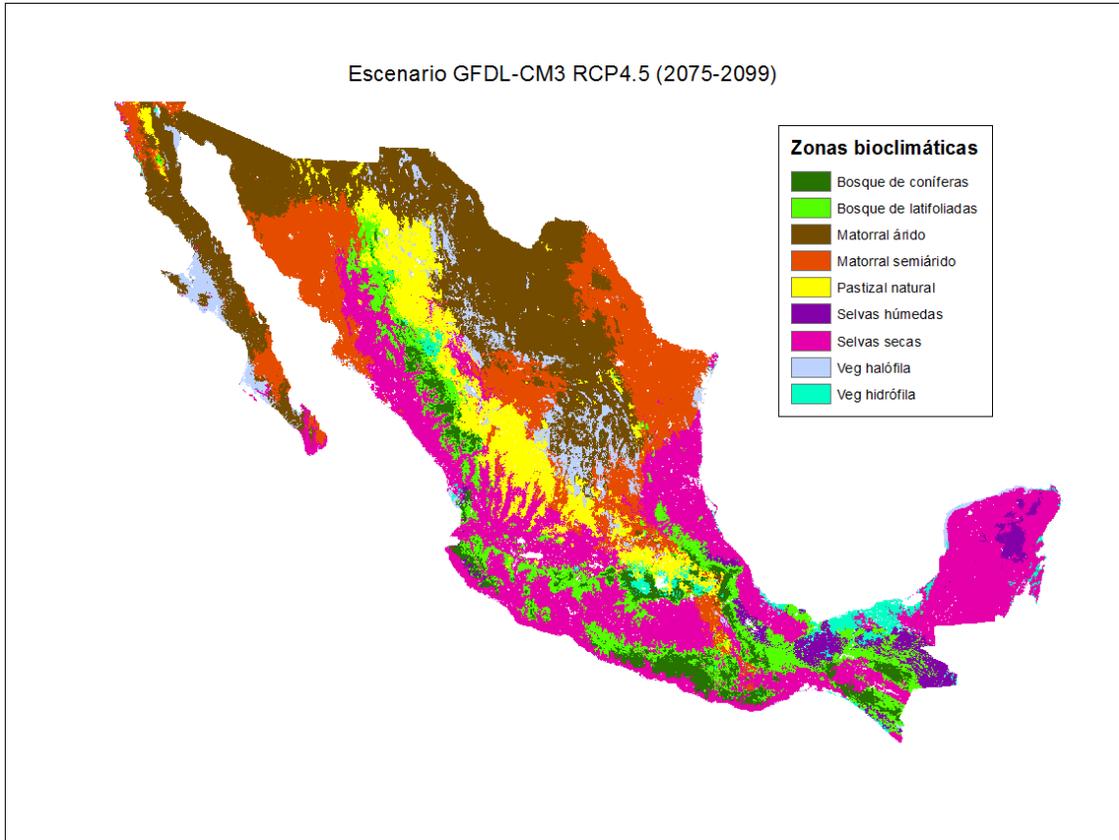
Finalmente, con base en las nueve cartas de probabilidad, cada uno de los píxeles se asignó a la zona bioclimática que tuviera la mayor probabilidad de ocurrencia para obtener mapas (**Escenarios futuros**, Figs. 2 y 3) que muestran una **proyección** de la posible distribución de las zonas bioclimáticas correspondientes a cada uno de las nueve principales formaciones vegetales del país bajo las condiciones que se espera ocurran en el futuro debido a los cambios globales en el clima.

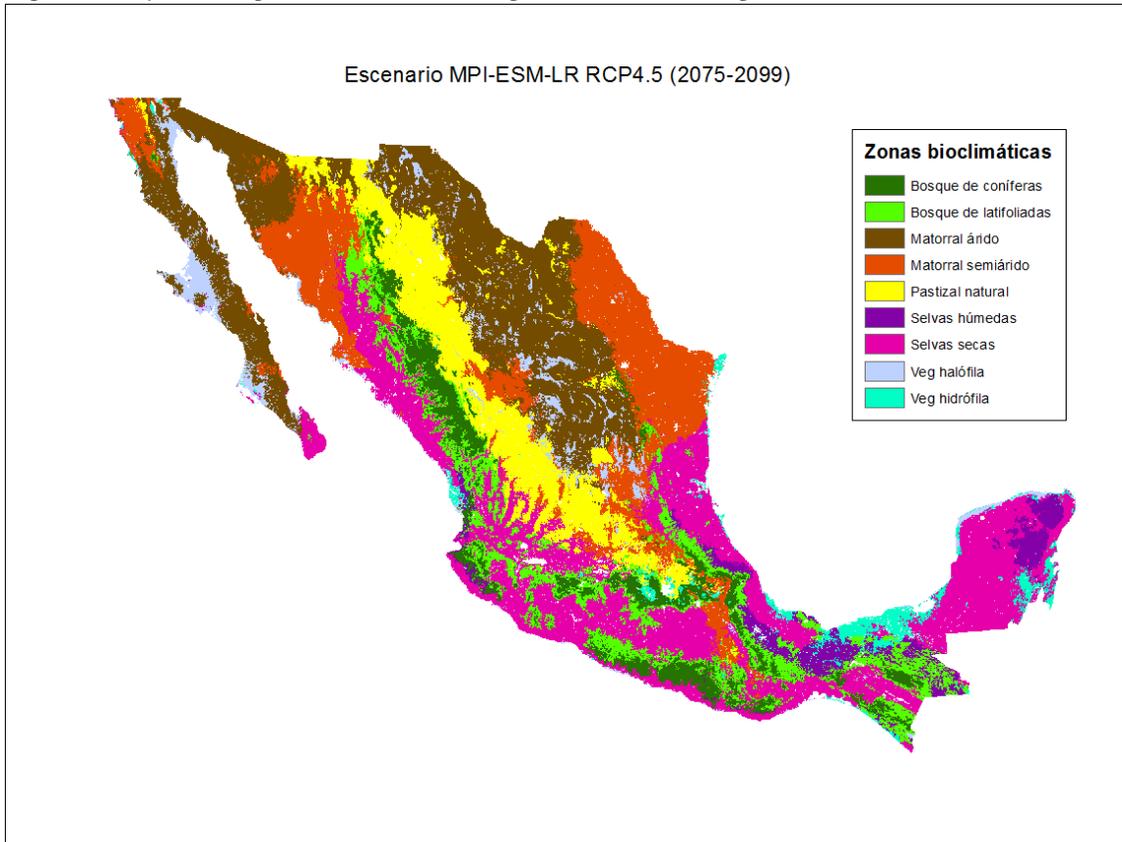
Los mapas de la Figura 2 muestran las proyecciones derivadas de los escenarios de forzamiento radiativo moderado (RCP 4.5W/m<sup>2</sup>) para cada uno de los tres modelos de circulación considerados. Aunque existen diferencias entre ellos, los tres escenarios muestran una notable expansión de las zonas bioclimáticas correspondientes a las selvas secas (sobre todo en la costa del Golfo de México y la Península de Yucatán) y los matorrales semiáridos, una gran disminución en la superficie del país con condiciones adecuadas para las selvas húmedas, e importantes disminuciones de las zonas de bosques coníferas, vegetación halófila e hidrófila. Las proyecciones para las zonas correspondientes a bosques de latifoliadas, matorrales áridos y pastizales difieren entre los tres modelos de circulación.

**Cuadro 1.** Extensión ocupada por cada una de las nueve formaciones vegetales en la Carta de Vegetación Potencial de INEGI y su extensión proyectada en: el mapa del Escenario Base y en los seis escenarios de cambio climático considerados para el horizonte 2075-2099. Las columnas marcadas Δ(%) muestran el cambio porcentual en la extensión de cada zona bioclimática con respecto al Escenario Base.

Formación vegetal/Zona bioclimática	Extensión Potencial INEGI	Extensión Escenario Base (1961-2000)	Escenarios de trayectoria de concentración moderada (RCP 4.5)						Escenarios de trayectoria de concentración elevada (RCP 8.5)					
			Extensión GFDL-RCP4.5 (2075-2099)		Extensión HADGEM2-ES RCP4.5 (2075-2099)		Extensión MPI-ESM-LR RCP4.5 (2075-2099)		Extensión GFDL-RCP8.5 (2075-2099)		Extensión HADGEM2-ES RCP8.5 (2075-2099)		Extensión MPI-ESM-LR RCP8.5 (2075-2099)	
			ha	Δ(%)	ha	Δ(%)	ha	Δ(%)	ha	Δ(%)	ha	Δ(%)	ha	Δ(%)
Bosque de coníferas	21,827,256	22,031,431	8,454,238	-61.6	12,032,388	-45.4	12,757,588	-42.1	9,559,838	-56.6	11,132,475	-49.5	7,158,931	-67.5
Bosque de latifoliadas	25,247,050	17,630,056	16,749,938	-5.0	17,265,413	-2.1	17,684,838	0.3	17,248,975	-2.2	14,531,513	-17.6	18,197,313	3.2
Matorral árido	44,705,556	32,880,219	45,539,244	38.5	12,056,681	-63.3	42,373,150	28.9	17,796,281	-45.9	9,944,594	-69.8	35,801,888	8.9
Matorral semiárido	23,846,450	24,911,369	31,436,956	26.2	49,320,781	98.0	30,914,863	24.1	71,589,156	187.4	68,767,988	176.1	42,475,256	70.5
Pastizal natural	16,152,100	20,814,394	17,972,538	-13.7	33,385,050	60.4	22,959,844	10.3	17,416,950	-16.3	20,227,981	-2.8	15,924,419	-23.5
Selvas húmedas	25,201,763	24,891,706	5,553,906	-77.7	3,841,713	-84.6	7,227,456	-71.0	56,644	-99.8	81,494	-99.7	120,194	-99.5
Selvas secas	25,420,350	24,828,038	52,118,819	109.9	50,447,369	103.2	44,623,756	79.7	51,526,019	107.5	52,736,631	112.4	58,769,444	136.7
Veg halófila	5,377,619	14,663,188	10,188,438	-30.5	10,461,831	-28.7	8,555,931	-41.7	4,932,313	-66.4	13,326,625	-9.1	12,027,038	-18.0
Veg hidrófila	2,640,744	9,141,031	3,777,356	-58.7	2,980,206	-67.4	4,644,975	-49.2	1,665,256	-81.8	1,042,131	-88.6	1,316,950	-85.6
Otros tipos de vegetación (zonas desprovistas de vegetación, vegetación de galería, pastizal de alta montaña, etc.)	1,372,544	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<b>Extensión total</b>	<b>191,791,431</b>	<b>191,791,431</b>	<b>191,791,431</b>		<b>191,791,431</b>		<b>191,742,400</b>		<b>191,791,431</b>		<b>191,791,431</b>		<b>191,791,431</b>	

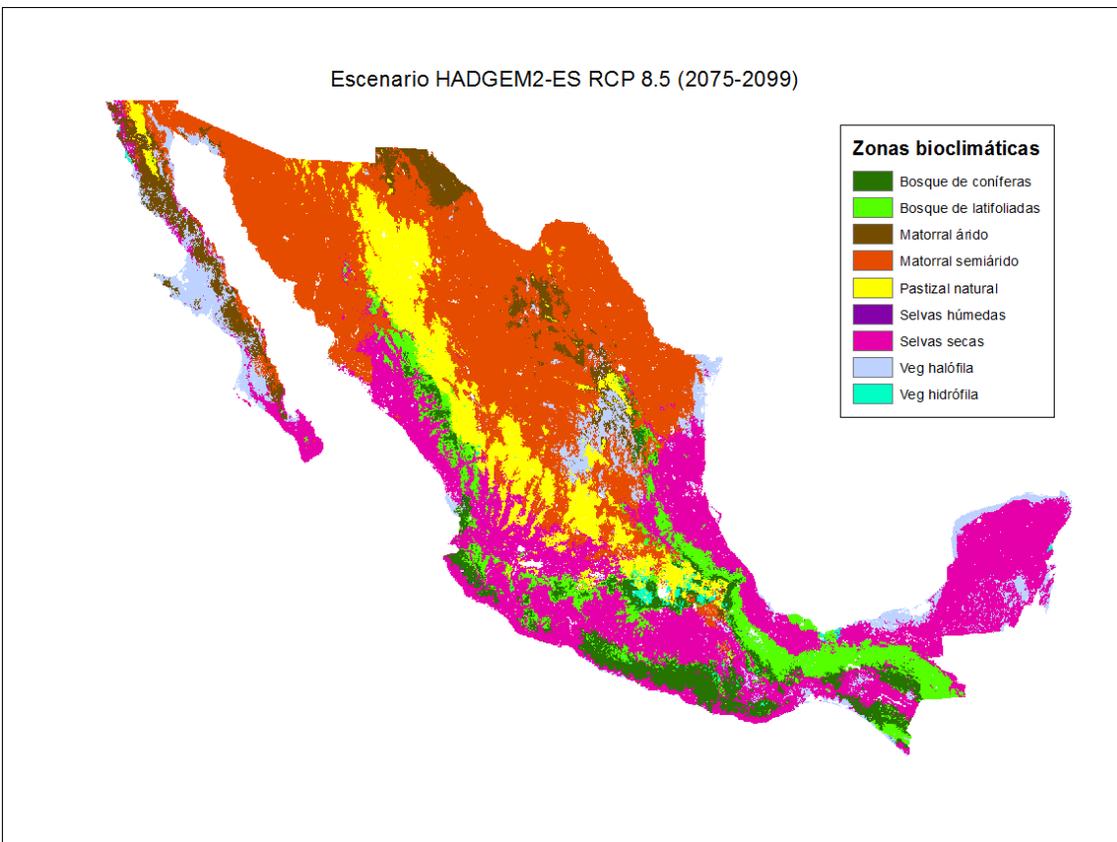
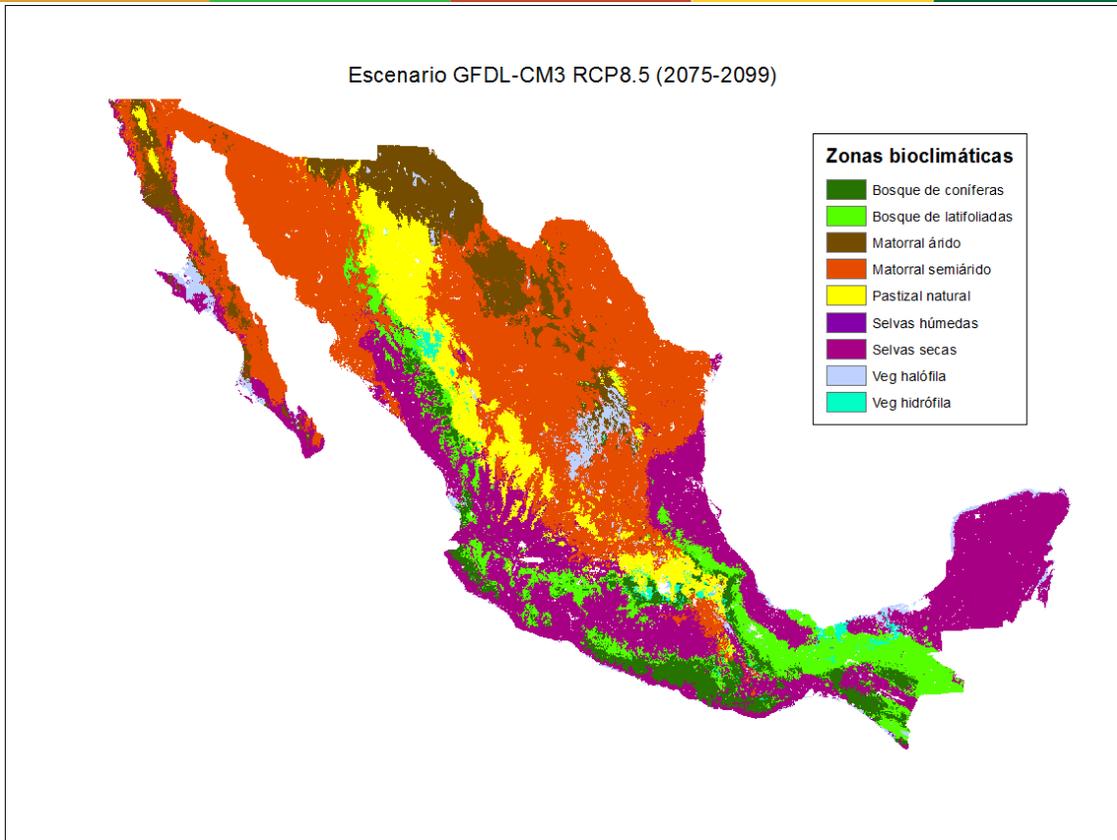
**Nota:** En algunos píxeles, el escenario MPI-ESM-LR con RCP de 4.5 W/m<sup>2</sup> da lugar a combinaciones de valores que hacen aritméticamente imposible calcular las probabilidades del modelo; por esta razón, la extensión total en este escenario es ligeramente menor que en los restantes.

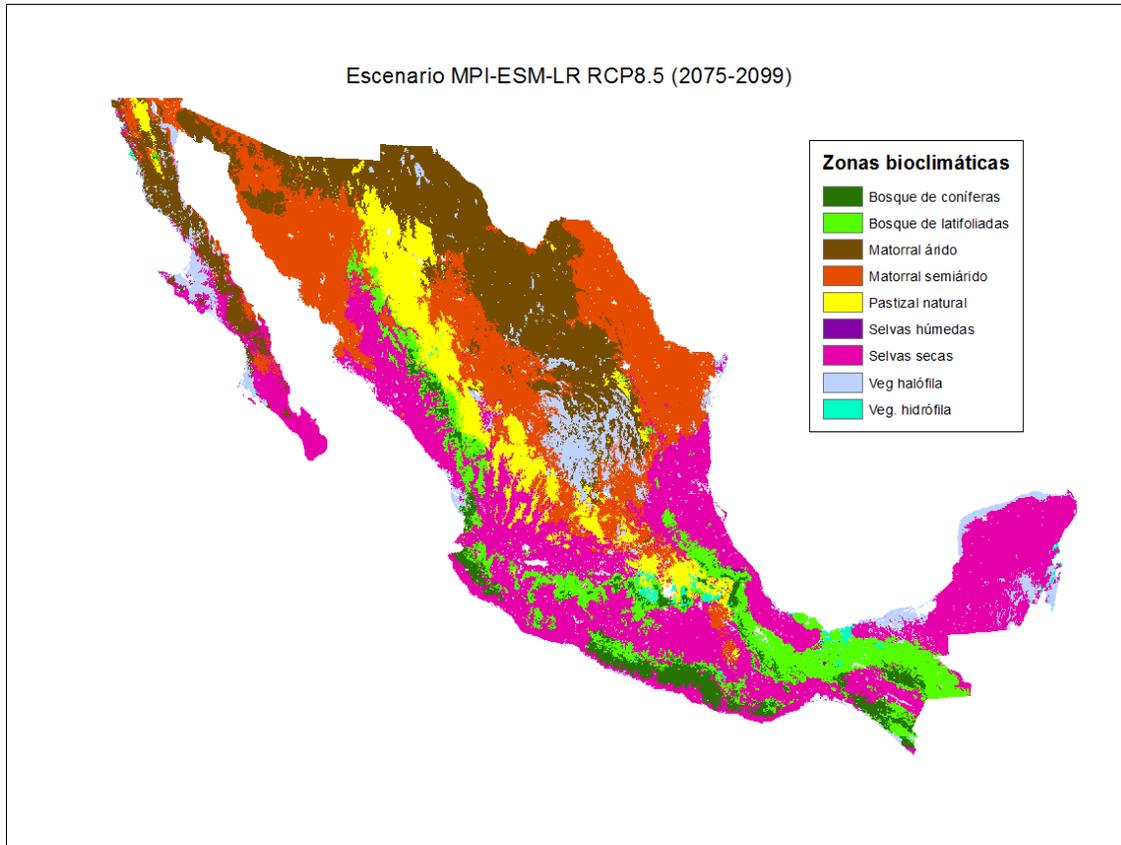


**Figura 2.** Proyección al período 2075-2099 de la posible distribución espacial de las zonas bioclimáticas

correspondientes a las nueve principales formaciones vegetales de México bajo las condiciones climáticas proyectadas por tres modelos de circulación general (GFDL-CM3, HADGEM2-ES y MPI-ESM-LR) forzados por la Ruta Representativa de Concentración que conduciría a un forzamiento radiativo de  $+4.5 \text{ W/m}^2$  en el año 2100 (con respecto a los niveles preindustriales).

Los mapas de la Figura 3 muestran las proyecciones derivadas de los escenarios de alta concentración de gases de efecto invernadero ( $\text{RCP } 8.5\text{W/m}^2$ ) para cada uno de los tres modelos de circulación considerados. Estas proyecciones son particularmente importantes ya que la Ruta Representativa de Concentración que conduce a un incremento (con respecto a los niveles preindustriales) de  $8.5\text{W/m}^2$  en el forzamiento radiativo de la atmósfera es la que se considera como el “escenario habitual o tendencial” (*business as usual*) de las emisiones, las cuales continuarían aumentando a través de todo el siglo XXI. Como puede apreciarse, bajo estas condiciones los tres escenarios conducirían prácticamente a la desaparición de las zonas del país con condiciones adecuadas para selvas húmedas y vegetación hidrófila (particularmente manglares), una gran disminución de las zonas de bosques coníferas y una sensible contracción en las zonas de vegetación halófila. Al mismo tiempo, se tendría una gran expansión de las zonas de matorral semiárido y selvas secas.





**Figura 3.** Proyección al período 2075-2099 de la posible distribución espacial de las zonas bioclimáticas correspondientes a las nueve principales formaciones vegetales de México bajo las condiciones climáticas proyectadas por tres modelos de circulación general (GFDL-CM3, HADGEM2-ES y MPI-ESM-LR) forzados por la Ruta Representativa de Concentración que conduciría a un forzamiento radiativo de  $+8.5 \text{ W/m}^2$  en el año 2100 (con respecto a los niveles preindustriales).

#### 4.3.2 Impactos sobre la distribución altitudinal y latitudinal de las zonas bioclimáticas

A una escala local o regional, los cambios en la distribución geográfica predicha para cada zona bioclimática pueden estar relacionados con cambios o desplazamientos en su ubicación o localización en relación a gradientes geográficos (por ejemplo, la ubicación latitudinal) o topográficos (por ejemplo, ubicación altitudinal o en relación con la exposición de las pendientes, etc.).

Para examinar este aspecto, se hizo una tabulación cruzada de los mapas de los escenarios base y futuros (los cuales muestran el tipo de formación vegetal que es más probable en cada pixel) con las cartas de elevación sobre el nivel del mar y de latitud. A partir de esto, se construyó la distribución de frecuencias de cada uno de los nueve tipos bioclimáticos considerados con respecto a la elevación y a la altitud, para cada uno de los escenarios considerados. Las distribuciones de frecuencia así obtenidas se examinaron visualmente para identificar cambios o desplazamientos en la localización latitudinal o altitudinal de cada zona bioclimática bajo cada uno de los escenarios futuros en relación con su ubicación en el escenario base. Los Cuadros 2 y 3 muestran las distribuciones de frecuencia con respecto a la elevación y la latitud, respectivamente.

**Cuadro 2.** Cambios en la distribución altitudinal proyectada de cada una de las nueve formaciones vegetales en el mapa del Escenario Base y en los seis escenarios de cambio climático considerados para el horizonte 2075-2099. Los valores en cada columna representan el porcentaje de los pixeles en que el tipo de vegetación es el más probable y que ocurren en cada piso altitudinal. El valor en negritas denota la ubicación de la moda de cada zona bioclimática en el gradiente altitudinal.

	ESCENARIOS							ESCENARIOS							ESCENARIOS							ESCENARIOS							
	Escenario Base	GFDL-CM3 RCP=4.5 (2075-2099)	HADGEM2-ES RCP=4.5 (2075-2099)	MPI-ESM-LR RCP=4.5 (2075-2099)	GFDL-CM3 RCP=8.5 (2075-2099)	HADGEM2-ES RCP=8.5 (2075-2099)	MPI-ESM-LR RCP=8.5 (2075-2099)	Escenario Base	GFDL-CM3 RCP=4.5 (2075-2099)	HADGEM2-ES RCP=4.5 (2075-2099)	MPI-ESM-LR RCP=4.5 (2075-2099)	GFDL-CM3 RCP=8.5 (2075-2099)	HADGEM2-ES RCP=8.5 (2075-2099)	MPI-ESM-LR RCP=8.5 (2075-2099)	Escenario Base	GFDL-CM3 RCP=4.5 (2075-2099)	HADGEM2-ES RCP=4.5 (2075-2099)	MPI-ESM-LR RCP=4.5 (2075-2099)	GFDL-CM3 RCP=8.5 (2075-2099)	HADGEM2-ES RCP=8.5 (2075-2099)	MPI-ESM-LR RCP=8.5 (2075-2099)	Escenario Base	GFDL-CM3 RCP=4.5 (2075-2099)	HADGEM2-ES RCP=4.5 (2075-2099)	MPI-ESM-LR RCP=4.5 (2075-2099)	GFDL-CM3 RCP=8.5 (2075-2099)	HADGEM2-ES RCP=8.5 (2075-2099)	MPI-ESM-LR RCP=8.5 (2075-2099)	
	<b>Bosques de coníferas</b>							<b>Bosques de latifoliadas</b>							<b>Matorral árido</b>							<b>Matorral semiárido</b>							
Altitud (msnm)	< 500	0.3	8.0	6.9	5.3	14.1	12.6	17.9	0.3	12.9	15.3	10.5	<b>30.5</b>	<b>28.4</b>	<b>26.8</b>	27.4	18.9	31.7	20.8	6.0	18.3	10.7	<b>51.0</b>	<b>54.5</b>	<b>37.0</b>	<b>50.3</b>	<b>36.0</b>	28.9	<b>43.8</b>
	500 - 1000	4.7	14.8	13.6	10.5	<b>20.6</b>	18.9	<b>23.0</b>	8.5	12.1	11.6	13.7	13.1	13.2	12.8	19.5	17.9	19.6	15.8	9.1	23.9	15.5	17.9	13.6	19.4	18.1	16.4	15.1	16.4
	1000 - 1500	6.4	10.0	10.6	6.9	13.1	15.8	15.2	32.3	19.4	20.1	25.9	15.4	15.6	14.8	<b>26.0</b>	<b>39.6</b>	<b>35.3</b>	<b>40.3</b>	<b>55.0</b>	<b>36.5</b>	<b>47.6</b>	9.7	11.7	27.6	12.0	21.5	<b>29.5</b>	13.8
	1500 - 2000	16.8	12.0	14.0	11.2	13.1	14.9	12.1	<b>38.4</b>	<b>28.2</b>	<b>28.2</b>	<b>30.4</b>	21.3	21.8	20.5	19.4	18.1	9.3	17.8	24.0	15.5	20.6	13.2	15.2	14.1	14.0	18.7	21.6	18.8
	2000 - 2500	<b>45.7</b>	<b>27.1</b>	<b>29.1</b>	<b>35.6</b>	<b>20.6</b>	<b>20.6</b>	15.5	20.2	23.6	21.4	17.3	17.3	18.3	19.3	7.7	5.4	4.1	5.2	5.7	5.9	5.5	7.6	4.8	1.8	4.9	7.5	4.8	7.1
	2500 - 3000	23.8	23.9	22.6	27.0	15.2	14.3	12.6	0.3	3.8	3.5	2.2	2.3	2.6	5.6	0.0	0.1	0.0	0.1	0.2	0.1	0.1	0.6	0.1	0.1	0.6	0.0	0.0	0.0
	3000 - 3500	1.9	3.4	2.8	2.9	2.6	2.3	2.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	3500 - 4000	0.3	0.7	0.5	0.5	0.6	0.5	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	4000 - 4500	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	4500 - 5000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	5000 - 5500	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	> 5500	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	<b>Selvas húmedas</b>							<b>Selvas secas</b>							<b>Pastizal natural</b>							<b>Veg halófila</b>							
Altitud (msnm)	< 500	<b>84.0</b>	<b>84.9</b>	<b>79.4</b>	<b>88.1</b>	<b>89.2</b>	<b>79.4</b>	<b>81.1</b>	<b>48.1</b>	<b>55.6</b>	<b>61.4</b>	<b>59.1</b>	<b>61.5</b>	<b>59.1</b>	<b>56.2</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	29.4	<b>31.9</b>	<b>58.2</b>	<b>48.9</b>	<b>47.6</b>	<b>70.8</b>	<b>48.0</b>
	500 - 1000	13.2	13.4	18.2	11.1	10.6	20.2	18.8	29.2	16.0	16.4	17.5	14.1	14.4	13.9	0.9	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.1	5.2	0.7	3.4	2.5	1.0	3.2	1.3
	1000 - 1500	2.7	1.6	2.5	0.8	0.3	0.3	0.1	15.7	13.2	12.9	12.6	11.7	12.3	12.3	21.2	1.4	12.1	5.3	0.7	1.7	1.8	<b>57.4</b>	23.6	21.2	27.1	5.4	5.3	10.4
	1500 - 2000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.7	13.0	8.7	9.8	10.5	11.7	13.2	<b>46.2</b>	22.5	35.3	35.0	18.3	15.6	11.2	7.0	28.1	15.3	15.6	25.7	14.0	24.8
	2000 - 2500	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	2.1	0.6	1.0	2.3	2.4	4.2	31.0	<b>64.9</b>	<b>46.8</b>	<b>54.1</b>	<b>64.5</b>	<b>67.7</b>	<b>67.6</b>	1.1	15.7	1.8	5.9	20.2	6.6	15.5
	2500 - 3000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.7	11.1	5.8	5.6	16.4	15.0	19.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	3000 - 3500	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	3500 - 4000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	4000 - 4500	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	4500 - 5000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	5000 - 5500	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	> 5500	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	<b>Veg hidrófila</b>																												
Altitud (msnm)	< 500	<b>98.6</b>	<b>66.2</b>	<b>80.2</b>	<b>89.1</b>	32.2	15.2	40.4																					
	500 - 1000	0.1	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0																					
	1000 - 1500	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0																					
	1500 - 2000	0.2	0.5	0.7	0.4	0.3	0.5	0.1																					
	2000 - 2500	0.7	5.9	4.0	2.7	5.8	12.2	9.5																					
	2500 - 3000	0.3	23.4	11.2	6.1	<b>50.7</b>	<b>54.3</b>	<b>37.3</b>																					
	3000 - 3500	0.0	3.0	2.6	1.1	9.0	14.6	10.2																					
	3500 - 4000	0.0	0.5	0.6	0.4	1.1	1.8	1.4																					
	4000 - 4500	0.1	0.3	0.4	0.2	0.6	1.0	0.8																					
	4500 - 5000	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.2																					
	5000 - 5500	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1																					
	> 5500	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0																					

Como puede apreciarse en el Cuadro 2, los escenarios de cambio climático imponen cambios sensibles en la distribución altitudinal de las diferentes zonas bioclimáticas; estos cambios son particularmente marcados en los escenarios de altas emisiones (RCP = 8.5W/m<sup>2</sup>). Los bosques de coníferas que, en el escenario base y en los escenarios de emisiones moderadas (RCP = 4.5W/m<sup>2</sup>) son más frecuentes entre los 2000 y 2500 msnm, en los escenarios de RCP = 8.5W/m<sup>2</sup> quedan restringidos a zonas más bajas y son desplazados por otras condiciones bioclimáticas. Algo semejante sucede con los bosques de latifoliadas, incluso de manera más acentuada.

También en los escenarios de altas emisiones, los matorrales áridos se vuelven menos frecuentes en las zonas más bajas de su distribución original, en tanto que los matorrales semiáridos amplían notablemente su distribución a zonas más altas.

La distribución altitudinal de las selvas húmedas no se modifica notablemente. Por el contrario, la distribución de las selvas secas se amplía sensiblemente hacia zonas más altas en los escenarios de RCP = 8.5W/m<sup>2</sup>.

En todos los escenarios los pastizales naturales ven desplazada su distribución altitudinal hacia zonas algo más altas que en el escenario base. También en todos los escenarios la vegetación halófila se vuelve más frecuente en zonas bajas, en comparación a su distribución en el escenario base. Finalmente, en los escenarios de RCP = 8.5W/m<sup>2</sup> la distribución de la vegetación hidrófila se modifica sensiblemente, debido a la drástica constricción de los manglares (en las zonas bajas).

Como puede apreciarse en el Cuadro 3, los cambios en la distribución latitudinal de las diferentes zonas bioclimáticas son muchos menos claros. Entre los cambios más notables se encuentran la expansión de las selvas secas, cuya zona bioclimática se amplía a lo largo de todo el gradiente latitudinal del país, el desplazamiento de la distribución de los matorrales áridos y semiáridos a zonas más al norte del país, el desplazamiento hacia el Sur de la distribución de los bosques templados (tanto de coníferas como de latifoliadas) y la reducción de las zonas de vegetación hidrófila de localidades más al sur.

**Cuadro 3.** Cambios en la distribución latitudinal proyectada de cada una de las nueve formaciones vegetales en el mapa del Escenario Base y en los seis escenarios de cambio climático considerados para el horizonte 2075-2099. Los valores en cada columna representan el porcentaje de los pixeles en que el tipo de vegetación es el más probable y que ocurren en cada nivel latitudinal. El valor en negritas denota la ubicación de la moda de cada zona bioclimática en el gradiente latitudinal. La latitud se expresa en términos de la distancia (en m) a partir del paralelo de referencia; valores más grandes denotan ubicaciones más al Norte.

	ESCENARIOS						ESCENARIOS						ESCENARIOS						ESCENARIOS																	
	Escenario Base	GFDL-CM3 RCP=4.5 (2075-2099)	HADGEM2-ES RCP=4.5 (2075-2099)	MPI-ESM-LR RCP=4.5 (2075-2099)	GFDL-CM3 RCP=8.5 (2075-2099)	HADGEM2-ES RCP=8.5 (2075-2099)	MPI-ESM-LR RCP=8.5 (2075-2099)	Escenario Base	GFDL-CM3 RCP=4.5 (2075-2099)	HADGEM2-ES RCP=4.5 (2075-2099)	MPI-ESM-LR RCP=4.5 (2075-2099)	GFDL-CM3 RCP=8.5 (2075-2099)	HADGEM2-ES RCP=8.5 (2075-2099)	MPI-ESM-LR RCP=8.5 (2075-2099)	Escenario Base	GFDL-CM3 RCP=4.5 (2075-2099)	HADGEM2-ES RCP=4.5 (2075-2099)	MPI-ESM-LR RCP=4.5 (2075-2099)	GFDL-CM3 RCP=8.5 (2075-2099)	HADGEM2-ES RCP=8.5 (2075-2099)	MPI-ESM-LR RCP=8.5 (2075-2099)	Escenario Base	GFDL-CM3 RCP=4.5 (2075-2099)	HADGEM2-ES RCP=4.5 (2075-2099)	MPI-ESM-LR RCP=4.5 (2075-2099)	GFDL-CM3 RCP=8.5 (2075-2099)	HADGEM2-ES RCP=8.5 (2075-2099)	MPI-ESM-LR RCP=8.5 (2075-2099)								
Latitud (m desde el paralelo de referencia)	<b>Bosques de coníferas</b>						<b>Bosques de latifoliadas</b>						<b>Matorral árido</b>						<b>Matorral semiárido</b>																	
	314 000 - 500000	4.5	14.5	12.0	7.9	19.2	16.5	20.7	2.7	6.3	4.5	6.8	5.4	3.7	5.2	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
	500000 - 750000	20.1	<b>37.9</b>	<b>40.4</b>	25.4	<b>46.0</b>	<b>47.1</b>	<b>45.6</b>	17.4	<b>38.6</b>	<b>35.4</b>	<b>35.5</b>	<b>52.7</b>	<b>46.5</b>	<b>48.7</b>	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.8	0.0	4.7	2.4	0.9	2.9	1.2	0.3	1.0	0.1	0.4	0.9	2.9	1.2	0.3	1.0
	750000 - 1000000	<b>30.2</b>	25.5	29.5	<b>26.5</b>	21.4	24.0	20.5	<b>22.5</b>	24.8	22.7	24.1	21.7	24.2	23.9	0.3	0.2	0.3	0.2	0.2	0.6	0.1	8.7	4.0	2.0	6.1	3.6	2.2	2.9	8.7	4.0	2.0	6.1	3.6	2.2	2.9
	1000000 - 1250000	5.7	1.9	1.9	2.9	2.9	3.4	4.0	19.5	6.0	11.3	12.7	4.5	9.4	6.3	4.5	1.8	1.0	1.7	0.2	0.1	1.2	9.6	9.7	5.7	8.2	10.6	6.6	9.8	9.6	9.7	5.7	8.2	10.6	6.6	9.8
	1250000 - 1500000	17.1	13.7	13.1	17.9	8.0	8.2	7.1	7.6	7.1	10.0	7.3	5.3	8.6	7.5	<b>25.1</b>	12.3	8.0	16.9	8.6	11.0	10.6	17.8	25.9	19.1	20.9	19.6	16.3	19.1	17.8	25.9	19.1	20.9	19.6	16.3	19.1
	1500000 - 1750000	13.5	5.4	2.9	12.7	2.6	0.8	1.8	8.2	8.4	10.1	6.9	7.1	7.0	5.6	22.7	24.9	20.6	25.3	15.3	26.5	22.9	<b>24.9</b>	<b>26.4</b>	<b>30.2</b>	26.0	<b>28.3</b>	28.5	<b>29.8</b>	<b>24.9</b>	<b>26.4</b>	<b>30.2</b>	26.0	<b>28.3</b>	28.5	<b>29.8</b>
1750000 - 2000000	8.1	1.0	0.1	6.4	0.0	0.0	0.1	16.7	8.4	5.7	6.5	3.3	0.6	2.5	22.8	26.4	21.3	25.4	28.8	15.3	28.8	22.6	25.6	28.0	<b>26.7</b>	23.0	<b>28.7</b>	26.5	22.6	25.6	28.0	<b>26.7</b>	23.0	<b>28.7</b>	26.5	
2000000 - 2250000	0.7	0.1	0.2	0.3	0.0	0.0	0.2	5.3	0.4	0.1	0.3	0.0	0.1	0.2	22.1	<b>31.5</b>	<b>42.8</b>	<b>27.6</b>	<b>44.8</b>	<b>42.1</b>	<b>34.0</b>	7.6	3.7	11.9	6.7	11.2	15.4	8.5	7.6	3.7	11.9	6.7	11.2	15.4	8.5	
2250000 - 2350000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	2.9	5.5	2.8	2.0	3.6	2.3	3.8	2.2	2.2	2.5	2.5	2.1	2.5	3.8	2.2	2.2	2.5	2.5	2.1	2.5	
Latitud (m desde el paralelo de referencia)	<b>Selvas húmedas</b>						<b>Selvas secas</b>						<b>Pastizal natural</b>						<b>Veg halófila</b>																	
	314 000 - 500000	5.7	5.2	4.4	3.3	<b>48.6</b>	3.0	1.2	4.3	3.6	3.7	4.4	3.2	3.6	3.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
	500000 - 750000	<b>40.2</b>	<b>66.8</b>	<b>55.7</b>	<b>50.4</b>	24.3	3.8	25.7	<b>27.3</b>	24.5	26.3	28.3	25.9	28.5	25.4	0.0	0.8	0.7	0.3	0.9	0.2	0.6	0.5	0.9	5.7	1.7	7.9	9.9	7.2	0.5	0.9	5.7	1.7	7.9	9.9	7.2
	750000 - 1000000	35.9	20.9	21.5	27.3	26.9	<b>80.4</b>	<b>72.6</b>	20.7	<b>32.5</b>	<b>30.9</b>	<b>31.6</b>	<b>34.0</b>	<b>32.5</b>	<b>31.2</b>	5.1	14.2	9.9	10.3	17.1	14.1	14.8	0.3	3.0	4.8	1.8	11.4	10.1	10.6	0.3	3.0	4.8	1.8	11.4	10.1	10.6
	1000000 - 1250000	18.1	7.2	18.4	19.0	0.1	12.8	0.5	18.9	22.4	19.2	19.9	22.6	20.6	20.6	20.6	<b>23.7</b>	21.5	<b>25.1</b>	14.4	<b>23.0</b>	17.6	3.8	22.6	7.5	16.4	20.4	15.2	23.6	3.8	22.6	7.5	16.4	20.4	15.2	23.6
	1250000 - 1500000	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.4	8.8	10.5	9.3	8.7	10.6	11.3	16.2	19.3	16.3	15.5	18.9	17.1	16.5	10.5	<b>26.1</b>	<b>23.0</b>	22.0	<b>35.3</b>	<b>25.0</b>	<b>31.3</b>	10.5	<b>26.1</b>	<b>23.0</b>	22.0	<b>35.3</b>	<b>25.0</b>	<b>31.3</b>
	1500000 - 1750000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.4	6.5	6.5	5.5	4.0	2.9	6.8	18.4	13.7	15.6	16.6	15.0	14.4	17.9	<b>32.6</b>	20.6	18.0	<b>22.2</b>	6.2	15.7	8.0	<b>32.6</b>	20.6	18.0	<b>22.2</b>	6.2	15.7	8.0
1750000 - 2000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.0	1.5	2.7	1.0	0.8	0.7	1.0	<b>23.4</b>	21.0	<b>22.3</b>	21.5	<b>27.1</b>	22.9	<b>25.8</b>	24.8	18.1	16.7	18.5	12.7	12.4	10.2	24.8	18.1	16.7	18.5	12.7	12.4	10.2	
2000000 - 2250000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.6	0.4	0.1	16.3	5.7	12.9	10.2	5.5	6.6	4.5	24.6	7.5	19.0	13.3	2.7	7.5	6.3	24.6	7.5	19.0	13.3	2.7	7.5	6.3	
2250000 - 2350000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.1	0.0	1.5	0.9	0.6	1.2	1.7	2.2	2.9	0.8	3.4	3.2	0.1	1.3	1.2	2.9	0.8	3.4	3.2	0.1	1.3	1.2	
Latitud (m desde el paralelo de referencia)	<b>Veg hidrófila</b>																																			
	314 000 - 500000	6.4	2.8	4.9	2.9	0.6	1.7	0.8																												
	500000 - 750000	<b>36.0</b>	<b>45.7</b>	37.9	<b>42.0</b>	<b>35.2</b>	16.9	30.1																												
	750000 - 1000000	20.5	33.4	<b>40.0</b>	37.3	27.7	<b>71.4</b>	<b>59.7</b>																												
	1000000 - 1250000	13.2	3.5	12.0	10.9	0.3	0.4	1.0																												
	1250000 - 1500000	11.9	1.8	1.8	2.4	6.8	4.2	2.4																												
	1500000 - 1750000	6.5	10.6	1.2	2.5	28.0	1.3	2.4																												
1750000 - 2000000	1.2	0.9	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0																													
2000000 - 2250000	1.6	0.7	1.5	0.9	0.1	3.3	2.8																													
2250000 - 2350000	2.8	0.6	0.8	1.0	0.2	0.8	0.9																													

4.3.3 Impactos sobre la extensión de las zonas bioclimáticas

El Cuadro 1 muestra también la extensión que ocuparía cada una de las zonas bioclimáticas (considerando solamente a la zona bioclimática más probable en cada pixel) tanto en el Escenario base, como bajo los seis escenarios de cambio climático considerados, así como el cambio porcentual,  $\Delta(\%)$ , que experimenta cada zona bioclimática con respecto a su extensión en el Escenario Base. Las cifras marcadas en color rojo en el Cuadro 1 denotan a aquellos casos en que todos los seis escenarios coinciden en proyectar una reducción con respecto al escenario base; las cifras marcadas en verde identifican a aquellos casos en que los seis escenarios proyectan una expansión. Como puede apreciarse, todos los seis escenarios conducirían a una gran disminución en la superficie del país con condiciones adecuadas para selvas húmedas, bosques de coníferas y vegetación hidrófila (sobre todo los manglares), así como a una notable expansión de la zona bioclimática correspondiente a las selvas secas, sobre todo en la costa del Golfo de México y la Península de Yucatán (ver Figs. 2 y 3), y los matorrales semiáridos.

Algunos de estos cambios son mucho más extremos en los escenarios de alta concentración de gases de efecto invernadero (RCP = 8.5W/m<sup>2</sup>), en los cuales la extensión de las zonas de selvas húmedas se reduce

en más del 99% y la de vegetación hidrófila en más del 80%; en estos escenarios la extensión de las zonas de selva seca y matorral semiárido se incrementa en más del 100%.

Quizá más importante que los cambios cuantitativos en la extensión de las zonas bioclimáticas bajo los diferentes escenarios de cambio climático es determinar y visualizar cómo es el proceso de transición que conduce a esos cambios en la extensión. Es decir, identificar aquellas áreas de cada zona bioclimática que permanecen sin cambio, así como aquellas otras que se vuelven más adecuadas para otro tipo de ecosistemas. Estos cambios se muestran en las matrices de transición correspondientes a cada uno de los escenarios de cambio climático considerados (Cuadros 4 – 9).

**Cuadro 4.** Matriz de transición de las zonas bioclimáticas del Escenario Base a las condiciones del escenario GFDL-CM3 de RCP = 4.5 W/m<sup>2</sup>. Los renglones representan a las zonas bioclimáticas en el Escenario Base y las columnas a las mismas bajo el escenario de cambio climático. Las cifras en el cuerpo de la tabla dan las superficies (en ha) de cada zona bioclimática en el Escenario Base que permanecen como tales (en negritas) o que cambian bajo el escenario modificado para el horizonte 2075-2099. Las cifras en rojo identifican a los principales cambios de cada zona bioclimática.

		GFDL-RCP4.5 (2075-2099)								Extensión total (ha)	
		Bosque de coníferas	Bosque de latifoliadas	Matorral árido	Matorral semiárido	Pastizal natural	Selvas húmedas	Selvas secas	Veghalófila		Veg hidrófila
Escenario BASE	Bosque de coníferas	<b>7,454,725</b>	<b>7,156,113</b>	537,619	243,381	<b>5,278,144</b>	19	312,544	14,213	1,034,675	<b>22,031,431</b>
	Bosque de latifoliadas	35,788	<b>5,460,800</b>	358,756	589,388	<b>3,669,688</b>	0	<b>7,486,519</b>	21,050	8,069	<b>17,630,056</b>
	Matorral árido	0	0	<b>25,899,388</b>	<b>4,718,119</b>	59,856	0	178,494	<b>2,024,306</b>	56	<b>32,880,219</b>
	Matorral semiárido	0	8,969	<b>2,665,800</b>	<b>19,708,000</b>	<b>1,183,613</b>	0	767,588	456,463	120,938	<b>24,911,369</b>
	Pastizal natural	0	44	<b>8,263,544</b>	<b>1,771,925</b>	<b>7,777,969</b>	0	<b>1,701,356</b>	1,298,075	1,481	<b>20,814,394</b>
	Selvas húmedas	952,094	4,032,569	0	0	0	<b>5,395,200</b>	<b>14,433,806</b>	30,444	47,594	<b>24,891,706</b>
	Selvas secas	1,744	1,350	4,869	<b>1,917,719</b>	6	0	<b>22,901,231</b>	675	444	<b>24,828,038</b>
	Veghalófila	0	319	<b>7,754,363</b>	<b>1,525,144</b>	3,238	0	108,013	<b>5,261,331</b>	10,781	<b>14,663,188</b>
	Veg hidrófila	9,888	89,775	54,906	963,281	25	158,688	<b>4,229,269</b>	<b>1,081,881</b>	<b>2,553,319</b>	<b>9,141,031</b>
	Extensión total (ha)	<b>8,454,238</b>	<b>16,749,938</b>	<b>45,539,244</b>	<b>31,436,956</b>	<b>17,972,538</b>	<b>5,553,906</b>	<b>52,118,819</b>	<b>10,188,438</b>	<b>3,777,356</b>	<b>191,791,431</b>

**Cuadro 5.** Matriz de transición de las zonas bioclimáticas del Escenario Base a las condiciones del escenario HADGEM2-ES de RCP = 4.5 W/m<sup>2</sup>. Los renglones representan a las zonas bioclimáticas en el Escenario Base y las columnas a las mismas bajo el escenario de cambio climático. Las cifras en el cuerpo de la tabla dan las superficies (en ha) de cada zona bioclimática en el Escenario Base que permanecen como tales (en negritas) o que cambian bajo el escenario modificado para el horizonte 2075-2099. Las cifras en rojo identifican a los principales cambios de cada zona bioclimática.

		HADGEM2-ES RCP4.5 (2075-2099)								Extensión total (ha)	
		Bosque de coníferas	Bosque de latifoliadas	Matorral árido	Matorral semiárido	Pastizal natural	Selvas húmedas	Selvas secas	Veghalófila		Veg hidrófila
Escenario BASE	Bosque de coníferas	<b>10,376,875</b>	<b>5,834,869</b>	8,306	189,463	<b>5,108,175</b>	12,031	98,769	131	402,813	<b>22,031,431</b>
	Bosque de latifoliadas	264,844	<b>6,977,719</b>	14,756	309,125	<b>4,717,325</b>	1,594	<b>5,329,594</b>	4,706	10,394	<b>17,630,056</b>
	Matorral árido	0	906	<b>9,353,063</b>	<b>18,335,256</b>	2,340,419	0	728,794	2,121,681	100	<b>32,880,219</b>
	Matorral semiárido	1,063	103,981	<b>857,169</b>	<b>20,269,513</b>	<b>2,243,325</b>	0	1,130,344	232,644	73,331	<b>24,911,369</b>
	Pastizal natural	0	75	41,094	<b>2,531,731</b>	<b>17,945,669</b>	0	<b>286,900</b>	8,850	75	<b>20,814,394</b>
	Selvas húmedas	1,383,538	4,263,731	1,394	0	0	<b>3,751,794</b>	<b>15,295,588</b>	166,350	29,313	<b>24,891,706</b>
	Selvas secas	5,600	2,563	1,688	<b>1,087,238</b>	41,175	0	<b>23,516,881</b>	171,100	1,794	<b>24,828,038</b>
	Veghalófila	0	6	<b>1,778,894</b>	<b>5,948,350</b>	987,944	0	221,256	<b>5,714,975</b>	11,763	<b>14,663,188</b>
	Veg hidrófila	469	81,563	319	650,106	1,019	76,294	<b>3,839,244</b>	<b>2,041,394</b>	<b>2,450,625</b>	<b>9,141,031</b>
Extensión total (ha)		<b>12,032,388</b>	<b>17,265,413</b>	<b>12,056,681</b>	<b>49,320,781</b>	<b>33,385,050</b>	<b>3,841,713</b>	<b>50,447,369</b>	<b>10,461,831</b>	<b>2,980,206</b>	<b>191,791,431</b>

**Cuadro 6.** Matriz de transición de las zonas bioclimáticas del Escenario Base a las condiciones del escenario MPI-ESM-LR de RCP = 4.5 W/m<sup>2</sup>. Los renglones representan a las zonas bioclimáticas en el Escenario Base y las columnas a las mismas bajo el escenario de cambio climático. Las cifras en el cuerpo de la tabla dan las superficies (en ha) de cada zona bioclimática en el Escenario Base que permanecen como tales (en negritas) o que cambian bajo el escenario modificado para el horizonte 2075-2099. Las cifras en rojo identifican a los principales cambios de cada zona bioclimática.

		MPI-ESM-LR RCP=4.5 (2075-2099)								Extensión total (ha)	
		Bosque de coníferas	Bosque de latifoliadas	Matorral árido	Matorral semiárido	Pastizal natural	Selvas húmedas	Selvas secas	Veghalófila		Veg hidrófila
Escenario BASE	Bosque de coníferas	<b>11,730,288</b>	<b>5,362,325</b>	162,463	625,944	<b>3,586,494</b>	200	246,213	169	317,338	<b>22,031,431</b>
	Bosque de latifoliadas	44,763	<b>8,450,438</b>	75,188	628,700	<b>4,149,369</b>	25	<b>4,275,763</b>	438	5,375	<b>17,630,056</b>
	Matorral árido	0	0	<b>28,792,113</b>	<b>2,502,063</b>	277,488	0	225,038	1,081,381	31	<b>32,878,113</b>
	Matorral semiárido	0	1,019	760,519	<b>22,139,450</b>	<b>1,037,150</b>	1,350	744,194	141,069	86,050	<b>24,910,800</b>
	Pastizal natural	0	31	<b>5,046,469</b>	<b>1,554,113</b>	<b>13,827,119</b>	0	303,900	82,519	244	<b>20,814,394</b>
	Selvas húmedas	981,213	<b>3,779,663</b>	119	0	0	<b>7,132,644</b>	<b>12,668,200</b>	107,788	219,613	<b>24,889,238</b>
	Selvas secas	625	2,106	44	<b>1,727,669</b>	9,838	0	<b>23,075,569</b>	9,469	300	<b>24,825,619</b>
	Veghalófila	0	0	<b>7,496,300</b>	905,300	72,231	0	104,619	<b>6,075,775</b>	7,744	<b>14,661,969</b>
	Veg hidrófila	700	89,256	39,938	831,625	156	93,238	<b>2,980,263</b>	<b>1,057,325</b>	<b>4,008,281</b>	<b>9,100,781</b>
Extensión total (ha)		<b>12,757,588</b>	<b>17,684,838</b>	<b>42,373,150</b>	<b>30,914,863</b>	<b>22,959,844</b>	<b>7,227,456</b>	<b>44,623,756</b>	<b>8,555,931</b>	<b>4,644,975</b>	<b>191,742,400</b>

**Cuadro 7.** Matriz de transición de las zonas bioclimáticas del Escenario Base a las condiciones del escenario GFDL-CM3 de RCP = 8.5 W/m<sup>2</sup>. Los renglones representan a las zonas bioclimáticas en el Escenario Base y las columnas a las mismas bajo el escenario de cambio climático. Las cifras en el cuerpo de la tabla dan las superficies (en ha) de cada zona bioclimática en el Escenario Base que permanecen como tales (en negritas) o que cambian bajo el escenario modificado para el horizonte 2075-2099. Las cifras en rojo identifican a los principales cambios de cada zona bioclimática.

		GFDL RCP = 8.5 (2075-2099)									Extensión total (ha)
		Bosque de coníferas	Bosque de latifoliadas	Matorral árido	Matorral semiárido	Pastizal natural	Selvas húmedas	Selvas secas	Veghalófila	Veg hidrófila	
Escenario BASE	Bosque de coníferas	<b>7,093,919</b>	<b>5,386,944</b>	323,463	493,556	<b>7,270,838</b>	0	456,319	2,575	1,003,819	<b>22,031,431</b>
	Bosque de latifoliadas	306,413	<b>4,056,725</b>	161,738	2,211,931	<b>3,412,106</b>	0	<b>7,475,969</b>	306	4,869	<b>17,630,056</b>
	Matorral árido	0	0	<b>7,415,538</b>	<b>22,440,131</b>	18,456	0	<b>1,341,481</b>	<b>1,663,119</b>	1,494	<b>32,880,219</b>
	Matorral semiárido	438	10,000	920,738	<b>22,015,363</b>	<b>1,141,956</b>	0	621,675	171,638	29,563	<b>24,911,369</b>
	Pastizal natural	0	200	<b>4,459,956</b>	<b>10,427,169</b>	<b>5,482,688</b>	0	326,406	113,231	4,744	<b>20,814,394</b>
	Selvas húmedas	1,977,775	<b>7,446,419</b>	0	0	0	<b>30,575</b>	<b>15,388,069</b>	46,831	2,038	<b>24,891,706</b>
	Selvas secas	103,406	26,506	519	<b>4,599,050</b>	175	0	<b>20,093,206</b>	5,150	25	<b>24,828,038</b>
	Veghalófila	13	319	<b>4,514,188</b>	<b>7,710,044</b>	86,931	0	760,025	<b>1,581,463</b>	10,206	<b>14,663,188</b>
	Veg hidrófila	77,875	321,863	144	<b>1,691,913</b>	3,800	26,069	<b>5,062,869</b>	<b>1,348,000</b>	<b>608,500</b>	<b>9,141,031</b>
Extensión total (ha)		<b>9,559,838</b>	<b>17,248,975</b>	<b>17,796,281</b>	<b>71,589,156</b>	<b>17,416,950</b>	<b>56,644</b>	<b>51,526,019</b>	<b>4,932,313</b>	<b>1,665,256</b>	<b>191,791,431</b>

**Cuadro 8.** Matriz de transición de las zonas bioclimáticas del Escenario Base a las condiciones del escenario HADGEM2-ES de RCP = 8.5 W/m<sup>2</sup>. Los renglones representan a las zonas bioclimáticas en el Escenario Base y las columnas a las mismas bajo el escenario de cambio climático. Las cifras en el cuerpo de la tabla dan las superficies (en ha) de cada zona bioclimática en el Escenario Base que permanecen como tales (en negritas) o que cambian bajo el escenario modificado para el horizonte 2075-2099. Las cifras en rojo identifican a los principales cambios de cada zona bioclimática.

		GFDL-RCP4.5 (2075-2099)									Extensión total (ha)
		Bosque de coníferas	Bosque de latifoliadas	Matorral árido	Matorral semiárido	Pastizal natural	Selvas húmedas	Selvas secas	Veghalófila	Veg hidrófila	
Escenario BASE	Bosque de coníferas	<b>7,870,006</b>	<b>4,787,244</b>	106,000	173,319	<b>7,746,600</b>	44	637,681	6,394	704,144	<b>22,031,431</b>
	Bosque de latifoliadas	929,444	<b>3,520,500</b>	58,300	2,194,350	<b>3,893,744</b>	113	<b>6,991,313</b>	35,025	7,269	<b>17,630,056</b>
	Matorral árido	15,494	269	<b>6,559,569</b>	<b>20,859,031</b>	257,688	0	1,118,369	<b>4,069,750</b>	50	<b>32,880,219</b>
	Matorral semiárido	15,313	56,169	1,216,988	<b>19,418,631</b>	1,450,169	0	<b>2,016,481</b>	646,594	91,025	<b>24,911,369</b>
	Pastizal natural	275	888	620,131	<b>12,815,813</b>	<b>6,799,144</b>	0	534,294	43,744	106	<b>20,814,394</b>
	Selvas húmedas	2,214,181	<b>5,914,644</b>	438	0	0	<b>75,769</b>	<b>16,074,400</b>	612,150	125	<b>24,891,706</b>
	Selvas secas	47,813	0	0	<b>3,513,738</b>	9,575	0	<b>20,978,631</b>	277,994	288	<b>24,828,038</b>
	Veghalófila	0	69	<b>1,383,169</b>	<b>9,133,106</b>	68,569	0	217,069	<b>3,851,569</b>	9,638	<b>14,663,188</b>
	Veg hidrófila	39,950	251,731	0	660,000	2,494	5,569	<b>4,168,394</b>	<b>3,783,406</b>	<b>229,488</b>	<b>9,141,031</b>
Extensión total (ha)		<b>11,132,475</b>	<b>14,531,513</b>	<b>9,944,594</b>	<b>68,767,988</b>	<b>20,227,981</b>	<b>81,494</b>	<b>52,736,631</b>	<b>13,326,625</b>	<b>1,042,131</b>	<b>191,791,431</b>

**Cuadro 9.** Matriz de transición de las zonas bioclimáticas del Escenario Base a las condiciones del escenario MPI-ESM-LR de RCP = 8.5 W/m<sup>2</sup>. Los renglones representan a las zonas bioclimáticas en el Escenario Base y las columnas a las mismas bajo el escenario de cambio climático. Las cifras en el cuerpo de la tabla dan las superficies (en ha) de cada zona bioclimática en el Escenario Base que permanecen como tales (en negritas) o que cambian bajo el escenario modificado para el horizonte 2075-2099. Las cifras en rojo identifican a los principales cambios de cada zona bioclimática.

		GFDL-RCP4.5 (2075-2099)									Extensión total (ha)
		Bosque de coníferas	Bosque de latifoliadas	Matorral árido	Matorral semiárido	Pastizal natural	Selvas húmedas	Selvas secas	Veghalófila	Veg hidrófila	
Escenario BASE	Bosque de coníferas	4,998,963	6,963,994	434,000	163,388	7,349,950	0	1,503,538	1,363	616,238	22,031,431
	Bosque de latifoliadas	369,806	3,880,106	599,050	1,052,725	3,110,613	6	8,611,475	631	5,644	17,630,056
	Matorral árido	0	0	18,934,306	7,810,425	4,794	0	2,397,288	3,733,338	69	32,880,219
	Matorral semiárido	0	163	1,358,063	20,004,144	1,134,669	0	1,920,163	407,006	87,163	24,911,369
	Pastizal natural	0	6	7,548,875	7,269,619	4,284,069	0	1,182,400	529,131	294	20,814,394
	Selvas húmedas	1,687,900	7,063,625	1,238	0	0	118,100	15,524,744	493,963	2,138	24,891,706
	Selvas secas	18,275	69	0	2,352,063	0	0	22,390,300	67,313	19	24,828,038
	Veghalófila	0	281	6,925,956	2,986,594	40,150	0	966,444	3,733,338	10,425	14,663,188
	Veg hidrófila	83,988	289,069	400	836,300	175	2,088	4,273,094	3,060,956	594,963	9,141,031
Extensión total (ha)		7,158,931	18,197,313	35,801,888	42,475,256	15,924,419	120,194	58,769,444	12,027,038	1,316,950	191,791,431

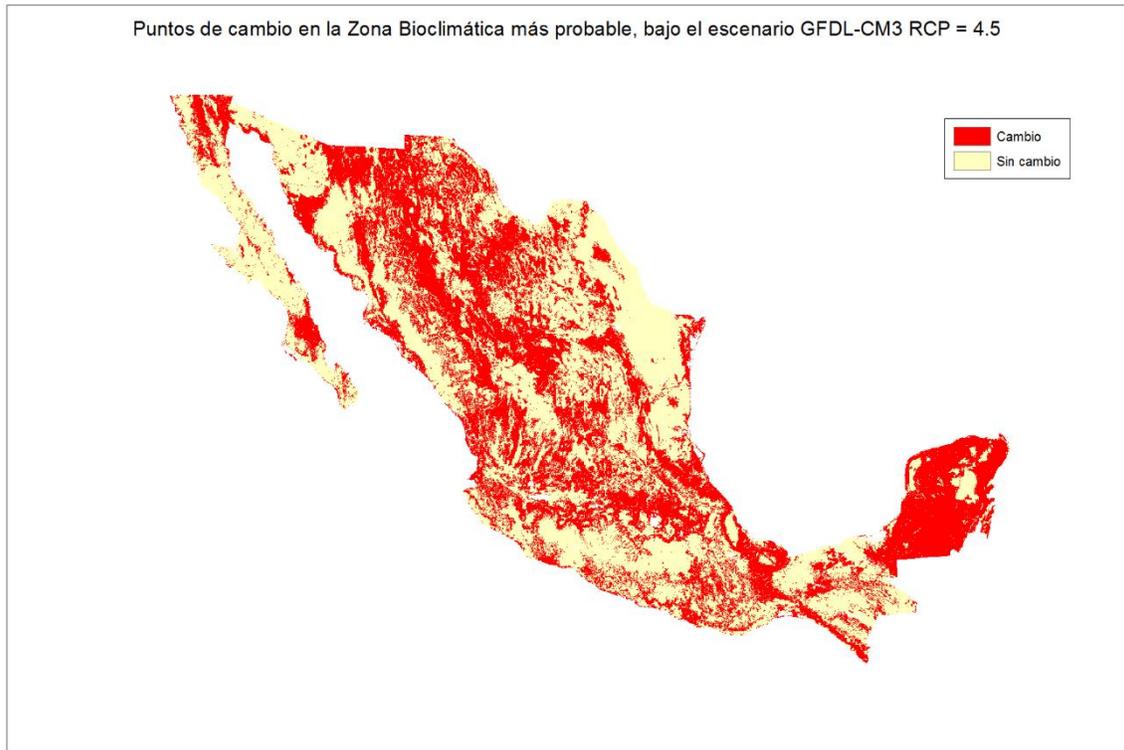
Como puede apreciarse, todos los escenarios proyectan que una fracción muy importante del bosque de coníferas se torna en zonas más adecuadas para el establecimiento de bosques de latifoliadas. Igualmente todos los escenarios conducen a que una fracción substancial de las zonas originalmente cubiertas por bosques de latifoliadas se vuelve más apta para el establecimiento de pastizales o de selvas secas. Buena parte de las zonas originalmente ocupadas por matorrales áridos se convertirían en zonas de matorral semiárido o vegetación halófila. En todos los escenarios más de la mitad de la superficie originalmente ocupada por selvas húmedas se transforma en zonas aptas para selvas secas o bosques de latifoliadas. Por el contrario, en todos los casos se proyecta que sólo una fracción relativamente menor de la zona de selvas secas se convierte en zona de matorrales semiáridos. Mucho del área originalmente apta para vegetación halófila se vería reemplazada por matorrales áridos o semiáridos. Finalmente, una gran proporción de las zonas de vegetación hidrófila se verían transformadas en zonas adecuadas para el establecimiento de vegetación halófila o selvas secas.

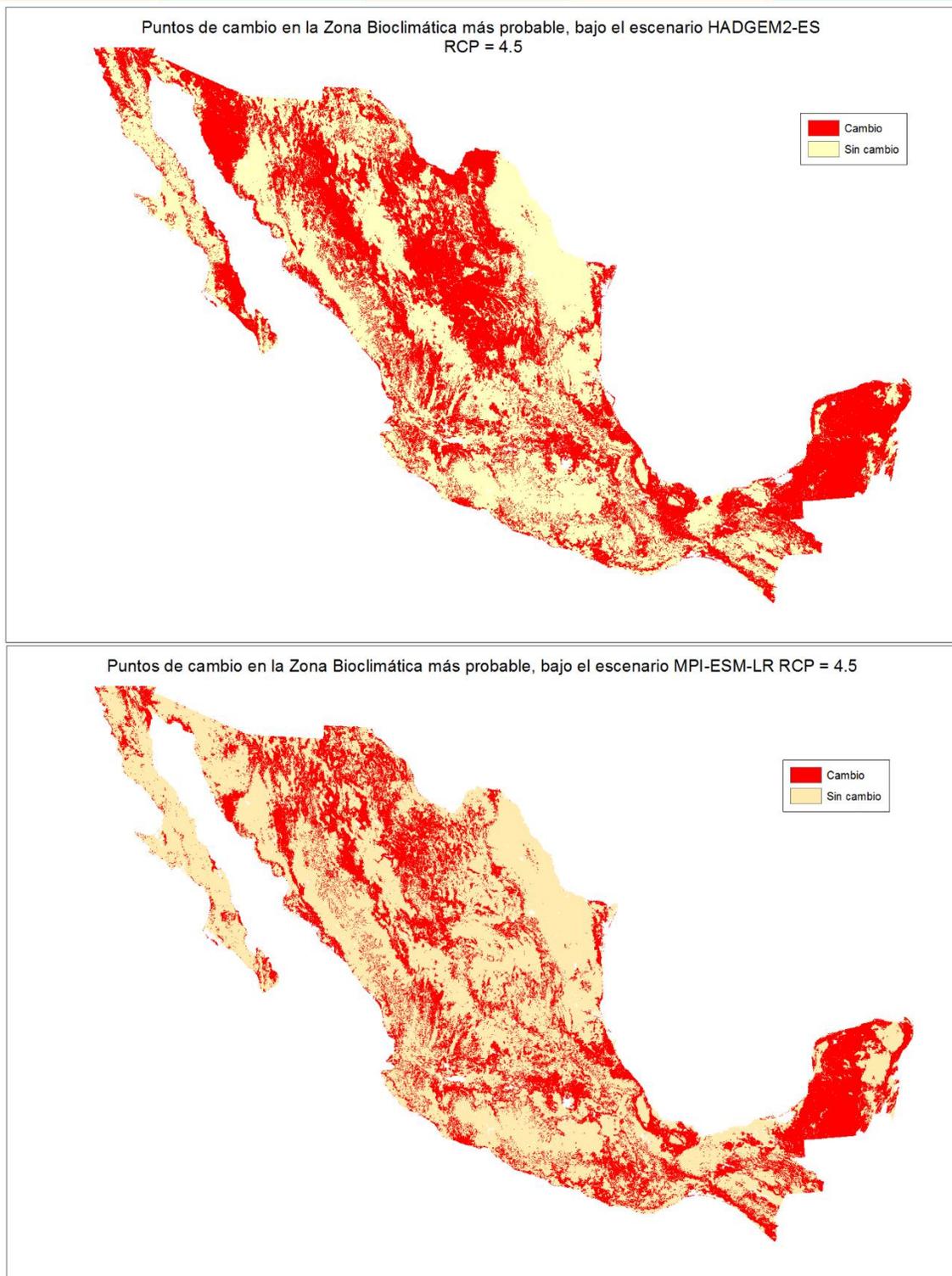
En sentido opuesto, puede notarse que la gran expansión de las selvas secas que proyectan todos los escenarios de cambio climático ocurriría a expensas de zonas actualmente aptas para el establecimiento de selvas húmedas o bosques de latifoliadas. La expansión de los matorrales semiáridos ocurriría a expensas de matorrales áridos, pastizales, selvas secas y vegetación halófila.

#### 4.3.4 Distribución espacial de los cambios en las zonas bioclimáticas

Las matrices de transición (Cuadros 4 a 9) muestran que diferentes escenarios conducen a procesos de transición más o menos diferentes, lo que resulta en que la extensión proyectada para cada zona bioclimática varía sensiblemente entre escenarios. Esas diferencias afectan no sólo a la extensión de cada zona bioclimática que se mantiene como tal o que se convierte a otra en la que es más probable que ocurra otro tipo de ecosistema diferente (bajo un escenario de cambio climático dado), sino que también afectan a la ubicación espacial de las zonas de cambio o de permanencia. Es decir, los diferentes escenarios de cambio climático conducen a resultados que son más o menos diferentes tanto en extensión como en ubicación geográfica.

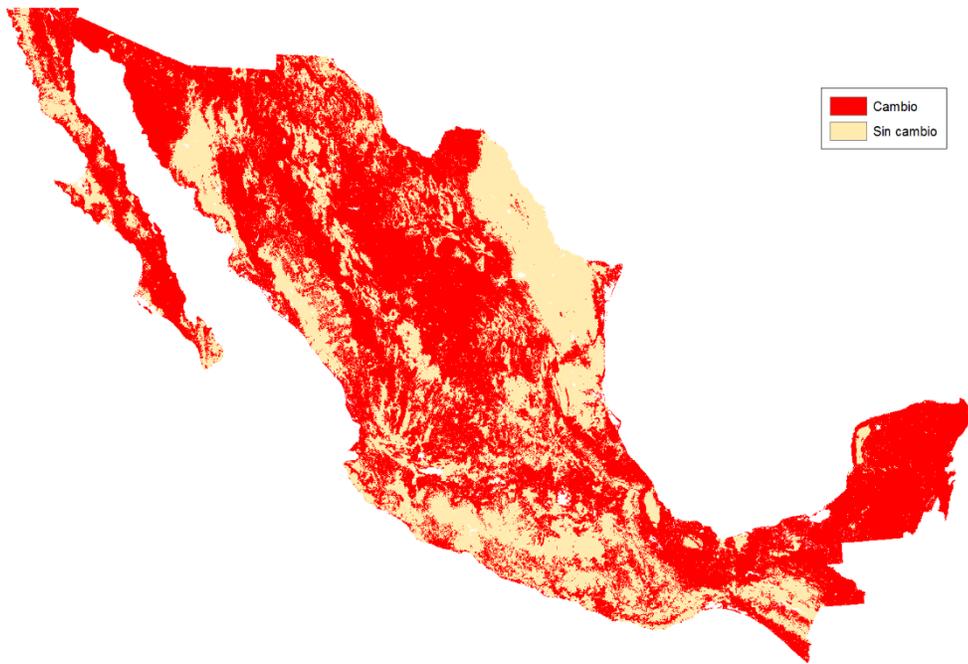
Las Figs. 4 y 5 muestran, de manera espacialmente explícita y para cada uno de los escenarios de cambio climático considerados, los puntos o zonas del país en que las condiciones climáticas cambian (con respecto al escenario base) en magnitud suficiente para que cambie el tipo de zona bioclimática más probable, de acuerdo con la proyección del modelo logit multinomial.





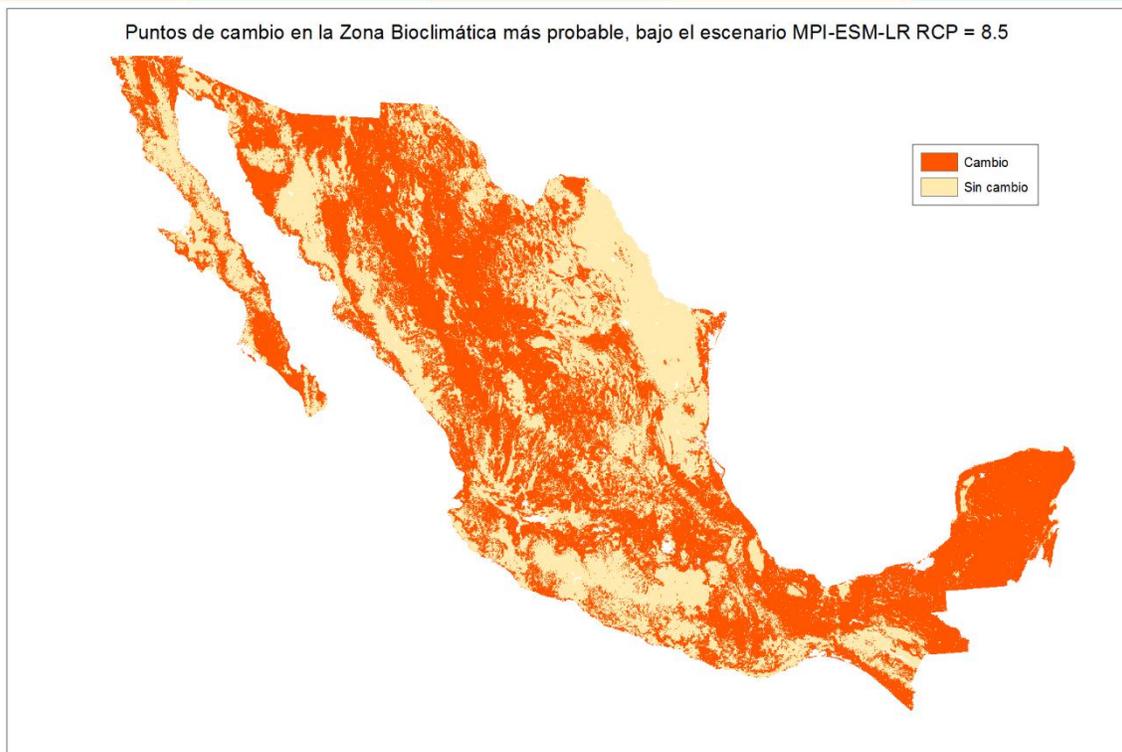
**Figura 4.** Ubicación de los puntos (en rojo) en que los escenarios de cambio climático de trayectoria de concentración moderada (GFDL-CM3, HADGEM2-ES y MPI-ESM-LR forzados por una RCP de +4.5 W/m<sup>2</sup>) producirían, hacia el período 2075-2099, cambios en la zona bioclimática más probable. En color claro se indican aquellos puntos en que los cambios proyectados por los escenarios no cambian a la zona bioclimática más probable (con respecto al escenario base).

Puntos de cambio en la Zona Bioclimática más probable, bajo el escenario GFDL-CM3 RCP = 8.5



Puntos de cambio en la Zona Bioclimática más probable, bajo el escenario HADGEM2-ES RCP = 8.5





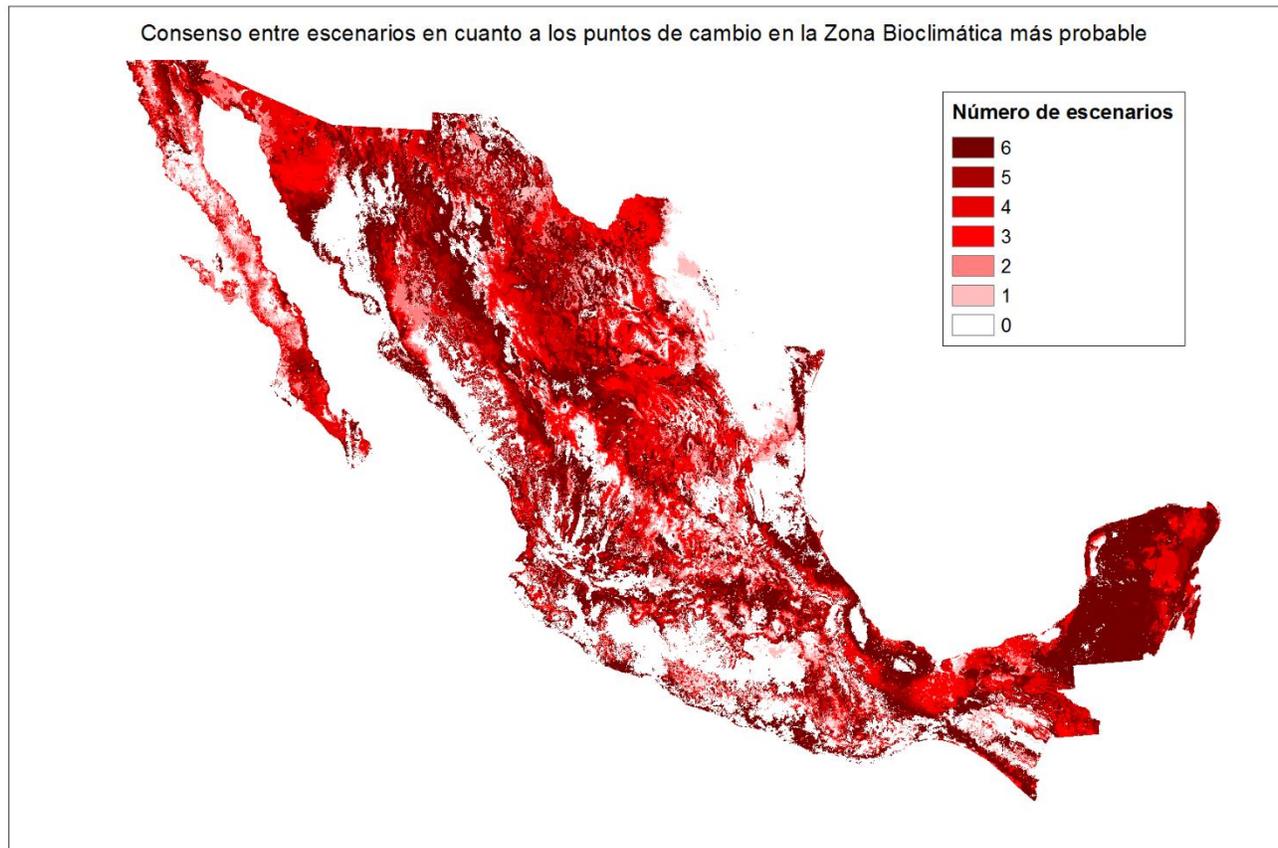
**Figura 5.** Ubicación de los puntos (en rojo) en que los escenarios de cambio climático de trayectoria de concentración moderada (GFDL-CM3, HADGEM2-ES y MPI-ESM-LR forzados por una RCP de  $+8.5 \text{ W/m}^2$ ) producirían, hacia el período 2075-2099, cambios en la zona bioclimática más probable. En color claro se indican aquellos puntos en que los cambios proyectados por los escenarios no cambian a la zona bioclimática más probable (con respecto al escenario base).

Como puede apreciarse, en los escenarios de emisiones moderadas (RCP = 4.5) la extensión de las zonas en que las condiciones climáticas cambian en magnitud suficiente para inducir un cambio en la zona bioclimática más probable es sensiblemente menor que la extensión de las zonas de cambio proyectadas por los escenarios de altas emisiones (RCP = 8.5). En general para los seis escenarios considerados, las zonas de cambio se ubican sobre todo en la Península de Yucatán, la planicie costera del Golfo de México y diversas áreas del Altiplano Central. Sin embargo, también se presentan zonas de cambio a lo largo del territorio en todas las franjas de contacto entre zonas bioclimáticas, por ejemplo, entre bosques templados y pastizales, entre pastizales y matorrales áridos o semiáridos, etc.

El hecho de que los diferentes escenarios de cambio climático conduzcan a resultados que son más o menos diferentes tanto en extensión como en ubicación geográfica resulta en un cierto grado de incertidumbre en cuanto al posible efecto del cambio climático en un lugar o territorio particular. Una estrategia que se ha utilizado para tratar de evaluar el grado de certidumbre que puede asociarse a las proyecciones de los escenarios de cambio climático es determinando el nivel de concordancia (consenso) entre escenarios. Cuando un número de diferentes escenarios proyectan un cambio particular, éste tendrá mayor certidumbre que aquellos cambios que sólo aparecen en uno o unos pocos escenarios.

La Fig.6 muestra el mapa de consenso entre escenarios para las zonas de cambio mostradas en las Figuras 4 y 5. Un punto dado del mapa de consenso puede tener valores que van desde cero (cuando ninguno de los escenarios proyecta un cambio en la zona bioclimática más probable), hasta seis (cuando todos los

escenarios considerados proyectan algún cambio en la zona bioclimática más probable), pasando por los valores intermedios, en función del número de escenarios que proyectan algún cambio.



**Figura 6.** Mapa de consenso entre los seis escenarios de cambio climático considerados. Los colores de la escala denotan el número de escenarios que concuerdan en predecir algún cambio en el tipo de ecosistema más probable en ese punto, con respecto al ecosistema presente en el escenario base. Los valores posibles van de cero (cuando ninguno de los escenarios predice un cambio en el tipo de ecosistema más probable) hasta seis (cuando todos los escenarios predicen algún cambio en el tipo de ecosistema más probable), pasando por los valores intermedios en función del número de escenarios que proyectan algún cambio.

Como puede observarse, existen algunas zonas particulares del país para las que ninguno de los escenarios predice cambio alguno (con respecto al escenario base) en el tipo de ecosistema que es más probable que ocurra. Este es el caso, sobre todo, de la Cuenca del Río Balsas en la que predominan las selvas secas, el Noreste del país en donde predominan matorrales semiáridos y selvas secas, la zona de selvas secas en el Noroeste del país en las partes medias y bajas de la Sierra Madre Occidental, así como la zona de bosques templados de la Meseta Central de Chiapas.

En el otro extremo están aquellas partes del país para las que todos o la mayoría de los escenarios de cambio climático proyectan algún cambio (con respecto al escenario base) en el tipo de ecosistema que es más probable. Estas zonas son las que ameritan particular atención desde el punto de vista de conservación de la biodiversidad, preservación y manejo de los servicios ecosistémicos, etc. ya que son las que presentan una mayor vulnerabilidad a los impactos del cambio climático. Entre las zonas que presentan esta condición se encuentran, sobre todo, la mitad occidental de la Península de Yucatán, las vertientes interiores de la Sierra Madre Occidental y del Eje Neovolcánico, así como diversas partes de la planicie costera del Golfo de México.

## **4.5 Conclusiones**

El modelo construido para estimar la probabilidad de ocurrencia de las diferentes formaciones vegetales en función de las condiciones climáticas y ambientales, permite evaluar el posible impacto del cambio climático sobre la distribución de los principales ecosistemas del país.

Con este tipo de análisis es posible identificar a aquellas áreas del país en que los escenarios de cambio climático disponibles proyectan cambios de magnitud suficiente como para que experimenten un cambio en el tipo de ecosistema más probable. Aún cuando los diferentes escenarios de cambio climático no son del todo consistentes en sus proyecciones de ubicación y extensión de los cambios, el análisis de concordancia o consenso entre escenarios da bases más firmes para identificar a las zonas de mayor vulnerabilidad potencial.

La información generada con este enfoque metodológico permite identificar a las zonas potenciales de cambio, así como la dirección y magnitud del mismo, lo que puede utilizarse para la formulación de medidas de adaptación, relativas a la conservación de la biodiversidad, manejo y conservación de ecosistemas, protección de hábitats, mantenimiento de servicios ambientales importantes, etc.

Es importante enfatizar que los escenarios de cambio climático proyectan cambios en las condiciones climáticas de prácticamente la totalidad del país, pero en estos análisis se consideran sólo aquellos que son suficientes como para modificar el bioclima local a grado tal que puede afectar a las comunidades vegetales presentes en esas zonas y hacer las condiciones más propicias para otro tipo de especies y ecosistemas.

Aunque en el texto se señalan casos particulares de cambio en la distribución potencial de la vegetación, el conjunto de resultados muestra claramente que: a) las condiciones imperantes en el país en el período base (1961-2000) van a cambiar y b) como consecuencia, se darán cambios significativos en la distribución de varios de los principales ecosistemas terrestres del país.



Plataforma de colaboración sobre  
**CAMBIO CLIMÁTICO  
Y CRECIMIENTO VERDE**  
entre Canadá y México

Este documento fue desarrollado en el marco de la Plataforma de  
Colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá  
y México, todos los derechos reservados

Derechos Reservados © 2017  
Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD)  
Montes Urales 440, Lomas de Chapultepec, Delegación Miguel Hidalgo, CDMX C.P.11000  
[www.mx.undp.org](http://www.mx.undp.org)

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC)  
Periférico sur 5000, Insurgentes Cuicuilco, CDMX. C.P. 04530  
[www.gob.mx/inecc](http://www.gob.mx/inecc)