



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

## FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

MODELACIÓN DEL HÁBITAT INVERNAL DE LA MARIPOSA  
MONARCA ANTE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

### T E S I S

Área:

Geomática

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**BIÓLOGA**

PRESENTA:

**ARACELI BÁEZ ISLAS**



Vo. Bo. DIRECTOR: DR. RAMIRO PÉREZ MIRANDA

MÉXICO D.F., NOVIEMBRE 2012



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

## RESUMEN

El cambio climático es un fenómeno natural; sin embargo, en los últimos años se han notado cambios en la temperatura y precipitación debido al incremento de Gases de Efecto Invernadero. Dicha modificación climática está alterando el funcionamiento de los ecosistemas, por tal motivo es importante realizar estudios que permitan conocer la distribución de especies biológicas bajo escenarios de cambio climático con la finalidad de ubicar áreas vulnerables al fenómeno y que además sirva a los tomadores de decisiones plantear medidas de mitigación o adaptación.

El objetivo de este estudio fue evaluar los cambios en superficie por efectos del cambio climático bajo diferentes escenarios, modelos y períodos en el oyamel (*Abies religiosa*) y el hábitat invernal de la mariposa monarca (*Danaus plexippus plexippus*) dentro de la zona núcleo de la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca. Se generaron mapas actuales de distribución del oyamel y del hábitat invernal de la mariposa monarca y con escenarios de cambio climático para los periodos 2030 y 2050, escenarios A2 y B2 de los modelos de circulación general (MCG): HadCM\_3, CGCM\_2 y modelo ensamble obtenidos mediante el método de reducción de escala (DownScaling).

Las coberturas obtenidas con escenarios de cambio climático demuestran una reducción progresiva del bosque de *Abies religiosa* respecto a su distribución actual. El escenario B2, período 2030 con el modelo HadCM\_3 predice una reducción del oyamel de hasta 18%. Para período 2050 bajo el mismo escenario y modelo la disminución sería hasta 45%. El modelo ensamble prevé una reducción para el 2030 de 35% y para el período 2050 de 55.8%. En cuanto al hábitat invernal de la mariposa monarca, las coberturas con cambio climático demuestran una reducción con respecto a su distribución actual. El escenario A2, período 2030 con el modelo CGCM\_2 predice una reducción importante para el hábitat de la mariposa monarca de hasta el 33%. De igual manera, con el escenario B2, período 2050 y modelo HadCM\_3 se predice una reducción del 62%. Con el modelo ensamble la reducción para 2030 será del 35% y para el período 2050 de 41%.

## DEDICATORIA

A mi esposo Oscar por siempre estar conmigo impulsándome, apoyándome, comprendiéndome; pero sobretodo por soportarme. A mi hijo Oliver por brindarme tanta felicidad y ganas de superación, a los dos LOS AMO.

A mis padres María y Fernando por ser un ejemplo de dedicación, por brindarme todos sus conocimientos así como enseñanzas de amor y respeto, por siempre confiar en mí y estar conmigo en cualquier situación.

A mi hermano León por ser mi mejor amigo y poder siempre contar con él; gracias Hermano.

A mi abuelito Saturnino que siempre me cuido a mí y a mi hijo, gracias por existir y estar a mi lado.

A mi suegra, que siempre me apoyo en todos mis proyectos y que ha sido como una segunda madre...muchas gracias. Y a toda mi familia que directa o indirectamente siempre me ha ayudado, gracias a todos.

A mis amigos que siempre me apoyaron en los momentos en los que quería renunciar y dedicarme a otra cosa, GRACIAS AMIGOS.

A la maestra Graciela que ya no se encuentra en este momento conmigo pero que fue mi ejemplo a seguir y mi inspiración a ser Bióloga y una mejor persona.

A todas las personas que han formado parte de mi vida por muy breve que haya sido el tiempo ya que gracias a ellos he crecido como persona y profesionista.

## AGRADECIMIENTOS

A FONDO SECTORIAL CONAFORT-CONACYT 2010 por brindar los recursos para el proyecto y la beca para la realización de esta tesis.

A Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme la oportunidad de ser un estudiante de ella y recibir una gran formación académica que he recibido de sus grandes profesores.

Al Dr. Ramiro Pérez Miranda por permitirme trabajar en su proyecto, y brindarme su conocimiento, tiempo, paciencia, apoyo, dirección para la realización de este trabajo; pero sobre todo por su amistad.

Al M. en C. Germán Calva Vásquez por aceptar ser mi asesor de tesis y brindarme su tiempo así como sus conocimientos, estar siempre al pendiente del trabajo y confiar en mí.

Al M. en C. Antonio González Hernández, por ayudarme en cada duda que me surgía, dedicarme tiempo, apoyo, y ser un pilar fundamental para el complemento de esta tesis; pero sobre todo por su amistad.

A la Profesora María de las Mercedes Luna Reyes por aceptar ser sinodal de la tesis, y ser un ejemplo de dedicación, esfuerzo y trabajo, además de sus aportaciones en este trabajo y complementar ideas.

Al Maestro Armando Cervantes Sandoval por aceptar ser sinodal de esta tesis, así como el complementar con sus observaciones y sugerencias.

Al Maestro Faustino López Barrera por aceptar ser sinodales de esta tesis y complementar con sus observaciones y sugerencias.

A todas las personas que hicieron agradable mi estancia en el Laboratorio de Geomática del CENID-COMEF (INIFAP).

## INDICE

<b>CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.2. OBJETIVOS DE ESTUDIO.....	3
1.2.1. Objetivo general.....	3
1.2.2. Objetivos específicos.....	3
1.2.3. Hipótesis .....	3
<b>CAPITULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	4
2.1. Cambio climático.....	4
2.2. Modelos climáticos.....	5
2.2.1. Clasificación de modelos climáticos.....	7
2.2.2. Modelos de circulación general.....	8
2.2.3. DownScaling.....	10
2.2.4. Software estadístico para la reducción de escala.....	11
2.2.5. Descripción de los MCG empleados para DownScaling .....	12
2.2.6. Escenarios climáticos .....	13
2.3. Modelo.....	15
2.3.1. Modelación.....	15
2.3.2. Tipos de modelación.....	16
2.3.3. Algebra de mapas.....	18
2.3.4. Sistemas de Información Geográfica.....	18
2.4. Impacto del cambio climático en la biodiversidad.....	19
2.4.1. México y el cambio climático.....	20
2.5. Descripción de <i>Abies religiosa</i> .....	23
2.5.1. Distribución geográfica en México.....	23
2.5.2. Características botánicas .....	23
2.5.3. Requerimientos ambientales.....	24
2.6. Descripción de la mariposa monarca.....	25
2.6.1. Características morfológicas.....	25
2.6.2. Ciclo de vida .....	26
2.6.3. Migración.....	27
2.6.4. Requerimientos ambientales del hábitat invernal.....	27
2.7. Importancia de la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca.....	29
<b>CAPITULO 3. MATERIALES Y METODOS</b> .....	30
3.1 Descripción de los componentes biofísicos del área de estudio.....	30
3.1.1 Ubicación geográfica del área de estudio.....	30
3.1.2. Descripción de la zona .....	30

3.2. Elaboración de cobertura de uso de suelo y vegetación 2010.....	33
3.3. Requerimientos ambientales del oyamel y del hábitat invernal de la mariposa monarca.....	34
3.3.1 Requerimientos ecológicos para el desarrollo de <i>Abies religiosa</i> .....	34
3.3.2 Requerimientos del hábitat invernal de la mariposa monarca.....	36
3.4. Estructuración cartográfica digital.....	37
3.4.1. Cartografía climática.....	37
3.4.2. Cartografía edafológica.....	37
3.4.3. Cartografía topográfica.....	38
3.5. Modelo de distribución potencial actual y con escenarios de cambio climático del <i>Abies religiosa</i> y hábitat de la mariposa monarca.....	38
<b>CAPITULO 4. RESULTADOS</b> .....	42
4.1. Distribución actual de <i>Abies religiosa</i> .....	42
4.1.1. Coberturas de distribución potencial de <i>Abies religiosa</i> con los modelos HadCM_3 y CGCM_2.....	43
4.1.2. Coberturas de distribución potencial de <i>Abies religiosa</i> con el modelo ensamble.....	45
4.2. Distribución actual del hábitat invernal de la mariposa monarca.....	46
4.2.1. Distribución potencial del hábitat invernal de la mariposa monarca con los modelos HadCM_3 y CGCM_2.....	47
4.2.2. Distribución potencial del hábitat invernal de la mariposa monarca con modelo ensamble en la superficie total de la zona núcleo.....	49
4.2.3. Cobertura de zonas aptas del hábitat invernal de la mariposa monarca con los modelos HadCM_3 y CGCM_2 sobre bosque de oyamel.....	50
4.2.4. Cobertura de zonas aptas del hábitat invernal de la mariposa monarca con modelo ensamble sobre bosque de oyamel.....	52
4.3. Discusión.....	53
4.4. Conclusiones.....	58
4.5. Recomendaciones.....	59
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	60
<b>ANEXOS</b> .....	71

## ÍNDICE DE FIGURAS

1. Visión esquemática de los componentes del sistema climático .....	4
2. Componentes del clima añadidos a los modelos climáticos a lo largo de los años ....	8
3. Características básicas de un Modelo Climático de Circulación General. ....	9
4. Proceso del Downscaling.....	10
5. Escenarios climáticos. Fuente: IPCC, 2001. ....	13
6. Capas de información espaciales para generar un modelo cartográfico .....	17
7. Distribución mundial de <i>Danaus plexippus plexippus</i> .....	25
8. Ruta migratoria a México de la mariposa monarca.....	27
9. Ciclo anual monarca .....	29
10. Ubicación y Zonificación de la Reserva de la Biósfera de la mariposa monarca....	31
11. Procedimiento para obtener Mapas de distribución potencial. ....	39
12. Distribución actual de <i>Abies religiosa</i> .....	42
13. Año 2030, HadCM_3 Escenario A2.....	44
14. Año 2050. HadCM_3 Escenario B2.....	44
15. Año 2050, Modelo Ensamble Escenario A2.....	45
16. Distribución actual del hábitat en el total de zona núcleo y sobre oyamel. ....	46
17. Año 2030, CGCM_2 Escenario B2.....	48
18. Año 2050 HadCM 3. Escenario A2.....	48
19. Año 2050, Modelo Ensamble Escenario A2. ....	49
20. Distribución del hábitat de la mariposa en bosque de oyamel .Año 2030, CGCM_2. B2 .....	50
21. Distribución del hábitat. Año 2050, HadCM_3 Escenario B2.....	50

## ÍNDICE DE CUADROS

1. Componentes para la construcción o comprensión de los modelos climáticos .....	6
2. Valores de las variables de la distribución de <i>Abies religiosa</i> en la RBMM.....	35
3. Categorías de distribución de <i>Abies religiosa</i> .....	35
4. Categorías de aptitud del terreno para el establecimiento hábitat de la mariposa monarca.....	36
5. Valores de temperatura y precipitación anuales obtenidas para el 2030 y 2050 con los modelos CGCM_2, HadCM_3 y modelo ensamble. Escenarios A2 y B2.....	40
6. Valores de temperatura y precipitación de los meses de noviembre a marzo, obtenidas para el 2030 y 2050 con los modelos CGCM_2, HadCM_3 y modelo ensamble. Escenarios A2 y B2.....	40
7. Distribución potencial actual del oyamel en la zona núcleo.....	42
8. Distribución potencial futura de <i>Abies religiosa</i> .....	43
9. Cambio de superficie con los modelos HadCM_3 y CGCM_2 para el oyamel.....	45
10. Distribución potencial del oyamel con modelo ensamble.....	46
11. Áreas de distribución actual del hábitat invernal de mariposa monarca.....	46
12. Superficie apta para el hábitat de la mariposa monarca con los modelos HadCM_3 y CGCM_2.....	47
13. Cambio de superficie con los modelos HadCM_3 y CGCM_2 para el hábitat invernal de la mariposa monarca.....	49
14. Cambio de superficie con el modelo ensamble para el hábitat invernal de la mariposa monarca.....	49
15. Áreas aptas para el hábitat de la mariposa monarca en oyamel con los modelos HadCM_3 y CGCM_2.....	51
16. Cambio de áreas aptas para el hábitat de la mariposa sobre oyamel con los modelos HadCM_3 y CGCM_2.....	51
17. Distribución potencial del hábitat de la mariposa monarca sobre oyamel con el modelo ensamble.....	52

## ÍNDICE DE GRAFICAS Y ANEXOS

### GRAFICAS

1. Superficie potencial de oyamel actual y con modelos y escenarios de cambio climático.....	43
2. Superficie potencial con diferentes modelos, escenarios y períodos del hábitat invernal de la mariposa monarca.....	47
3. Superficie apta en bosque de oyamel con escenarios de cambio climático para el hábitat de la mariposa monarca. ....	51

### ANEXOS

1. Figuras de distribución potencial actual y con cambio climático de oyamel. ....	71
2. Figuras de distribución potencial del hábitat invernal de la mariposa monarca del total de la zona núcleo. ....	74
3. Figura de distribución potencial del hábitat invernal de la mariposa monarca sobre oyamel.....	77

## CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático, actualmente constituye una de las mayores preocupaciones alrededor del mundo, principalmente por la importancia global de sus efectos, la incertidumbre del comportamiento futuro y por la necesidad de lograr compromisos para mitigar e iniciar un proceso de adaptación (IPCC, 2007a). Las tendencias actuales predicen aumentos de hasta 1°C en la temperatura; además de la alteración de los regímenes de precipitaciones en algunas regiones; diversos estudios han demostrado que el calentamiento global afecta severamente a la biodiversidad en diferentes formas y escalas (Jiménez, 2009). En este sentido la biodiversidad presentará cambios tales como variaciones en rangos de distribución potencial de las especies, desplazamientos altimétricos de los ecosistemas, fragmentación del hábitat y cambios en el funcionamiento de los ecosistemas (Jiménez *et al.*, 2010).

En función de lo anterior se busca modelar el clima futuro para conocer el comportamiento que tendrán las comunidades ante el cambio climático; los Modelos de Circulación General (MCG) son instrumentos para predecir el cambio climático global, (FIC, 2011); sin embargo, en la mayor parte de los estudios de evaluación de impactos se requieren escenarios climáticos con resolución local, los cuales se pueden obtener a través de técnicas estadísticas de reducción de escala (DownScaling) (Magaña, 2007).

La Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca (RBMM) es un área natural protegida de gran importancia ambiental porque alberga en sus bosques de oyamel a la mariposa monarca en época invernal, proveniente del norte de Estados Unidos y sur de Canadá (CCA, 2008).

A pesar de lo anterior, la RBMM enfrenta diferentes problemas y amenazas, como lo son la tala clandestina, turismo desorganizado y observaciones recientes sugieren muerte regresiva por estrés hídrico la cual se encuentra relacionada con factores físicos imputables al cambio climático. (Rendón-Salinas *et al.*, 2004).

Es por ello que el propósito de este trabajo fue evaluar los cambios en superficie por efectos del cambio climático bajo diferentes escenarios, modelos y períodos en el oyamel (*Abies religiosa*) y el hábitat invernal de la mariposa monarca (*Danaus plexippus plexippus*) dentro de la zona núcleo de la RBMM respecto a su distribución y con escenarios A2 y B2 y períodos 2030 y 2050, de los modelos de cambio climático (MCG): HadCM\_3, CGCM\_2 (obtenidos mediante técnicas de reducción de escala) y un modelo ensamble (regionalizado).

## 1.2. OBJETIVOS DE ESTUDIO

### 1.2.1. Objetivo general

Evaluar los cambios en superficie por efectos del cambio climático bajo diferentes escenarios, modelos y períodos en *Abies religiosa* y el hábitat invernal de *Danaus plexippus plexippus* en la zona núcleo de la reserva de la biosfera de la mariposa monarca.

### 1.2.2. Objetivos específicos

Modelar espacialmente la distribución actual y potencial con escenarios de cambio climático del bosque de oyamel para el período 2030 y 2050 con modelos HadCM\_3 y CGCM\_2, procesados con el método DownScaling.

Modelar espacialmente las zonas del hábitat invernal actual de la mariposa monarca y potenciales con escenarios de cambio climático para el período 2030 y 2050 con modelos HadCM\_3 y CGCM\_2, procesados con el método DownScaling.

Modelar espacialmente la distribución potencial con cambio climático del bosque de oyamel y zonas del hábitat invernal de la mariposa monarca para el período 2030 y 2050 con un modelo ensamble regionalizado para México.

### 1.2.3. Hipótesis

La distribución potencial con escenarios de cambio climático de *Abies religiosa* indicará una reducción de su extensión en altitudes más bajas, implicando que el hábitat invernal de la mariposa monarca se reduzca al mismo tiempo que disminuyan los bosques de oyamel.

## CAPITULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. Cambio climático

Es un fenómeno natural que ocurre en el planeta y permite mantener la temperatura en un rango adecuado para la vida. El sistema climático global (SCG) (Figura 1) consta de los siguientes componentes: a) atmósfera, b) océanos, c) biosfera terrestre y marina, d) criosfera y e) superficie terrestre; los cuales interactúan y, como resultado de esa interacción colectiva, determinan el clima de la superficie de la Tierra (IPCC, 2002).

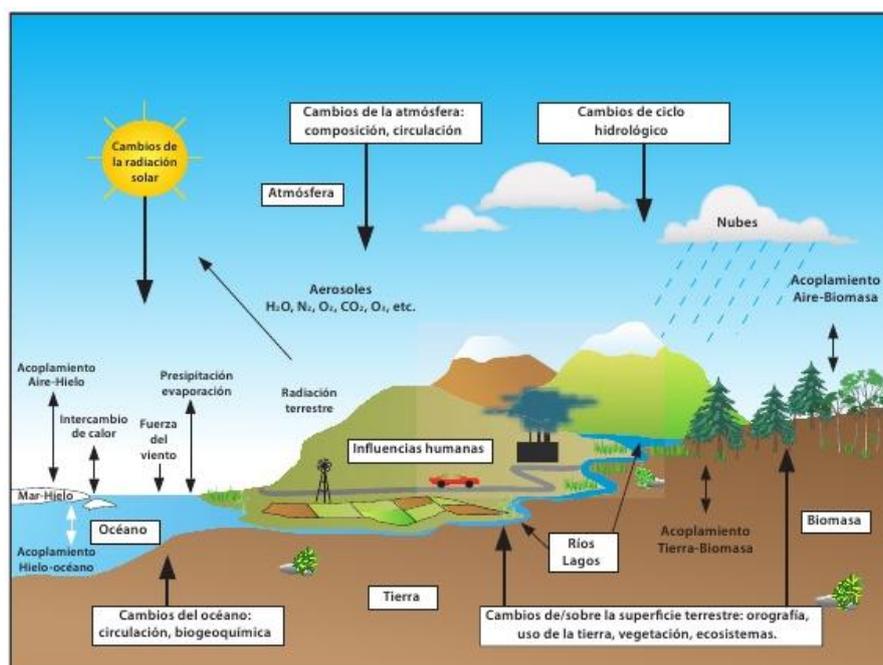


Figura 1. Visión esquemática de los componentes del sistema climático mundial que revisten importancia para los cambios climáticos a escala temporal de siglo (negrita), sus procesos e interacciones (flecha fina) y algunos elementos que pueden cambiar (flecha negra). Fuente: IPCC, 2007b.

El concepto de cambio climático se utiliza para caracterizar cambios sistemáticos sostenidos en los promedios a largo plazo de los elementos o variables climáticas, los cuales pueden deberse a mecanismos físicos de procesos internos del sistema, así como por forzamiento externo (Amador y Alfaro, 2009).

En el forzamiento externo se encuentra en parte el resultado del incremento en las concentraciones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) como son: vapor de agua, bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) y clorofluorocarburos (CFC);

atribuyendo los incrementos a la acción del hombre con una certidumbre superior al 90% (IPCC, 2007a). Cuanto mayor es la concentración de los GEI, menor es la cantidad de radiación infrarroja que el planeta remite libremente al espacio exterior. Al aumentar su concentración, se incrementa la cantidad de calor atrapado en la atmósfera, dando origen a que se eleve la temperatura superficial del planeta. Estos gases son muy eficientes en atrapar el calor que emite la superficie de la tierra por lo que un ligero incremento en estos es suficiente para modificar significativamente las propiedades del clima (Stratus, 2004).

En 1863, Tyndall hizo las primeras observaciones del cambio climático al notar que las concentraciones de ciertos gases en la atmósfera estaban aumentando, y que esto tenía una correlación con el incremento en la temperatura del planeta. Cambios significativos en el aumento de dichos gases, alterarían la circulación del mar y la atmósfera y, consecuentemente, el ciclo hidrológico, lo que se manifestaría con cambios en la precipitación y la temperatura en superficie (Aguirre y Chamba, 2010).

El aumento de la temperatura promedio de la Tierra en los últimos 100 años ha sido en promedio de 0.6°C (0.4-0.8°C), de los cuales el año 1998 fue el más cálido (Aguirre y Chamba, 2010). El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) estima que un incremento que duplique las concentraciones de CO<sub>2</sub> con respecto al nivel preindustrial daría un aumento de temperatura de 1.5 a 5.8°C (IPCC, 2001). El producto de esta alteración sería equivalente a desplazar una región cualquiera en 200 km, ocasionando migración de algunas comunidades de zonas costeras al interior de los continentes, cambios en el uso del suelo, entre otros factores (Fragoso, 2003; Lozano, 2004).

## 2.2. Modelos climáticos

Los modelos climáticos intentan simular el comportamiento del SCG y están motivados por la intención de formular predicciones oportunas de los impactos antropógenos sobre el clima que desencadenan las emisiones de GEI,

abarcando toda la cadena de causalidad desde las emisiones hasta los impactos. Para elaborar dichas proyecciones sobre el impacto de las perturbaciones de origen humano es preciso calcular los efectos de todos los elementos clave que actúan en el sistema climático (Delgado y Suarez, 2009). Estos procesos se representan en términos matemáticos en un programa informático, que contenga los suficientes elementos de los componentes del SCG para efectuar simulaciones del clima, denominándose “modelo climático” (IPCC, 1997).

El propósito final es identificar la posible respuesta del SCG a un cambio en alguno de los parámetros y procesos que controlan el estado del sistema. La respuesta climática ocurre a fin de restablecer el equilibrio dentro del mismo; es decir, el SCG puede ser perturbado por el forzante radiativo asociado a un incremento de algún GEI en la atmósfera. El fin es determinar la respuesta a la perturbación (Ricciardi, 1995). Los principales componentes a tomar en cuenta para la elaboración de los modelos climáticos se presentan en el Cuadro 1 (Henderson-Sellers y McGuffie (2005).

Cuadro 1. Componentes para la construcción o comprensión de los modelos climáticos

<b>Componente</b>	<b>Referente a</b>
<b>Radiación</b>	La forma en que son tratadas la entrada y absorción de la radiación solar y la emisión de la radiación infrarroja.
<b>Dinámica</b>	El movimiento de energía alrededor del globo (desde latitudes bajas a altas) y movimientos verticales (convección).
<b>Procesos de la superficie</b>	Inclusión de la tierra/océano/hielo y el cambio resultante en el albedo, el poder de emisión y los intercambios de energía superficie-atmósfera.
<b>Resolución en el tiempo y el espacio</b>	El intervalo de tiempo del modelo y las escalas horizontales y verticales determinadas.

### 2.2.1. Clasificación de modelos climáticos

Según Ricciardi (1995) los modelos climáticos se clasifican en cuatro categorías:

- 1) Modelos de Balance de Energía (EBMs); simulan el balance de radiación global y la transferencia latitudinal de energía; otros factores a incluir son el almacenamiento de energía dependiente del tiempo y el flujo de energía en el océano profundo.
- 2) Modelos de una dimensión, Radiativos-Convectivos (RCMs); simulan en detalle la transferencia de energía a través del espesor de la atmósfera, incluyendo las transformaciones radiativas que ocurren a medida que la energía es absorbida, emitida y dispersada. Son más útiles en el estudio de perturbaciones forzantes que tienen su origen dentro de la atmósfera.
- 3) Modelos bidimensionales, Estadísticos-Dinámicos (SDMs); combinan la transferencia horizontal de energía modelada por los EBMs, con la aproximación radiativa-convectiva de los RCMs. Son particularmente útiles en investigaciones sobre el rol de la transferencia horizontal de energía, y de los procesos que alteran directamente esa transferencia.
- 4) Modelos de Circulación General (GCMs); representan el intento más sofisticado de simulación del sistema climático. Pueden proporcionar una representación razonablemente precisa y, al contrario de los otros modelos, pueden simular procesos a escala continental y global pero son poco confiables para detalles regionales.

La elección del modelo depende de la naturaleza del análisis y el costo computacional (IPCC, 1996). La estimación de la mayoría de los impactos del cambio climático se basa en escenarios de los MCG al ser actualmente el recurso más avanzado del que se dispone para el estudio del clima (Conde y Gay 2008).

Estos modelos cuentan con características diferentes; consecuentemente, estas variaciones llevan a resultados distintos, sin embargo, no les restan validez y todos ellos muestran un calentamiento global. En los últimos años han mejorado sustancialmente, con el avance de la ciencia, al extenderse y

mejorarse la base de datos sobre la que se apoyan y al ampliarse las herramientas de cálculo que emplean. Todo ello permite incorporar un mayor número de componentes climáticas y refinar la malla espacial sobre la que hacen los cálculos, como se muestra en la Figura 2 (FIC, 2011).

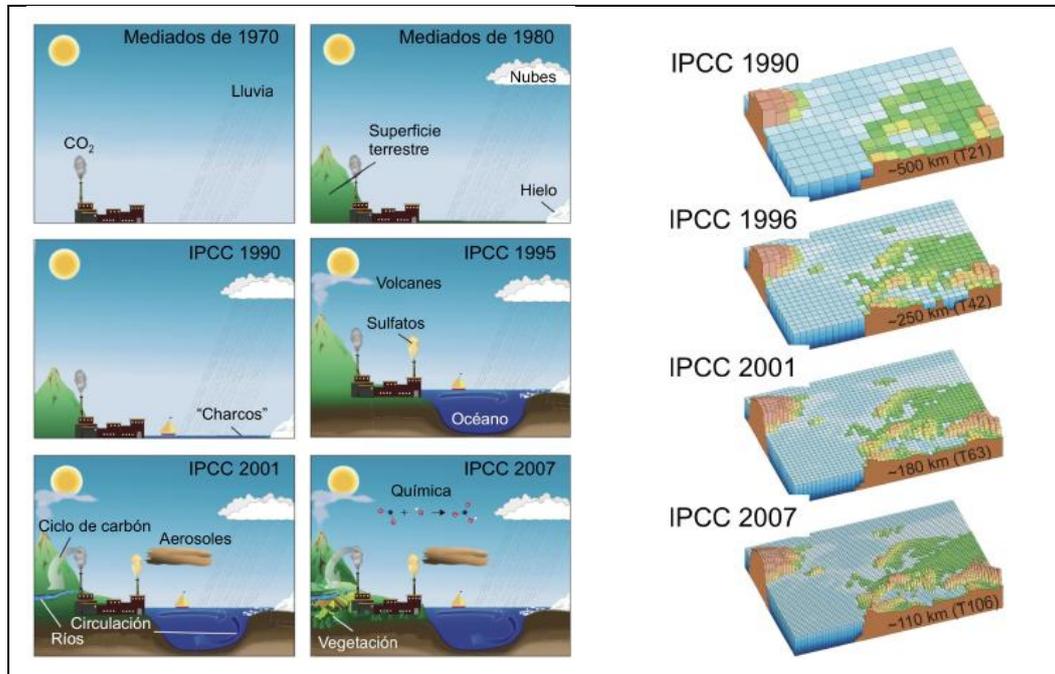


Figura 2. Componentes del clima añadidos a los modelos climáticos a lo largo de los años. Fuente: IPCC, 2007a.

En la actualidad hay alrededor de 15 centros importantes de modelos mundiales, los laboratorios de investigación clave se encuentran en Estados Unidos (NCAR, GISS y GFDL) y en Europa (Max Planck de Alemania y Centro Hadley de Reino Unido) (Environment Canada, 2010a).

### 2.2.2. Modelos de circulación general

Los MCG son representaciones numéricas tridimensionales, que se emplean para simular el comportamiento del SCG, incluyendo la atmósfera, los océanos, biosfera, criosfera y superficie terrestre (Jáuregui, 2003). Los resultados de los experimentos desarrollados con MCG pueden ser combinados con las salidas de modelos climáticos más simples para poder evaluar los resultados de los primeros bajo una gran variedad de supuestos sobre las futuras emisiones de GEI (Magaña y Caetano 2007).

En la atmósfera incluyen los vientos, la humedad, las nubes y la concentración de los diversos gases que la componen, analizando sus variaciones temporales y las diferencias con la altura. En el océano, estos modelos consideran las corrientes marinas, la temperatura y la salinidad; de manera semejante, la atmósfera estudia las variaciones de estos parámetros con el tiempo y espacio (Figura 3). Los MCG también tienen que modelar la temperatura en la superficie terrestre, los cuerpos de agua y, de manera simplificada, la orografía continental (Henderson-Sellers y McGuffie, 1990).

La información que se requiere para estudios de impacto del cambio climático debe ser de escalas espaciales de mayor resolución (Cano *et al.*, 2001); sin embargo, los MCG están restringidos en su utilidad para estudios de impacto local debido a su resolución espacial típicamente del orden de 500,000 Km<sup>2</sup>, además de la incapacidad de tomar en cuenta características de menor escala como las nubes y la topografía (Wilby *et al.*, 2004).

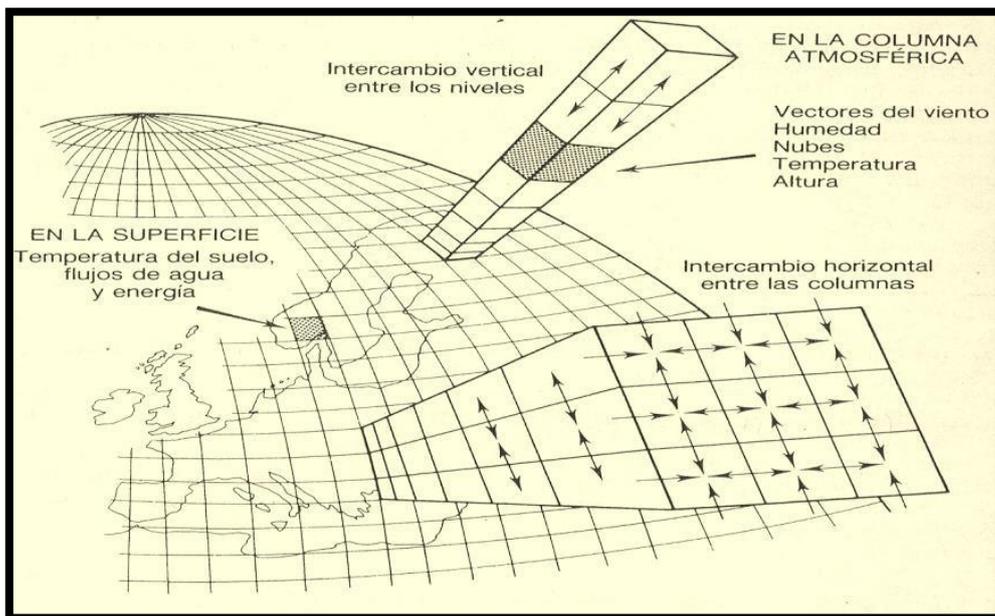


Figura 3. Características básicas de un Modelo Climático de Circulación General. Fuente: Henderson-Sellers y McGuffie (1990).

Como consecuencia, en el intento de hacer más fina la malla de resolución se han desarrollado diversas técnicas de regionalización para refinar espacialmente la información generada por los MCG, para proporcionar datos

útiles en la generación de estudios de evaluación de impactos regionales o locales (Giorgi *et al.*; 2001 citado por Giorgi, 2008).

### 2.2.3. DownScaling

Se denomina DownScaling a la técnica de extraer la información más fiable aportada por las simulaciones de los MCG para obtener datos de alta resolución (Figura 4) (Cano *et al.*, 2001). Una de las desventajas de esta técnica es que a mayor nivel de reducción de escala, mayor nivel de incertidumbre deberá asumirse (Conde y Gay, 2008). Existen dos tipos de procesamiento de información que proveen los MCG, las técnicas de ajuste son: dinámicas y estadísticas (Wilby *et al.*, 2004).

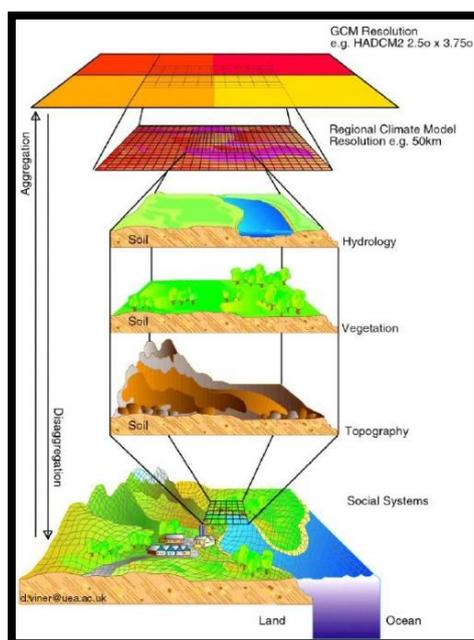


Figura 4. Proceso del Downscaling. Fuente: <http://www.cccsn.ec.gc.ca/~downscaling>. Julio 2012.

El método de ajuste dinámico utiliza un modelo de área limitada de alta resolución bajo condiciones de frontera como función del tiempo derivadas del MCG. La aplicación de este método requiere conocimiento del clima y la variabilidad climática regional, experiencia en modelado climático y requerimientos de uso computacional (Cano *et al.*, 2001).

Las técnicas de ajuste de escala estadístico usan las salidas de los MCG; permiten la construcción de escenarios climáticos para sitios individuales o regiones con una resolución a diferentes escalas temporales como: diaria,

mensual y estacional. Utiliza información estadística o derivada de series de tiempo históricas. Son útiles cuando se requiere una evaluación rápida de escenarios climáticos locales a un costo relativamente bajo; el uso de agrupaciones de tipo estadístico permite un análisis relativamente confiable (Wilby *et al.*, 2004).

Wilby y Dawson (2007) clasifican los métodos de estadísticos de reducción de escala en tres tipos:

1. Aproximaciones basadas en patrones de tiempo. Se fundamentan en agrupar datos meteorológicos locales con base en patrones predominantes de la circulación atmosférica. Se construyen por re-muestreo de la distribución de los datos observados, o generando series sinópticas del tiempo para re-muestrear los datos observados.
2. Generadores estocásticos del tiempo. Están basados en la representación de la ocurrencia de la precipitación usando un proceso de Markov de dos estados. Después estos modelos se adaptan para la reducción de escala, condicionando sus parámetros a los predictores atmosféricos de gran escala, estados del tiempo o propiedades del período de lluvias.
3. Modelos de regresión. Éstos son conceptualmente medios simples para representar las relaciones lineales (o no lineales), entre los predictandos y los forzantes atmosféricos de gran escala. Los métodos aplicados incluyen comúnmente regresión múltiple, análisis de correlación canónica y redes neuronales, que son similares a la regresión no lineal.

#### 2.2.4. Software estadístico para la reducción de escala

Los programas estadísticos más utilizados para técnicas de DownScaling son los MAGICC/SCENGEN, Statistical DownScaling Model (SDSM) y Herramienta de Predicción del Clima (CPT). El primero toma como entrada los escenarios de emisiones de los gases de efecto invernadero, gases reactivos y de dióxido de azufre, y produce como salida la temperatura global media y el aumento del nivel del mar (Amador y Alfaro, 2009).

El segundo (SDSM) emplea técnicas y métodos estadísticos para relacionar información climática de modelos de baja resolución espacial (como los de MCG) con datos de alta resolución (como la proporcionada por las estaciones climáticas locales), para generar escenarios diarios de clima de superficie bajo forzamientos climáticos presentes y futuros (Wilby y Dawson, 2007).

Finalmente se encuentra la Herramienta de Predicción del Clima; esta aplicación computacional fue diseñada específicamente como corrector de errores sistemáticos a las salidas de MCG y regionalizar pronósticos estacionales, este programa utiliza campos mensuales o estacionales obtenidos de un período histórico de simulación (período de calibración), y tiene la capacidad de construir una ecuación de transferencia para cada mes (Magaña, 2010)

#### 2.2.5. Descripción de los MCG empleados para DownScaling

El modelo HadCM3 creado en el año 2000, tiene como características una resolución atmosférica de 19 niveles (una malla de 96 x 73 celdas) y para el océano 20 niveles una resolución horizontal de 1.25° X 1.25°. Esta resolución hace posible la representación de importantes detalles de la estructura normal oceánica, cuenta con un total de 14 bandas espectrales (Johns *et al.*, 1997). Dispone de seis bandas espectrales de longitud de onda corta y ocho de longitud de onda larga. Los efectos de los gases como el CO<sub>2</sub>, vapor de agua y ozono están representados explícitamente; también incluye un simple parámetro para los aerosoles (Hardy, 2003). Este modelo se puede utilizar para los escenarios A2, B2, A2b, A2c. No necesita ningún tipo de ajuste de flujo para realizar una buena simulación, aunque se ha utilizado en períodos de tiempo de unos mil años y se han observado pequeñas desviaciones en el clima en la superficie terrestre (IPCC, 2005).

El modelo CGCM2 es espectral con una resolución horizontal de 3.7 X 3.7°, además tiene diez niveles en la vertical. La componente oceánica tiene una resolución de 1.8° X 1.8° y 29 niveles en la vertical. La habilidad de este

modelo climático para reproducir el clima presente y su variación histórica le añade confianza a las proyecciones del futuro (Environment Canada, 2010b).

El modelo ensamble es un trabajo de proyecciones de cambio climático regionalizadas para México, el cual emplea las medianas de 10 MCG (mpi\_echam5, miub\_echo\_g, csiro\_mk3\_0, csiro\_mk3\_5, cccma\_cgcm3\_1, giss\_model\_e\_r, ncar\_ccsm3\_0, miroc3\_2\_hires, mri\_cgcm2\_3\_2a, ukmo\_hadcm3) (Magaña y Caetano, 2007). Dichas proyecciones se generaron en CPT con resolución temporal mensual y espacial de 50 km x 50 km, para el período 2000-2099 de los escenarios de emisiones de GEI A2, A1B, B1 y COMMITTED (Magaña y Caetano, 2007).

#### 2.2.6. Escenarios climáticos

Este concepto se utiliza para denotar un estado probable o plausible, normalmente simplificado del SCG ante uno o más diferentes tipos de forzamientos. Los escenarios son descripciones coherentes y consistentes de cómo el sistema climático de la tierra puede cambiar en el futuro. Son derivados de los escenarios de posibles emisiones futuras de GEI, los cuales se utilizan como elementos introducidos para el cálculo de proyecciones climáticas (IPCC, 2001). Existen cuatro líneas evolutivas y familias de escenarios (Figura 5): A1, A2, B1 y B2. El esquema de su división se basa en el tipo de fuerza determinante (IPCC, 2001).

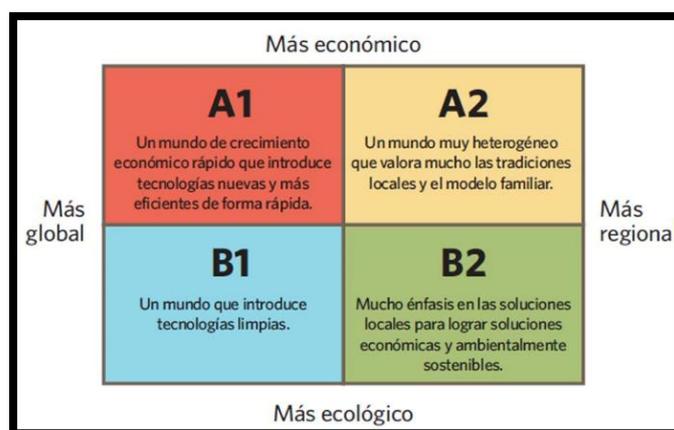


Figura 5. Escenarios climáticos. Fuente: IPCC, 2001.

La familia de escenarios A1 *“describe un mundo futuro con un rápido crecimiento económico y una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes”* (IPCC, 2001).

La familia A2 describe un mundo muy heterogéneo. *“Sus características más distintivas son la autosuficiencia y la conservación de las identidades locales. El índice de natalidad en el conjunto de las regiones converge muy lentamente, con lo que se obtiene una población en continuo crecimiento. El desarrollo económico está orientado básicamente a las regiones, y el crecimiento económico por habitante así como el cambio tecnológico están fragmentados y son más lentos que en otras líneas evolutivas”* (IPCC, 2001).

La familia B1 *“describe un mundo convergente con una misma población mundial y desciende posteriormente, pero con rápidos cambios de las estructuras económicas, acompañados de una utilización menos intensiva de los materiales y de la introducción de tecnologías limpias con un aprovechamiento eficaz de los recursos”* (IPCC, 2001).

La familia B2 describe un mundo en el cual predominan las soluciones locales a la sostenibilidad económica, social y ambiental. *“Es un mundo cuya población aumenta progresivamente a un ritmo menor que en A2, con niveles de desarrollo económico intermedios, y con un cambio tecnológico menos rápido y más diverso que en las líneas A1 y B1. Aunque este escenario se orienta a la protección del medio ambiente y a la igualdad social, se centra principalmente en los niveles local y regional”* (IPCC, 2001).

Dado que existen diversas formas de construcción de escenarios climáticos, se recomienda que para tomar en cuenta las incertidumbres asociadas al clima futuro se haga uso de diferentes modelos de circulación general atmósfera-oceano, con forzamientos para distintos escenarios de emisiones (Jones y Mearns, 2006; Palma *et al.*, 2006).

### 2.3. Modelo

Wilson (1993) describe a los modelos como *“una representación de un objeto, sistema o idea, de forma diferente de la entidad misma; cuyo propósito es explicar, entender o mejorar un sistema. Puede ser una abstracción de las propiedades dominantes del objeto”*. Skilling (citado por Gago y Serrano 2002) menciona que *“Un modelo puede ser una teoría, o una ley, o una hipótesis o una idea estructurada. Puede ser una función, una relación o una ecuación. Puede ser, también, una síntesis de datos. Lo más importante es que estén bien desarrollados en el espacio o en el tiempo, su aplicación puede extenderse al razonamiento sobre el mundo real”*. La FAO (1997) define a un modelo como *“un bosquejo que representa un conjunto real con cierto grado de precisión y en la forma más completa posible, pero sin pretender aportar una réplica de lo que existe en la realidad”*.

Los modelos son muy útiles en la proyección de la realidad por su versatilidad y oportunidad que ofrecen para predecir posibles escenarios, en los cuales se puede trabajar anticipadamente a los problemas y las consecuencias que puedan implicar (Ricciardi, 1995).

#### 2.3.1. Modelación

La modelación es la actividad técnica de emplear modelos (FAO, 1997). Es el proceso de generación de modelos abstractos, conceptuales, gráficos o matemáticos de una representación idealizada y simplificada de la realidad (Velásquez, 2007). El auge de la modelación cartográfica ha sido posible fundamentalmente por el desarrollo que han experimentado los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en los últimos años. Mediante estas herramientas es posible procesar gran cantidad de información procedente de diferentes ámbitos para elaborar mapas de distribución potencial en función de factores ambientales (Delgado, 2008).

El proceso de modelación involucra una serie de procedimientos como son la elección del tema, reconocimiento de la situación, referencial teórico, formulación del problema, desarrollo, resolución del problema a partir del

modelo, interpretación de la solución y validación del modelo (Salett y Hein, 2004). La modelación permite diagnosticar y evaluar el estado actual de los objetos, analizar el comportamiento espacio temporal de los objetos y ordenarlos en el marco de un territorio, elaborar pronósticos, desarrollar situaciones teóricas, comprobar hipótesis sobre la distribución y organización espacial de los objetos, así como realizar sucesivas aproximaciones hasta lograr el modelo más cercano a la realidad (Del Valle, 2008).

### 2.3.2. Tipos de modelación

Hay principalmente dos tipos de modelación: la estadística y la espacial, las cuales difieren entre el propósito que se persiga. La modelación estadística o matemática es un conjunto de distribuciones de probabilidad en el espacio que se emplea para realizar inferencias o toma de decisiones a partir de ciertos datos (Davison, 2003). Es una formalización de las relaciones entre las variables en forma de ecuaciones matemáticas, es la manera de entender de mejor forma un fenómeno en el que subyace una relación causa efecto del tipo x-y (McCullagh, 2002).

Ojeda (2004) establece que existen principalmente dos métodos de modelación estadística; mediante modelos paramétricos lineales y modelos lineales generalizados. De acuerdo con Mateo *et al.* (2011) las técnicas más empleadas son tres:

1. Técnicas discriminantes que necesitan presencias y ausencias: Regresión Logística Multivariante (RLM), árboles de clasificación (CART, BRT y MDA), redes neuronales (ANN), modelos lineales generalizados (SVM, GRASP), modelos aditivos generalizados (GAM), estadística bayesiana y máxima entropía (Maxent).
2. Técnicas descriptivas sólo requieren datos de presencias: envueltas geográficas, envueltas ambientales (BIOCLIM, ANUCLIM, BIOMAP, HABITAT o), y métodos de distancias matemáticas (DOMAIN).
3. Técnicas mixtas que generan internamente las pseudo-ausencias: algoritmos genéticos: Algoritmo Genético para la Producción de conjuntos de reglas (GARP).

Estas técnicas estadísticas son una alternativa eficaz para estimar la distribución de la diversidad biológica en ausencia de datos exhaustivos que se pueden emplear en el estudio de la biodiversidad (protección de especies, valorar posibles impactos de invasión biológica, predecir la distribución de especies en condiciones de cambio climático), lo que permitiría priorizar áreas para la conservación (Delgado, 2008).

Por otro lado, existe la modelación espacial, la cual se refiere al proceso de manipular y analizar datos espaciales asociada con bases de datos espaciales (Ramírez, 2007). Uno de los objetivos del modelado incluye una descripción relativamente realista del comportamiento presente y las predicciones del comportamiento futuro (Arab *et al.*, 2006). Dentro de esta modelación se encuentra la generación de un modelo cartográfico, el cual es una representación gráfica de los datos espaciales y procedimientos analíticos que se usan para desarrollar una solución de análisis (Figura 6) (Tomlin, 1990). El propósito de dicho modelo es auxiliar en la organización del análisis y estructurar los procedimientos necesarios, así como identificar datos necesarios para el estudio, y sirve como fuente de consulta y referencia para el análisis (Eastman, 2003).

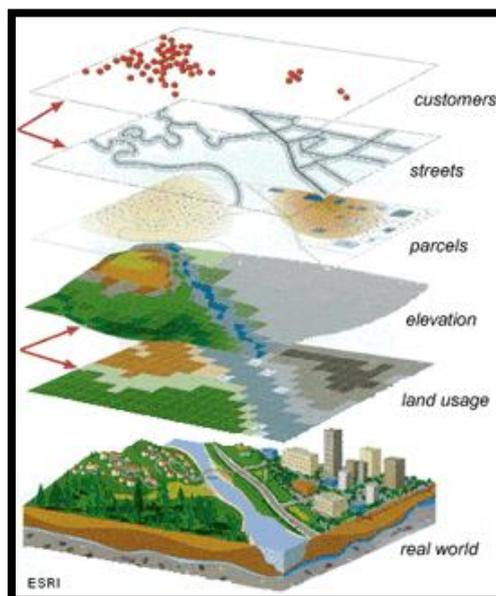


Figura 6. Capas de información espaciales para generar un modelo cartográfico. Fuente: <http://xn--geomatica-cza.com/geomatica-sig.html>. Julio 2012.

La modelación cartográfica, comprende el análisis con SIG de datos espaciales con operaciones matemáticas o booleanas, con frecuencia usadas para identificar áreas con características únicas de combinación en mapas con entidades georreferenciadas; consiste en aislar aquellos elementos y relaciones del mundo real que son útiles para constituir una estructura de datos la cual se puede modelizar (Johnston, 1998).

### 2.3.3. Algebra de mapas

Una de las metodologías existentes para modelar la distribución de especies es la modelación por algebra de mapas o algebra booleana en un SIG. Consiste en obtener los requerimientos ambientales que una determinada especie necesita para desarrollarse en formato cartográfico, después se procesan en un SIG para obtener áreas potenciales (Gómez *et al.*, 2007a). Se realiza una recodificación o reclasificación, la cual consiste en generar nuevos valores con base en valores ya existentes; es decir, a partir del valor de cada celda en el mapa fuente se obtiene el valor que corresponde a esa misma celda en el mapa resultante. Esta reclasificación se puede realizar en variables cuantitativas o cualitativas (Kraak y Ormeling, 2007).

Según Malczewski (1999), el álgebra booleana genera un nuevo mapa a partir de dos o más mapas de entrada mediante operadores lógicos como: intersección (AND), unión (OR) y complemento (NOT); dichos operadores se ejecutan en variables y pueden tomar dos estados: presencia o ausencia, denotados por valores de 1 y 0. El operador AND en dos conjuntos A y B es similar a multiplicar A por B; el operador OR equivale a la suma de A y B; y NOT se entiende como el inverso; es decir, si  $A=0$ , entonces  $B=1$  y viceversa.

### 2.3.4. Sistemas de Información Geográfica

Un SIG es una herramienta de análisis espacial para resolver problemas por medio de modelos que permiten encontrar patrones y entender cuáles son los eventos que dan origen a los fenómenos que se estudian. Este término fue acuñado por primera vez por el geógrafo Roger Tomlinson en 1963, y en 1964 desarrolló el primer SIG con el nombre de Canadian Geographic Information

System (CGIS) (Buzai, 2000). Estos sistemas funcionan como herramientas de carácter estadístico, operaciones matriciales, funciones topológicas y teoría de cálculos; permiten ingresar, estructurar, organizar, modelar, analizar, interpretar, representar y visualizar datos espaciales geográficamente referenciados y asociados a una base de datos alfanumérica (Duque, 2008).

Un SIG está formado por cinco componentes o elementos y cada uno de esos cumplen con una función para que existan entre ellos una interacción, estos son; Hardware (equipo de cómputo con el que opera), software (herramientas y funciones para almacenar, analizar y desplegar la información geográfica), datos (información georreferenciada y no espacial), operadores (administradores del sistema) y métodos (planes del diseño y normas de operación) (Mancebo *et al.*, 2008).

Gómez (1992) y Ramírez (2007) establecen que la funcionalidad de los SIG se puede establecer a partir de tres principales componentes o subsistemas:

1. Entrada de datos. Se refiere al proceso de identificar y reunir los datos necesarios para una aplicación específica; incluye: mapas, cuadros, figuras, datos digitales existentes (topografía, hidrología, clima, vegetación, entre otros.).
2. Almacenamiento y manejo de datos. Este componente incluye las funciones necesarias para almacenar y recuperar datos de la base. Los datos espaciales se ordenan en dos formas: raster o vector.
3. Manejo de datos y análisis. Los datos se manejan y analizan para obtener información útil para una aplicación particular. Salidas o productos resultantes (mapas, cuadros, histogramas.).

#### 2.4. Impacto del cambio climático en la biodiversidad

Existe cierta incertidumbre acerca de la tasa y magnitud de los probables cambios inducidos por efecto del cambio climático, en especial a niveles regionales, pero resulta claro que existe el potencial de un impacto significativo en la situación de la flora y fauna en todo el mundo. Hoy en día los análisis sugieren que las distribuciones geográficas actuales de muchas especies serán

climáticamente inadecuadas dentro de un tiempo relativamente corto. Si dichos cambios se hacen realidad, la supervivencia de las especies biológicas dependerá de su capacidad para adaptarse a nuevas condiciones climáticas, o a su capacidad de modificar su distribución geográfica para seguir en climas adecuados (Fragoso, 2003).

Se estima que si las temperaturas suben 1.5 o 2.5°C, el 20 o 30% de las especies de plantas y animales estarán en riesgo de extinción, además de que se provocará cambios en su distribución. Por otra parte, los bosques podrían verse amenazados cada vez más por las plagas y los incendios, volviéndose más vulnerables a las especies invasoras. El riesgo de extinción será probablemente mayor en especies con limitados rangos climáticos, requerimientos restringidos de hábitat y dificultades para regenerarse (CAN, 2007).

Se han documentado múltiples impactos del calentamiento global sobre la biodiversidad; de manera general se han publicado investigaciones que relacionan respuestas de la biodiversidad a cambios de temperatura durante 20 o más años, se ha encontrado que de un total de 500 taxones estudiados, un 80% mostró cambios en sus pautas de migración, distribución e incluso cambios en el tamaño corporal a causa del calentamiento global (IPCC, 2002).

#### 2.4.1. México y el cambio climático

La mayoría de los estudios realizados para México sobre cambio climático y su relación con la vegetación, están más bien dirigidos hacia la investigación del papel que juegan las plantas como fuentes de emisión o secuestro de carbono. En contraste, el estudio de los efectos del cambio climático sobre la vegetación de México, es un tema relativamente poco explorado (Villers y Trejo, 2010).

La evidencia científica sugiere que las especies no se adaptan fácilmente a cambios drásticos y rápidos. Sin embargo CONANP (2010a) establece que México es uno de los pocos países del mundo en donde, teóricamente, podría

ser factible conservar la mayor parte de su biota, a pesar del impacto del cambio climático. Los factores que apoyan esta hipótesis son:

1. La ubicación geográfica de México como área de confluencia y límites de las bioregiones neártica y neotropical determina que muchas especies de flora y fauna se encuentran en sus límites de distribución natural.
2. La variación de las condiciones climáticas estacionales en México posibilita la supervivencia de especies del trópico húmedo originarias de zonas más ecuatoriales y otras especies templadas de afinidad holártica de latitudes boreales.
3. Diversos grados altitudinales posibilitaría la migración y movimiento de especies, las cuales podrían desplazarse de manera horizontal y vertical dentro del paisaje de acuerdo con sus umbrales de tolerancia y adaptación, para mantener su distribución dentro de las zonas climáticas más aptas en respuesta al cambio climático

La mayoría de los estudios que se han realizado en México muestran una tendencia de aumento de temperatura y disminución de la precipitación, trayendo como consecuencia un incremento de la superficie del clima árido (Villers y Trejo, 2010). Entre 1997 y 1998 se presentó en México un incremento de 0.5°C en la temperatura media anual, seguido de un enfriamiento de 0.4°C y un posterior calentamiento rápido de 0.7°C. Respecto a la media anual de las temperaturas máximas, a partir de 1990, se ha rebasado la media histórica de 28.4° C, observándose que los años con mayor incremento en promedio para el territorio nacional son 1995, 1998 y 2007. La media anual de las temperaturas mínimas para el territorio nacional indica una tendencia hacia condiciones menos frías en promedio; a partir de 1990, se rebasó la media histórica de 13.2° C (SEMARNAT-INE, 2009). En el período de 1941 a 2008, la precipitación promedio anual en México fue de alrededor de 776.4 mm. En la mayor parte de México la distribución mensual de la precipitación acentúa la desigualdad en la disponibilidad del recurso, ya que el 80% de la precipitación acumulada mensual se presenta entre mayo y octubre, siendo el resto del año relativamente seco (SEMARNAT-INE, 2009).

En 2006 se realizó un estudio de cambio climático de distribución espacial de varias especies forestales de bosque templado empleando modelos GFDL y HADGEM con escenarios A2 para el año 2050. El análisis de la distribución potencial actual de *Abies religiosa* de esta especie resultó que 88.7% de la superficie nacional es no apta, 7.6% marginal, 3.5% moderado y 0.3% apta. Para el mapa de distribución espacial para el 2050, el oyamel aumentó su categoría de no apto a 9.6%; sin embargo dentro de todas las especies forestales del bosque templado, ésta especie será la menos afectada al disminuir sus condiciones óptimas un 5.0% con respecto a las variables meteorológicas (Gómez *et al.*, 2006).

En el 2007 se llevó a cabo un estudio sobre el comportamiento de la vegetación bajo escenarios de cambio climático en la Reserva de la Biosfera Barranca de Metztitlán, Hidalgo, México. El objetivo fue simular y cuantificar los cambios en las condiciones climáticas en un posible aumento en las concentraciones de GEI en la Reserva. Los modelos empleados fueron GFDL (Geophysical Fluids Dynamics Laboratory) y HADLEY (del Centro Hadley) para los años 2020 y 2050. Los resultados mostraron un incremento para el clima árido del 62.4% bajo los dos modelos. Los climas templados disminuyeron su área 23% en promedio bajo los dos modelos (Gómez *et al.*, 2007b).

En el 2012 se realizó un estudio sobre el cambio de la cobertura forestal del *Abies religiosa* con escenarios de cambio climático en todo el Eje Volcánico Transversal; los resultados obtenidos fueron una disminución para el período 2030 del 69.2%, para el 2060 de 87.6% y para 2090 de 95.5%. Estos resultados se proyectaron para la RBMM; obteniendo que el hábitat adecuado para la mariposa monarca en el 2090 ya no será viable dentro de la reserva (Sáenz-Romero *et al.*, 2012)

De acuerdo a Villers y Trejo (2010) los pastizales, bosques templados y matorrales xerófitos con afinidades templadas, son los tipos de vegetación más sensibles. En el caso de los bosques templados establecidos a lo largo de las cadenas montañosas del país, se reduciría considerablemente, lo cual

implicaría la redistribución de estos bosques o el establecimiento de formas adaptadas a condiciones más secas y cálidas, como es el caso de bosques espinosos y matorrales xerófitos. Los bosques tropicales ampliarían su distribución hacia el norte del país.

## 2.5. Descripción del *Abies religiosa*

### 2.5.1. Distribución geográfica en México

*Abies religiosa* H.B.K. Schltdl. et Cham es el nombre científico del oyamel, también conocido como: abeto, acshoyatl, bansú, pinabete, xolócotl, entre otros (Martínez, 1963). Los bosques de oyamel son típicos de la zona ecológica templada subhúmeda de México. Se distribuye naturalmente desde los 21° en México hasta los 14° Latitud Norte en Guatemala. Se encuentra en las montañas centrales y del sur de México (Eje Volcánico Transversal, Sierra Madre del Sur), y oeste de Guatemala (Anaya, 1962). Su área de distribución natural se encuentra limitada en los estados de Hidalgo, Puebla, Veracruz, Michoacán, Jalisco, Morelos, Tlaxcala, Distrito Federal y Estado de México (Madrigal, 1964).

Las regiones templadas de México ocupan una superficie de 46 millones de ha, equivalente a 23.4% de la superficie nacional (Sánchez *et al.*, 2005). Dentro de estas regiones se encuentran los bosques de oyamel. En la década de los 60 se estimó que estos bosques ocupaban 0.16% de la superficie de México (Flores-Mata *et al.*, 1971). A finales de los ochenta, los relictos de estos bosques representan menos del 0.1% (SEMARNAP, 1998).

### 2.5.2. Características botánicas

Es un árbol monoico, perennifolio de 35 a 40 m de altura, en ocasiones hasta 60 m, y diámetro de 1.00 hasta 1.80 m; fuste recto, cónico con ramas extendidas o ligeramente ascendentes y verticiladas; copa densa, cónica (CATIE, 2000). La corteza es grisácea, áspera, agrietada, dividida en placas irregulares, el grosor total de la corteza varía de 18 a 25 mm, la madera es suave y liviana. Las hojas son simples, alternas, de 20 a 30 mm de largo y de 1 a 1.5 mm de ancho, dispuestas en espiral, lineares, ápice agudo y córneo. Los

frutos son conos cilíndricos de 10 a 16 cm de largo y de 4 a 6 cm de ancho. Las escamas son cuneadas de 28 a 35 mm de largo, ápice redondeado y entero (Manzanilla, 1974).

### 2.5.3. Requerimientos ambientales

#### Clima

Requiere una precipitación media anual superior a los 1,000 mm. Es un árbol muy resistente al frío. La temperatura media de su hábitat varía entre los 7 a 15°C, la mínima es de -20°C con una máxima de hasta 30°C (Rzedowski, 1978, Madrigal, 1964).

#### Topografía

Se encuentra confinado a sitios de alta montaña, por lo común entre 2,400 a 3,600 msnm, pues entre estos rangos se localiza cuando menos el 95% de la superficie que ocupa, en alturas inferiores a los 2,000 msnm presenta enfermedades y plagas (CATIE, 2000). Se encuentra en pendientes muy pronunciadas de 17 hasta 70% (SIRE, 2001), con exposición N, NE, NO, SE, SE, S, E y O, pues influye mucho la presencia y dirección de los vientos húmedos (Madrigal, 1964). Específicamente en la RBMM, el bosque de oyamel se encuentra en altitudes de 2,600 a 3,000, y por debajo de este rango en cañadas protegidas o laderas de exposición norte (Sigala y Campos, 2001).

#### Edafología

Crece en suelos jóvenes (Histosol, Inceptisol, Espodosol). Generalmente profundos, de origen volcánico (andesitas, basaltos o riolitas) de textura limo-arenosa, arcillo-arenosa o arenosa con una pedregosidad de ligera a moderada, granular o en bloques (Gómez, 2002; Anaya, 1962). Con un pH de 5 a 7, y muy ricos en materia orgánica de 0.29 hasta 70%. Prefiere sustratos bien drenados y húmedos la mayor parte del año (Rzedowski, 1978, Madrigal, 1964).

## 2.6. Descripción de la mariposa monarca

El género *Danaus* se encuentra ampliamente distribuido en América, Asia, África, e Indoaustralia, ocasionalmente se ha registrado en Europa. Se encuentra establecida en Australia, Nueva Guinea, Sulawesi, las islas Molucas, el archipiélago de las Filipinas, la isla Cocos, las islas Canarias y las Azores. Ocasionalmente se ha registrado en Europa Occidental: Portugal, Francia, España e Inglaterra, sin constancia de establecimiento (Figura 7) (CONANP, 2010b; Oberhauser, 2004).

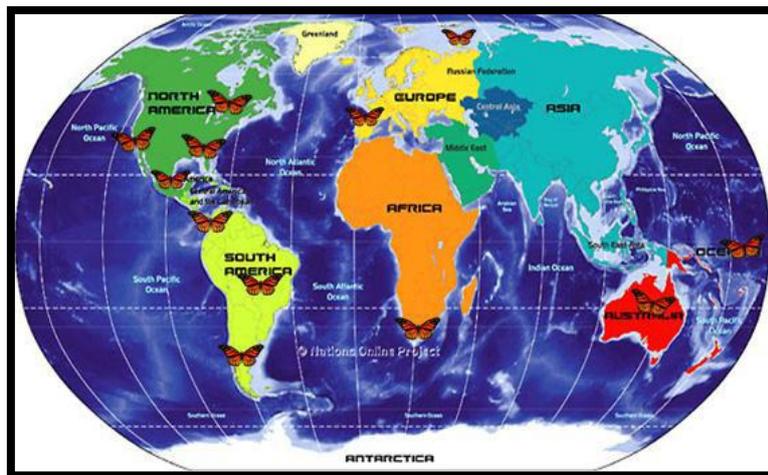


Figura 7. Distribución mundial de *Danaus plexippus plexippus*. Fuente: CONANP, 2010b.

La mariposa monarca (*Danaus plexippus plexippus*) es un insecto del orden Lepidóptera suborden Rhopalocera, se ubica dentro de la familia *Nymphalidae*, y pertenece a la subfamilia *Danainae* (CONANP, 2010b). Se distribuye en Canadá, Estados Unidos y México (CONANP, 2010b, CCA, 2008).

### 2.6.1. Características morfológicas

Tiene tres partes corporales: cabeza, tórax, abdomen. La cabeza se compone principalmente de ojos, antenas y boca. Posterior a la cabeza se encuentra el cuello que se conecta al tórax; formado por pro, meso y metatórax, cada uno lleva un par de patas en la parte ventral. Las patas se conforman por cinco artejos: la coxa, trocánter, fémur, tibia y tarso; la pata termina en unas pequeñas uñas (SEMARNAT, 2010). Las alas son dos delgadas membranas que tienen estructuras tubulares llamadas venas y constituyen un armazón que les da rigidez. Los colores sólidos son dados por escamas pigmentadas provenientes de la dieta de las larvas. El abdomen tiene forma cilíndrica, está

formado por diez segmentos. A ambos lados del abdomen se encuentran los orificios respiratorios o espiráculos. Las hembras suelen tener un abdomen redondeado mientras que en los machos, el abdomen puede ser más delgado o puntiagudo (CCA, 2008).

#### 2.6.2. Ciclo de vida

Se le considera como un insecto holometábolo. Su ciclo de vida comienza con la fase de huevo, el cual es de color amarillo cremoso, con forma de barril y un milímetro de diámetro. En un promedio de tres a cuatro días, la larva eclosiona desde la ovoposición (Oberhauser y Solensky, 2011).

En la segunda fase la larva, se alimenta del envés de la hoja del género *Asclepias* spp. (CONANP, 2010b), de la cual obtiene los cardenólidos. Cuando la larva mide entre tres y cuatro centímetros de largo presenta una coloración en franjas blancas, con finas estrías de color negro y amarillo. Durante esta etapa muda su piel cinco veces. En el momento en que la larva alcanza su máximo crecimiento se cuelga por el cremáster de la parte posterior del abdomen y forma la crisálida (Oberhauser, 1997). La crisálida es gruesa y tiene una forma más o menos oval, su color es verde azulado y presenta una serie de puntos negros y dorados, sufre modificaciones morfológicas (desarrollo de alas y cambio de mandíbulas); esta etapa tiene una duración aproximada de nueve a 15 días (Montesinos, 2003).

Al término de la metamorfosis aparecen las alas color naranja y negro dentro del capullo translúcido, esto marca la salida del adulto de la crisálida. El tiempo de vida de los adultos es aproximadamente igual al que requiere para su desarrollo, es decir, cuatro a cinco semanas para las generaciones de primavera y de verano (CONANP, 2001). Las generaciones de septiembre y principios de octubre dan origen a los adultos de invierno, cuyo período de vida se incrementa hasta seis a siete meses (Alonso y Arellano, 1989).

### 2.6.3. Migración

Las monarcas no pueden sobrevivir largos períodos de temperatura bajo cero, por lo tanto necesitan migrar a lugares menos fríos durante el invierno (SEMARNAT, 2010). Se han identificado tres rutas migratorias: 1) Las mariposas del centro y noreste de los Estados Unidos y del sureste de Canadá, viajan hacia el sur para pasar el invierno en el centro de México; 2) La población del oeste de las Montañas Rocallosas de los Estados Unidos migra a la costa de California; 3) la tercera ruta migratoria también desde la zona de los Grandes Lagos se desplaza hacia la Península de Yucatán (CONANP, 2001).

La migración de la monarca alcanza su momento más importante durante la hibernación en los bosques de oyamel del Eje Neovolcánico Transversal en México (Figura 8) (Solís, 2000). Las monarcas migratorias pueden viajar hasta 129 km por día, y recorrer 4,500 km en un mes de viaje, para hasta llegar a los sitios de hibernación (Rendón *et al.*, 2004). Llegan a la RBMM durante la última semana de octubre y la primera mitad de noviembre permaneciendo en esta región hasta marzo, cuando finaliza la hibernación (Alonso *et al.*, 1997).

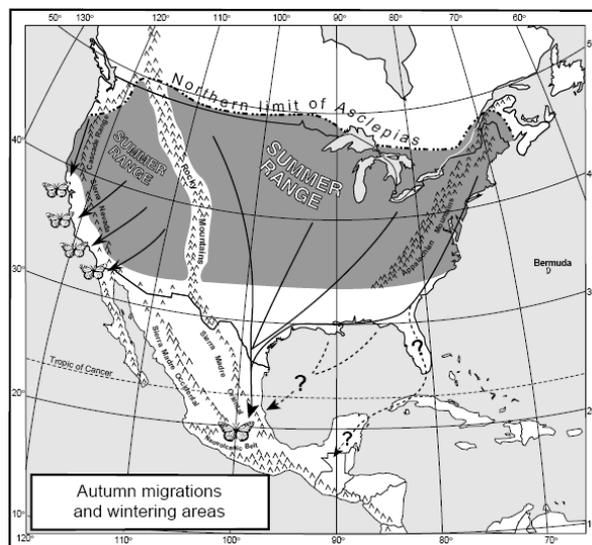


Figura 8. Ruta migratoria a México de la mariposa monarca. Fuente: Brower, 1996.

### 2.6.4. Requerimientos ambientales del hábitat invernal

De la Maza (1995) menciona que las áreas de hibernación principales están en los límites de los estados de Michoacán y México. Se encuentran entre los 19°20' y 19°45' Latitud Norte y 100°10' y 100°200 Longitud Oeste. En la RBMM

y sus alrededores se han documentado 22 sitios con colonias de mariposas (CONANP, 2010b). Sin embargo, sólo 11 de estos sitios se consideran colonias permanentes, seis santuarios dentro del área natural protegida (ANP) y cinco en los alrededores (Slayback y Brower, 2007). Los bosques de oyamel de las zonas altas crean un microhábitat frío que propicia la estabilidad térmica e hídrica necesaria para su permanencia y sobrevivencia (Garduño, 2011). Esto produce en las mariposas monarca un índice metabólico bajo y una actividad reducida de mediados de noviembre a mediados de marzo (Brower, 1996).

Desde mediados de noviembre y hasta mediados de febrero, las colonias de hibernación de la mariposa permanecen estables en los bosques donde originalmente se formaron las agrupaciones (Alonso y Arellano, 1989). Durante la segunda mitad de febrero, cuando la temperatura se incrementa y la humedad disminuye en estos bosques, las mariposas se desplazan pendiente abajo en busca de lugares más húmedos (WWF, 2000). La supervivencia de las monarcas desde noviembre hasta marzo depende del equilibrio entre factores macro y micro climáticos, requiriéndose que el clima sea tan frío para mantener a las mariposas en un estado de diapausa reproductiva, pero no tan frío como para matarlas; lo suficientemente cálido para mantener la integridad de sus grupos y no extremadamente caliente como para resultar una actividad excesiva (Brower, 1995).

Las características ambientales de los lugares donde prefieren hibernar las mariposas monarcas son: 1) altas elevaciones (la mayoría de las colonias se encuentran en altitudes por encima de los 2,750 msnm); 2) proximidad a cursos de agua (la mayoría de los lugares se encuentran a menos de 400m de fuentes de agua permanentes o temporales); 3) pendientes de inclinación moderada (entre 23° y 26°); y 4) orientación de sur a suroeste; 5) temperaturas que fluctúen entre los 3° y 18°C (Bojórquez *et al.*, 2003).

Las mariposas sobrevivientes a la hibernación en México regresan al sur de los Estados Unidos (Figura 9), ahí, las hembras depositan sus huevos, dando lugar a dos ciclos de vida (Oberhauser y Solensky, 2011). Las mariposas de la

segunda generación viajan hasta el centro y norte de los Estados Unidos de América y el sur de Canadá, lugares en los que se reproducen otras tres generaciones de monarcas. La quinta generación, estará integrada por las monarcas que llegarán a México (De la Maza, 1995).

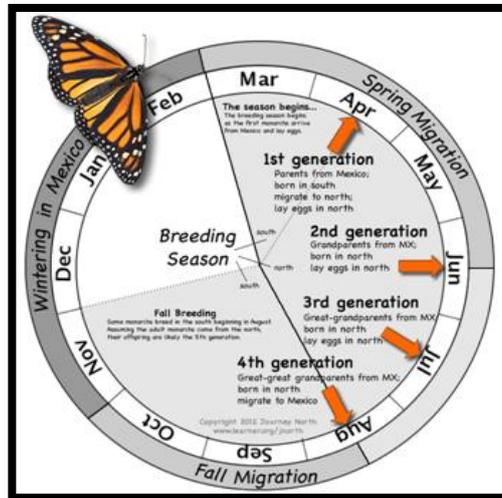


Figura 9. Ciclo anual monarca. Fuente: <http://www.learner.org/jnorth/monarch>. Fecha de consulta: Julio 2012.

## 2.7. Importancia de la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca

La reserva de la mariposa monarca tiene una importancia internacional como el único sitio en que hiberna la mayoría de la población de las mariposas monarca de la parte este de América de Norte por lo cual es considerada patrimonio de la humanidad (WWF, 2000). Los densos bosques de oyamel, con arroyuelos permanentes, generan y mantienen las condiciones microclimáticas para la monarca, lo cual permite una estabilidad térmica e hídrica necesaria para la permanencia y sobrevivencia de las mariposas (Sigala y Campos, 2001).

En el área existen numerosos conflictos ejidales que han incidido en un manejo inadecuado de sus recursos naturales, los principales problemas a los que se enfrenta la reserva son deforestación por incendios forestales, cambios de uso de suelo, tala clandestina, afectaciones por plagas, turismo desorganizado y las afectaciones por cambio climático; es por ello que existe una gran incertidumbre sobre la viabilidad de esta reserva para salvaguardar en el futuro sus componentes bióticos. Algunos estudios predicen que si los fenómenos antes mencionados no se atienden, el declive del fenómeno migratorio será una realidad (Garduño, 2011).

## CAPITULO 3. MATERIALES Y METODOS

### 3.1 Descripción de los componentes biofísicos del área de estudio

#### 3.1.1 Ubicación geográfica del área de estudio

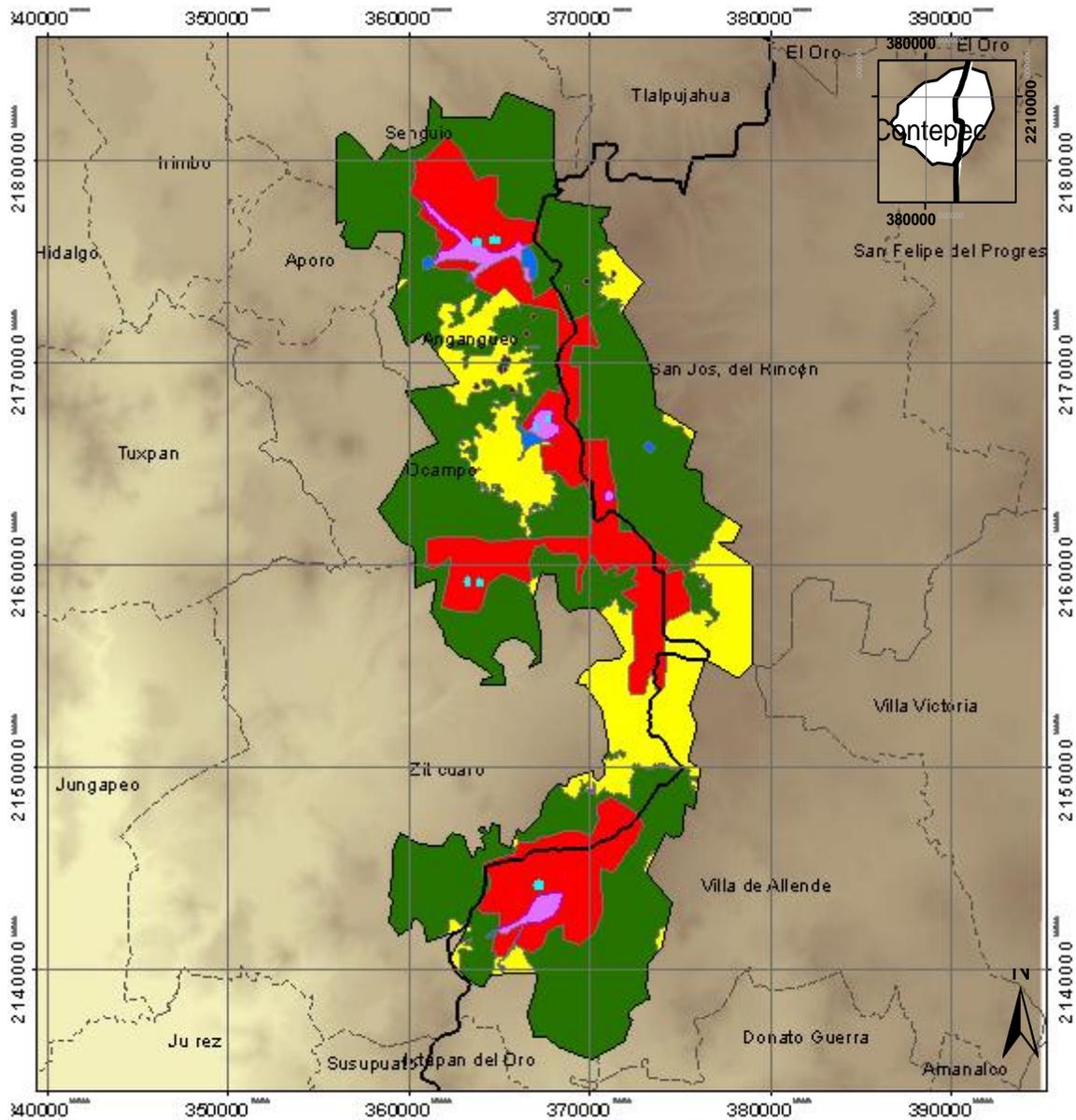
El área de estudio de este trabajo es la RBMM. Se localiza en las estribaciones del Eje Neo-Volcánico, entre los límites de los Estados de México y Michoacán. Es un área que se encuentra dividida en tres zonas, conocidos como "Santuarios", cuyos nombres listados de norte a sur son: "Cerro Altamirano", "Sierra Chincua", "Sierra El Campanario", "Cerros Chivatí-Huacal" y "Cerro Pelón" (Figura 10) (Garduño, 2011).

El área de estudio se encuentra entre las coordenadas: para Altamirano 19° 59' 42" y 19° 57' 07" Latitud Norte y 100° 09' 54"; y 100° 06' 39" Longitud Oeste y para el corredor Chincua-Cerro Pelón son 19° 44' 27" y 19° 18' 32" Latitud Norte y 100° 22' 26" y 100° 09' 07" Longitud Oeste. Tiene una extensión de 56,259.275 ha, divididas en tres zonas núcleo (ZN) con una superficie total de 13,551.445 ha y dos zonas de amortiguamiento de 42,707.830 ha de superficie total (CONANP, 2001).

#### 3.1.2. Descripción de la zona

##### Clima

En general presenta un clima Cw, templado subhúmedo con lluvias en verano, temperaturas medias anuales de 8° a 22°C, precipitaciones promedio de 700 mm hasta 1,250 mm; este tipo de clima cambia en distancias relativamente cortas debido a la presencia de montañas, sierras y relieves escarpados. Se presentan cinco subtipos climáticos: (A)Cw<sub>0</sub>: Semitemplado subhúmedo, (A)Cw<sub>2</sub>: Semitemplado subhúmedo, Cw<sub>1</sub>: Templado subhúmedo, Cw<sub>2</sub>: Templado subhúmedo. Los climas templados C(w<sub>1</sub>) y C(w<sub>2</sub>) se presentan en la mayor parte del territorio de la región, sobre las partes altas, con altitudes que entre los 2,000 y 2,500 m. En las zonas con altitudes mayores a los 3,000 m se tienen condiciones semifrías Cb'(w<sub>2</sub>) (CONANP, 2001).



- Simbología**
- Limite Estatal
  - Municipios
  - Poligonal de la Reserva
- ZONIFICACIÓN**
- Aprovechamiento sustentable agricola
  - Aprovechamiento sustentable de Rec.
  - Asentamientos humanos
  - Subzona de protección
  - Uso publico
  - Subzona de uso restringido
  - Usos especiales
  - Colonias de Mariposa Monarca

Elaborado con base a:

Zonificación de la RBMM CONANP, 2001.

Modelo de elevación digital, resolución 50 m, INEGI.

Monitoreo de colonias de Mariposa monarca.

Proyección UTM Zona 14N.

Figura 10. Ubicación y Zonificación de la Reserva de la Biosfera de la mariposa monarca (RBMM).

## Topografía

La altitud varía de los 2,400 a 3,600 las máximas elevaciones corresponden en la parte norte los cerros Altamirano, 3,320 msnm, Campanario, 3,640 msnm, El Mirador 3,340 msnm, Huacal 3,200 msnm, Chivatí 3,180 msnm, y Los Madroños 3,040 msnm. En la porción sur destacan los cerros Pelón 3,500 msnm y Cacique 3,300 msnm, El Piloncillo 3,300 msnm y La Palma, 3,300 msnm. Predominan las pendientes pronunciadas, más de la mitad de la región presenta desniveles mayores a los 15 grados (CONANP, 2001).

## Relieve

El área natural protegida pertenece a la Provincia Fisiográfica del Eje Volcánico Transversal, que marca el extremo sur de la Altiplanicie Mexicana y la separa de la Depresión del Balsas. El relieve montañoso que caracteriza al área está constituido por rocas volcánicas del Terciario que cubren secuencias metamórficas y sedimentos del Mesozoico, sujetas a una intensa disectación fluvial que origina fuertes pendientes y escasez de depósitos aluviales. Esto indica que el área se encuentra en una etapa de juventud; estas condiciones producen una alta permeabilidad, por lo que las corrientes superficiales se encuentran poco desarrolladas, aunque se presentan en gran cantidad (Cornejo *et al.*, 2003).

## Suelos

Suelos medianamente desarrollados y erosión de ligera a fuerte. La formación de los suelos responde a los procesos de descomposición de materia orgánica, como a la composición litológica de la zona que incluye andesitas, basaltos, riolitas, granitos, esquistos y tobas, lo que determina la presencia predominante de Andosoles, húmico y órtico y en menor extensión Acrisoles y Planosoles, Feozem, Litosoles, Luvisoles Cambisoles, Regosoles y Vertisoles, todos ellos derivados de cenizas volcánicas (CONANP, 2001).

## Hidrología

El aparato volcánico da origen a una red hidrológica exorreica. El parte aguas, con una dirección noroeste-sureste, produce que los escurrimientos de la parte

noreste abastezcan a la subcuenca Cauchi y los de la porción suroeste se incorporan a la cuenca Cutzamala. La Sierra Chincua y la Sierra el Campanario aportan algunas corrientes permanentes. La riqueza hídrica que generan estas sierras alimenta un total de 23 manantiales, ocho presas y numerosos cuerpos de agua (CONANP, 2001).

### Vegetación

La diversidad biológica corresponde a un bosque templado, el tipo de vegetación dominante es el bosque de oyamel, en codominancia con *Pinus* spp., también se encuentra especies de *Quercus*, *Cupressus*, *Alnus*, *Arbutus*, *Salix* y *Prunus*. El estrato arbustivo y el herbáceo se encuentran representados por los géneros *Juniperus*, *Senecio*, *Eupatorium*, *Stevia* y *Archibaccharis*; matorral de *Baccharis* y pastizales. Se tienen registradas 423 especies de plantas vasculares, así como 49 especies de hongos (Ibarra, 2007).

### 3.2. Elaboración de cobertura de uso de suelo y vegetación 2010

Para generar la cobertura de uso de suelo y vegetación se utilizaron imágenes satélite SPOT, se emplearon dos escenas con fecha de junio del 2010. Estas escenas fueron obtenidas de la Estación de Recepción México de la constelación Spot (ERMEXS). Se les realizó la corrección geométrica utilizando el software ERDAS IMAGINE™ 9.1. La corrección consistió en colocar para cada escena 60 puntos de control con ayuda de vectoriales de las cartas topográficas con claves: E14a16, E14a25, E14a26, E14a35 y E14a36 escala 1:50,000 de INEGI. Se procuró tener una distribución uniforme de los puntos de control dentro de la escena y se re-muestreó la misma utilizando el criterio del vecino más cercano.

Para la clasificación de las imágenes se levantaron campos de entrenamiento de bosque de oyamel, con apoyo de un GPS (marca Garmin modelo 60 CSx) y con un error de seis metros. Para otros tipos de uso de suelo y vegetación se utilizaron las imágenes de Google Earth®. Con esta información se generaron las firmas espectrales. La clasificación supervisada se efectuó en el software

ERDAS Imagen™ 9.1. La escala de trabajo de la cobertura de salida fue de 1:50,000.

La verificación de la clasificación se realizó utilizando el uno por ciento de intensidad de muestreo. Se levantaron un total de 100 puntos en toda la zona núcleo de la reserva, los cuales se realizaron en forma aleatoria: 50 fueron visitas en campo (para la clase de bosque de oyamel) y 50 a través de imágenes de Google Earth®. En cada sitio se tomaron datos de coordenadas geográficas, tipo de vegetación y uso de suelo, para ello se hizo uso del geoposicionador satelital (GSP 60 CSx).

### 3.3. Requerimientos ambientales del oyamel y del hábitat invernal de la mariposa monarca

Para obtener las distribuciones espaciales potenciales actual y con escenarios de cambio climático de oyamel y del hábitat de la mariposa monarca se realizó una investigación documental, cartográfica y trabajo de campo, para determinar sus requerimientos climáticos, edafológicos y topográficos.

#### 3.3.1 Requerimientos ecológicos para el desarrollo del *Abies religiosa*

Los requerimientos ecológicos del oyamel se obtuvieron de las siguientes fuentes bibliográficas: Anaya (1962); Martínez (1963); Madrigal (1964); Manzanilla (1974); Rzedowski (1978); Sánchez (1978); Arreguín *et al.* (1979); Ávila (2000); CATIE (2000); SIRE (2001) y Gómez (2002) que se complementaron y precisaron con la información cartográfica.

Para esta última, en el ambiente del SIG ArcMap™ se extrajo del vectorial de uso de suelo y vegetación 2010 el polígono del bosque del oyamel. Posteriormente, a partir de las variables ecológicas requeridas de la especie se emplearon coberturas digitales edafoclimáticas y topográficas (las cuales se describen en el apartado estructuración cartográfica) para extraer su información. Los valores obtenidos de la distribución del árbol de oyamel en la RBMM se presentan en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Valores de las variables de la distribución del *Abies religiosa* en la RBMM.

VARIABLE		MINIMOS	MAXIMOS
<b>Climáticos</b>	Precipitación total anual (mm)	700	1200
	Temperatura media anual (°C)	5	15
	Temperatura mínima anual (°C)	-12	5
	Temperatura máxima anual (°C)	20	9
<b>Edafológicos</b>	Textura	Arcilla	Migajón-arenoso
	pH	4	7
	Materia Orgánica (%)	0.29	70
	Tipo de suelo	Sin andosol	Andosol
<b>Topográficos</b>	Altitud (msnm)	2,240	3,600
	Pendiente (%)	17	70
	Exposición	N, NE, NO, SE, SO, S,E,O	

Con base en la información del Cuadro 2 se definieron tres categorías de aptitud: Alta, Media y Nula (Cuadro 3). El criterio considerado para establecer estas fueron con fundamento en la información obtenida de FAO (1976) donde: La primera categoría se refiere a las áreas en donde se encuentran todos los beneficios y no existe ninguna limitación para la distribución de la especie, se consideran altas; la segunda son sitios con limitaciones moderadamente graves que implican riesgos de degradación se consideran medias; y la tercera son áreas que presentan limitaciones graves al no cumplir los requerimientos de la especie se consideran nulas.

Cuadro 3. Categorías de distribución de *Abies religiosa*.

CATEGORIA DE APTITUD				
	VARIABLE	ALTA	MEDIA	NULA
<b>Climáticos</b>	Precipitación total anual (mm)	900 a 1200	700 a 900	<700
	Temperatura media anual (°C)	5 a 15	15 a 20	<5, >20
	Temperatura mínima anual (°C)	1 a 5	-12 a 1, 6 a 9	>-12, 9 a 15
	Temperatura máxima anual (°C)	9 a 18	18 a 20	>20
<b>Edafológicos</b>	Textura*	Gruesa	Media	Fina
	pH	5 a 6.7	4 a 5, 6.7 a 7	<4, >7
	Materia Orgánica (%)	.20 a 70	-	<0.20
	Tipo de suelo	Andosol	Cambisol, Histosol, Inceptisol,	Otro
<b>Topográficos</b>	Altitud (msnm)	2600 a 3660	2240 a 2600	<2240
	Pendiente (%)	17 a 70	0 a 17, 70 a 128	>128
	Exposición	N, NE, NO, SE, SO, S,E,O		

### 3.3.2 Requerimientos del hábitat invernal de la mariposa monarca

La determinación de las condiciones ambientales del hábitat de la mariposa monarca se consiguieron consultando las siguientes de fuentes bibliográficas: Alonso-Arellano (1989); De la Maza (1995); Brower (1996); Alonso *et al.* (1997); Solís (2000); WWF (2000); Sigala-Campos (2001); Bojórquez *et al.* (2003); Rendón *et al.*, (2004); Oberhauser (2004); Slayback *et al.* (2007); CONANP (2010<sup>a</sup>); SEMARNAT (2010) y Garduño (2011).

Se realizó trabajo de campo para precisar la información de las variables ambientales requeridas. Esto consistió en delimitar con un geoposicionador satelital (marca Garmin 60CSx) las colonias de mariposa monarca en la Sierra Chincua, Cerro Prieto, Cerro Pelón y El Rosario, durante los meses de noviembre a marzo. Adicionalmente, por parte del personal del Área de Investigación de la Reserva de la Biósfera de la Mariposa Monarca, se obtuvieron 20 puntos georreferenciados de colonias de mariposa monarca monitoreados en el año 2011. En el SIG ArcMap™ la información georreferenciada fue utilizada para realizar la caracterización de las condiciones ambientales del hábitat invernal de la mariposa. Para ello se emplearon coberturas espaciales de: precipitación, temperatura máxima, mínima y media (del período que comprende noviembre a marzo), altitud, pendiente y exposición. Con los datos obtenidos se realizó una matriz de requerimientos empleando dos categorías de aptitud: Apta y No Apta (Cuadro 4). El criterio considerado para establecer las categorías fueron: Apta, sitios donde se encuentran las condiciones ambientales ideales para establecimiento de la mariposa y la No Apta áreas que no cumplen con las condiciones.

Cuadro 4. Categorías de aptitud del terreno para el establecimiento hábitat de la mariposa monarca

		CATEGORIA DE APTITUD	
		APTO	NO APTO
<b>Climáticos</b>	Precipitación del período invernal (mm)	<68	>68
	Temperatura media del período invernal (°C)	9 a 12	<9, >12
	Temperatura mínima del período invernal (°C)	0 a 3	<0, >3
	Temperatura máxima del período invernal (°C)	17 a 19	>19
<b>Topográficos</b>	Altitud (msnm)	2819 a 3400	<2819, >3400
	Pendiente (%)	3-87	<3, >87
	Exposición	S, SO,O,NO, N, SE, NE	E

### 3.4. Estructuración cartográfica digital

En función de los requerimientos definidos se procedió obtener la cartografía digital necesaria para determinar la aptitud del terreno.

#### 3.4.1. Cartografía climática

La cartografía climática digital utilizada fue de precipitación, temperatura media, temperatura máxima y mínima en formato raster. Estas se generaron a partir de la información obtenida por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), actualizada al 2003, con una resolución de pixel de 90 m (Díaz, 2003). Para el caso del oyamel se emplearon valores anuales, y para el hábitat de la mariposa se operaron datos para el período de noviembre a marzo.

Con relación a la distribución potencial con escenarios de cambio climático se usaron coberturas de temperatura y precipitación, para los períodos 2030 y 2050, obtenidas por dos métodos: DownScaling y modelo ensamble regional. El primero de ellos, se consiguió aplicando el método estadístico de DownScaling para generar las coberturas en cuestión, a partir de procesos realizados a los MCG de la Atmósfera: CGCM\_2 y HadCM\_3, con escenarios A2 y B2.

El segundo se logró del modelo ensamble regional, obteniendo las variables precipitación y temperatura de la página electrónica <http://zimbra.ine.gob.mx/escenarios/> con escenario A2.

#### 3.4.2. Cartografía edafológica

Las coberturas edafológicas utilizadas fueron: pH, materia orgánica y textura. Estas se obtuvieron a partir de los vectoriales de las cartas edafológicas de INEGI escala 1:50,000 (claves: E14a16, E14a25, E14a26, E14a35 y E14a36). En el Estado de México (en la parte Este de la RBMM) se complementó la información de pH y materia orgánica a partir de una base de datos obtenida del INIFAP, la cual fue elaborada para el área agrícola y obtenida en forma de malla a cada 1,000 m. Los datos se interpolaron en el SIG ArcMap™ 9.3 con el

método de inversa a la distancia al cuadrado (IDW2) con 10 puntos vecinos más cercanos.

#### 3.4.3. Cartografía topográfica

Los componentes de la variable topográfica se generaron a partir del modelo digital de elevación (MED), el cual tiene un formato ráster con una resolución de 50 m; esta se bajó de la página de INEGI: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/Descarga.asp>. El MED fue procesado en el SIG ArcMap™ 9.3 en el módulo *Spatial Analysis*, para obtener las coberturas de altitud, pendiente y exposición

#### 3.5. Modelo de distribución potencial actual y con escenarios de cambio climático del *Abies religiosa* y hábitat de la mariposa monarca

El procedimiento para generar el modelo de distribución potencial actual del *Abies religiosa* y del hábitat de la mariposa monarca, se realizó una reclasificación de las coberturas topográficas, edafológicas y climáticas, de acuerdo con la matriz de aptitud de los requerimientos ambientales. Una vez reclasificadas se aplicó operaciones de Lógica Booleana.

Para obtener la distribución potencial con escenarios de cambio climático del *Abies religiosa* y del hábitat de la mariposa monarca, se emplearon las mismas variables edáficas y topográficas reclasificadas. Con respecto a las variables climáticas se utilizaron las generadas mediante DownScaling con los modelos CGCM\_2 y HadCM\_3, escenarios A2 y B2 y la del modelo ensamble regional, escenarios A2, en los tres se usaron dos períodos 2030 y 2050. Las cuales se reclasificaron de acuerdo a las categorías de requerimientos ambientales oyamel y del hábitat (Figura 11). Los procesos se llevaron a cabo en el módulo de Spatial Analyst del programa ArcMap™ 9.3.

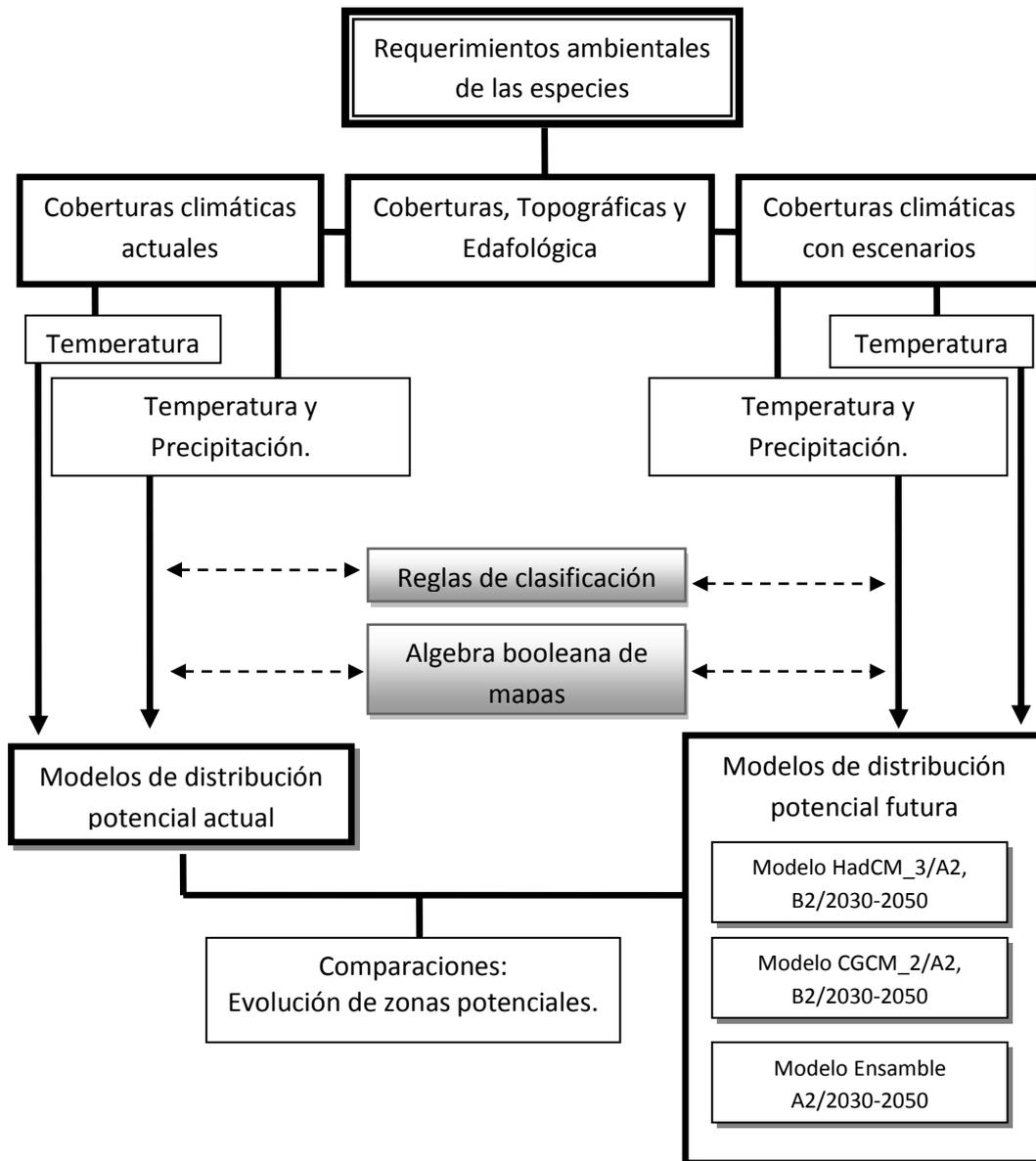


Figura 11. Procedimiento para obtener Mapas de distribución potencial.

Los valores obtenidos de las coberturas de temperatura y precipitación con escenarios de los modelos de cambio climático CGCM\_2 y HadCM\_3, y modelo ensamble regional estuvieron por debajo de los actuales; estos se pueden observar en el Cuadro 5 y 6.

Cuadro 5. Valores de temperatura y precipitación anuales obtenidas para el 2030 y 2050 con los modelos CGCM\_2, HadCM\_3 y modelo ensamble. Escenarios A2 y B2.

Período	Escenario	TMAX °C	TMIN °C	TMED °C	PP mm
	<b>Actual</b>	16.3	1.9	5.7 a 12.6	998
<b>CGCM_2</b>					
<b>2030</b>	A2	26.6	1.1	7.3 a 18.6	820
	B2	25.9	1.3	7.8 a 18.6	821
<b>2050</b>	A2	26.6	1.6	8.0 a 19.2	671
	B2	26.3	1.3	8.5 a 19.0	747
<b>HadCM_3</b>					
		TMAX °C	TMIN °C	TMED °C	PP mm
<b>2030</b>	A2	26.4	1.5	8.5 a 18.8	641
	B2	25.9	1.6	8.2 a 19.1	601
<b>2050</b>	A2	26.7	2.1	8.9 a 18.5	640
	B2	26.6	3.0	9.9 a 19.4	641
<b>Modelo Ensamble</b>					
		TMAX °C	TMIN °C	TMED °C	PP mm
<b>2030</b>	A2	18.5	2.7	10.3 a 17.2	932
<b>2050</b>	A2	17.9	3.6	11 a 18	912

Cuadro 6. Valores de temperatura y precipitación de los meses de noviembre a marzo, obtenidas para el 2030 y 2050 con los modelos CGCM\_2, HadCM\_3 y modelo ensamble. Escenarios A2 y B2.

Período	Escenario	TMAX °C	TMIN °C	TMED °C	PP mm
	<b>Actual</b>	22.9	-0.12	8.1 a 14.5	57
<b>CGCM_2</b>					
<b>2030</b>	A2	24.3	-3.2	5.6 a 15.9	54
	B2	24.2	-3.3	6.6 a 15.7	60
<b>2050</b>	A2	24.9	-3.1	5.8 a 16.4	54
	B2	24.5	-1.8	6.8 a 16.5	65
<b>HadCM_3</b>					
		TMAX °C	TMIN °C	TMED °C	PP mm
<b>2030</b>	A2	25.4	-3.4	7.2 a 16.8	172
	B2	23.8	-2.3	7.9 a 16.3	193
<b>2050</b>	A2	25.3	-1.8	5.8 a 17.1	134
	B2	25.2	-1.1	8.8 a 17.3	199
<b>Modelo Ensamble</b>					
		TMAX °C	TMIN °C	TMED °C	PP mm
<b>2030</b>	A2	23.7	0.3	8.8 a 15.4	71
<b>2050</b>	A2	24.3	0.4	9.4 a 16.2	72

Por lo anterior, al procesar estas coberturas en el modelo de distribución potencial con escenarios de cambio climático de los modelos HadCM\_3 y CGCM\_2, para oyamel y el hábitat invernal de la mariposa monarca, los resultados fueron que desaparecen, esto fue debido a que los escenarios de cambio climático proyectan cambios substanciales por debajo de los actuales. La variable más afectada es la precipitación, pues los escenarios indican que en la región las lluvias disminuirán de manera importante; en la temperatura las modificaciones serán menores. Estas variaciones proporcionan resultados de pérdida total de la distribución de oyamel y del hábitat invernal de la mariposa en los dos períodos y escenarios. Por tal motivo con propósitos de generar un modelo de análisis de la distribución potencial, se tomó la decisión de emplear solo la variable temperatura. En el caso del modelo ensamble se emplearon las dos variables climáticas de temperatura y precipitación, puesto que la precipitación en este modelo a pesar del cambio en el régimen de precipitación con respecto a la actual, se encuentran entre el rango adecuado para la distribución potencial de las dos especies bajo estudio.

## CAPITULO 4. RESULTADOS

### 4.1. Distribución actual del *Abies religiosa*

En la Figura 12 se observa la distribución actual de *Abies religiosa* en la zona núcleo de la reserva de la mariposa monarca. En el Cuadro 7 se observa la superficie de aptitud por categoría; el área con categoría de alta corresponde a 8,088.49 ha (59.65% respecto a superficie total de la zona núcleo) mientras que 5,470.32 ha (40.35%) restante corresponde a nula; la aptitud media no se obtuvo debido a que los valores que corresponden con esta categoría de aptitud se encuentran en la zona de amortiguamiento, fuera de la zona núcleo de la reserva.

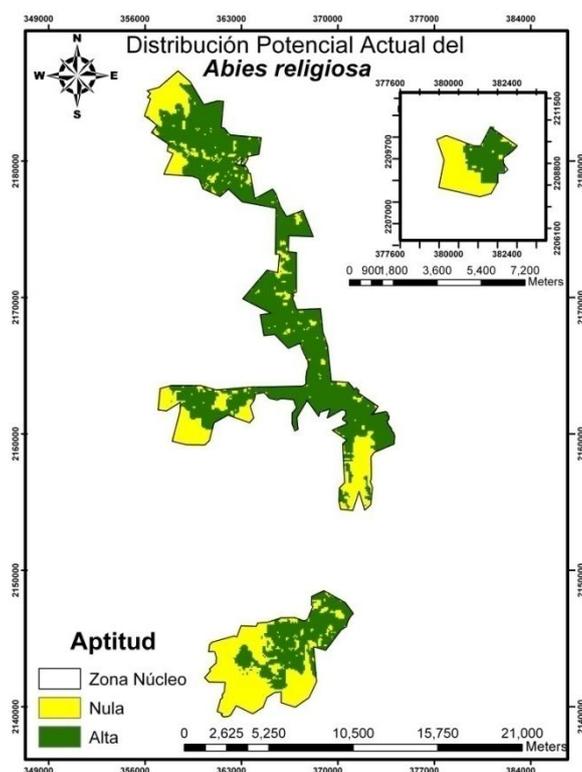


Figura 12. Distribución actual del *Abies religiosa*.

Cuadro 7. Distribución potencial actual del oyamel en la zona núcleo.

Período	Aptitud	Superficie apta (ha)	%*
Actual	Alta	8,088.49	59.65
	Media	-	-
	Nula	5,470.32	40.35

\*Porcentaje con respecto a la superficie total de la zona núcleo.

#### 4.1.1. Coberturas de distribución potencial del *Abies religiosa* con los modelos HadCM\_3 y CGCM\_2

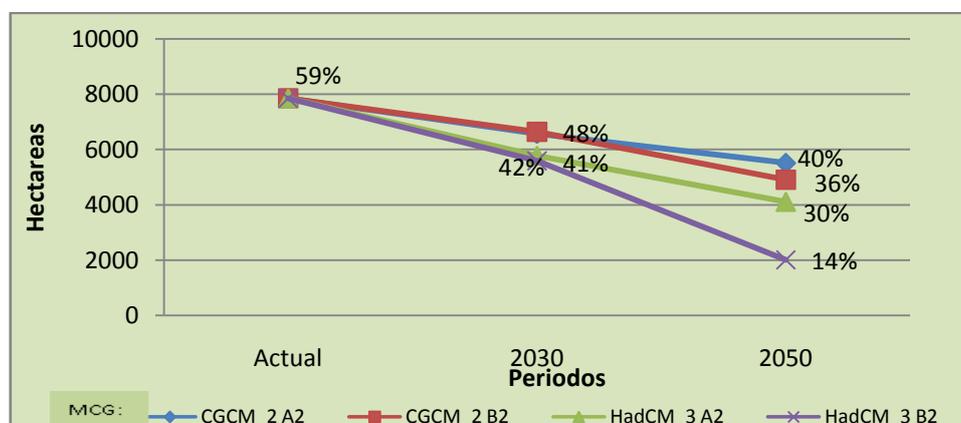
La aptitud del oyamel con escenarios de cambio climático presentó diferentes distribuciones. Se encontraron dentro de la zona núcleo dos categorías de aptitud, alta y nula, la categoría de aptitud media no se encontró dentro del área de estudio, puesto que los valores que se establecen en ella no cumplen con los requerimientos para la especie en la zona núcleo. Para el período 2030, la superficie de aptitud alta en el escenario A2 con el modelo CGCM\_2 varía con una diferencia del 0.49% con respecto del B2 (67.23 ha).

En el modelo HadCM\_3 para el período 2030 la diferencia entre el A2 y B2 en la aptitud alta es de 1.36% (184.68 ha). Para el período 2050, la superficie de aptitud alta en el escenario A2 con el modelo CGCM\_2 varía con una diferencia del 4.48% con el B2 (606.69 ha). En el modelo HadCM\_3 para el período 2050 la diferencia entre el A2 y B2 en la aptitud alta es de 15.51% (2,102.76 ha). Las superficies con aptitud alta se presentan en el Cuadro 8.

Cuadro 8. Distribución potencial futura de *Abies religiosa*.

Período	Escenario	Aptitud	CGCM_2		HadCM_3	
			Superficie (ha)	%	Superficie (ha)	%
2030	A2	Alta	6,573.14	48.47	5,780.97	42.62
	B2	Alta	6,640.37	48.96	5,596.29	41.26
2050	A2	Alta	5,515.29	40.67	4,111.56	30.32
	B2	Alta	4,908.60	36.19	2,008.80	14.81

\*Porcentaje con respecto al total de la zona núcleo.



Grafica 1. Superficie potencial de oyamel actual y con modelos y escenarios de cambio climático.

En relación a cambios de aptitud actual con los escenarios de cambio climático se presentan diferentes configuraciones geográficas. Para el período 2030 con el modelo CGCM\_2 y escenario A2, la superficie de aptitud actual se reduce a no apto fue 18.73% (1,515.35 ha), con el escenario B2 se perdió 17.90% (1,448.12 ha). Con el modelo HadCM\_3 en A2 se redujo 28.53% (2,307.52 ha) y con B2 30.81% (2,492.2 ha) (Figura 13).

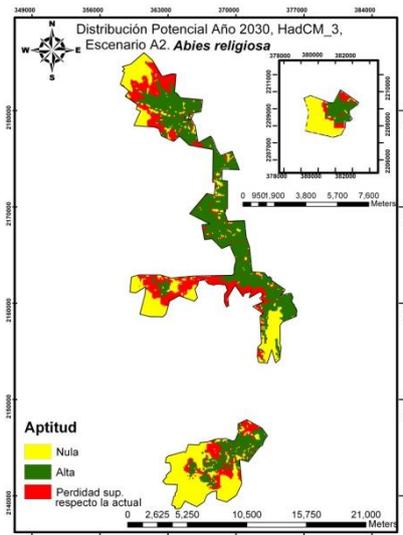


Figura 13. Año 2030, HadCM\_3 Escenario A2.

Para el período 2050, con el modelo CGCM\_2 en el escenario A2 redujo su superficie de aptitud alta 31.81% (2,573.2 ha), con el B2 se perdió 39.31% (3,179.89 ha). En el modelo HadCM\_3 en A2 se perdió 49.17% (3,976.93 ha) y con el B2 75.16% (6,079.69 ha) (Figura 14). Los cambios en superficie se muestran en el Cuadro 9.

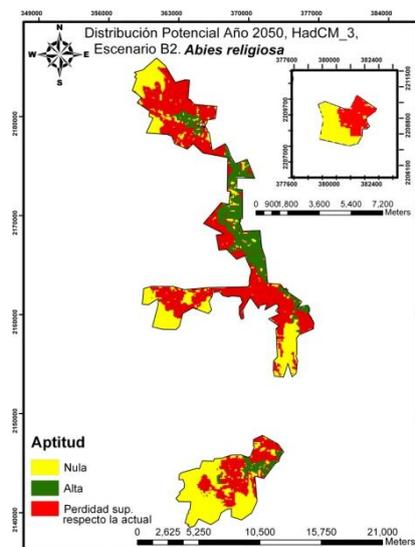


Figura 14. Año 2050, HadCM\_3 Escenario B2

Cuadro 9. Cambio de superficie con los modelos HadCM\_3 y CGCM\_2 para el oyamel.

Período	Escenario	Aptitud	CGCM_2		HadCM_3	
			Pérdida en superficie (ha)	%	Pérdida en superficie (ha)	%
2030	A2	Alta	1,515.35	18.73	2,307.52	28.53
	B2	Alta	1,448.12	17.90	2,492.20	30.81
2050	A2	Alta	2,573.20	31.81	3,976.93	49.17
	B2	Alta	3,179.89	39.31	6,079.69	75.16

\*Porcentaje con respecto a la distribución potencial actual del oyamel

#### 4.1.2. Coberturas de distribución potencial del *Abies religiosa* con el modelo ensamble

La aptitud del oyamel con el modelo ensamble presentó diferentes distribuciones. Se encontraron dentro de la zona núcleo dos categorías de aptitud, alta y nula, la categoría de aptitud media no se encontró dentro del área de estudio. Para el período 2030, la superficie de aptitud alta en el escenario A2 es de 3,034.73 ha lo que representa al 22.42% de la superficie total de la zona núcleo. Para el período 2050 la aptitud alta es de 276.18 ha, lo que representa al 2.04% del área total de la zona núcleo. Es decir que para el período 2030 la superficie que se perderá respecto a la distribución actual será de 62.48% y para el 2050 el 96.57% (Figura 15), la descripción de la distribución en superficies se presenta en el Cuadro 10.

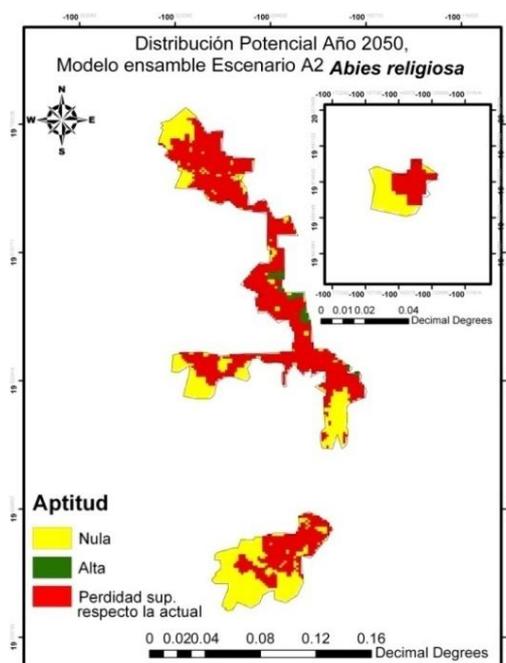


Figura 15. Año 2050, Modelo Ensamble Escenario A2.

Cuadro 10. Distribución potencial del oyamel con modelo ensamble.

Modelo Ensamble			
Superficie alta (ha)	%	Pérdida en superficie (ha)	%*
3,034.73	22.42	4,823.03	62.48
-	-	-	-
276.18	2.04	7,581.58	96.57
-	-	-	-

\*Porcentaje con respecto a la distribución potencial actual del oyamel

#### 4.2. Distribución actual del hábitat invernal de la mariposa monarca

El área con potencial actual donde se encuentran las condiciones para el establecimiento del hábitat invernal de la mariposa monarca se presentan en la Figura 15. Esta corresponde 8,982.53 ha (66.22%) de la superficie total de la zona núcleo (Cuadro 11); de las cuales 6,620.35 ha (48.91%) corresponden a bosque de oyamel, el resto se encuentra sobre bosque de pino-encino y uso agrícola.

Distribución actual en el total de la zona núcleo

Distribución actual sobre oyamel

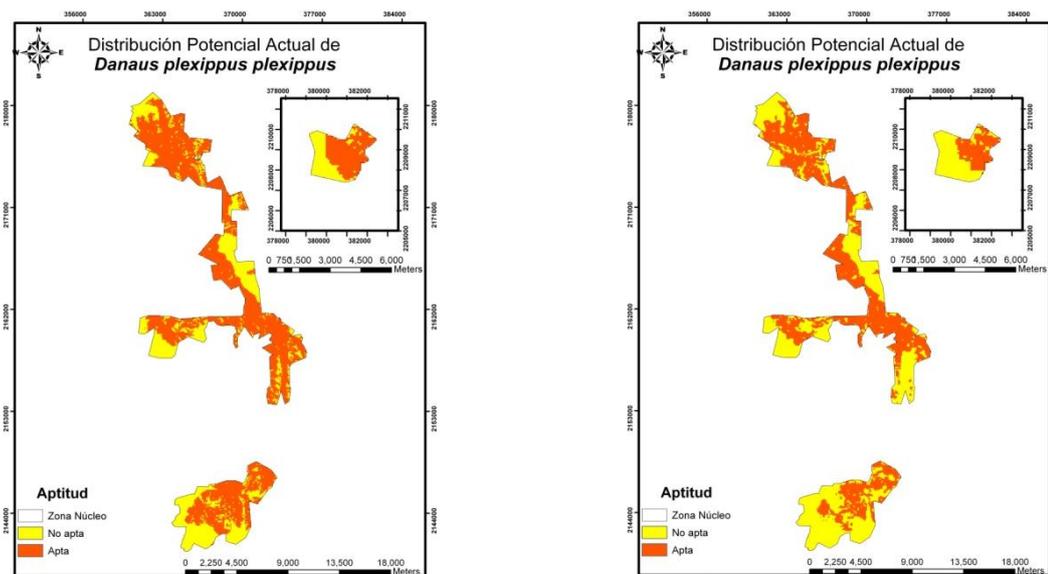


Figura 16. Distribución actual del hábitat en el total de zona núcleo y sobre oyamel.

Cuadro 11. Áreas de distribución actual del hábitat invernal de mariposa monarca.

Período	Aptitud	Superficie (ha)	%*
Distribución potencial actual en el total de la superficie de la ZN	Apto	8,982.53	66.22
	No apto	4,581.29	33.78
Distribución potencial actual en Oyamel	Apto	6,620.35	48.91
	No apto	6,915.52	51.09

\*Porcentaje con respecto a la zona núcleo.

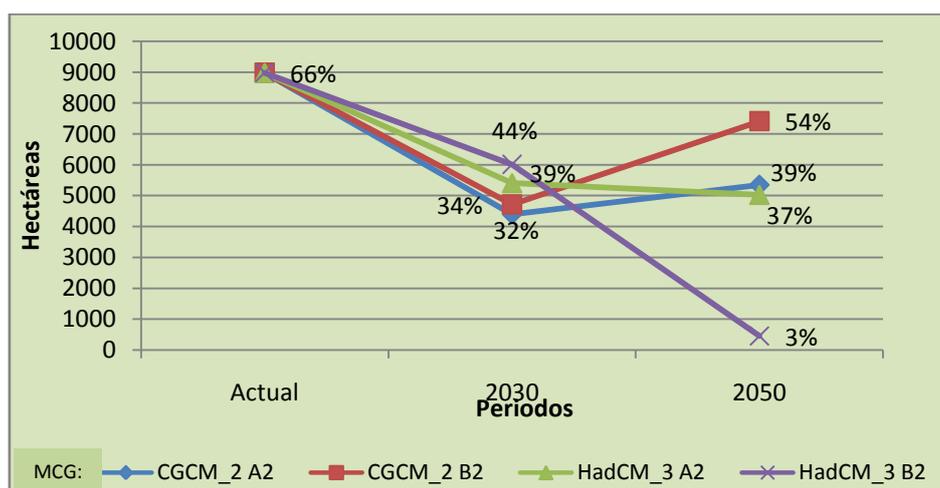
#### 4.2.1. Distribución potencial del hábitat invernal de la mariposa monarca con los modelos HadCM\_3 y CGCM\_2

Las superficies aptas para el hábitat de la mariposa monarca con escenarios de cambio climático en el total de la zona núcleo tienen diferentes distribuciones. Para el período 2030, la superficie apta en el escenario A2 con el modelo CGCM\_2 varía con una diferencia del 2.37% con respecto del B2 (321.2 ha). En el modelo HadCM\_3 para el período 2030 la diferencia entre el A2 y B2 es de 4.46% (604.53 ha). Para el período 2050, la superficie en el escenario A2 con el modelo CGCM\_2 varía con una diferencia del 15.23% que el B2 (2,064.96 ha). En el modelo HadCM\_3 para el período 2050 la diferencia entre el A2 y B2 es de 33.72% (4,571.65 ha). Las variaciones de superficies se observa de manera más detallada en el Cuadro 12 y en la Grafica 2.

Cuadro 12. Superficie apta para el hábitat de la mariposa monarca con los modelos HadCM\_3 y CGCM\_2.

Período	Escenario	Aptitud	CGCM_2		HadCM_3	
			Superficie (ha)	%	Superficie (ha)	%
2030	A2	Apta	4,393.71	32.41	5,404.68	39.87
	B2	Apta	4,714.91	34.78	6,009.21	44.33
2050	A2	Apta	5,347.16	39.45	5,024.25	37.06
	B2	Apta	7,412.12	54.68	452.6	3.34

\*Porcentaje con respecto a la superficie total de la zona núcleo.



Grafica 2. Superficie potencial con diferentes modelos, escenarios y períodos del hábitat invernal de la mariposa monarca.

El área disponible para el establecimiento del hábitat de la mariposa monarca cambiará con respecto a su distribución potencial actual para el total de la zona

núcleo en el período 2030, con el modelo CGCM\_2 en el escenario A2 se estima una pérdida de 4,588.8 ha (51%), con el B2 (Figura 17) de 4,267.62 ha (47.5%). En el modelo HadCM\_3 en A2 3578 ha (39.8%) y con el B2 2,973.3 ha (33.10%).

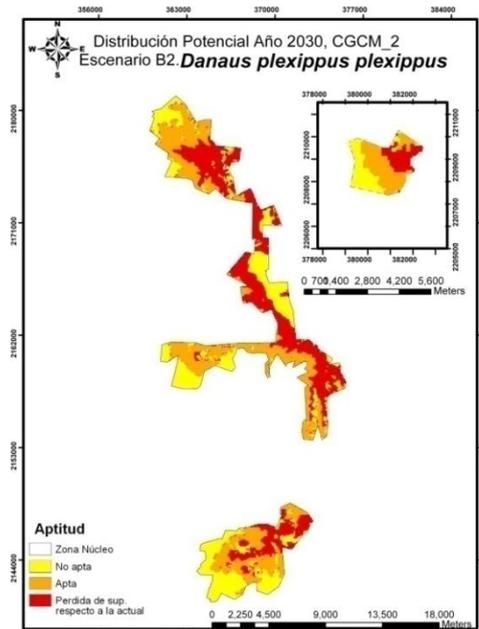


Figura 17. Año 2030, CGCM\_2 Escenario B2.

Para el período 2050, con el modelo CGCM\_2 en el escenario A2 será de 3,635.3 ha (40.4%), mientras que con B2 1,570.4 ha (17.4%). En el modelo HadCM\_3 en A2 (Figura 18) se reducirá su área 3,958.2 ha (44.0%) y con el B2 disminuirán 8,529.9 ha (94.9%). Se observa en el Cuadro 13.

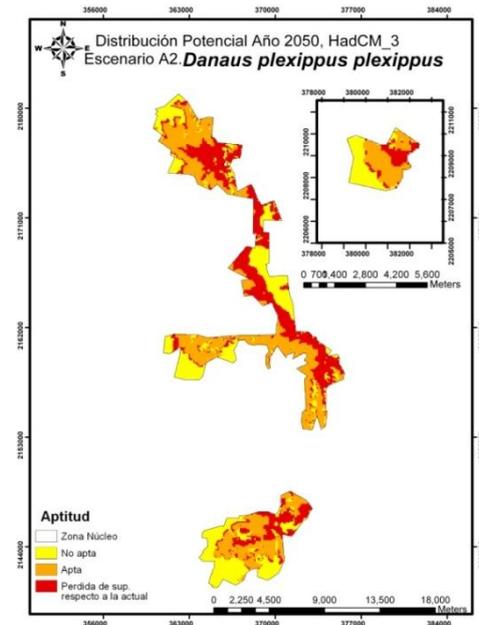


Figura 18. Año 2050 HadCM\_3. Escenario A2.

Cuadro 13. Cambio de superficie con los modelos HadCM\_3 y CGCM\_2 para el hábitat invernal de la mariposa monarca.

Período	Escenario	Aptitud	CGCM_2		HadCM_3	
			Pérdida en superficie (ha)	%*	Pérdida en superficie (ha)	%*
2030	A2	Apta	4,588.82	51.08	3,577.85	39.83
	B2	Apta	4,267.62	47.51	2,973.32	33.10
2050	A2	Apta	3,635.37	40.47	3,958.28	44.07
	B2	Apta	1,570.41	17.48	8,529.93	94.96

\*Porcentaje con respecto a la distribución potencial actual de la mariposa monarca

#### 4.2.2. Distribución potencial del hábitat invernal de la mariposa monarca con modelo ensamble en la superficie total de la zona núcleo

El área disponible para el establecimiento del hábitat de la mariposa monarca para el total de la zona núcleo en el período 2030, con el modelo ensamble será de 4,131.8 ha. (30.51%) y el 2050 3,367.7 ha (24.86%); es decir, la superficie que se perderá respecto a la distribución potencial actual del hábitat será de 4,851 ha. (54%) para 2030, mientras que para el 2050 será de 5,614.83 ha. (62.51%). Los cambios en superficies se detallan en el Cuadro 14.

Cuadro 14. Cambio de superficie con el modelo ensamble para el hábitat invernal de la mariposa monarca.

Modelo Ensamble			
Superficie ocupada (ha)	%	Pérdida en superficie (ha)	%*
4131.8	30.51	4,851.00	54.00
-	-	-	-
3367.7	24.86	5,614.83	62.51
-	-	-	-

\*Porcentaje con respecto a la distribución potencial actual de la mariposa monarca

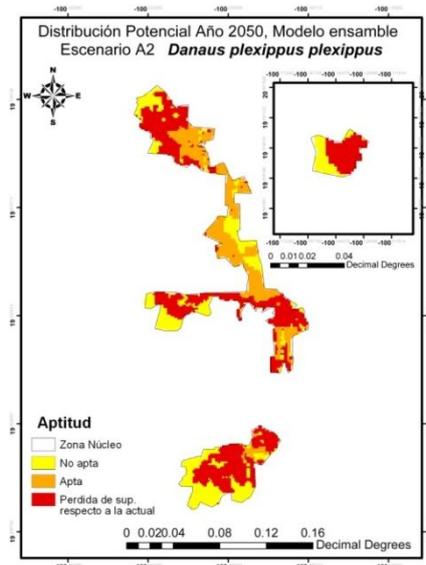


Figura 19. Año 2050, Modelo Ensamble Escenario A2.

#### 4.2.3. Cobertura de zonas aptas del hábitat invernal de la mariposa monarca con los modelos HadCM\_3 y CGCM\_2 sobre bosque de oyamel

Las distribuciones de superficie que serán aptas en bosque de oyamel, para el período 2030, la superficie ocupada en oyamel con el escenario A2 con el modelo CGCM\_2 es de 19.68%, para el B2 (Figura 20) es de 23.58%. En el modelo HadCM\_3 para el período 2030 en el escenario A2 ocupa el 20.88% y 44.09% para el B2.

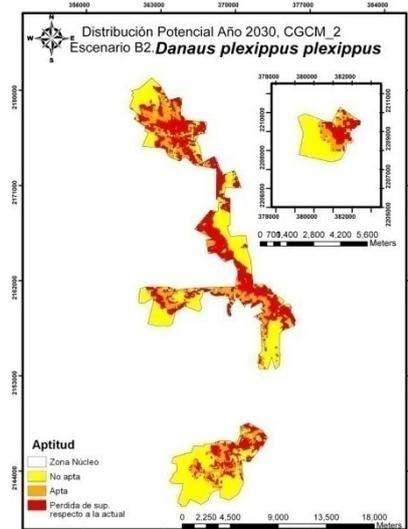


Figura 20. Distribución del hábitat de la mariposa en oyamel. Año 2030, CGCM\_2. B2.

Para el período 2050, la superficie potencial para el hábitat de la mariposa monarca que se encontrara sobre bosque de oyamel será con el escenario A2 con el modelo CGCM\_2 es de 17.39%, para el B2 es de 31.86%. En el modelo HadCM\_3 para el período 2050 en el escenario A2 ocupa el 3.56% y 4.58% para el B2 (Figura 21). Las distribuciones se presentan en el Cuadro 15.

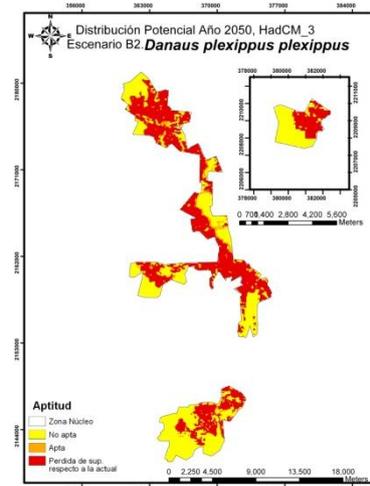
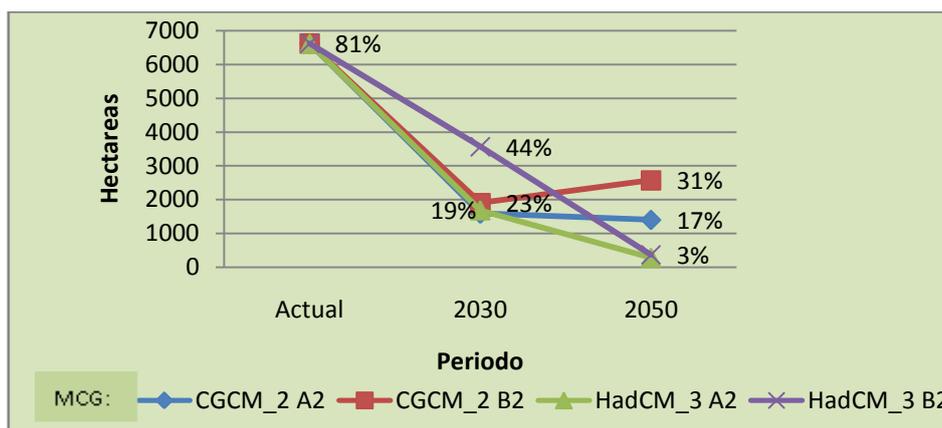


Figura 21. Distribución del hábitat. Año 2050, HadCM\_3 Escenario B2.

Cuadro 15. Áreas aptas para el hábitat de la mariposa monarca en oyamel con los modelos HadCM\_3 y CGCM\_2.

Período	Escenario	Aptitud	CGCM_2		HadCM_3	
			Superficie (ha)	%	Superficie (ha)	%
2030	A2	Apta	1,591.65	19.68	1,688.85	20.88
	B2	Apta	1,907.55	23.58	3,566.43	44.09
2050	A2	Apta	1,406.97	17.39	287.55	3.56
	B2	Apta	2,576.61	31.86	370.17	4.58

\*Porcentaje con respecto a la distribución del hábitat invernal de la mariposa monarca sobre bosque de oyamel en la zona núcleo.



Grafica 3. Superficie apta en bosque de oyamel con escenarios de cambio climático para el hábitat de la mariposa monarca.

El área apta para la mariposa en bosque de oyamel tendrá una reducción en el período 2030, con el modelo CGCM\_2 en el escenario A2 de 75.95%, con el B2 71.18%. En el modelo HadCM\_3 en A2 el 74.49% y con el B2 46.12%. Para el período 2050, con el modelo CGCM\_2 en el escenario A2 78.74%, con el B2 61.08%. En el modelo HadCM\_3 en A2 95.65% y con el B2 del 94.4%. Los cambios en superficie se muestran en el Cuadro 16.

Cuadro 16. Cambio de áreas aptas para el hábitat de la mariposa sobre oyamel con los modelos HadCM\_3 y CGCM\_2.

Período	Escenario	Aptitud	CGCM_2		HadCM_3	
			Pérdida en superficie (ha)	%*	Pérdida en superficie (ha)	%*
2030	A2	Apta	5,028.70	75.95	4,931.50	74.49
	B2	Apta	4,712.80	71.18	3,053.92	46.12
2050	A2	Apta	5,213.38	78.74	6,332.80	95.65
	B2	Apta	4,043.74	61.08	6,250.18	94.40

\*Porcentaje con respecto a la distribución del hábitat invernal de la mariposa monarca sobre bosque de oyamel en la zona núcleo.

#### 4.2.4. Cobertura de zonas aptas del hábitat invernal de la mariposa monarca con modelo ensamble sobre bosque de oyamel

El área disponible para el establecimiento del hábitat de la mariposa monarca sobre el bosque de oyamel en el período 2030, con el modelo ensamble será de 1,851.80 ha (13.67%) y el 2050 0 ha (0%); es decir que la superficie que se perderá respecto a la distribución potencial actual del hábitat será de 4,768.55 ha. (72.03%) para 2030, mientras que para el 2050 será de 6,620.35 ha (100%). Los cambios en superficies se detallan en el Cuadro 17.

Cuadro 17. Distribución potencial del hábitat de la mariposa monarca sobre oyamel con el modelo ensamble.

<b>Modelo Ensamble</b>			
Superficie ocupada (ha)	%	Pérdida en superficie (ha)	%
1,851.80	13.67	4,768.55	72.03
-	-	-	-
0.00	0	6,620.35	100
-	-	-	-

\*Porcentaje con respecto a la distribución del hábitat invernal de la mariposa monarca sobre bosque de oyamel en la zona núcleo.

### 4.3. Discusión

Los modelos climáticos que se emplearon en este estudio muestran variaciones climáticas sustanciales en las proyecciones futuras; los modelos HadCM\_3 y CGCM\_2 presentan valores de temperatura y precipitación muy similares entre ellos puesto que fueron trabajados bajo el mismo método; en el caso del modelo ensamble la escala de trabajo fue mayor, por ello se dan las diferencias entre los modelos, principalmente en la precipitación.

Se esperaba que el escenario A2 (escenario “pesimista”) predijera una modificación climática mayor en el aumento de temperatura, y por consiguiente la reducción del bosque de oyamel se incrementaría. Por el contrario, con el escenario B2 (escenario “optimista”) la variación climática debería ser menor, en consecuencia se esperaba que la reducción en superficie del oyamel no fuera tan trascendente; sin embargo, no se obtuvo esta correspondencia directa. La posible causa de ello se le puede atribuir a la escala de trabajo.

Los modelos empleados predicen modificaciones climáticas que afectarían de manera importante la distribución potencial del oyamel; para el período 2030 con el modelo CGCM\_2 el incremento de la temperatura media anual fue de hasta 6.6°C y con el modelo HadCM\_3 de 6.8°C, y con el modelo ensamble fue de 5.3°C. En cuanto a la precipitación, los modelos demostraron que esta variable tendrá un decremento importante; con el modelo CGCM\_2 para el período 2030 dicha variable tendrá una reducción de 178 mm y para 2050 de 327 mm; mientras que con el modelo HadCM\_3 la disminución de la precipitación para el 2030 será de 397 mm y para 2050 de 358 mm. Ante estos cambios reduccionistas de la precipitación se indica una reducción total de bosque de oyamel, así como modificaciones importantes en el patrón para el establecimiento de las colonias de la mariposa monarca. En el caso del modelo ensamble regional habría una disminución en la precipitación de 66 mm para 2030 y para el 2050 de 86 mm, indicando una reducción del bosque.

Ante esta situación de reducción total del bosque de oyamel y del hábitat de la mariposa monarca con los escenarios de cambio climático de los modelos HadCM3 y CGCM\_2 desde el primer periodo, los resultados del modelado de

las distribuciones potenciales con cambio climático fueron realizados sin tomar en cuenta la variable precipitación.

Para el oyamel la reducción en superficie, para el período 2030 será mayor con el modelo HadCM\_3 escenario B2 (30%); para en el 2050 se predice una mayor reducción bajo el mismo modelo y escenario (75%). Los resultados del modelo ensamble regional demostraron que si se emplean las variables temperatura y precipitación, la cobertura del bosque de oyamel tendrá una mayor reducción respecto a los modelos HadCM\_3 y CGCM\_2. Con el modelo ensamble bajo el escenario A2 se predice una reducción para el 2030 del 62.48% y para el 2050 de 96.57%. Es importante resaltar que el modelo ensamble sólo cuenta con el escenario A2 y que por lo tanto solo es posible compararlo con un escenario.

El estudio realizado por Gómez *et al.* (2006) reflejó que el *Abies religiosa* reducirá su categoría de aptitud optima un 2% si se disminuyen sus condiciones climáticas un 5.0% con respecto a las variables meteorológicas actuales. En el caso de este proyecto, la precipitación tendrá una disminución del 60%; por lo cual se esperaría una reducción proporcional que sería del 24%; en este trabajo se obtuvo una reducción del 23% (promedio de los modelos).

Los datos obtenidos en este proyecto también se compararon con el estudio realizado por Gómez *et al.* (2007b); en el cual se proyecta que los climas templados disminuirán su área 23% en promedio, para el caso de la RBMM las proyecciones indican que habría una reducción del bosque de oyamel de 23%.

Sáenz-Romero en su estudio realizado para el Eje Neovolcánico Transversal encontró que para el 2030 los bosques de oyamel tendrán una reducción del 69.2% y para el 2060 del 87.6%; estos valores serían proporcionales a las reducciones del bosque de oyamel que se esperan con el modelo ensamble escenario A2.

Las variaciones climáticas antes mencionadas indicarían que el incremento de la temperatura y disminución de la precipitación estarán estresando el bosque de oyamel, haciéndolo más susceptible a plagas y enfermedades, ocasionando una muerte gradual del bosque. Garduño (2011) señala que las afectaciones por el cambio climático ya son evidentes y los abetos de la RBMM presentan muerte regresiva atribuyéndole este problema principalmente al estrés hídrico que está sufriendo la zona.

Para evitar que los daños por el cambio climático sean severos se recomienda a los tomadores de decisiones sustituir gradualmente los bosques de oyamel que presentan muerte regresiva en la zona núcleo de la RBMM por otra especie más resistente al calor y a menor humedad. Sáenz-Romero (2012) recomienda emplear *Picea martinezii* ya que las proyecciones climáticas futuras en la reserva indican que las condiciones serían las adecuadas para esta especie. Se sugiere realizar plantaciones de árboles de oyamel en sitios en donde para el año 2030 y el 2050 el clima sería el adecuado (altitudes más elevadas), es decir, realizar una migración asistida, esto debido a que en estudios anteriores realizados en Europa se ha encontrado que las especies han tenido un desplazamiento altitudinal de 65 m, cuando, en realidad, un cambio de 150 m sería necesario para compensar el aumento de la temperatura media que se produciría, por lo cual no se puede esperar una posible respuesta de la especie al cambio climático.

En el caso del hábitat invernal de la mariposa monarca, en el período 2030 modelo CGCM\_2 la temperatura media tendrá un aumento de 2 °C con respecto a la actual, mientras que con el modelo HadCM\_3 el incremento será de 2.8 °C y con el modelo ensamble de 1.7 °C. La temperatura mínima tendrá cambios sustanciales al llegar hasta -3.3°C para el 2030 y -1.8 para el 2050 con los modelos HadCM\_3 y CGCM\_2, con el modelo ensamble seguirá manteniéndose para los dos periodos. Con respecto a la precipitación con el modelo CGCM\_2 y ensamble, no habrá cambios respecto a la actual; mientras que con el modelo HadCM\_3 aumentará considerablemente llegando hasta los 193 mm para el período 2030 y a los 199 mm para el 2050. Es por ello que

para modelar la distribución de la mariposa monarca tampoco se empleó la variable de precipitación con los modelos HadCM\_3 y CGCM\_2, mientras que con el modelo ensamble sí. El motivo por el que no se empleó la precipitación es que las condiciones climáticas que predicen los modelos para la distribución futura indican que existirán áreas totalmente desfavorables para el establecimiento de su hábitat; debido a que su hábitat se restringe a  $-4^{\circ}\text{C}$  si las mariposas se encuentran mojadas (Brower, 1996) teniendo una mortalidad del 50%. En 1992, el clima lluvioso durante enero y febrero seguido de bajas temperaturas mató a más del 80% de las mariposas en el área de invernación La Herrada (Brower, 1996) por lo cual las variaciones climáticas con los escenarios estarían representando un clima equiparable al mencionado si se emplea la precipitación.

Para el hábitat invernal de la mariposa monarca las coberturas de distribución actual reflejan que las condiciones climáticas para el establecimiento de su hábitat se encuentran en lugares con bosque de oyamel, así como en sitios donde hay bosque de pino-encino, y uso agrícola. Se encontró que los sitios aptos para su hábitat en la zona núcleo, corresponde en oyamel a 6,620.35 ha (48% con respecto a la superficie total de la zona núcleo), mientras que a otros tipos de vegetación se encuentran en 2,362.18 ha (17.31%). Debido a los resultados de distribución potencial actual, se generaron mapas con dos criterios diferentes, el primero tomando en cuenta el establecimiento del hábitat de la mariposa en el total de la superficie de la zona núcleo, y el segundo considerando su establecimiento sólo sobre bosque de oyamel (CONANP, 2010b).

Para el período 2030 se pronostica una mayor reducción en el total de la zona núcleo con el modelo CGCM\_2 escenario A2 (51%); en el 2050 la reducción será mayor con el modelo HadCM\_3, con el escenario B2 (94.9%). La superficie disponible para su hábitat sobre el oyamel, para el período 2030 el cambio será mayor con el modelo CGCM\_2 escenario A2 (75.95%); en el 2050 con el modelo HadCM\_3, con el escenario A2 (95.68%). En el caso del modelo ensamble regional en la superficie total de la zona núcleo se predicen cambios

considerables en la superficie respecto a la distribución potencial del hábitat; para el año 2030 con el escenario A2 se obtuvo reducción del 54% y en el período de 2050 será del 62%. En cuanto la reducción que habrá sobre la distribución potencial futura sobre el bosque de oyamel, para el 2030 será de 72% y para 2050 del 100%.

Los resultados anteriores demuestran que las condiciones climáticas disponibles para el hábitat de la mariposa monarca se reducirán gradualmente a medida que el bosque de oyamel se reduzca. En el estudio de Sáenz-Romero (2012) se sugiere que conforme el bosque de oyamel desaparezca la mariposa monarca no tendrá la misma ruta migratoria en la RBMM.

En este sentido se plantea que si se desea conservar el fenómeno migratorio de la mariposa monarca es necesario tomar medidas inmediatas, se recomendaría realizar plantaciones forestales con otras especies que sean adecuadas para el clima futuro, la interrogante es saber si es posible que la mariposa se adapte a nuevas especies arbóreas; esta propuesta estaría encaminada a que la mariposa monarca ya está llegando a otros sitios en México (Toluca y Guadalajara). Es importante determinar si la mariposa depende del oyamel o de una especie con cobertura foresta suficiente para protegerla de la lluvia y heladas. La realidad es que las proyecciones futuras son desfavorables para el establecimiento de la mariposa monarca en la RBMM; por lo que se deben de tomar medidas inmediatas si no se quiere perder el fenómeno migratorio a la RBMM al no haber sitios disponibles para su establecimiento.

#### 4.4. Conclusiones

Utilizando los modelos DownScaling o el regional se determinó que las coberturas obtenidas con escenarios de cambio climático demuestran una reducción progresiva respecto a la distribución actual del bosque de *Abies religiosa* y del hábitat invernal de la mariposa monarca.

Respecto a los dos modelos DownScaling, usando la variable de temperatura en el modelo HadCM\_3 bajo el escenario B2 prevé una mayor reducción de bosque de oyamel para 2030 y 2050.

Para el hábitat de la monarca, el modelo CGCM\_2 bajo el escenario A2, prevé una reducción alta para el período 2030, para 2050 el cambio será mayor con el modelo HadCM\_3 escenario B2.

Conjuntando las variables precipitación y temperatura, el modelo ensamble escenario A2 prevé una mayor reducción en bosque de oyamel y hábitat de la mariposa que los modelos DownScaling para 2030 y 2050.

Las proyecciones climáticas futuras de temperatura fueron más precisas con DownScaling que el modelo ensamble; puesto que las primeras fueron validadas para cada periodo y cuentan con una resolución de celda de 30m mientras que el ensamble es una interpolación cada 5 km

Con la precipitación no es posible decir cual método fue el más adecuado para proyecciones futuras.

La precipitación será determinante para la supervivencia del bosque de oyamel y para el establecimiento de las colonias de la mariposa; por consiguiente, si la variable se comporta como lo suponen las proyecciones, la muerte gradual del bosque será una realidad y no existirán áreas disponibles para el establecimiento de las nuevas colonias, dentro de la zona núcleo de la RBMM.

#### 4.5. Recomendaciones

Continuar con la georreferenciación de colonias faltantes que se encuentran dentro de la zona núcleo, con el fin de conocer los cambios climáticos de las colonias de la mariposa monarca de octubre a marzo.

Georeferenciar las colonias que se encuentran fuera de la zona núcleo, como las de Santuario Cerro del Amparo, Palomas, Piedra Herrada, Los Azufres y Mil Cumbres con el fin de caracterizar ambientalmente estos sitios y determinar si son más amplias sus requerimientos de aptitud para el establecimiento de su hábitat.

Monitorear colonias que se encuentren en otros sitios de México diferentes a los de la RBMM para conocer si sus requerimientos están cambiando a una posible respuesta al fenómeno climático.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Aguirre C., L. M. y C. Chamba L. 2010. Patrones de comportamiento de 10 especies vegetales del páramo del Parque Nacional Podocarpus ante escenarios de cambio climático. Tesis de Ing. Forestal. Área Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables. Universidad Nacional de Loja. Loja, Ecuador. 92 p.
2. Alonso A., M. y A. Arellano G. 1989. Mariposa Monarca: Su hábitat de hibernación en México. Universidad Nacional Autónoma de México, Monarca A.C. Rev. Cien. No. 15. México, D.F. p 6-11.
3. Alonso A., M., E. Rendón S. y E. Montesinos P. 1997. Realidades energéticas de la mariposa monarca. Debate. (48): 48-49.
4. Amador J., A. y E. Alfaro J. 2009. Métodos de reducción de escala: aplicaciones al tiempo, clima, variabilidad climática y cambio climático. Rev. Iberoamericana de Economía Ecológica. (11):39-52.
5. Anaya L., A. L. 1962. Estudio de las relaciones % la vegetación, el suelo y algunos factores climáticos en seis sitios del declive occidental del Iztaccihuatl. Tesis. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 74 p.
6. Arab A., Hooten, M.B., Wikle, C.K. 2006. Hierarchical spatial models. Department of Statistics, University of Missouri-Columbia, Utah State University. 8 p.
7. Ávila B., C.H., 2000. Ecología poblacional de *Abies hickelii* en el Pico de Orizaba, Veracruz, Colegio de Posgraduados. Informe Final SNIB-CONABIO proyecto No. L172. México, D.F. 97 p.
8. Bojórquez T., L. A., L. Brower P, G. Castilleja, S. Díaz, S. Sánchez-Colón, P. Gómez-Priego, G. Alcantar, D. Melgarejo, Solares M., Gutiérrez L., Juárez M., Hernández M. and Calvert W. 2003. Mapping expert knowledge: Redesigning the monarch butterfly reserve. Conservation Biology. (17). 367-379 p.
9. Brower L. 1995. Para comprender la migración de la mariposa Monarca. Departamento de Zoología, Universidad de Florida. Gainesville, Florida. 87 p.

10. Brower L. 1996. Monarch butterfly orientation: missing pieces of a magnificent puzzle Departamento de Zoología, Universidad de Florida. Gainesville, Florida p 93-103.
11. Buzai D. 2000. La exploración geodigital. Lugar Editorial S.A. Buenos Aires, Argentina. 180 p.
12. Comunidad Andina (CAN). 2007. Panorama del cambio climático en la Comunidad Andina. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Agencia Española de Cooperación Internacional. Lima, Perú 66 p.
13. Cano R., F. López J., A. Cofiño S., J. Gutiérrez M. y M. Rodríguez A. 2001. Aplicación de métodos de clasificación al downscaling estadístico. V Simposio Nacional de Predicción. Editorial INM Disponible en: [www.ecmwf.int/research/demeter/news/.../C12-SAN Downscaling](http://www.ecmwf.int/research/demeter/news/.../C12-SAN_Downscaling). Fecha de consulta Mayo 2012.
14. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). 2000. *Abies religiosa* H.B.K (Schl. Et. Cham). Nota Técnica Sobre manejo de semillas forestales N° 108. Julio. Turrialba, Costa Rica. p.2.
15. Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA). 2008. Plan de América del Norte para la conservación de la Mariposa Monarca. Informe de proyecto. Montreal, Canadá. 60 p.
16. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). 2001. Programa de manejo Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. México. 140 p.
17. CONANP. 2010a. Estrategia de cambio climático para áreas protegidas. SEMARNAT. México, D.F. 25 p.
18. CONANP. 2010b. Monitoreo de las colonias de hibernación de la mariposa monarca (*Danaus plexippus*) en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. Disponible en: <http://www.conanp.gob.mx/acciones/fichas/mariposa/info/info.pdf> Fecha de consulta: Septiembre 2011.
19. Conde, C. y C. Gay G. 2008. Guía para la Generación de Escenarios de Cambio Climático a Escala Regional. Primera versión. Centro de Ciencias de la Atmósfera. UNAM. México, D.F. 105 p.

20. Cornejo T G., A. Casas, B. Farfán, J. Villaseñor y G. Ibarra Manríquez. 2003. Flora y vegetación de las zonas núcleo de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, México. Boletín de la Sociedad Botánica de México. No. 73. México, D.F. p. 43-62.
21. Davison A. C. 2003. Statistical Models. Department of Mathematics. Cambridge University Press. Switzerland. p. 1-57.
22. De la Maza E., 1995. La monarca del vuelo. Revista Ciencias UNAM (37) 4-18.
23. Del Valle H., F. 2008. Controversias y tendencias de la modelación cartográfica ambiental. In M.P. Cantú, A.R. Becker y J.C. Bedano (Eds.), EFUNARC. Evaluación de la Sustentabilidad Ambiental en Sistemas Agropecuarios. Río Cuarto, Córdoba. p. 89-96.
24. Delgado T., C. 2008. Evolución de la Diversidad Vegetal en Ecuador ante un Escenario de Cambio Global. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Ciencias Biológicas. Departamento de Biología Vegetal I. 303 p.
25. Delgado T. y D. Suárez D. 2009. Efectos del cambio climático en la diversidad vegetal del corredor de conservación comunitaria Reserva Ecológica El Ángel bosque protector golondrinas en el norte del Ecuador. Ecología Aplicada. (8):37-36.
26. Díaz P., G. 2003. Reporte Anual de Investigación e Innovación Tecnológica. 2007. INIFAP.
27. Duque M., 2008. Modelación cartográfica hidrológica de la cuenca hidrográfica del Río La Chimba para determinar la potencialidad del aprovechamiento del recurso agua mediante herramienta SIG en la cuenca y en el área de influencia del proyecto de riego Cayambe - Tabacundo. Tesis de Ingeniería. Escuela Politécnica del Trabajo. Sangolquí, Ecuador. 246 p.
28. Eastman J. R. 2003. Guía para SIG y procesamiento de imágenes. IDRISI Kilimanjaro. Manual versión 14.0 Clark Labs. Clark University. Worcester, MA.USA. 312 p.
29. Environment Canadá (EC). 2010a. La segunda generación Junto modelo climático global. Disponible en:

<http://translate.google.com.mx/translate?hl=es&langpair=en|es&u=htt>

Fecha de consulta: Enero 2010.

30. Environment Canada. 2010b. Climate Modelling and Analysis. Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis. Disponible en: <http://www.ec.gc.ca/ccmac-cccma/>. Fecha de consulta: Enero 2010.
31. Flores-Mata G., J. Jiménez-López, X. Madrigal-Sánchez, Moncayo-Ruiz F. y Takaki-Takaki F. 1971. Memoria del mapa de tipos de vegetación. México, D.F. 59 p.
32. Fragoso I., L. 2003. Estimación del contenido y captura de carbono en biomasa aérea del predio "Cerro Grande" municipio de Tancitaro Michoacán. Tesis de licenciatura. Facultad de Agrobiología. Morelia, Michoacán. 77p.
33. Fundación para la Investigación del Clima (FIC). 2011. Taller de formación en escenarios de cambio climático y aplicaciones meteorológicas operativas. Managua, Nicaragua. 133 Diap.
34. Gago C., G. y M. Serrano C. 2002. Nuevas herramientas para la construcción de organización territorial en función del transporte. Papeles de Geografía, Núm. 36. Universidad de Murcia. Murcia, España. P. 59-80.
35. Garduño B. 2011. Diagnóstico Fitosanitario Forestal en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). Estado de México. 106 p.
36. Giorgi, F. 2008. Regionalización de la información sobre el cambio climático para la evaluación de impactos y la adaptación a los mismos. Boletín de la Organización Meteorológica Mundial. (57), 86-92. Disponible en: [http://www.wmo.int/wcc3/bulletin/57\\_2\\_en/documents/giorgi\\_es.pdf](http://www.wmo.int/wcc3/bulletin/57_2_en/documents/giorgi_es.pdf)  
Fecha de consulta Mayo 2012.
37. Gómez P. 1992. Los sistemas de información geográfica. Su importancia y su utilidad en los estudios medioambientales. Cuadernos de Sección. Historia-Geografía (20): 455-465

38. Gómez R. 2002. Estado del conocimiento de *Abies religiosa*. Tesis Ingeniería Universidad Autónoma de Chapingo. México. 450 p.
39. Gómez D., A. Monterroso R., A. Tinoco R, L. Toledo M. 2006. Cuarta comunicación nacional de México ante la convención marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Sector forestal. Informe Técnico. México, D.F. 93 p.
40. Gómez D., A. Monterroso R. y A. Tinoco R, 2007a. Distribución del cedro rojo (*Cedrela odorata*) en el Estado de Hidalgo, bajo condiciones actuales y escenarios de cambio climático. Instituto de Ecología. (13):29-49
41. Gómez D., A. Monterroso R., A. Tinoco R y J. López G. 2007b. Comportamiento de la vegetación bajo escenarios de cambio climático en la reserva de la Biosfera Barranca de Metztitlán, Hidalgo, México. Departamento de Suelos, Universidad Autónoma de Chapingo, Instituto de Geografía, UNAM. (11): 61-69p.
42. Hardy J., T. 2003. Climate change; Causes, effects and solutions. Wiley, Chichester. 247 p.
43. Henderson-Sellers, A. y McGuffie, K. 1990. Introducción a los modelos climáticos. Ediciones Omega, S.A. España. 213p.
44. Henderson-Sellers, A. y McGuffie, K. 2005. A climate modelling primer. 3 ed. John Wiley and Sons. E.U. 280p.
45. Ibarra G., M. 2007. Inventario florístico de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, México. Universidad Nacional Autónoma de México Centro de Investigaciones en Ecosistemas. Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. BK013. México, D. F. 13 p.
46. Panel Intergubernamental de expertos sobre cambio climático (IPCC). 1996. La Ciencia del Cambio Climático. Contribución del Grupo de Trabajo I al Segundo Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático Cambridge, Reino Unido. 572 p.
47. IPCC. 1997. Introducción a los modelos climáticos simples utilizados en el segundo informe de evaluación del IPCC. Houghton J., Meira G., Griggs D., Maskell K. (Eds.). Ginebra, Suiza. 60 p.

48. IPCC. 2001. Cambio climático: Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Tercer informe de evaluación. Resumen para responsables de políticas. OMM-PNUMA. Ginebra, Suiza. 101 p.
49. IPCC. 2002. Cambio climático y biodiversidad. Documento técnico V. Gitay H., Suárez A., Watson R. y Dokken D. (Eds.). OMM-PNUMA. Ginebra, Suiza. 93 p.
50. IPCC, 2005. Bases de datos del IPCC (física del clima) en internet. 0 Introducción a los modelos Climáticos. Disponible en: <http://elclima.esparatodos.es/>. Fecha de consulta: Mayo 2012.
51. IPCC. 2007a. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Summary for Policymakers. Disponible en: [http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/publications\\_and\\_data\\_reports.shtml](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.shtml) Fecha de consulta: Enero 2012. 114 p.
52. IPCC. 2007b. Cambio Climático: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático Pachauri K., Reisinger A. (Eds.). OMM-PNUMA. Ginebra, Suiza. 104 p.
53. Jáuregui O., E. 2003. Algunos conceptos modernos sobre la circulación general de la atmósfera. Investigaciones Geográficas. (50):121-143.
54. Jiménez, M. 2009. Resiliencia de los ecosistemas naturales terrestres de Costa Rica al cambio climático. Tesis de Maestro en Ciencias. Escuela de Posgrado, Programa de Educación para el Desarrollo y la Conservación del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Turrialba, Costa Rica. 140 p.
55. Jiménez M., Chain A., y Locatelli B. 2010. Efectos del cambio climático en la distribución de zonas de vida en Centroamérica. Comunicación técnica en Recursos Naturales y Ambiente. Turrialba, Costa Rica. (59): 32-40.
56. Johns, T.C., R.E. Carnell, J.F. Crossley, J.M. Gregory, J.F.B. Mitchell, C.A. Senior, S.F.B. Tett and R.A. Wood 1997. The second Hadley Centre coupled atmosphere-ocean GCM: model description, spinup and validation. Clim. Dyn., 13, p.103-134.

57. Johnston C. A. 1998. Geographic Information Systems in Ecology. Methods in Ecology. First Edition. Blackwell Science Ltd. Malden, USA. 256 p.
58. Jones R., and Mearns L. 2006. Adaptation policy frameworks for climate change. Developing strategies, policies and measures, Assessing future climate risks. Technical Paper No. 5. United Nations Development Program, Global Environment Facility, Cambridge University Press. 263 p.
59. Kraak M., and Ormeling F., 2007. Cartography visualization of spatial data. Editorial Longman. United Kingdom, Great Britain. 205 p.
60. Lozano G. 2004. Evidencia del cambio climático: cambios en el paisaje. *In* Cambio climático, una visión desde México. Martínez J., Fernández A., Osnaya P. (Comp.). INE-SEMARNAT. México D.F. pp.65-76
61. Madrigal S. X. 1964. Contribución al conocimiento de la ecología de los bosques de Oyamel (*Abies religiosa* H.B. K. Schl. et. Cham. ) en el Valle de México. Tesis de licenciatura. Instituto Politécnico Nacional, Escuela Nacional de Ciencias Biológicas. México. 111 p.
62. Magaña V. 2007. Elaboración de escenarios de cambio climático para la región de estudio en el Golfo de México. Informe final de trabajo. SEMARNAT. México. 92 p.
63. Magaña V. y E. Caetano. 2007. Pronóstico climático estacional regionalizado para la República Mexicana como elemento para la reducción de riesgo, para la identificación de opciones de adaptación al cambio climático y para la alimentación del sistema: cambio climático por estado y por sector. Centro de Ciencias de la Atmósfera. UNAM, INE, SEMARNAT. México D.F. 41p.
64. Magaña V. 2010. Guía para generar y aplicar escenarios probabilísticos regionales de cambio climático en la toma de decisiones. Centro de Ciencias de la Atmósfera. UNAM, INE. México D.F. 80 p.
65. Malczewski, J. 1999. Gis and multicriteria decision analysis. John Wiley & Sons, INC. Ontario, Canada. 393 p.

66. Mancebo S. Q., E. Ortega P., A. Valentín C., B. Martín R. y L. Martín 2008. Libro SIG: aprendiendo a manejar los SIG en la gestión ambiental. Madrid, España. 109 p.
67. Manzanilla H. 1974. Investigaciones epidemétricas y silvícolas en bosques mexicanos de *Abies religiosa*. Dirección Nacional de Información y Relaciones Públicas de la Secretaría de Agricultura y Ganadería. México, D.F. 156 p.
68. Martínez, M. 1963. Las pináceas mexicanas 3ª Ed. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F. 400 p.
69. Mateo R. G., A. Felicísimo M., y J. Muñoz. 2011. Modelos de distribución de especies: Una revisión sintética. Rev. chil. hist. nat. 84(2): 217-240.
70. McCullagh P. 2002. What is a Statistical model? The Annals of statistics Vol.30, No. 5. University of Chicago. Chicago, E.U. 86 p.
71. Montesinos P E. B. 2003. Biología y estructura genética de las poblaciones locales y migratorias de mariposa monarca (*Danaus plexippus*) en México. Tesis de Maestría, Instituto de Ecología, UNAM. México D.F. pp. 36-52
72. Oberhauser, K. S. 1997. Guía para la identificación de orugas de la mariposa monarca (*Danaus plexippus*). National Science Foundation. Department of Ecology, Evolution and Behavior; University of Minnesota. 16 p.
73. Oberhauser K. S. 2004. Modeling the distribution and abundance of mariposa Monarca. In: Oberhauser K., and Solensky J. Monarch Butterfly Biology and Conservation. Cornell University Press. Ithaca, Nueva York. EUA. pp. 199-202.
74. Oberhauser K. S., y M. Solensky J. 2011. Ecología de la Mariposa Monarca. Universidad de Minnesota, The College of Wooster. Disponible en: <http://www.ecología.info/mariposa-monarca.htm>. Fecha de consulta: Agosto 2012.
75. Ojeda M. 2004. La modelación estadística. Foro de matemáticas del sureste. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México. p. 8

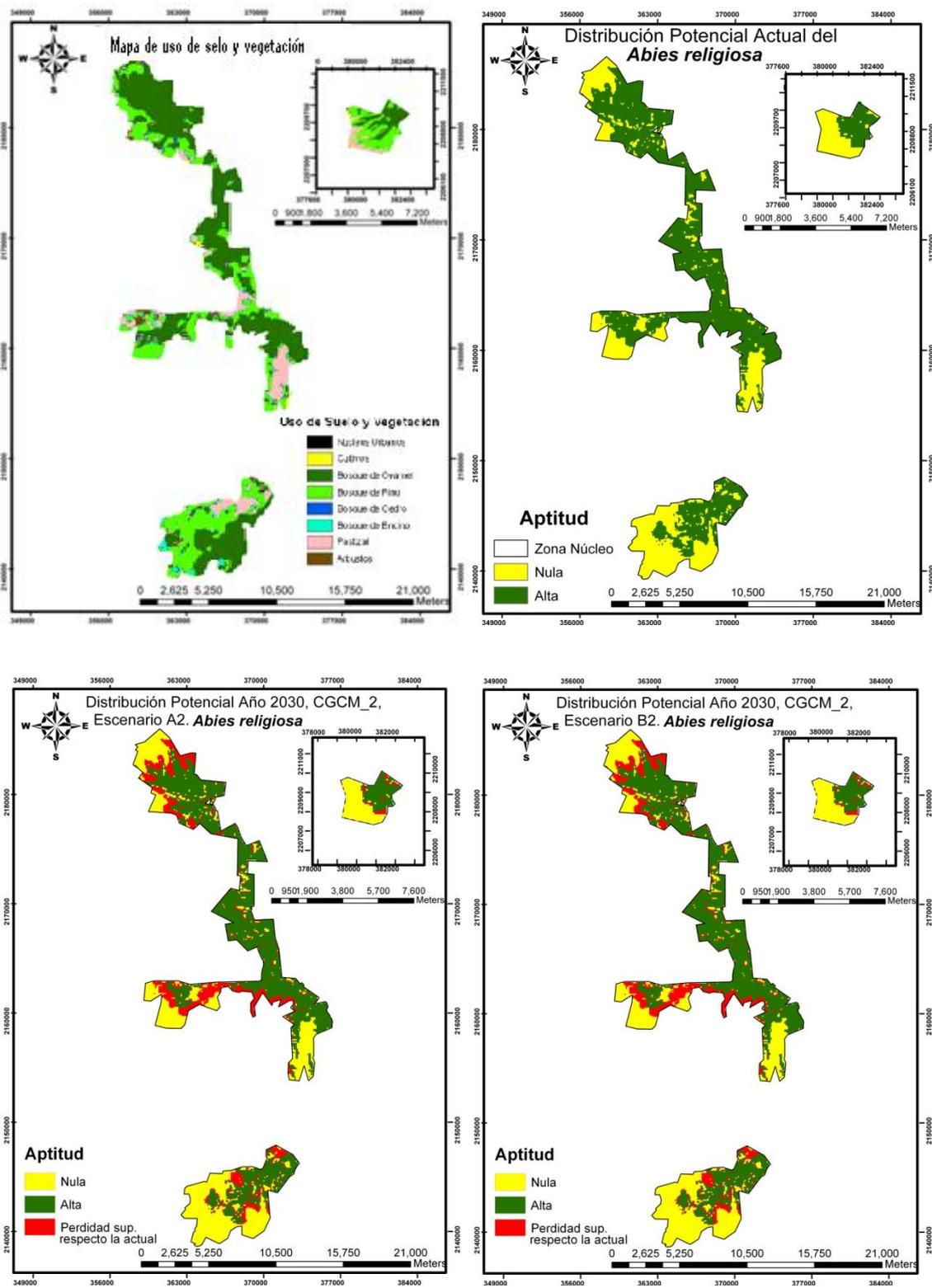
76. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 1996. Esquema para la evaluación de tierras. Boletín de Suelos de la FAO No. 32. Roma, Italia. 66 p.
77. FAO. 1997. Depósito de documentos de la FAO. Análisis de Sistemas de Producción Animal. Las Herramientas Básicas. Roma, Italia. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/W7452S/w7452s01.htm>. Fecha de Consulta. Agosto, 2012.
78. FAO. 2011. El cambio climático y los bosques. Roma, Italia. p. 2
79. Palma E., Conde C., Morales E., Colorado G. 2006. Escenarios climáticos. Universidad Veracruzana. Veracruz, México. 27 p.
80. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). 2005. Proyecto de Ciudadanía Ambiental Global, Cambio Climático. D.F. México. 33 p.
81. Ramírez A. M. 2007. El proceso de análisis jerárquico con base en funciones de producción para planear la siembra de maíz de temporal. Tesis Doctoral. Institución de Enseñanza e Investigación en Ciencias Agrícolas. México, México 223 p.
82. Rendón-Salinas E., Pérez-Ojeda J., Ibarra-Contreras A. y Galindo-Leal C. (Eds.). 2004. Primer foro regional Mariposa Monarca. Memorias. Valle de Bravo, Edo de Méx. 102 p.
83. Ricciardi H. J. 1995. Academia nacional de geografía, cambio global, causa, ciencia, tecnología, implicaciones humanas. Academia Nacional de Geografía. República Argentina, Buenos Aires. 461 p.
84. Rzedowski J. 1978. Vegetación de México. Limusa. México, D.F. 432p.
85. Sáenz-Romero C., G. Rehfeldt, P. Duval and R. Linding-Cisneros. *Abies religiosa* habitat prediction in climatic change scenarios and implications for monarch butterfly conservation in México. *Forest Ecology and Management*. 275 (2012): 98-106.
86. Salett M. B., y N. Hein. 2004. Modelación matemática y los desafíos para enseñar matemática. *Educación matemática*. 16 (2): 105-125.
87. Sánchez A. S., L. López M., D. Granados S. 2005. Semejanza florística entre los bosques de *Abies religiosa* H.B.K (Schl. Et. Cham) de la franja volcánica Transmexicana. *Investigaciones geográficas* (56):62-67.

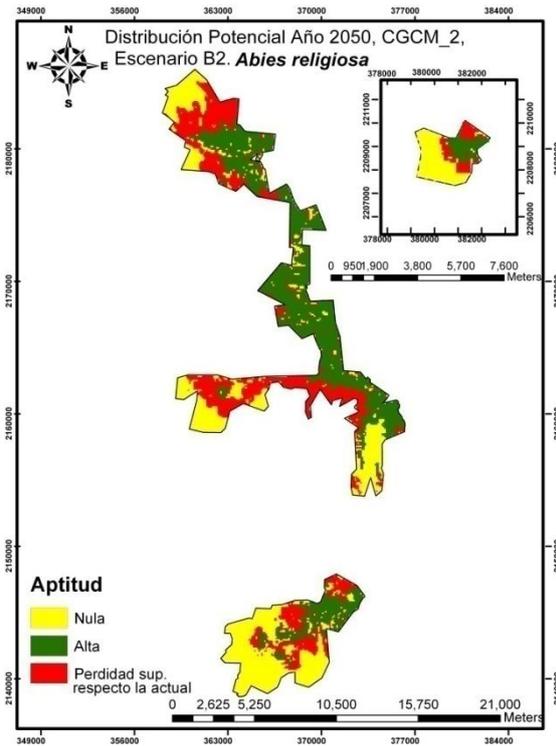
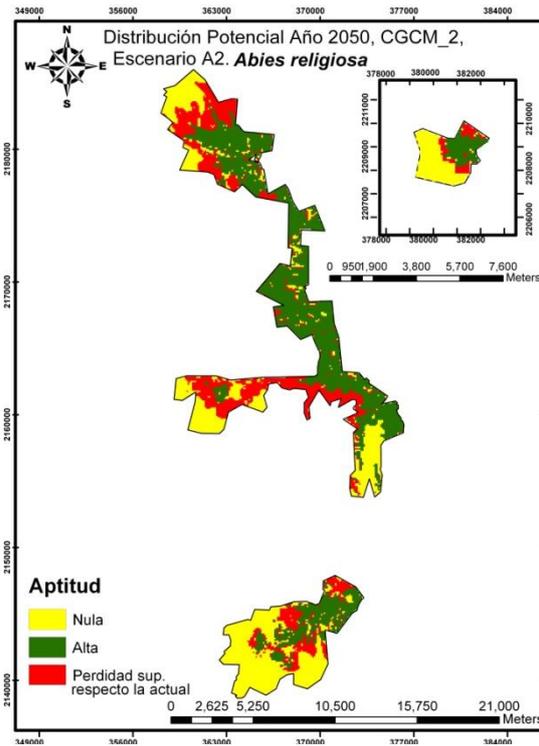
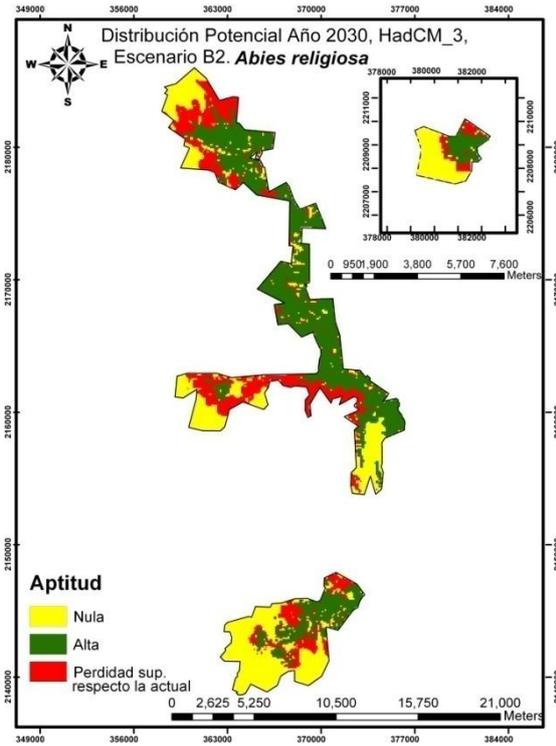
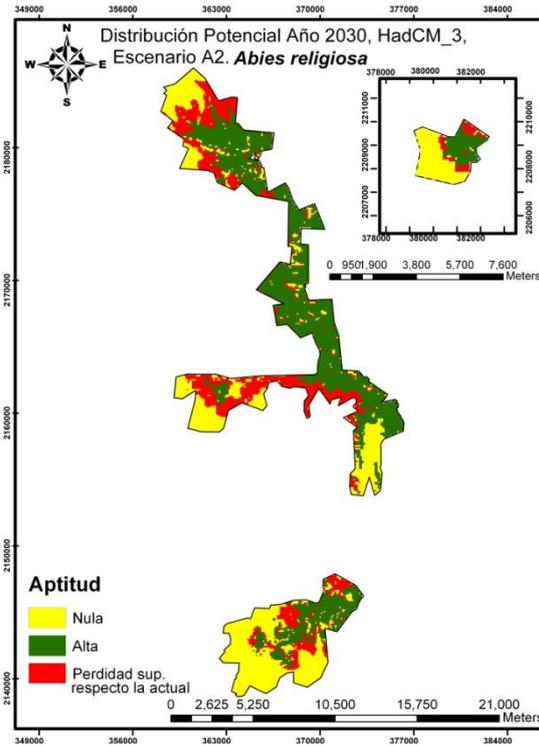
88. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP). 1998. Diagnóstico de la deforestación en México. Subsecretaría de recursos naturales, Inventario Nacional de Recursos Naturales. México, D.F. 29 p.
89. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) – Instituto Nacional de Ecología (INE). 2009. México Cuarta Comunicación Nacional Ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. México. 276p.
90. SEMARNAT. 2010. Plan de Manejo Tipo para la Mariposa Monarca. México, D.F. 42 p.
91. Sigala P., y Campos R. 2001. El entorno socio ambiental de la Mariposa Monarca. Tesis de Ingeniería. Universidad Autónoma de Chapingo. México. 80 p.
92. Sistema de Información de Reforestación (SIRE). 2001. *Abies religiosa* H.B.K (Schl. Et. Cham) México. Disponible en: <http://beta.semarnap.gob.mx/pfnm/> Fecha de consulta: Julio 2011.
93. Slayback D. A. and L. Brower P., 2007. Further aerial Surveys confirm the extreme localization of overwintering monarch butterfly colonies in Mexico. *American Entomologist* 53 (3):146-149.
94. Solís R. 2000. De monarca y otros reales acontecimientos. Cuadernos de biodiversidad. Secretaria de urbanismo y medio ambiente del Gobierno de Michoacán. Morelia, Michoacán. 6p.
95. Stratus Consulting, Inc., 2004. Adaptación al cambio climático: Hermosillo, Sonora, un caso de estudio desarrollado. Magaña V., Eakin H., Moreno L., Martínez M., Landavazo O. (Eds.) UNAM, Colegio de Sonora. México. 66 p.
96. Tomlin, C.D., 1990. *Geographic Information Systems and Cartographic Modeling*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ. A comprehensive approach to analysis and modeling using raster systems - an excellent introduction to GIS- based analysis. pp 361-374. Disponible en: <http://www.geog.ubc.ca/courses/klink/gis.notes/new.ncgia/u05.htm> Fecha de consulta: Enero 2012.

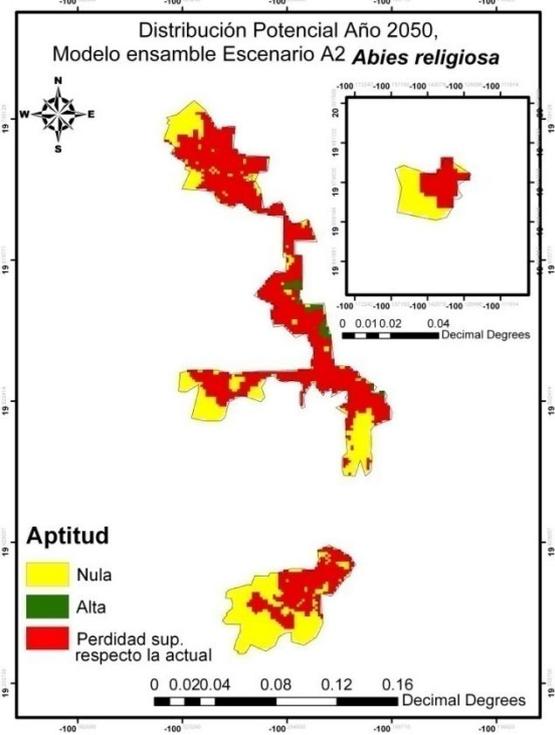
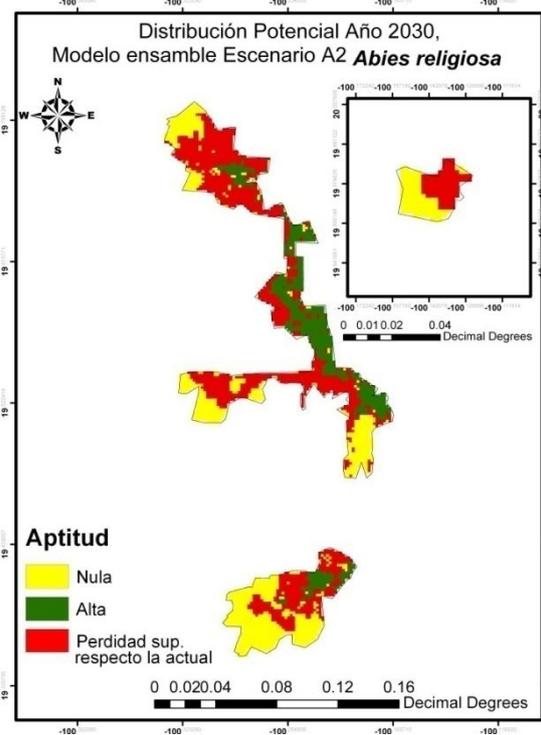
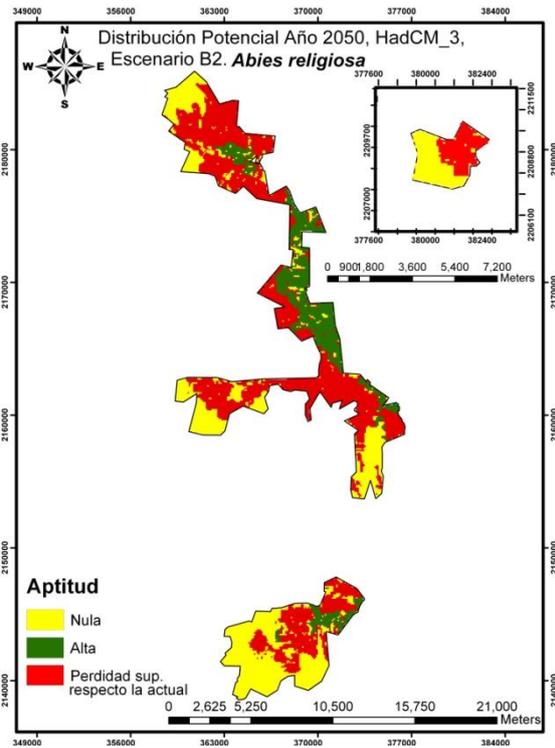
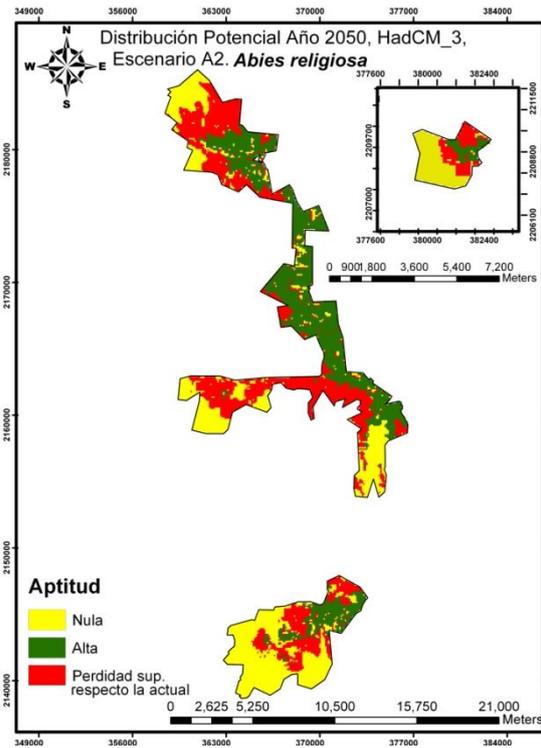
97. Velásquez S., 2007. ¿Qué es la modelación? Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Loja, Ecuador. 34 p.
98. Villers L. y Trejo I. 2010. El cambio climático y la vegetación en México. Instituto de Geografía, UNAM, México D.F. 16 p.
99. Wilby R., Charles S., Zorita E., Timbal B., Whetton P., Mearns. 2004. Guidelines for use of climate scenarios developed from statistical downscaling methods. Supporting material of the IPCC. TGICA. Disponible en:  
<[http://ipccddc.cru.uea.ac.uk/guidelines/StatDown\\_Guidepdf](http://ipccddc.cru.uea.ac.uk/guidelines/StatDown_Guidepdf)>. Fecha de consulta. Junio 2012.
100. Wilby, R. and Dawson, C. 2007. SDSM 4.2. A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. User Manual. UK. 94p.
101. Wilson, B. 1993. Sistemas: Conceptos, Metodología Y Aplicaciones. México. Limusa. pp 34.
102. Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF). 2000. Mariposa monarca, El fondo monarca, un estímulo para la conservación. E. Grace S. (Ed.). Disponible en: [www.wwf.org](http://www.wwf.org). Fecha de consulta: Enero 2012. 30 p.

# ANEXOS

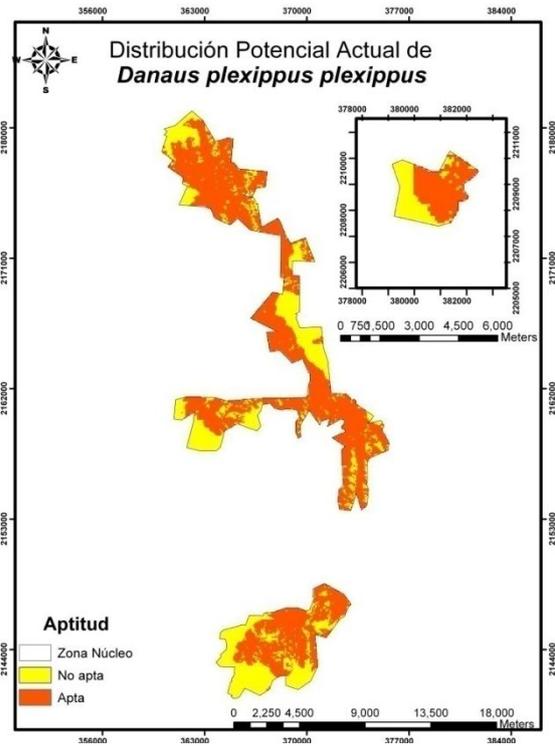
## Anexo 1. Figuras de distribución potencial actual y con cambio climático del oyamel.



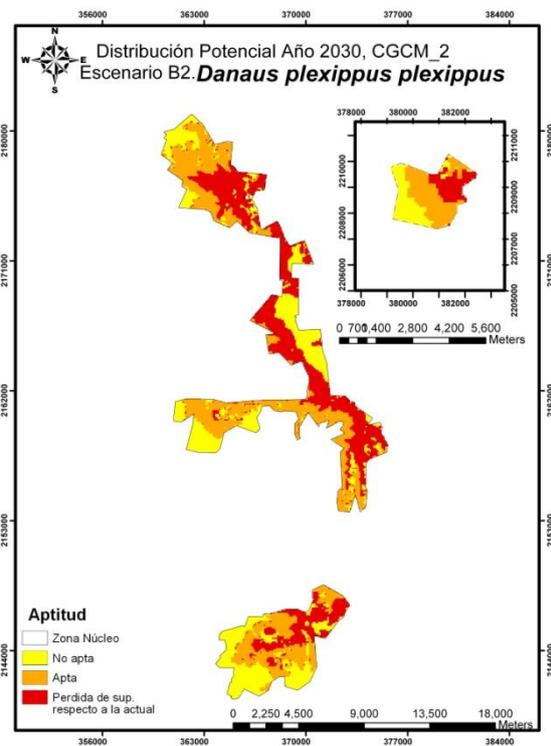
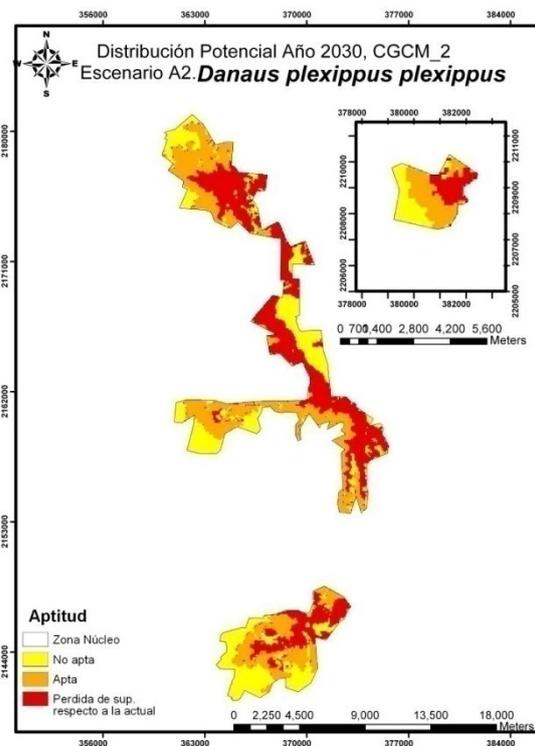


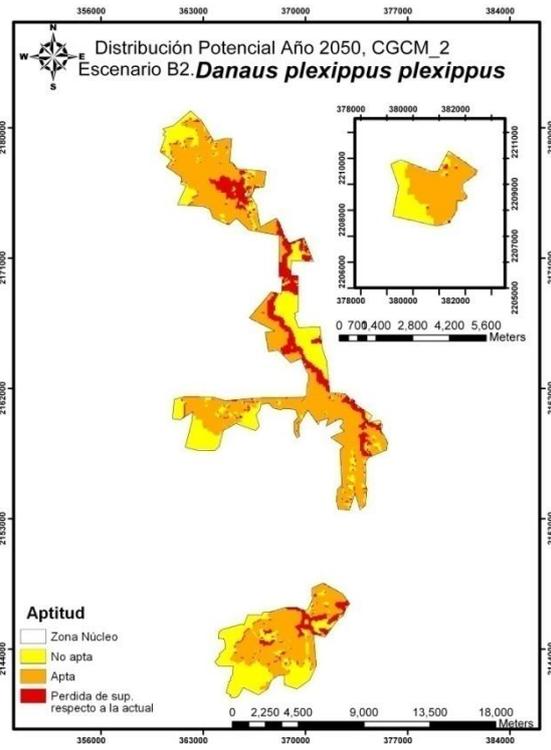
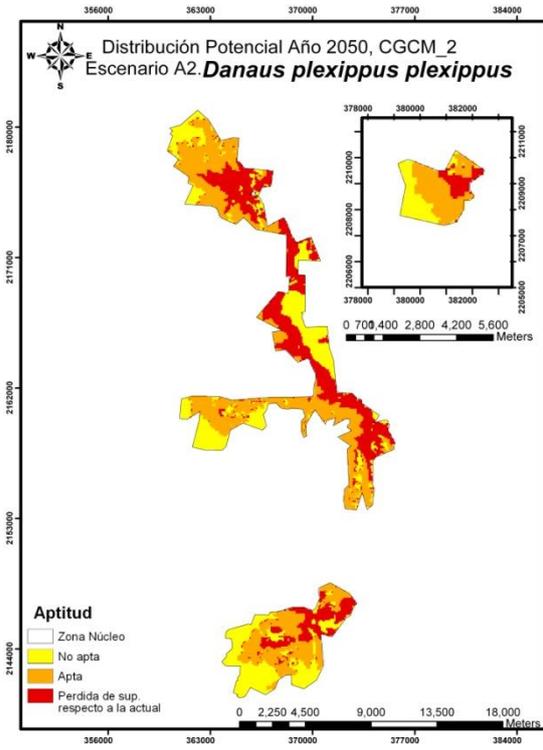
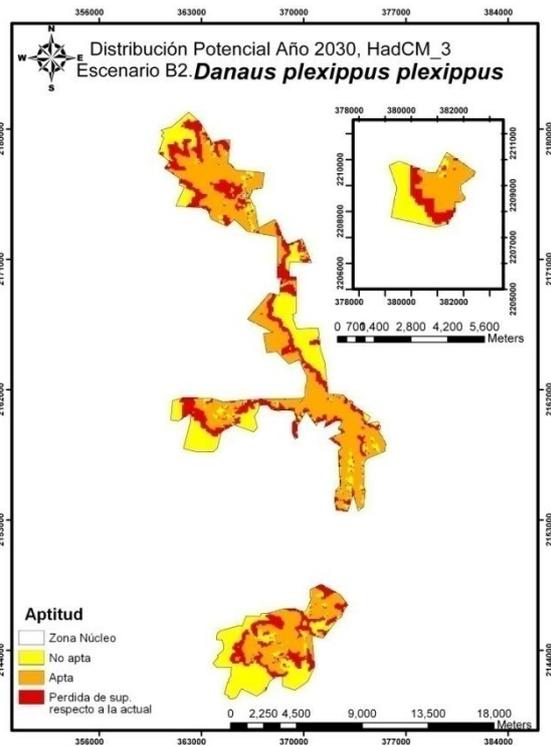
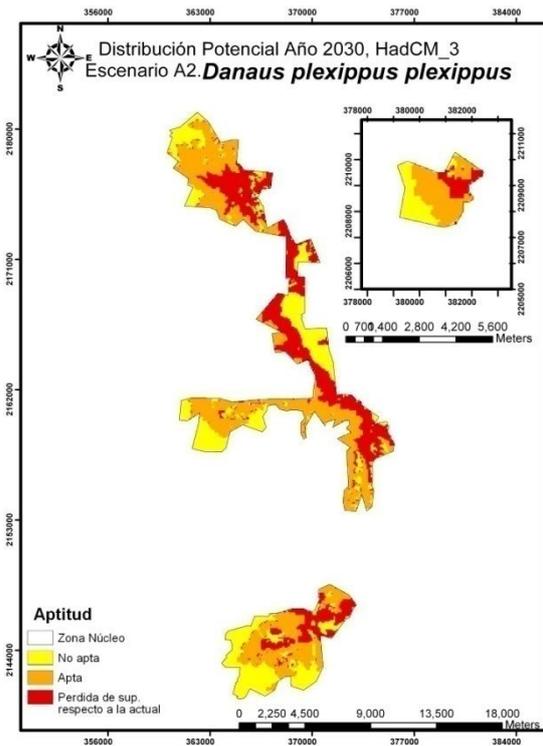


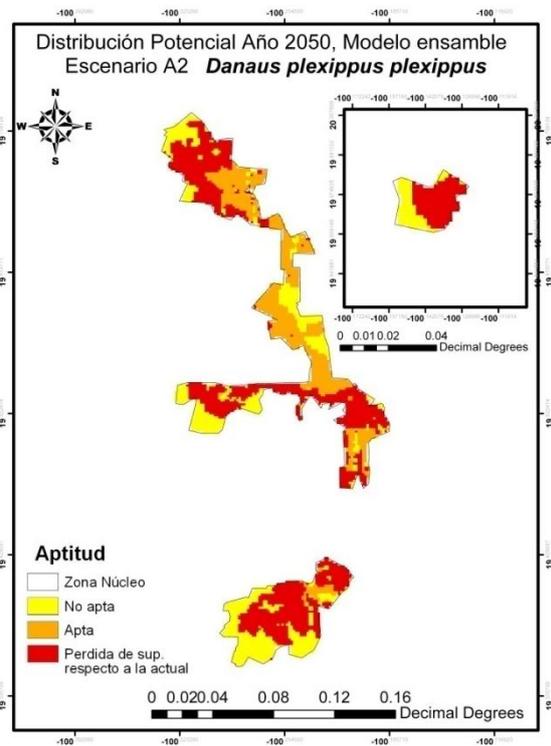
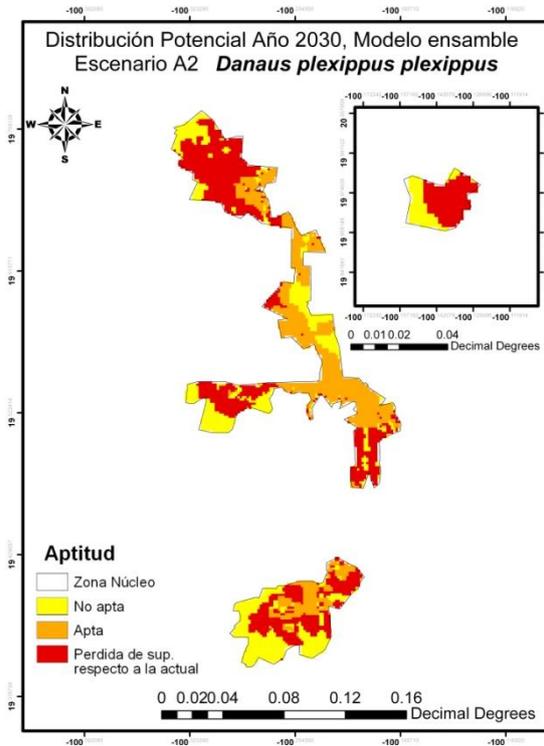
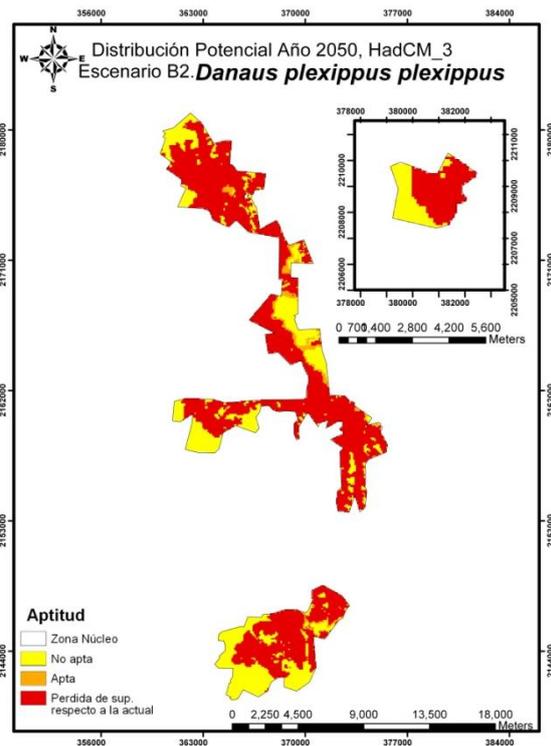
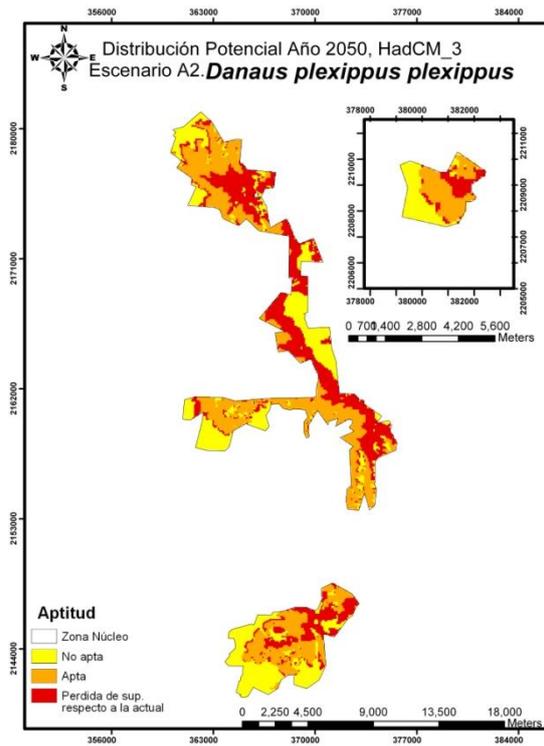
Anexo 2. Figuras de distribución potencial del hábitat invernal de la mariposa monarca del total de la zona núcleo.



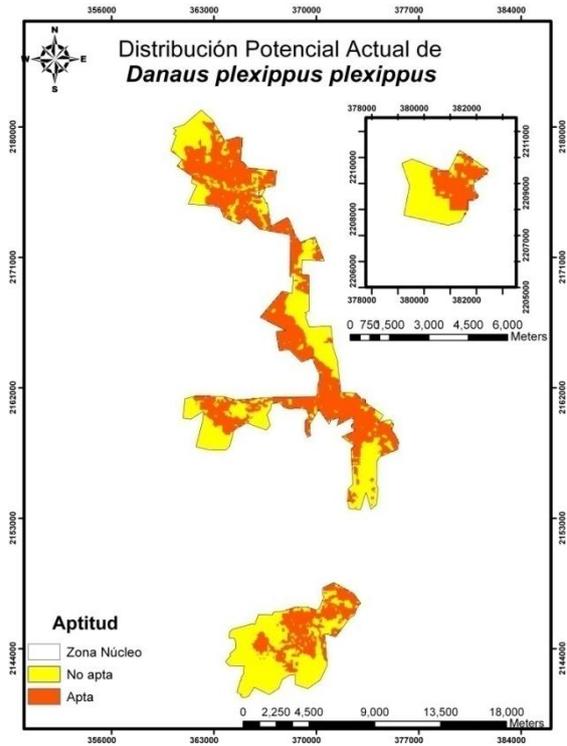
Distribución actual en el total de la zona núcleo.







Anexo 3. Figura de distribución potencial del hábitat invernal de la mariposa monarca sobre oyamel.



Distribución actual sobre bosque de oyamel.

