



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DE *Scolytus
mundus* Wood Y SU
COMPORTAMIENTO BAJO
ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO
EN LA RESERVA DE LA BIÓSFERA
MARIPOSA MONARCA**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

B I Ó L O G O

P R E S E N T A:



ROBERTO ARREOLA RAMOS

DIRECTOR DE TESIS:

M. EN C. FRANCISCO MORENO SÁNCHEZ

MÉXICO, D. F. JUNIO, 2013



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

1. Datos del alumno

Arreola
Ramos
Roberto
5535108635
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Biología
302143957

2. Datos del tutor

M en C
Francisco
Moreno
Sánchez

3. Datos del sinodal 1

Dr
Ramiro
Pérez
Miranda

4. Datos del sinodal 2

M en C
Tomás
Hernández
Tejeda

5. Datos del sinodal 3

M en C
Antonio
González
Hernández

6. Datos del sinodal 4

Dr
Víctor Javier
Arriola
Padilla

7. Datos del trabajo escrito

Distribución potencial de *Scolytus mundus* Wood y su comportamiento bajo escenarios de cambio climático en la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca
78 p
2013

Dedicatoria

A mi abuela, quien su cariño ha dado forma a lo que soy y cuyo ser constituye la principal guía en mi camino.

A mis padres, de quienes he recibido el amor necesario para seguir andando.

A mis tíos y tías: Pablo, Gabriel, Toño, Salvador, Milton y Mónica, cuyas muestras de afecto y apoyo nunca han cesado.

A Omar, del que he descubierto y adoptado las formas más propositivas de ver la vida y de quien recibo siempre un sólido respaldo en lo que hago.

A Paula, porque con su entrega me ha hecho ver que somos mucho más que dos.

A mis amigos y amigas, con mención especial para Lupita y Charly, con quienes he formado una bonita comunión.

A mi hermano Julio César, a mis primos y hermosas primas: Marcos, Luz, Jaqueline, Monse, Poleth, Fernanda, Pablo, Josué, Salvador, Isaac, Miguel, Oscar, Sergio, Jorge, Paquito, Verito, Paola, Rosa, Lupita, Pamela, Laura, Lizeth, Verónica, Karen, Brenda, Miriam, Raulito, Enriquito, Alejandra, sin olvidarme de Edgar Enrique, Paco, David y el tío Armando, todos ellos quienes son parte de mi memoria, representan algunas de las tantas personas que estimo de mi familia y de quienes he tomado ejemplo.

A los numerosos miembros de mi familia y comunidad, quienes han formado parte de mis enseñanzas, alegrías y tristezas.

A todos aquellos que me apoyan, confían y creen en mí.

Agradecimientos

Al FONDO SECTORIAL CONAFOR-CONACYT 2010 C02 con clave 148358 por el otorgamiento de los recursos para el desarrollo del proyecto “Riesgo del hábitat invernal de la mariposa Monarca por Scolytus mundus y cambio climático” y la beca para esta tesis.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por permitir formarme en ella, abrirme siempre las puertas y ser parte de lo que soy ahora.

Al M. en C. Francisco Moreno Sánchez por aceptar dirigir esta tesis y enfatizar sobre los puntos sustanciales tanto en el quehacer científico como en la vida cotidiana.

Al Dr. Gustavo Cruz Bello por su comprensión, amabilidad y confianza.

Al M. en C. Tomás Hernández por sus precisos consejos y sincera amistad.

A todos los investigadores del CENID-COMEF INIFAP que siempre tuvieron disposición para apoyarme en la realización de este trabajo y participar en mi formación dentro del campo de la investigación forestal. Gracias Dr. Pérez, M. en C. González y Dr. Arriola.

Al Dr. Enrique Martínez-Meyer por brindarse a orientar la culminación de esta investigación.

A mis compañeros del laboratorio por alegrar mis horas de trabajo.

A la vida, por mostrarme sonrisas a donde quiera que voy.

“No guarden los libros en el estante

Después de leerlos,

Arránquenles las hojas

Y láncenlos a los cuatro vientos,

Deben darles luz a los hombres

Y al final, vida a más árboles...”

Feliciano Sánchez Chan

ÍNDICE

1. RESUMEN	1
2. INTRODUCCIÓN.....	2
3. OBJETIVOS	4
4. MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES	5
4.1. Nicho ecológico y distribución potencial: bases teóricas	5
4.2. Modelos de nicho ecológico	7
4.2.1. Validación de modelos de nicho ecológico	9
4.3. Algoritmo Genético Basado en Reglas (<i>Genetic Algorithm of Rule-set Production, GARP</i>)	11
4.4. Los bosques de oyamel (<i>Abies religiosa</i>) del centro de México	16
4.4.1. Principales afectaciones y plagas en el oyamel	17
4.5. <i>Scolytus mundus</i> Wood.....	19
4.6. Clima y cambio climático: perspectivas generales	23
4.6.1. Escenarios de cambio climático	26
4.7. Comportamiento de las plagas forestales ante el cambio climático	29
5. MATERIALES Y MÉTODOS	32
5.1. Área de estudio	32
5.1.1. Ubicación de la RBMM	32
5.1.2. Descripción de los componentes biofísicos de la RBMM	34
5.2. Modelaje de la distribución potencial de <i>Scolytus mundus</i>	36
5.2.1. Localidades de presencia de <i>Scolytus mundus</i>	38
5.2.2. Coberturas ambientales para <i>Scolytus mundus</i>	39
5.2.2.1. Coberturas climáticas	40

5.2.2.2. Cobertura del terreno.....	41
5.2.2.3. Coberturas topográficas	41
5.2.3. Ejecución de los modelos, procesamiento y análisis de resultados .	42
6. RESULTADOS	45
6.1. Localidades de presencia de <i>Scolytus mundus</i>	45
6.2. Áreas de distribución potencial de <i>Scolytus mundus</i>	46
6.3. Validación de las distribuciones potenciales actuales	58
7. DISCUSIÓN	60
7.1. Localidades de presencia de <i>Scolytus mundus</i>	60
7.2. Coberturas ambientales y áreas de distribución potencial de <i>Scolytus mundus</i>	60
7.3. Validación de las distribuciones actuales	65
8. CONCLUSIONES.....	67
8.1. Recomendaciones.....	67
9. LITERATURA CITADA.....	68
10. ANEXO.....	77

Índice de Figuras

Figura 1. Nicho Grinnelliano	6
Figura 2. Diagrama BAM.....	6
Figura 3. Diagrama del algoritmo genético	12
Figura 4. Interfaz de <i>DesktopGarp</i>	14
Figura 5. Árboles de oyamel con muerte descendente en bosques con declinación forestal	18
Figura 6. Árboles de oyamel con muerte descendente causada por hongos y descortezadores.....	19
Figura 7. <i>Scolytus mundus</i> Wood.....	20
Figura 8. Ciclo de vida de <i>Scolytus mundus</i>	22
Figura 9. Concentración de CO ₂ y cambios mundiales en la radiación durante el último milenio	24
Figura 10. Esquema del efecto invernadero global	24
Figura 11. Emisiones de CO ₂ mundiales por familia de escenarios	28
Figura 12. Localización de la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca (RBMM)	33
Figura 13. Neblina en los bosques de oyamel de la RBMM	35
Figura 14. Diagrama de flujo del método	37
Figura 15. Interfaz de <i>DesktopGarp</i> con los parámetros utilizados en las ejecuciones	42
Figura 16. Esquema espacial de la extracción de valores con las localidades de presencia de <i>Scolytus mundus</i>	44
Figura 17. Presencia de <i>Scolytus mundus</i> en los bosques de oyamel del Eje Volcánico Transversal, incluida la RBMM	45
Figura 18. Distribución potencial actual de <i>Scolytus mundus</i> en el período generacional A.....	47
Figura 19. Distribución potencial de <i>Scolytus mundus</i> en el período generacional A con el escenario A2.....	48
Figura 20. Distribución potencial de <i>Scolytus mundus</i> en el período generacional A con el escenario A1B	49
Figura 21. Distribución potencial actual de <i>Scolytus mundus</i> en el período generacional B.....	51
Figura 22. Distribución potencial de <i>Scolytus mundus</i> en el período generacional B con el escenario A2.....	52

Figura 23. Distribución potencial de <i>Scolytus mundus</i> en el período generacional B con el escenario A1B	53
Figura 24. Áreas potenciales de cada distribución	55
Figura 25. Cobertura de oyamel sobre las distribuciones del período generacional A	56
Figura 26. Cobertura de oyamel sobre las distribuciones del período generacional B	57
Figura 27. Localidades de validación en las distribuciones actuales	59

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Matriz de confusión usada en la validación de modelos.....	10
Cuadro 2. Coberturas ambientales para las ejecuciones de GARP.....	40
Cuadro 3. Descripción de las categorías de aptitud	43
Cuadro 4. Claves de las distribuciones potenciales de <i>Scolytus mundus</i>	46
Cuadro 5. Áreas de las distribuciones potenciales del período generacional A	47
Cuadro 6. Rangos de las coberturas climáticas del período generacional A.....	50
Cuadro 7. Áreas de las distribuciones potenciales del período generacional B	51
Cuadro 8. Rangos de las coberturas climáticas del período generacional B.....	54
Cuadro 9. Valores de las coberturas topográficas.....	58

1. RESUMEN

Durante los últimos años los bosques de la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca (RBMM) se han visto afectados por la falta de manejo forestal, resinación del arbolado, incendios forestales y variaciones meteorológicas. Estas circunstancias los predisponen a ser atacados por organismos tales como el descortezador *Scolytus mundus* Wood que se considera como una de las plagas con mayor importancia en los bosques de oyamel (*Abies religiosa*) del centro del país. En este trabajo se determinó la distribución potencial de *S. mundus* con el modelo de nicho ecológico GARP, haciendo uso de variables ambientales que influyen en la distribución y tamaño de las poblaciones de insectos forestales. Las distribuciones contemplaron coberturas climáticas con datos actuales y bajo dos escenarios de cambio climático para el año 2040 en cada período generacional de *S. mundus*. En los resultados se observó que el período comprendido de junio a septiembre (A), con condiciones climáticas actuales, registró áreas potenciales para *S. mundus* de 26,194 ha y el de octubre a mayo (B) 31,516 ha. Se vio que las áreas potenciales bajo escenarios de cambio climático aumentan hasta 36,880 ha cuando se incrementa la temperatura y la precipitación. Las pruebas de χ^2 , que utilizan los errores de omisión y comisión como elementos para validar el modelaje con GARP, fueron altamente significativas al generar valores de $P = 1.97582 \times 10^{-82}$ ($P < \alpha = 0.05$) en el período generacional A y $P = 9.56248 \times 10^{-60}$ ($P < \alpha = 0.05$) en el período generacional B. Sin embargo, se plantearon algunas limitantes al utilizar GARP para esta especie en la RBMM, ya que las áreas que señalan las proyecciones pueden estar sobreestimadas debido a que el modelo puede emplear rangos donde la especie no se ha registrado o quizá no se consideraron suficientes factores en el modelaje de la distribución potencial de *S. mundus*.

Palabras clave: cambio climático, distribución potencial, error de omisión y comisión, GARP, descortezador.

2. INTRODUCCIÓN

La distribución potencial se refiere al área geográfica que reúne las condiciones ambientales y biológicas donde una especie puede establecerse. Los modelos de nicho ecológico, también llamados modelos de idoneidad de hábitat o de distribución de especies, son herramientas que permiten conocer la distribución potencial. Estos se basan en fundamentos matemáticos (Soberón y Nakamura, 2009; Peterson *et al.*, 2011), son ampliamente usados en estudios de biogeografía, conservación de la vida silvestre, respuestas de la fauna ante el cambio climático, ecología evolutiva (Anderson *et al.*, 2002) y poco utilizados en insectos y plagas forestales (Peterson *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2009). El Algoritmo Genético Basado en Reglas (*Genetic Algorithm of Rule-set Production, GARP*) es un ejemplo de estos modelos, ya que emplea inteligencia artificial y se inspira en la teoría de la evolución de Darwin (Obitko, 1998) para predecir posibles áreas de distribución con base en las variables ambientales donde se encuentran las especies (Stockwell y Peters, 1999).

El comportamiento de la distribución de plagas forestales está influenciado directamente por las variables ambientales, pues son quienes determinan el tamaño poblacional y los lugares donde estos organismos habitan (Coulson y Witter, 1990; Nair, 2007). A nivel mundial existen brotes de insectos forestales que dañan anualmente al menos 35 millones de hectáreas (ha) en climas templados y zonas boreales (FAO, 2011). En México las entidades de Michoacán y el Estado de México sumaron 7,773 ha afectadas por plagas de descortezadores durante el período de 1998-2004 (SEMARNAT, 2005). Como parte de estas entidades, la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca (RBMM) presenta problemas de diversa índole que inciden en la calidad y abundancia de los bosques de esa zona (López, 2007; Cornejo e Ibarra, 2008). Tal es el caso de la presencia de *Scolytus mundus* Wood, un descortezador específico de oyamel (*Abies religiosa* (HBK) Schlecht. *et* Cham) considerado de las plagas con mayor importancia en los bosques de oyamel del centro del País (Cibrián *et al.*, 1995). En los últimos años, *S. mundus* se encontró afectando árboles en la RBMM cuando se presentan amplios períodos de sequía (Garduño, 2011).

Por otra parte, las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) propician incrementos en la temperatura de la superficie terrestre y cambios en los regímenes de lluvias (IPCC, 2000; Gitay *et al.* 2002; IPCC, 2007), por lo que las afectaciones negativas se reflejarán en el sector forestal propiciando una disminución en la cantidad y calidad de los bosques a nivel mundial. Esto se deberá principalmente por mayor cantidad de brotes de plagas forestales y al aumento en la frecuencia de sequías e incendios (Moore y Allard, 2008). Se espera que las plagas se distribuyan a nuevas áreas (Logan *et al.*, 2003; Moore y Allard, 2008) y hacia mayores altitudes y latitudes (Battisti, 2008). En general, el comportamiento de los insectos y plagas forestales por causa del cambio climático pronostica cambios en los períodos de hibernación, incremento en el número de generaciones y potenciales cambios en su distribución geográfica entre otros (Ladányi y Horváth, 2010).

Esta investigación modeló la distribución potencial de *S. mundus* en condiciones climáticas actuales y con escenarios de cambio climático, utilizando las localidades donde se ha presentado y coberturas ambientales como variables que determinan la distribución de insectos y plagas forestales. Para ello se empleó GARP, el cual se ha documentado que es de los mejores modelos para predecir la distribución de especies especialistas y utilizado poco en la distribución potencial de insectos y plagas forestales donde ha mostrado resultados que indican alto poder predictivo (Naoki *et al.*, 2006; Peterson *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2009).

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo general

Determinar la distribución potencial actual de *Scolytus mundus* Wood y bajo dos escenarios de cambio climático en la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca (RBMM) utilizando GARP.

3.2. Objetivos particulares

- Determinar la distribución potencial de *Scolytus mundus* Wood en los dos periodos generacionales que presenta y dos periodos de tiempo: actual y para el año 2040, bajo dos con escenarios de cambio climático (A2 y A1B).
- Analizar las áreas de distribución potencial de *S. mundus* en función de las condiciones ambientales donde se presenta dicha especie.
- Analizar la factibilidad de emplear GARP para determinar la distribución potencial de *S. mundus* en el bosque de oyamel de la RBMM.

4. MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES

4.1. Nicho ecológico y distribución potencial: bases teóricas

Las primeras ideas acerca de los parámetros que determinan la distribución de las especies fueron desarrolladas por Grinnell (1917a, b) en dos publicaciones donde considera que los animales ocupan áreas definidas con rangos de variables acorde a las características corporales. Analizó el ambiente donde se desarrolla el “cuitlacoche californiano” o *California Thrasher* (*Toxostoma redivivum*) y argumentó que el nicho ocupado se basa en el comportamiento de este y la dependencia a tipos específicos de vegetación.

Posteriormente Hutchinson (1957) describió el espacio donde se distribuye una especie al cual llamó *nicho fundamental* (NF) y lo formuló matemáticamente como el hipervolumen multidimensional que considera n variables (físicas y biológicas). Dedujo que los componentes del hipervolumen definen las propiedades ecológicas que permiten a las especie existir “indefinidamente”. En este sentido, la consideración de la “existencia indefinida” de la especie se tornaba ambigua.

Como una propuesta novedosa y basada en diversas concepciones del nicho ecológico, Soberón y Nakamura (2009) definen dos tipos de nicho: *Eltoniano* y *Grinnelliano*. El primero refiere al espacio con interacciones ecológicas y consumo de recursos, mientras que el segundo está determinado por variables que no interactúan con otras y cambian poco (*scenopoéticas*). Estos autores proyectaron el nicho Grinnelliano en dos perspectivas, ambiental (A) y geográfica (B), y se apoyaron en la definición de Hutchinson sobre el NF (Figura 1). Aquí se encuentra un subconjunto de combinaciones ambientales que Jackson y Overpeck denominaron *nicho potencial* (NP), el cual es la intersección de las variables ambientales y el nicho fundamental ($A \cap NF$). Como parte del NP, el *nicho realizado* (NR) representa los sitios que las especies ocupan actualmente.

La distribución de especies se representa mediante el diagrama conocido como “BAM” (*biotic, abiotic and movements*; Figura 2). Este contempla las interacciones bióticas (B), ambientales o abióticas (A) y el movimiento (M) de una especie durante un intervalo de tiempo en el espacio geográfico (G). La región donde las condiciones biológicas son favorables es representada como la intersección de B y M e indica el área donde las especies tienen acceso de acuerdo con las capacidades de movilización y la estructura de las barreras del medio. La zona denotada como G_0 muestra el área de distribución actual para las especies y los puntos en esta representan los lugares donde se les ha encontrado. Finalmente, la distribución potencial (G_I) es el área que puede ser ocupada si ocurren cambios en la dispersión poblacional (Soberón y Peterson, 2005; Soberón y Nakamura, 2009; Peterson *et al.*, 2011).

Bajo estos supuestos, la distribución potencial puede considerarse como el espacio geográfico con posibilidad de ser ocupado por las especies cuando las condiciones ambientales y biológicas son idóneas y si ocurren cambios en la dispersión, la cual limita la distribución actual.

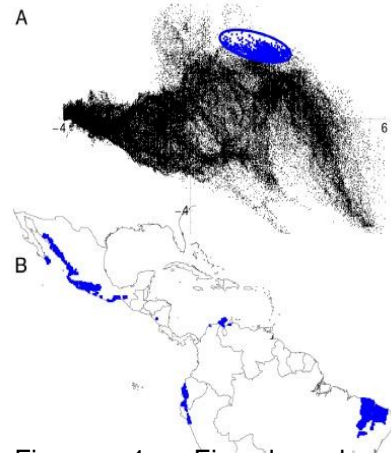


Figura 1. Ejemplo de Nicho Grinnelliano. A. Cada punto negro representa una combinación de variables, la elipse azul muestra el nicho fundamental y los puntos contenidos en ella son el nicho potencial. B. Proyección geográfica del nicho potencial. Tomada de Soberón y Nakamura (2009).

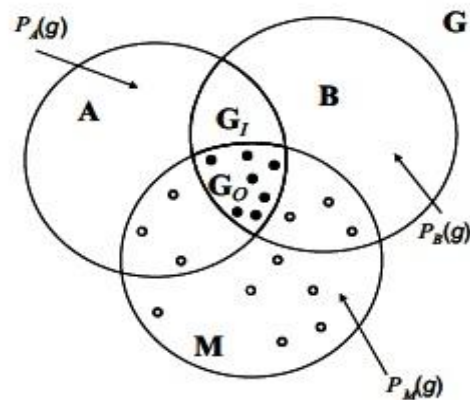


Figura 2. Diagrama BAM. Tomada de Soberón y Nakamura (2009).

4.2. Modelos de nicho ecológico

La distribución potencial de las especies puede ser determinada mediante los modelos de nicho ecológico, también llamados modelos de distribución de especies o los que Kearney llamó modelos de idoneidad de hábitat¹. Todos estos son sinónimos de acuerdo a la utilidad, ya sea que predigan el hábitat de las especies o posibles áreas de distribución, tienen como propósito ubicar lugares adecuados para la supervivencia de las poblaciones por la identificación de los requerimientos ambientales (Soberón y Nakamura, 2009).

El primero de los trabajos sobre este modelaje se llevó a cabo por Gordon en 1965, quien hizo aproximaciones de la distribución de especies en relación con las variables ambientales (Citado por Mateo *et al.*, 2011). Durante la década de los ochentas se generaron estimaciones con carácter predictivo para especies y comunidades como la de Box, quien en 1981 propuso el modelo para la predicción de biomas a nivel global. En 1986 Nix estableció los fundamentos matemáticos para el algoritmo BIOCLIM y Austin en 1987 aplicó modelos estadísticos para cuantificar la relación vegetación-ambiente (Citados por Pliscoff y Fuentes, 2011).

Los modelos actuales tienen la ventaja de ser implementados mediante herramientas SIG² utilizando dos tipos de información. El primer tipo son las localidades de presencia en coordenadas geográficas y se refieren a las certezas de que la especie se encontró en el espacio geográfico. El segundo tipo son las coberturas digitales de información ambiental reunida en archivos ráster³, las cuales consideran cantidades de combinaciones de variables ambientales limitadas por el espacio geográfico donde se encuentra la especie de estudio (Mateo *et al.*, 2011; Peterson *et al.*, 2011; Pliscoff y Fuentes, 2011).

¹ Descripción de un lugar en un espacio y escala de tiempo determinada, donde un organismo vive o puede vivir.

² Sistema de Información Geográfica (acrónimo que en inglés se refiere a Geographic Information System, GIS). Integración organizada de software, hardware, datos geográficos, métodos y personas.

³ Archivo computacional con información reunida en celdas.

Las principales fuentes para obtener localidades de presencia de las especies son colecciones científicas de especímenes biológicos y redes de información sobre biodiversidad (Soberón y Nakamura, 2009; Soberón, 2012). Se considera que mientras mayor sea el número de localidades, se amplía y precisa el rango de variables, pues se ha documentado que cantidades altas de presencias aumenta la significancia de los datos tanto en el modelaje como en la validación (Peterson *et al.*, 2002; Peterson *et al.*, 2011). Sin embargo, Anderson en el 2003 (Citado por Phillips *et al.*, 2006) menciona que la intensidad y el método de muestreo varían a lo largo del área de estudio, lo que puede inducir a correlación espacial entre localidades del mismo sitio.

La selección de las coberturas ambientales y la cantidad deben considerarse en función de las características conocidas de la especie. Sin embargo, dado que el comportamiento y requerimientos de cada especie son particulares, es difícil ubicar espacialmente todas las variables de influencia debido a las escalas con que se maneja la información. Algunas de las más utilizadas son las coberturas climáticas (temperaturas, precipitación, radiación solar, velocidad de viento, etc.), topográficas (altitud, pendiente, exposición, geología, etc.) y las que consideran la cobertura del terreno (Mateo *et al.*, 2011; Peterson *et al.*, 2011; Plischoff y Fuentes, 2011).

Las escalas de manejo de la información, en las coberturas ambientales para los modelos de nicho ecológico, se describen en el estudio de Mackey y Lindenmayer (2001). Estos autores mencionan que la utilización de coberturas climáticas como la precipitación y temperatura es adecuada en escalas globales y mesoescalas⁴. La vegetación, la topografía y algunos regímenes de temperatura pueden influir de manera directa en la distribución de los animales en topoescalas⁵ y finalmente,

⁴ Escalas a nivel global, consideran las poblaciones mundiales de la especie de estudio.

⁵ Escalas que consideran interacciones entre poblaciones separadas geográficamente por procesos de migración (metapoblaciones)

consideran que las vegetaciones bien definidas tienen importante influencia en nanoescalas⁶.

Actualmente existe variedad de técnicas para modelar la distribución de especies y se han propuesto diversas clasificaciones representadas de acuerdo al fundamento matemático que utilizan, o bien, si requieren localidades de presencia y ausencia o únicamente de presencia. Algunos de los modelos más utilizados son: Maxent (algoritmo de Máxima Entropía), GARP (*Genetic Algorithm of Rule-set Production*), ENFA (*Ecological-Niche Factor Analysis*) y BIOCLIM (variables bioclimáticas), entre otros (Mateo *et al.*, 2011; Peterson *et al.*, 2011; Pliscoff y Fuentes, 2011).

4.2.1. Validación de modelos de nicho ecológico

La validación de los modelos se refiere a la efectividad en la predicción de la distribución potencial en términos de significancia estadística. En la distribución potencial basada en modelos nicho ecológico, los errores son comúnmente utilizados para generar los métodos de validación y se establecen de acuerdo a la condición predicha por los modelos, ya sea una presencia o ausencia de la especie (Peterson *et al.*, 2011; Cuadro 1).

⁶ Escalas que consideran solo una población en una localidad.

Cuadro 1. Matriz de confusión usada en la validación de modelos. Tomada de Peterson *et al.* 2011.

		Condición actual	
		Presente	Ausente
Condición predicha	Presente	<i>a</i>	<i>b</i>
	Ausente	<i>c</i>	<i>d</i>

Donde:

a = Localidades donde se encuentra a la especie y el modelo predice presencia (verdaderos positivos)

d = Localidades donde la especie no se encuentra y el modelo predice ausencia (verdaderos negativos)

b = Localidades donde la especie no se encuentra y el modelo predice presencia (falsos positivos)

c = Localidades donde la especie se encuentra y el modelo predice ausencia (falsos negativos)

El empleo de estos errores es posible de acuerdo con la cantidad de localidades de presencia disponibles que no se incluyen en el modelaje y se utilizan en dos categorías de mediciones, aquellas que se basan en predicciones binarias (“umbral - dependiente”) y las que presentan múltiples valores (umbral - independiente”).

Las pruebas umbral - dependiente utilizan dos únicos valores, presencia o ausencia y hacen uso del error de *omisión* como una medida de la validez del modelo mediante el cálculo con base en la matriz de confusión como “ $c/(a+c)$ ”.

Otro tipo de error se presenta cuando se clasifican erróneamente los positivos, es decir, cuando el modelo predice presencia de la especie y se sabe que está ausente. A este se le conoce como error de *comisión* y se representa como *b* en la matriz de confusión (Anderson *et al.*, 2003; Peterson *et al.*, 2011).

4.3. Algoritmo Genético Basado en Reglas (*Genetic Algorithm of Rule-set Production, GARP*)

GARP es el acrónimo del llamado Algoritmo Genético Basado en Reglas desarrollado por David Stockwell en el *ERIN Unit of Environment Australia*⁷(Kansas University, 2011). Este modelo de nicho ecológico utiliza el algoritmo genético descrito por Obitko (1998), el cual se basa en inteligencia artificial y se inspira en la Teoría de la Evolución de Darwin para predecir áreas adecuadas para la presencia de las especies en función de variables ambientales (Stockwell y Peters, 1999).

El algoritmo hace referencia a juegos de soluciones (análogas a los cromosomas) llamados población, la cual se utiliza para formar poblaciones nuevas y de acuerdo a la aptitud forma nuevos juegos de soluciones (Figura 3).

⁷ Departamento de Sostenibilidad, Medio Ambiente, Agua, Población y Comunidades. Gobierno de Australia.

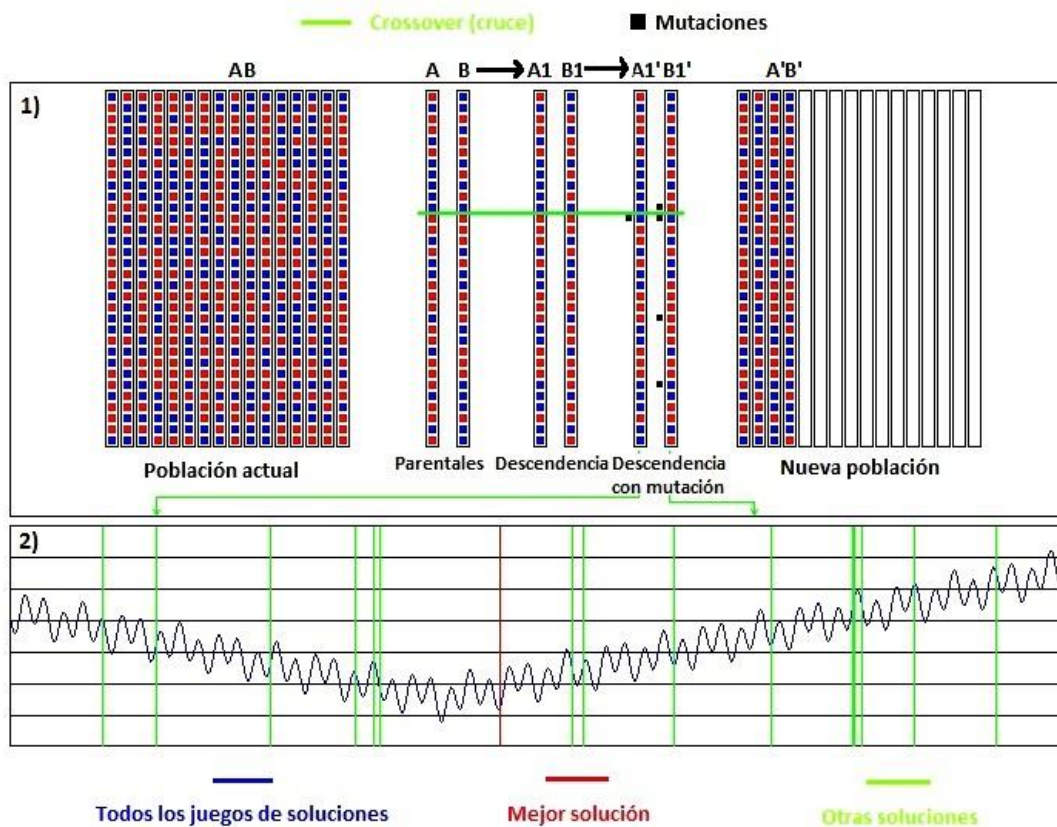


Figura 3. Diagrama del algoritmo genético. 1) Generación de mejores soluciones. Selección del par “cromosómico” por aptitud y la generación de otros con presencias y ausencias (puntos rojos y azules). La generación de cromosomas está en función del entrecruzamiento y mutación. 2) Espacio de búsqueda. La línea continua (azul) representa todas las combinaciones posibles, las verticales representan la mejor (roja) y otras posibles soluciones (verdes). Tomada de Obitko (1998).

Los requerimientos del modelo son localidades de presencia de la especie en coordenadas geográficas (grados decimales) y coberturas de información ambiental en formato ASCII⁸ (Kansas University, 2011).

Para generar las predicciones, el modelo trata de encontrar las correlaciones entre las presencias y ausencias de la especie con los parámetros ambientales utilizando cuatro tipos de reglas: atómica, regresión logística, envoltura bioclimática y negación

⁸ Acrónimo inglés de *American Standard Code for Information Interchange*. Es un código de caracteres basado en el alfabeto latino que utiliza 7 bits para representar caracteres y un bit adicional para detectar errores en la transmisión.

de la envoltura bioclimática, las cuales se describen en la guía de usuario y referencia técnica del sistema de modelaje en GARP y especifican lo siguiente (Payne y Stockwell, 1996?):

- Atómica. La especie se considera presente en todos los valores del espacio geográfico iguales al valor de cada localidad de presencia.
- Envoltura bioclimática (BIOCLIM). Se refiere al programa BIOCLIM generado por Nix en 1986 y engloba un rango de valores ambientales de las localidades donde se encuentra la especie considerando hasta 95% de los datos totales de este rango.
- Negación de la envoltura bioclimática (regla de rango). Empleando los valores de BIOCLIM, un número de variables pueden ser consideradas como irrelevantes y pueden tomar cualquier valor, incluso una ausencia de la especie.
- Regresión logística. Es la adaptación de los modelos que emplean este análisis y el resultado es transformado en un número de probabilidad (p). Si $p \geq 0.75$, la regla se considera como adecuada y se aplica en la predicción final.

En la ejecución de GARP se generan datos de ausencia llamados “seudo – ausencias” a partir de los registros de localidades de presencia. Después, divide porcentualmente el total de datos en dos grupos, para la calibración y para aplicar el algoritmo y con ello se genera una imagen del área de predicción tomando en cuenta las reglas mencionadas (cualquiera de estas, todas o las posibles combinaciones) y el límite de convergencia⁹ (*Convergence limit*), o bien, hasta alcanzar el número máximo de iteraciones (*Max iterations*) establecido por el usuario. Este proceso se repite hasta generar la cantidad de imágenes determinada por el número de corridas

⁹ Se refiere al límite donde la resultante del algoritmo ya no puede estar “mejor” o “peor” y se fuerza a generar la predicción.

(Runs) y son almacenadas en formatos computacionales (ASCII, ARC/INFO Grid¹⁰ y/o un mapa de bits¹¹) con dos valores: “1” para indicar la presencia de la especie y “0” para la ausencia.

La interfaz contempla la opción “mejores parámetros para selección de modelos” (*Best Subset Selection Parameters*) que permite ajustar medidas de los errores de omisión y comisión para almacenar sólo la cantidad establecida de mejores predicciones (Figura 4; Kansas University, 2011). Cuando estas predicciones se superponen haciendo concordar los límites geográficos, se observan mismas áreas de presencia de la especie y con el fin de ponderarlas se les agrupa en formas conocidas como “modelos compuestos” (Anderson *et al.*, 2003).

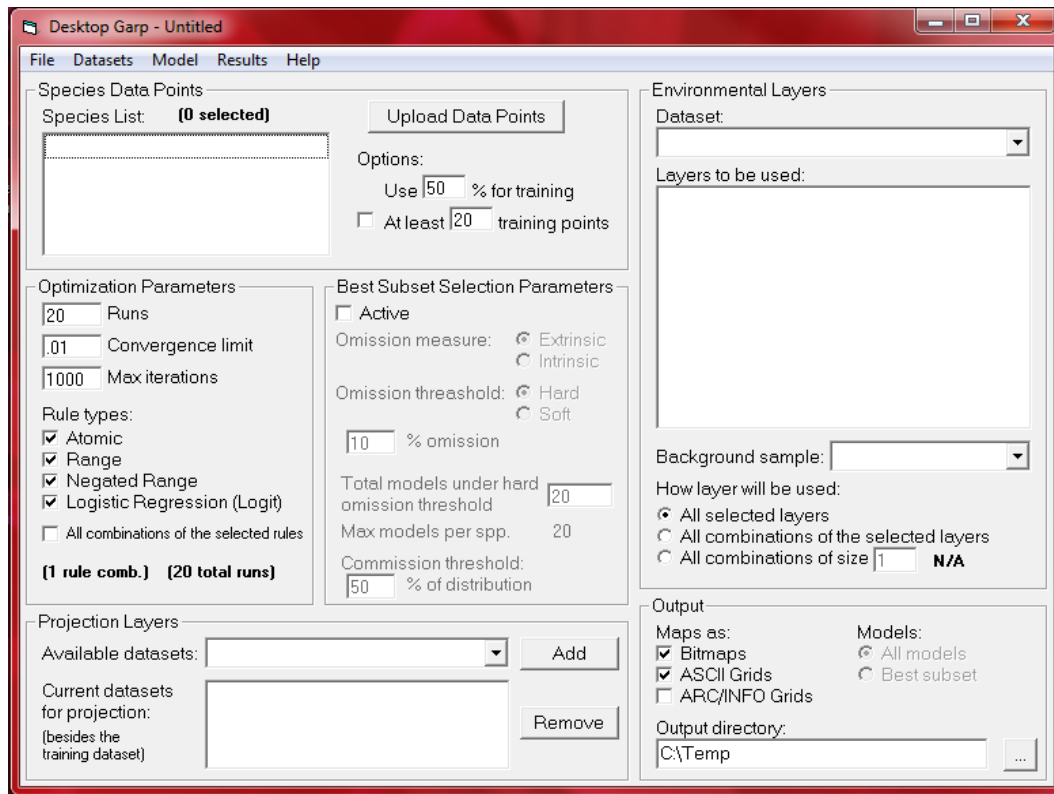


Figura 4. Interfaz de *DesktopGarp* (versión computacional de escritorio 1.1.6).

¹⁰ Formato de archivo *ráster* con caracteres binarios y otras modificaciones desarrollado por ESRI (*Environmental Systems Research Institute*).

¹¹ Formato de archivo *ráster* con píxeles o puntos de color.

Actualmente este algoritmo se utiliza en el modelaje de la distribución de especies, entre otras cosas, por la ventaja de requerir únicamente localidades de presencia (Peterson *et al.*, 2011). En cuanto a los resultados, se sabe que un mismo conjunto de datos de entrada puede generar imágenes de predicción distintas, por lo que se le considera no determinístico (Benito y Peñas, 2007).

GARP ha sido empleado en estudios de biogeografía, conservación de vida silvestre, respuestas de la fauna ante el cambio climático y ecología evolutiva entre otras disciplinas (Anderson *et al.*, 2002). Uno de ellos es el de Oberhauser y Peterson (2003) quienes determinaron el hábitat invernal de la mariposa monarca (*Danaus plexippus*) en los bosques de oyamel del Estado de México y Michoacán.

El trabajo de Naoki *et al.* (2006) utilizó distintos modelos de nicho ecológico (entre ellos GARP) para predecir la distribución de especies de vida silvestre en Bolivia y concluyeron que GARP genera mejores predicciones en especies especialistas¹² que en generalistas¹³, lo cual fue atribuido a la especificidad con tipos particulares de vegetación.

En México se modeló la distribución potencial del género *Crotalus* para todo el país utilizando GARP y Maxent. Se encontró que cerca del 85% de las áreas naturales protegidas del país presentan al menos una especie de estas serpientes. Sin embargo, algunas distribuciones tuvieron poca representatividad debido a que en múltiples casos se tenían menos de cinco sitios de presencia (Paredes *et al.*, 2011).

¹² Organismos cuyo rango de variables en su nicho es muy estrecho, con adaptaciones a un hábitat muy particular (Gliessman, 2002).

¹³ Organismos cuyo rango de variables en su nicho es muy amplio, más adaptables a diversos ambientes que los especialistas (Gliessman, 2002).

4.4. Los bosques de oyamel (*Abies religiosa*) del centro de México

Los bosques de coníferas son frecuentes en zonas de clima templado y frío del hemisferio boreal y en el territorio mexicano ocupan cerca del 15% (Flores *et al.* citado por Rzedowski, 2006). En orden de importancia por extensión se encuentran los bosques de *Pinus* y *Quercus*, seguidos de los bosques de *Juniperus* y *Abies*, siendo estos últimos de distribución muy restringida y localizada. Estos bosques, también llamados bosques de oyamel (*sensu* Madrigal, 1964), se distinguen entre las comunidades vegetales dominadas por coníferas debido a las condiciones ecológicas en que se desarrollan. En México se distribuyen en sitios de alta montaña entre los 2400 y 3600 m de altitud y se confinan a cerros, laderas y cañadas con pendientes de 17 a 60% donde se protegen de vientos fuertes e insolación intensa. Las áreas continuas de amplia extensión donde se encuentran corresponden a serranías a través del Eje Volcánico Transversal como en el Cofre de Perote, el Pico de Orizaba, el Nevado de Toluca, La Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca, el Tacintaro, el Nevado de Colima y en zonas circundantes al Valle de México.

Abies religiosa (HBK) Schlecht. *et* Cham es la especie que domina el estrato arbóreo superior en los bosques de oyamel y única representante del género en la Cuenca de México. La importancia del oyamel como recurso forestal es el ser utilizado como fuente de pulpa para fabricación de papel y como madera aserrada. Se distribuye naturalmente en entidades como el Distrito Federal, el Estado de México, Hidalgo, Veracruz, Michoacán, Jalisco, Morelos, Guerrero, Puebla y Tlaxcala (Madrigal, 1964; Sánchez *et al.*, 2006; Rzedowski, 2006).

Los bosques templados de la Cuenca de México, especialmente los de oyamel se han visto afectados por diversas causas, siendo las más importantes los aprovechamientos forestales, la tala clandestina, los incendios, el sobrepastoreo, la contaminación atmosférica, las plagas y enfermedades forestales. La extensión de los bosques de oyamel se estimó en 0.16% de la superficie del país en 1971 y para

1998 la SEMARNAP¹⁴ registró una extensión menor al 0.1% en México (Sánchez *et al.*, 2006).

4.4.1. Principales afectaciones y plagas en el oyamel

Las afectaciones o daños en ecosistemas forestales se asocian generalmente a los agentes que los causan, ya sean ambientales (desrames por viento, quemaduras por incendios, daños por heladas, entre otros) o biológicos (barrenación, esqueletonización, minas, agallas, rizados, entre otros) y que ocurran de manera individual o en conjunto, pueden predisponer al arbolado a diversas enfermedades. Las enfermedades se refieren a procesos que causan alteraciones anatómicas y energéticas, así como disfunciones fisiológicas que generan estrés y en ocasiones pueden causar la muerte del organismo o parte de él. Se reconocen como infecciosas si los agentes que las generan son biológicos, o no infecciosas si los agentes son abióticos (Coulson y Witter, 1990; Cibrián *et al.*, 2007).

El término plaga es aplicado en una connotación antropocéntrica y describe principalmente a insectos y otros organismos como plantas parásitas que causan daños en los valores ecológicos, económicos y sociales de los bosques (Padilla, 1987; Coulson y Witter, 1990; SEMARNAT, 2003; Cibrián *et al.*, 2007). En este estudio se consideró el término sólo para insectos forestales dañinos.

Durante las últimas décadas los bosques de oyamel (*Abies religiosa*) del centro del país han registrado afectaciones de ambos tipos, tanto ambientales como biológicas, mismas que han incidido sobre las masas forestales en distintos puntos de la Cuenca de México. Las principales afectaciones son la llamada “declinación del oyamel” y la conocida como “muerte descendente”.

¹⁴ Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca.

La declinación del oyamel, como todas las declinaciones forestales (Granados y López, 2001), es la acumulación de varias enfermedades que manifiestan menguo en la salud y el vigor de estos árboles, la cual ocurre a nivel de grupo. Esta se observó en los bosques de oyamel al Sur y Sureste de la Cuenca de México durante la década de los 70's en áreas que comprenden varias hectáreas (Figura 5).

Los síntomas más evidentes de la declinación del oyamel son la pérdida de ramas, poca retención de acículas y punteado blanquecino en el haz de estas; además, cuando las lesiones se extienden hasta unirse, se tornan café rojizas y el tejido muere. En tales observaciones se determinó que el rango de retención de follaje de un árbol en declinación es de cuatro a seis años.

Existen diferentes factores que actúan en las etapas de declinación del oyamel, siendo fundamental la sobremaduración del arbolado y la contaminación atmosférica. Estos



Figura 5. Árboles de oyamel con muerte descendente en bosques con declinación forestal. Al fondo la Ciudad de México. Tomada de Cibrián *et al.* (2007).

factores mantienen en condición vulnerable al bosque para ser atacado por plagas de insectos descortezadores como *Scolytus mundus* Wood y *Pseudohylesinus variegatus*, a los cuales se asocian organismos como hongos pudridores de la madera (*Fomitopsis pinicola*) y causantes de canchales (*Nectria sp.*), que en conjunto se les clasifica como factores de contribución (Cibrián *et al.*, 2007).

La muerte descendente del oyamel es considerada la principal afectación causada por el descortezador *S. mundus*, al cual se asocian organismos como los hongos que originan la pudrición de raíz (*Heterobasidion annosus*) y *P. variegatus* considerado depredador secundario. Esta afectación puede ocurrir en árboles individuales o en grupos y puede ser reconocida por el debilitamiento, enrojecimiento y



Figura 6. Árboles de oyamel con muerte descendente causada por *Heterobasidion annosus* y descortezadores (*S. mundus* y *P. variegatus*). Tomada de Cibrián *et al.* (2007).

muerte tisular de la parte más alta del árbol hacia la base (Figura 6; Cibrián *et al.*, 1993; Cibrián *et al.*, 1995).

4.5. *Scolytus mundus* Wood

Clasificación basada en Bouchard *et al.* (2011):

Reino. Animalia

Phyllum. Arthropoda

Clase. Insecta

Orden. Coleoptera

Familia. Curculionidae

Subfamilia. Scolytinae - Latreille, 1804

Tribu. Scolytini

Género. *Scolytus* - Geoffroy, 1762

Especie. *Scolytus mundus* Wood, 1968 (Tanner y Wood, 1968).

Scolytus mundus Wood es un escarabajo de color negro específico de árboles de oyamel que mide de 3.6 a 4.5 mm de longitud (Figura 7). Es atraído por diferentes compuestos volátiles (oleorresinas, alcoholes y/o terpenos) que emanan los tejidos muertos del árbol y se transporta aprovechando las corrientes de aire para llegar a

las partes altas del fuste, barrenar la corteza y dirigirse a la interfase cambium - floema con el fin de alimentarse de esta (Wood, 1982).

El primer ataque lo lleva a cabo la hembra, quien llega hasta la madera donde coloca los huevos a lo largo de ramificaciones pertenecientes a una galería que construye en forma



Figura 7. *Scolytus mundus* Wood. Foto: T. H. Atkinson. Tomada de Atkinson, 2013.

perpendicular al eje del árbol y de este modo asegura la siguiente generación. La emergencia de los adultos se muestra por orificios circulares de 1.3 - 1.5 mm de diámetro y galerías a lo largo del tronco (Figura 8; Cibrián *et al.*, 1995).

S. mundus se considera una de las plagas con mayor importancia en los bosques del centro de México y el principal descortezador de *A. religiosa*, a quienes ataca ocasionalmente en estado aparentemente sano y mayormente cuando se encuentran debilitados por enfermedades de raíz (*Heterobasidion annosus*) o en declinación (Cibrián *et al.*, 1995; Villa citado por Tkacz *et al.*, 1998; Burgos, 2012). Los incendios forestales, exposición, déficit de humedad del suelo, presencia de islas de calor y la ausencia de manejo forestal son algunos otros factores importantes que hacen susceptible al arbolado de ataque por este insecto (Cibrián *et al.*, 2007).

Algunas otras observaciones indican que únicamente los bosques maduros y sobremaduros que sufren debilitamientos por sequías o por incendios han soportado las infestaciones más severas registradas para este coleóptero (Cibrián *et al.*, 1995).

El descortezador *S. mundus* puede atacar al oyamel de manera individual o agregada. En la primera lo hace a diferentes alturas del fuste y si la herida no logra degollar al árbol se inicia la cicatrización del área afectada; en el segundo caso la población de insectos crece y se suman al ataque descortezadores como *P.*

variegatus y *Pityophthorus spp* (Cibrián *et al.*, 1995; Villa citado por Tkacz *et al.*, 1998; Burgos, 2012).

Cuando *S. mundus* presenta tres o cuatro generaciones, se mantiene en poblaciones altas y se dirige a las porciones inferiores de tronco, de modo tal que grupos de árboles pueden llegar a albergar cerca de 200 individuos. En ocasiones se ha observado que un mismo tronco puede presentar múltiples ataques en diferentes fechas.

S. mundus no mata por sí solo al oyamel; sin embargo, las lesiones pueden durar varios años expuestas y con ello aumenta la probabilidad de ataque por descortezadores secundarios y hongos pudridores de la madera, los cuales contribuyen a la muerte descendente del árbol (Cibrián *et al.*, 1995).

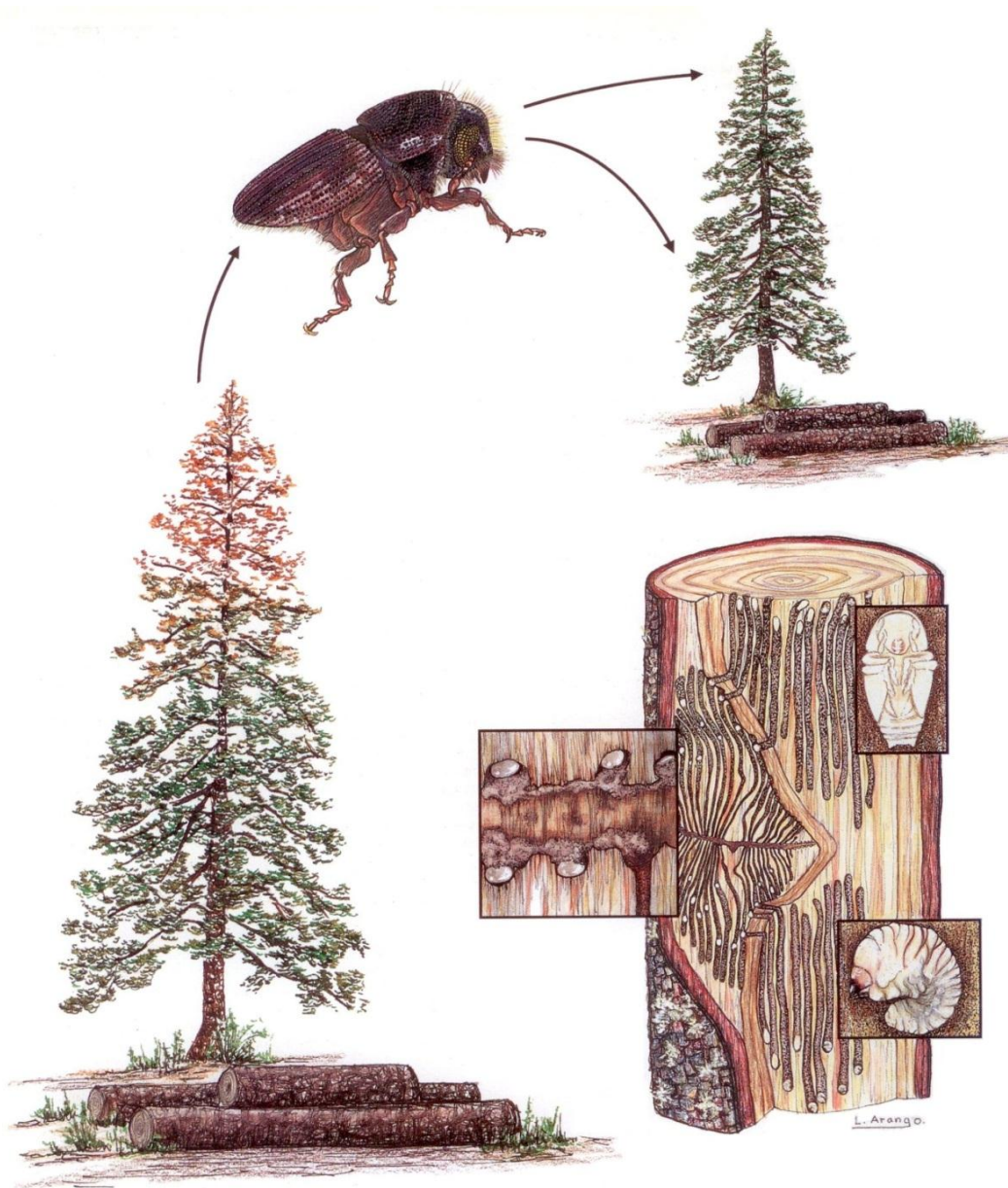


Figura 8. Ciclo de vida de *Scolytus mundus* Wood. Tomada de Cibrián *et al.* (1995).

De acuerdo con Hernández (1979), *S. mundus* presenta dos generaciones por año: la primera se desarrolla de octubre a mayo y la segunda de junio a octubre. En cuanto a la distribución, se registró la presencia de *S. mundus* en los bosques de oyamel a lo largo del Eje Volcánico Transversal en los estados de Veracruz, Puebla,

Tlaxcala, Hidalgo, México, Morelos, Michoacán y el Distrito Federal (Wood, 1982, Cibrián *et al.*, 1993; Cibrián *et al.*, 1995; Campos y Cibrián, 2012. Com. pers.).

Estudios más recientes indican que la presencia de *S. mundus*, en la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca, se debió al déficit hídrico originado por una sequía atípica (Garduño, 2011).

4.6. Clima y cambio climático: perspectivas generales

El origen del clima corresponde al momento en que el planeta Tierra se formó y las diferencias en él son atribuidas al cambio en las condiciones superficiales del planeta. La principal característica que define al clima es el cambio que presenta en diferentes escalas de tiempo (Burroughs, 2001).

El concepto tradicional de clima contempla promedios de variables con alrededor de 30 años de datos como mínimo según la Organización Meteorológica Mundial (Casas y Alarcón, 1999). Sin embargo, actualmente se habla de clima como el estado cambiante de la atmósfera debido a la compleja interacción con el mar y los continentes. En este sentido, cuando las variables meteorológicas distan de los valores promedio a lo largo de diferentes períodos de tiempo, se habla de anomalías climáticas (Magaña, 2004).

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC), en su artículo 1, define el cambio climático como: “cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera mundial, y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”.

Las actividades humanas se traducen en emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Actualmente el más importante de los GEI es el CO₂, debido a que es el más abundante en la atmósfera; sus niveles han rebasado los normales en los últimos 200 años (Figura 9) y se sabe que es producto de actividades como la quema de combustibles fósiles, además de la deforestación y cambios en el uso de suelo.

La presencia de estos gases en la atmósfera originan el fenómeno conocido como efecto invernadero, al cual deben el nombre por la analogía con las condiciones ambientales que suceden en los invernaderos convencionales; el calor que queda atrapado en la atmósfera se retiene sobre la superficie molecular de estos gases, manteniendo las fluctuaciones de temperatura bajas y dando origen a este fenómeno en diferentes escalas (Figura 10).

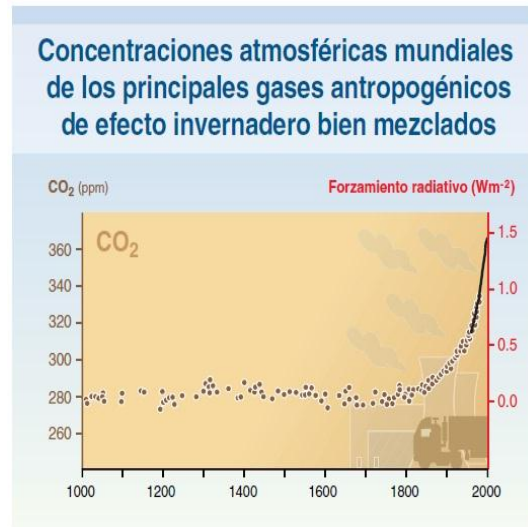


Figura 9. Concentración de CO₂ y cambios mundiales en la radiación durante el último milenio. Tomada de Gitay *et al.*, 2002.

Se estima que los incrementos de la temperatura del planeta desde mediados del siglo XX, son consecuencia del aumento en la concentración de GEI producto de las actividades humanas. Estos incrementos son de 0.74 °C, del año 1906 al 2006.

Otras observaciones indican que, desde 1961, los océanos del mundo han absorbido más del 80% del calor del planeta, derivando en incrementos de los niveles normales del agua del mar (IPCC, 2007).

En la actualidad, las evidencias más conocidas que de los efectos del calentamiento global muestran el estado actual de los glaciares, pues se ha observado que se derriten a ritmos acelerados no vistos antes. Ejemplo de ello son los del Kilimanjaro en Tanzania, los Alpes Europeos y los que se encuentran dentro del *Glacier National Park* en Estados Unidos, mismos que se cree

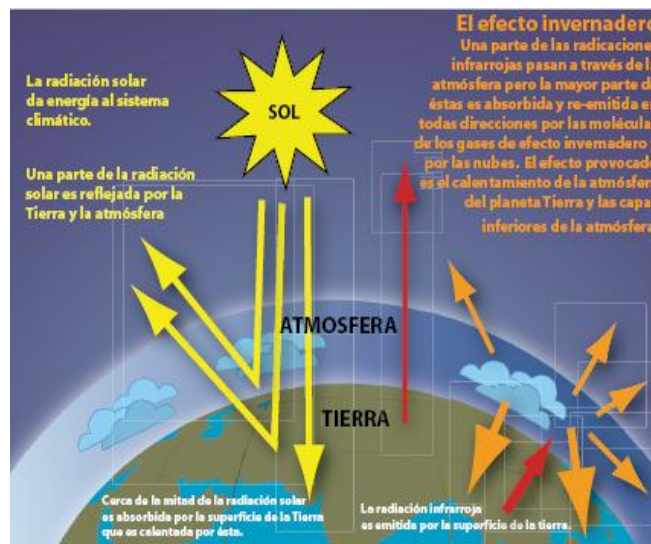


Figura 10. Esquema del efecto invernadero global. Tomado de IPCC, 2007.

puedan desaparecer en las próximas décadas. Otras pueden observarse en la pérdida de coloración y muerte de los grandes arrecifes de coral, causadas por el calentamiento de los océanos. Incluso el aumento en la frecuencia y severidad de eventos como *El Niño* y huracanes son otros de los más mencionados (Casper, 2010).

Debido a que el cambio climático es reconocido como problema de interés mundial, desde la década de los 70's este fenómeno fue atribuido a las altas temperaturas y se consideró el responsable de condiciones climáticas inusuales como sequías, inundaciones, ciclones, huracanes y tifones. En 1988 se fundó el IPCC¹⁵ para “proporcionar al mundo con una visión científica clara del estado de conocimiento actual sobre el cambio climático y sus potenciales impactos ambientales y socio-económicos”; se planteó como una agrupación de expertos en el tema y actualmente es la encargada de evaluar los cambios de clima (actuales y futuros), el impacto, formas de adaptación y de mitigación mediante el estudio de las emisiones de GEI como agentes causales de este fenómeno (Gitay *et al.*, 2002; Ávalos, 2004).

Con base en datos históricos y proyecciones futuras con escenarios de cambio climático que consideran emisiones de GEI, el IPCC ha estimado cambios en el clima que van en aumento promedio para la temperatura de la superficie terrestre de 1.8 - 4.0 °C hacia el año 2100. A demás, con grado de confianza alto se espera que a mediados del siglo XXI la escorrentía fluvial anual y la disponibilidad de agua puedan aumentar hacia latitudes Norte y Sur (y en ciertas áreas lluviosas tropicales) y disminuir en regiones secas de latitudes medias y en los trópicos (IPCC, 2007).

El estudio del cambio climático ha tomado gran importancia por las consecuencias que puede ocasionar a diferentes niveles, pues se espera que afecte directamente a organismos individuales, poblaciones, su distribución y el funcionamiento de los ecosistemas (Gitay *et. al.* 2002). Sin embargo, estos cambios (actuales y futuros) representan una amenaza global y los efectos están determinados principalmente

¹⁵ Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático (*Intergovernmental Panel on Climate Change*). www.ipcc.ch

por el grado de vulnerabilidad (generalmente asociada al desarrollo) de las sociedades o ecosistemas (Magaña *et al.*, 2004; Leary *et al.*, 2008).

Se esperan efectos sobre distintos sectores a nivel mundial y regional. En el caso de los alimentos, se espera que la producción de estos aumente en latitudes medias y altas donde la temperatura se incremente entre 1 - 3 °C y que disminuya hacia latitudes inferiores en zonas tropicales donde la temperatura se incremente de 1 - 2°C. En los ecosistemas habrá una extinción de especies entre 20 - 30% si la temperatura promedio mundial aumenta entre 1.5 - 2.5°C; se pronostican cambios en la estructura y función de los ecosistemas así como modificaciones en la distribución geográfica de las especies con consecuencias negativas en la biodiversidad. Las costas se verán afectadas por mayor erosión y aumentos en el nivel del mar. Los asentamientos humanos e industrias se verán influidos por estos cambios si se ubican en zonas costeras y planicies propensas a crecidas fluviales. La salud de la población humana disminuirá debido a enfermedades inducidas por fenómenos meteorológicos y los padecimientos respiratorios irán en aumento por las altas concentraciones de ozono en el ambiente (IPCC, 2007; Leary *et al.*, 2008).

4.6.1. Escenarios de cambio climático

Los escenarios de cambio climático representan imágenes de lo que podría acontecer por los cambios en las emisiones de GEI y se consideran instrumentos de utilidad, tanto en el análisis como en la evaluación los efectos que el cambio climático puede tener a diferentes niveles.

Durante 1990 y 1992 se desarrollaron algunos escenarios que estimaban emisiones globales de GEI a largo plazo. Estos se sometieron a evaluación en 1995 y se concluyó que se debía comprender las fuerzas que rigen estas emisiones y la metodología de elaboración conforme a los cambios habidos desde 1992. Para 1996, el IPCC determinó generar nuevos escenarios con el fin de comprender mejor el clima y las anomalías de este. En estos estudios se determinó que el cambio

demográfico, el desarrollo social y el económico, así como la dirección y rapidez del cambio tecnológico, son las principales fuerzas que influyen en la trayectoria de estas emisiones.

Actualmente se desarrollaron cuatro líneas evolutivas en las que se generaron 40 escenarios reunidos en cuatro familias; estas se clasificaron en A1, A2, B1 y B2 y denotan lo siguiente (IPCC, 2000; IPCC, 2007):

- A1. Describe el mundo futuro con rápido crecimiento económico donde la población mundial alcanza el límite a principios de siglo y disminuye posteriormente, considerando la rápida introducción de tecnologías eficientes. De esta se deriva el grupo de escenarios A1B que considera la utilización equilibrada de todo tipo de fuentes.
- A2. Las características distintivas de esta familia son la autosuficiencia y la conservación de las identidades locales, en las cuales el desarrollo económico es regional, el crecimiento económico y tecnológico por habitante están fragmentados y son más lentos que en las otras líneas evolutivas. Esta considera un solo grupo de escenarios.
- B1. Representa un mundo convergente con igual población a la que existe actualmente, misma que alcanza el máximo a mediados de siglo y desciende posteriormente. Se caracteriza por el rápido cambio hacia economías de servicios e información y contempla la utilización poco intensiva de materiales y tecnologías limpias¹⁶.

¹⁶ Entendido como energías y actividades con bajas o sin emisiones de GEI.

- B2. En esta predomina un mundo de soluciones locales hacia la sostenibilidad económica, social y medioambiental.

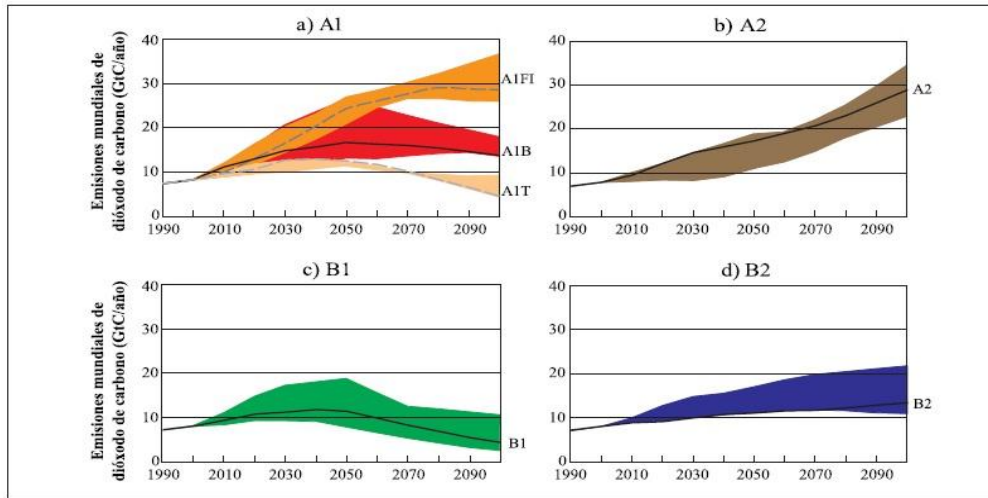


Figura 11. Emisiones de CO₂ mundiales por familia de escenarios (1990-2100). Tomada de IPCC (2000).

Cada una de las familias representa una emisión de GEI hipotética desde el año 1990 hasta el 2099 (Figura 11). En relación a su utilidad, se precisa que ninguno de ellos está sujeto a probabilidades de suceder y se aplican de acuerdo a las necesidades del usuario. Estos escenarios plantean variabilidades del clima en función de la emisión de GEI a diferentes escalas. Las proyecciones mundiales están consideradas en el Informe Especial de Escenarios de Emisiones del IPCC (2000).

En México se generaron proyecciones regionalizadas de escenarios para todo el país y están elaboradas mediante la reducción de escala de los Modelos de Circulación General (MCG)¹⁷ que permite relacionar patrones de gran escala con condiciones regionales del clima y cuya metodología se describe en el Cuarto Reporte de Evaluación del IPCC. Para estos se esperan incrementos en la temperatura a finales de este siglo de 2 - 4°C, principalmente en el norte de México. Tales proyecciones

¹⁷ Modelos de simulación de los componentes climáticos principales en la atmósfera, principalmente a escala global y continental (IPCC, 1997)

permiten la elección de diferentes escenarios (A2, A1B, B1 y *committed*) y la opción llamada “ensamble”, la cual emplea el promedio de más de 20 diferentes MCG para determinar las anomalías de precipitación y temperatura hasta el año 2099 (Magaña y Caetano, 2007).

4.7. Comportamiento de las plagas forestales ante el cambio climático

El comportamiento de las plagas se determina en función a sus características ecológicas. Las variables ambientales como las climáticas, meteorológicas y en muchos casos las topográficas son importantes debido a que modifican el tamaño y distribución de las poblaciones de insectos forestales (Coulson y Witter, 1990; Nair, 2007).

Debido al carácter poiquilotermo, la temperatura de los insectos forestales puede tener efectos directos modificando por sí sola su distribución y tamaño poblacional (Whyllie y Speight, 2012). Además, se reconoce la existencia de la adaptación metabólica al frío para insectos de climas en elevadas altitudes y latitudes; lo cual representa no solo su respuesta a la temperatura ambiental, sino un componente indispensable en el ciclo de vida de los insectos (Chown y Nicolson, 2009).

Se registran temperaturas de 23.8 - 26.6 °C (75-80 °F) como óptimas para el desarrollo de insectos de zonas templadas y donde éstos presentan mayor actividad (Craighead, 1950). Otros estudios documentan que bajo condiciones controladas que simulan tiempos de verano, el descortezador *Dendroctonus frontalis* Zimmerman a temperaturas alrededor de 10 °C emerge del hospedero a los 25 días después del ataque inicial, y reemerge a temperaturas de 25 °C después de los siguientes 12 días (Gagne *et. al.*, 1980). También se indican óptimos de 24 – 27 °C en condiciones naturales para diferentes especies de insectos en bosques templados del Este de Estados Unidos (Forest Service, 1985).

La altitud mantiene una correlación con la temperatura, debido a que en mayores elevaciones existe reducción en la temperatura y a la vez disminución en la diversidad de árboles e insectos (Furniss y Carolin, 1977; Whyllie y Speight, 2012). Algunos estudios han mostrado que cuando la altitud es elevada, el número de insectos por unidad de área es reducido (Speight *et al.*, 1999, citado por Battisti, 2008).

Aunque no se ha determinado correlación directa con otras variables, la exposición puede determinar algunas condiciones de temperatura y con ello algunos comportamientos en poblaciones de insectos forestales (Furniss y Carolin, 1977).

Los cambios globales esperados en la precipitación indican variaciones en la frecuencia y severidad de los eventos climáticos que podrían impactar los bosques del mundo. En referencia a lo anterior, se pronostican sequías más prolongadas, expansión de insectos a nuevas áreas e incrementos en la frecuencia de incendios. Las afectaciones actuales se muestran en plagas de polillas (*Thaumetopoea pityocampa* y *T. processionea*), descortezadores (*D. frontalis* y *D. ponderosae*) y también de hongos (*Mycosphaerella pini*, *Armillaria mellea* y *Phytophthora cinnamomi*), quienes han aumentado sus rangos de expansión y en algunos casos han mostrado cambios en los períodos generacionales (Moore y Allard, 2008).

Uno de los primeros estudios que pronostica cambios en los comportamientos de insectos bajo escenarios de cambio climático es el de Williams y Liebhold (1995), quienes consideraron cinco escenarios y mapas históricos para proyectar la distribución espacial de la defoliación causada por dos polillas en coníferas; observaron, entre otras cosas, que la defoliación era proporcional a los aumentos en las temperaturas y precipitación para algunos meses de verano y documentaron aumentos en la defoliación con escenarios de cambio climático respecto a los registros históricos de 15 % del área de estudio.

En otros estudios donde se argumenta el carácter que las plagas tienen como indicadores de alteraciones en ecosistemas forestales, se proyectan

desplazamientos y áreas nuevas de expansión en Norteamérica durante las próximas décadas debido al incremento en la temperatura (Logan *et al.*, 2003). Considerando el aumento en el número de insectos por unidad de área, se cree que existe una relación inversa con la altitud y latitud, ya que Battisti (2008) asume que los aumentos de temperatura originados por el calentamiento global pueden provocar la expansión de insectos hacia mayores altitudes y latitudes.

Las perspectivas futuras acerca de las plagas y su comportamiento con base en el cambio climático consideran como respuestas potenciales modificaciones en la distribución geográfica, en el período de hibernación, la extensión de los períodos de desarrollo e incrementos en el número de generaciones, entre otros (Ladányi y Horváth, 2010).

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Área de estudio

5.1.1. Ubicación de la RBMM

La Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca (RBMM) se encuentra en los municipios de Temascalcingo, San Felipe del Progreso, Donato Guerra y Villa de Allende en el Estado de México, y Contepec, Senguio, Angangueo, Ocampo, Zitácuaro, y Aporo en el Estado de Michoacán. Las coordenadas extremas donde se localiza comprenden dos sitios:

- *Altamirano* entre los 19° 59' 42" y 19° 57' 07" de latitud norte (N) y 100° 09' 54" y 100° 06' 39" longitud oeste (O), y
- el *Corredor Chincua - Cerro Pelón* en los 19° 44' 27" y 19° 18' 32" de latitud norte (N) y 100° 22' 26" y 100° 09' 07" longitud oeste (O).

Esta área tiene una extensión de 56, 259 ha, se divide en zona de amortiguamiento (42,708 ha) y zona núcleo (13,551 ha; Figura 12).

Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca (RBMM)

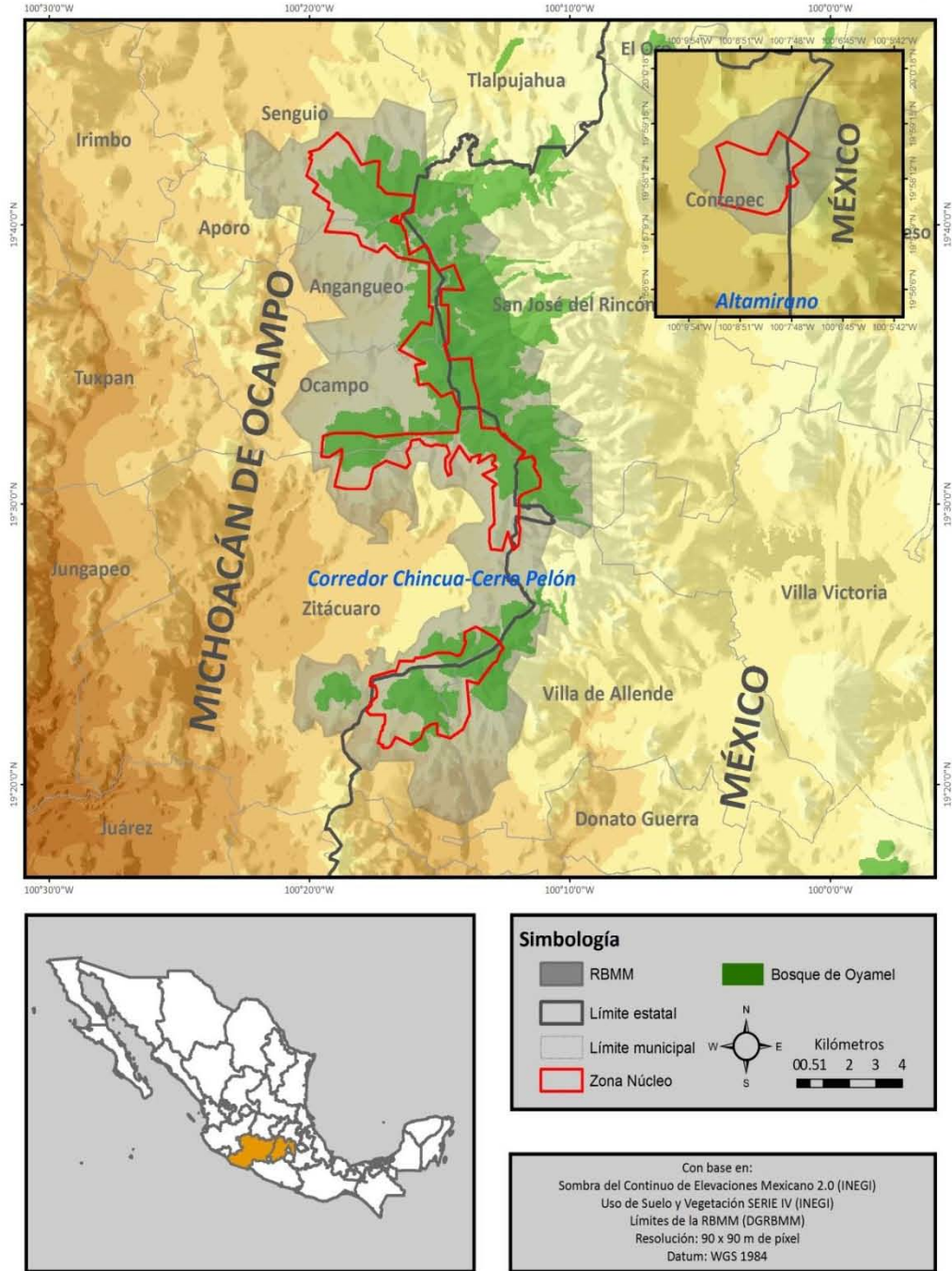


Figura 12. Localización de la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca (RBMM).

5.1.2. Descripción de los componentes biofísicos de la RBMM

El área de la RBMM pertenece al Eje Volcánico Transversal, posee un sistema montañoso discontinuo formado principalmente por sierras y lomeríos en mayor proporción, separadas por valles y llanuras con mínima extensión. Las máximas elevaciones corresponden a los 3,320 m.s.n.m. en el Cerro de Altamirano para el sitio ubicado en la parte más al Norte del área de la Reserva, 3,640 m.s.n.m. en Campanario, 3,340 m.s.n.m. en Cerro El Mirador, 3,200 m.s.n.m. en Huacal, 3,180 m.s.n.m. en Chivatí y 3,040 m.s.n.m. para el Cerro Los Madroños en el corredor Sierra Chincua - Cerro Pelón hacia el sitio ubicado en la parte Sur.

En general, el área de la Reserva presenta un clima templado subhúmedo con lluvias en verano y temperaturas medias anuales de 8 - 22 °C (Cw); las precipitaciones registran un promedio de 700 - 1,250 mm por año. Por las condiciones climáticas y presencia de una alta humedad ambiental, es posible observar neblina en los meses húmedos y fríos (CONANP, 2001; Cornejo e Ibarra, 2008).



Figura 13. Neblina en los bosques de oyamel de la RBMM. Foto: R. Medellín

Los suelos de la RBMM son principalmente andosoles húmico y órtico; en menor proporción existen los acrisoles, planosoles, feozem, litosoles, fluvisoles y algunas extensiones de cambisoles, regosoles y vertisoles.

El tipo de vegetación representativa es el bosque de oyamel, el cual se encuentra entre los 2,400 - 3,600 m.s.n.m., cuya especie dominante es *Abies religiosa* (HBK) Schlecht. et Cham. es la especie dominante y constituye el hábitat de la mariposa monarca (*Danaus plexippus*). Le sigue el bosque de pino - oyamel en la franja altitudinal entre los 2400 - 3000 m.s.n.m., con menor proporción el bosque de pino en manchones aislados entre los 1,500 - 3,000 m.s.n.m., el bosque de encino distribuido por debajo de los 2,900 m.s.n.m y el bosque de cedro que se restringe al Cerro Pelón y otras áreas reducidas entre los 2,400 - 2,600 m.s.n.m.; también se presentan mínimas extensiones de matorrales y pastizales dentro de la zona núcleo y de amortiguamiento.

La fauna de la Reserva está representada por 198 especies de vertebrados, de las cuales son cuatro especies de anfibios, 132 de aves y 56 de mamíferos. Algunas especies endémicas o bajo alguna protección son la salamandra michoacana (*Ambystoma ordinarium*), los roedores *Peromyscus levipes* y *Nelsonia neotomodon* y la mariposa monarca (*D. pexippus plexippus*) que se encuentra bajo protección especial (CONANP, 2001).

5.2. Modelaje de la distribución potencial de *Scolytus mundus*

Para determinar la distribución potencial de *S. mundus* se utilizó el Algoritmo Genético Basado en Reglas (GARP), en la versión de escritorio (DesktopGarp 1.1.6). Los requerimientos del modelo son localidades de presencia y coberturas ambientales en formato ASCII. El diagrama de flujo del método se muestra en la Figura 14.

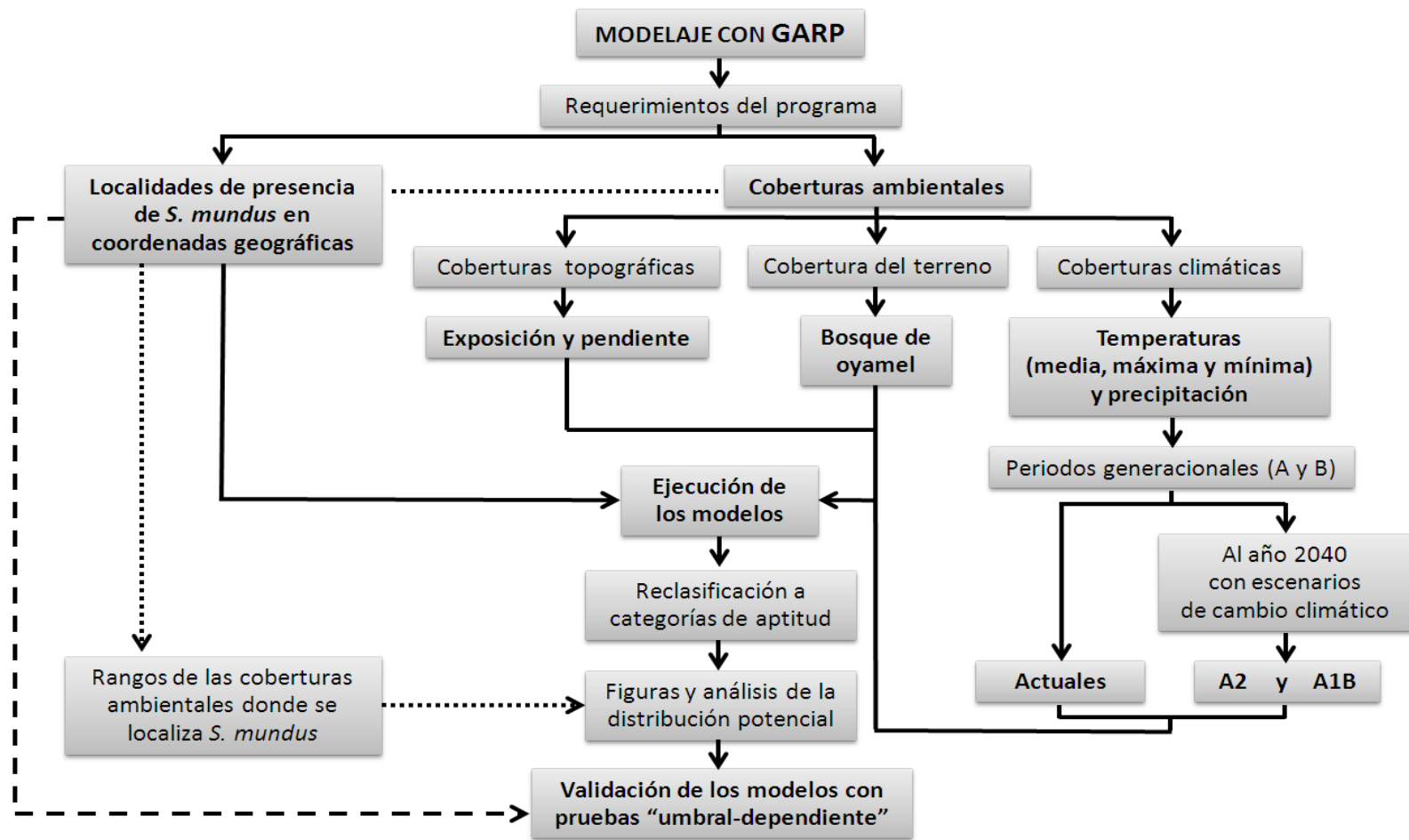


Figura 14. Diagrama de flujo del método.

5.2.1. Localidades de presencia de *Scolytus mundus*

Para reunir las localidades de presencia de *S. mundus* se realizó una investigación en colecciones científicas de especímenes biológicos, publicaciones científicas, redes de información sobre biodiversidad, por contacto con dependencias gubernamentales y con expertos en el conocimiento de dicha especie.

Se obtuvieron 41 localidades a lo largo del Eje Volcánico Transversal en las entidades de Veracruz, Puebla, Tlaxcala, Hidalgo, Estado de México, Distrito Federal, Morelos y Michoacán.

En algunas localidades se registraron las coordenadas geográficas. Para las que no, se realizó el proceso de georreferenciación utilizando Google Earth © 2012 con apoyo de los especialistas en el conocimiento de *S. mundus*.

Las 41 localidades se dividieron en dos grupos (Peterson *et al.*, 2011). El primer grupo contempla 32 y con ellos se hizo un listado en formato de Excel (.xls¹⁸) necesario para ejecutar GARP. El segundo grupo estuvo conformado por nueve localidades de la RBMM y con ellos se validaron los modelos, debido a que el análisis de la información se centró en esta área (Anexo 1).

Las localidades con presencia de *S. mundus* sirvieron para definir los límites geográficos de las coberturas ambientales.

¹⁸ Formato de Microsoft Excel © para libros con hojas de cálculo correspondientes a versiones iguales o anteriores a la 2003.

5.2.2. Coberturas ambientales para *Scolytus mundus*

Las coberturas utilizadas fueron de tres tipos:

- Climáticas: temperatura (media, máxima y mínima en °C) y precipitación (mm)
- Cobertura del terreno: bosque de oyamel
- Topográficas: exposición y pendiente (%)

El procesamiento de las coberturas se hizo dentro de los límites estatales donde se localiza *S. mundus* (Veracruz, Puebla, Tlaxcala, Hidalgo, Estado de México, Distrito Federal, Morelos y Michoacán), utilizando la herramienta SIG ArcGIS 9.3® con el *datum*¹⁹ WGS84, en formato de ráster *ARC/INFO GRID*²⁰ para facilitar el manejo de la información y con resolución de 90 x 90 m de píxel.

Bajo la consideración de que *S. mundus* presenta dos generaciones por año (Hernández, 1979; Cibrián *et al.*, 1995), se establecieron dos períodos de tiempo acordes a estos para el procesamiento de la información:

- Período generacional A: junio – septiembre
- Período generacional B: octubre - mayo

Las coberturas se convirtieron a formato ASCII como tipo de archivo necesario para la ejecución de GARP y se ordenaron como se muestra en el Cuadro 2.

¹⁹ Geometría de referencia para líneas, planos o superficies. En este caso se refiere a un conjunto de puntos de la superficie terrestre.

²⁰ Formato de ESRI para archivos de celdas con información de valores discretos o continuos.

Cuadro 2. Coberturas ambientales para las ejecuciones de GARP.

Distribuciones	Coberturas ambientales		
	Climáticas	Cobertura del terreno	Topográficas
Distribución potencial actual	Período A Período B	Temperatura media, máxima y mínima (°C) y precipitación (mm)	
Distribución potencial con el escenario A2 en el año 2040	Período A Período B	Temperatura media, máxima y mínima (°C) y precipitación (mm) + anomalías del escenario A2*	Bosque de oyamel Exposición y pendiente
Distribución potencial con el escenario A1B en el año 2040	Período A Período B	Temperatura media, máxima y mínima (°C) y precipitación (mm) + anomalías del escenario A1B*	

*Obtenidas del SIECCRe en el sitio de internet <http://zimbra.ine.gob.mx/escenarios/>

5.2.2.1 Coberturas climáticas

Las coberturas climáticas actuales de temperatura (media, máxima y mínima en °C) y precipitación (mm) se generaron a partir de información del banco cartográfico ráster del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) actualizada al 2003 con resolución de 90 x 90 m de píxel (Díaz, 2003). Para las temperaturas se hicieron promedios y para la precipitación sumas de los meses de cada período generacional. A este conjunto se le llamó “coberturas climáticas base” y se utilizaron en las distribuciones potenciales actuales.

El segundo conjunto de coberturas climáticas se generó a partir de las “coberturas climáticas base” y las anomalías de temperatura y precipitación del Sistema de Información de Escenarios de Cambio Climático Regionalizados (SIECCRe) del Instituto Nacional de Ecología (INE) para el año 2040 de los escenarios A2 y A1B con distancia entre puntos de 50 Km (Magaña y Caetano, 2007). Estos puntos se

interpolaron con el método de vecino más cercano (ESRI, 2012), se sumaron a las coberturas climáticas base y fueron utilizadas en las distribuciones con escenarios de cambio climático.

5.2.2.2 Cobertura del terreno

La cobertura del terreno con bosque de oyamel fue generada con la carta “Uso de suelo y vegetación” de la Serie IV de INEGI, cuyo formato digital es un archivo *shapefile* (.shp²¹) con una escala de 1:250,000.

5.2.2.3 Coberturas topográficas

Las coberturas topográficas de exposición y pendiente (%) fueron generadas a partir del Modelo Digital de Elevación (MDE)²² utilizando el módulo *Spatial Analyst* de ArcGIS 9.3®. El MDE fue descargado del sitio de internet del Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) 2.0 (INEGI, 2011b), es un archivo ráster con 50 x 50 m de resolución de píxel.

²¹ Formato de ESRI para archivos con formas como puntos, líneas o polígonos.

²² Representación visual y matemática de la altimetría con respecto al nivel medio del mar. Se usa para caracterizar las formas de relieve (INEGI, 2011a).

5.2.3. Ejecución de los modelos, procesamiento y análisis de resultados

En cada ejecución de GARP se estableció un 50% de localidades de presencia para el entrenamiento del algoritmo, 100 corridas y se aplicaron las cuatro reglas que utiliza en la elaboración de las predicciones.

El límite de convergencia fue bajo (0.001) para permitir que el algoritmo alcanzara un óptimo ajuste del modelo con el máximo número de iteraciones (repeticiones del algoritmo), que en este caso fue de 1000.

Se designó la generación de los “diez mejores modelos” (*Best Subset Selection Parameters*) y se permitieron predicciones que tuvieran hasta 20% de error de omisión en la distribución (Figura 15).

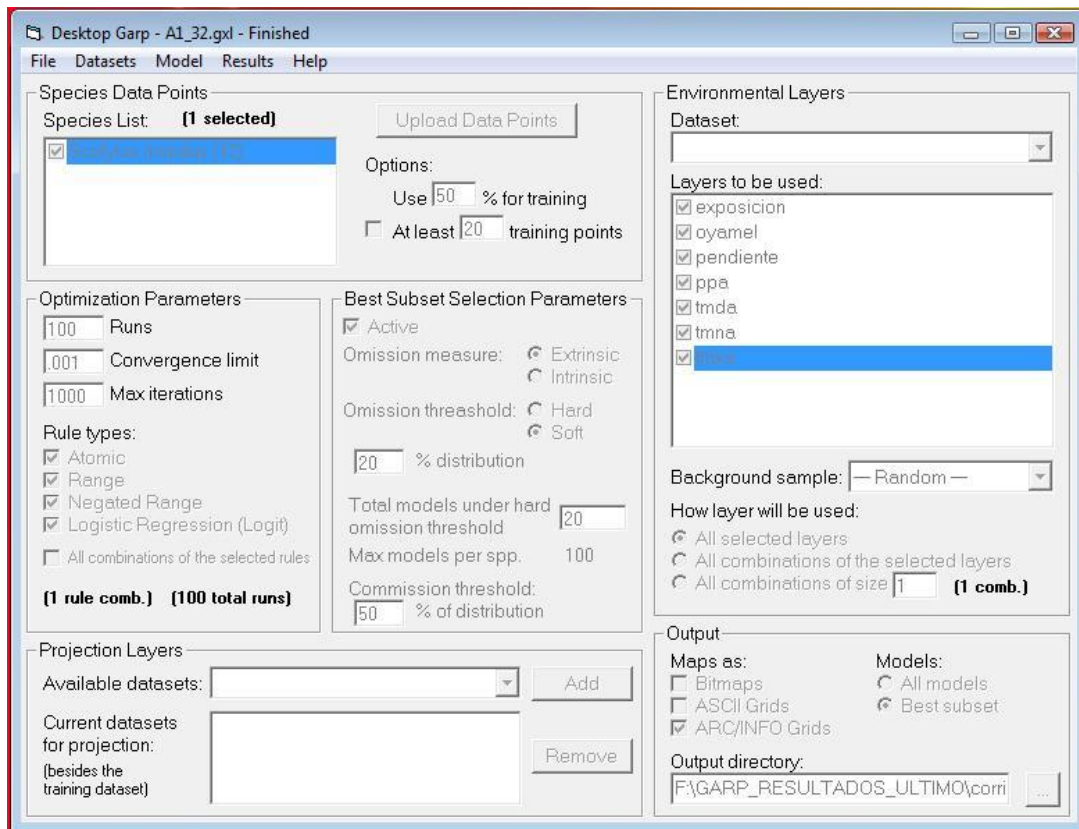


Figura 15. Interfaz de *DesktopGarp* con los parámetros utilizados las ejecuciones.

Como resultado de cada ejecución de GARP se obtuvieron 10 imágenes con el área de predicción que corresponden a los “diez mejores modelos”, es decir, a las áreas que representaron mejor la distribución potencial de *S. mundus*. Estas fueron sumadas y reclasificadas con el fin de generar cuatro categorías de aptitud (Cuadro 3) como una forma de elaborar “modelos compuestos” (Anderson *et al.*, 2002; Anderson *et al.*, 2003).

Cuadro 3. Descripción de las categorías de aptitud.

Categoría de aptitud	Clave	Descripción
No apta	N	Área de ausencia
Marginalmente apta	mA	Área donde se superponen de 1 - 4 mejores modelos
Apta	A	Área donde se superponen de 5 - 7 mejores modelos
Muy apta	MA	Área donde se superponen de 8 -10 mejores modelos

Se generaron figuras de distribución potencial de *S. mundus* con las categorías de aptitud en la RBMM y fueron complementadas con la sombra del MDE para apoyar las observaciones.

El análisis de los resultados se centró en la cuantificación del área predicha como apta para *S. mundus* en cada distribución potencial y en cada categoría de aptitud, sólo en la RBMM. Las diferencias fueron analizadas en función de los rangos y valores de las coberturas ambientales empleadas en cada distribución, los cuales fueron generados a partir de una extracción de valores con las 41 localidades de presencia de *S. mundus* (Figura 16).

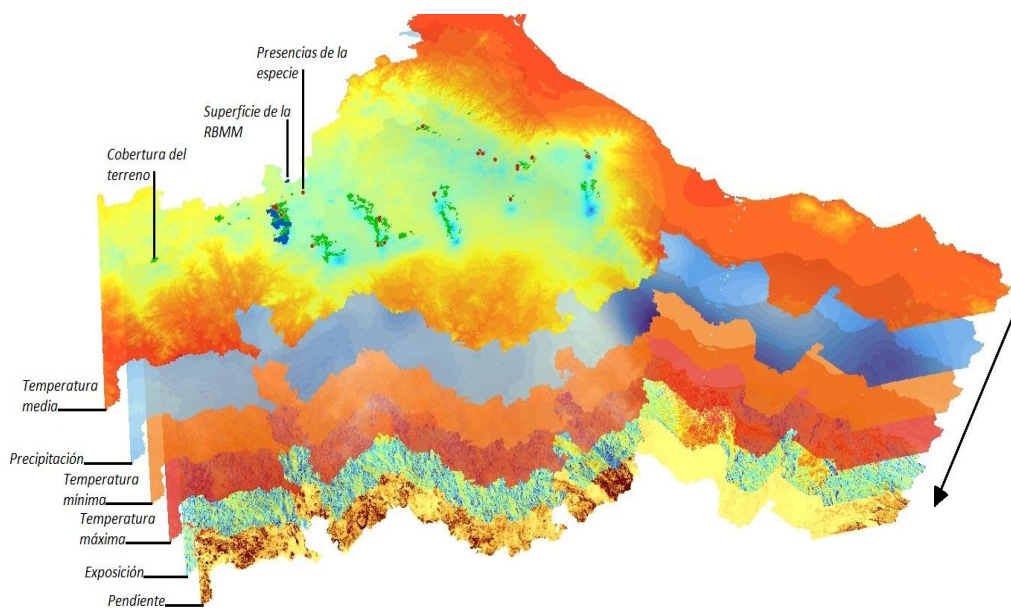


Figura 16. Esquema espacial de la extracción de valores con las localidades de presencia de *S. mundus* (puntos en color rojo).

Finalmente, para la validación de los modelos con GARP se empleó una prueba “umbral dependiente” basada en el cálculo de X^2 (Anderson *et al.*, 2002; Anderson *et al.*, 2003; Oberhauser y Peterson, 2003) con los elementos de la matriz de confusión descritos en el Cuadro 1 (Peterson *et al.*, 2011). Dicho cálculo se implementó en un macro²³ de Microsoft Excel © utilizando como parámetros: a) la proporción de localidades de presencia correctamente predichas sobre las distribuciones potenciales actuales, misma que permitió estimar el error de omisión y b) la proporción del área predicha como potencial respecto del área total del modelaje que contiene datos (entidades donde se encuentra *S. mundus*), la cual sustituyó la proporción de localidades de ausencia y permitió estimar el error de comisión.

²³ Serie de instrucciones para ejecución de instrucciones de manera secuencial.

6. RESULTADOS

6.1. Localidades de presencia de *Scolytus mundus*

Las localidades de presencia de *S. mundus* de 1968 - 2012 fueron 41 y se ubicaron en los bosques de oyamel del Eje Volcánico Transversal, incluida la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca (Figura 17).

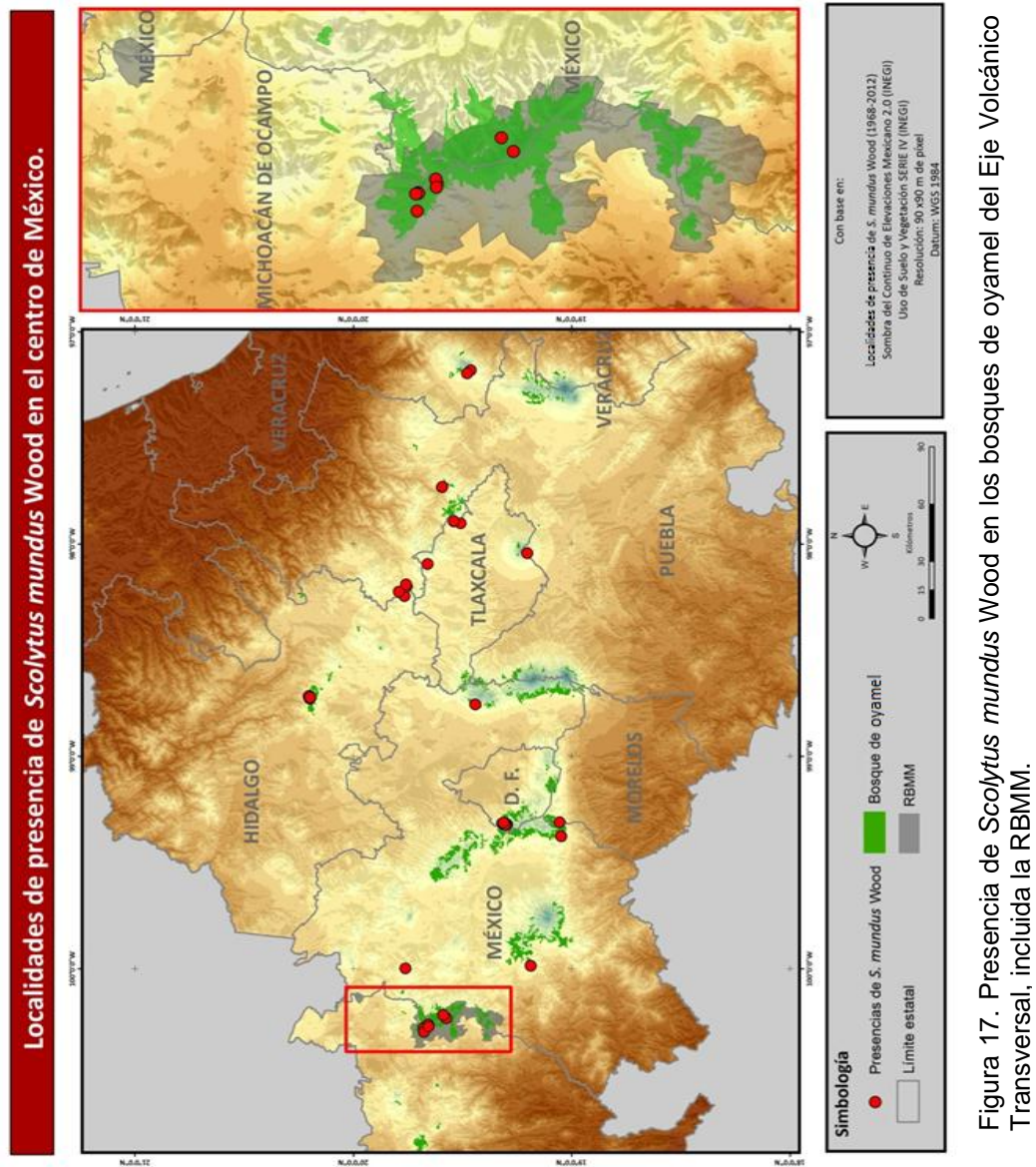


Figura 17. Presencia de *Scolytus mundus* Wood en los bosques de oyamel del Eje Volcánico Transversal, incluida la RBMM.

6.2. Áreas de distribución potencial de *Scolytus mundus*

Se generaron seis figuras de la distribución potencial de *S. mundus* en la RBMM en los dos periodos generacionales que presenta (junio – septiembre y octubre – mayo) bajo condiciones climáticas actuales y con los escenarios de cambio climático A2 y A1B, y se les asignó una clave (Cuadro 4):

Cuadro 4. Claves de las distribuciones potenciales de *S. mundus*.

Descripción	Clave
Distribución potencial actual del período generacional A	Actual A
Distribución potencial del período generacional A con el escenario A2 para el año 2040	A2 A
Distribución potencial del período generacional A con el escenario A1B para el año 2040	A1B A
Distribución potencial actual en el período generacional B	Actual B
Distribución potencial del período generacional B con el escenario A2 para el año 2040	A2 B
Distribución potencial del período generacional B con el escenario A1B para el año 2040	A1B B

La distribución potencial actual de *S. mundus* del período generacional A (Actual A), que comprende de junio a septiembre, indicó que 26,193 ha del presentaron aptitud para la presencia de este descortezador (Cuadro 5) y dicha área equivale a 46.55 % del área total de la RBMM.

El área de aptitud correspondió principalmente a la categoría muy apta (MA) con 22,975 ha, representando el 40.8 % de la RBMM, la categoría apta (A) registró 1,045 ha y marginalmente apta (mA) 2,172 ha. Éstas se localizaron en la mayor parte de la zona Este del corredor Chincua-Cerro Pelón ubicada en el Estado de México y en menor proporción en la zona núcleo del Estado de Michoacán (Figura 18).

Cuadro 5. Áreas potenciales del período generacional A.

Distribución	Categorías de aptitud				Área total de aptitud
	N	mA	A	MA	
Hectáreas (ha)					
Actual A	30,067	2,172	1,045	22,975	26,193
A2 A	28,354	3,484	149	24,272	27,906
A1B A	30,303	855	29	25,072	25,956

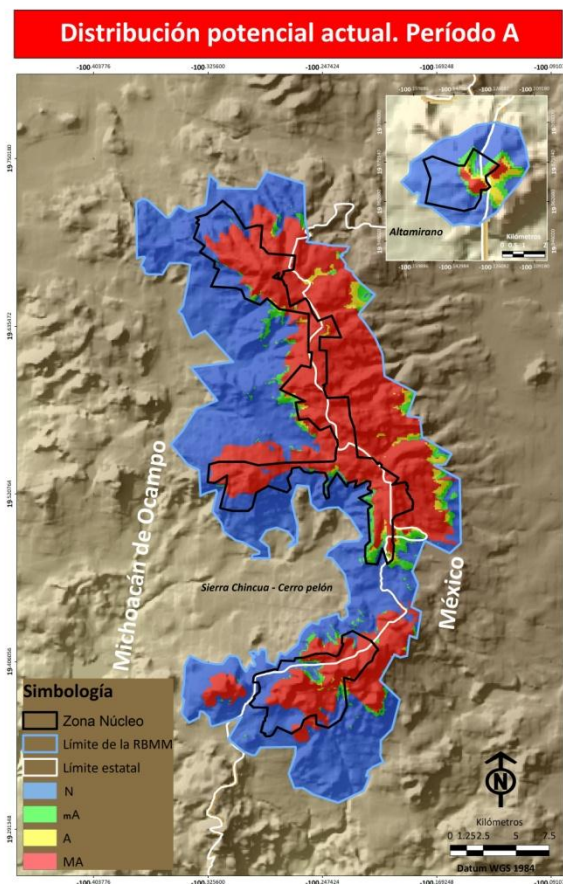


Figura 18. Distribución potencial actual de *S. mundus* en el período generacional A (Actual A).

Los resultados de la distribución potencial de *S. mundus* con el escenario A2 para el año 2040 durante el período generacional A (A2 A), indicaron un área con aptitud de 27,906 ha que equivale a 49.6 % del área total de la RBMM, lo que representa un incremento de 3.05 % respecto de la distribución Actual A.

En la categoría de aptitud MA registraron 24,272 ha, la categoría A presentó sólo 149 ha y mA 3,884 ha (Cuadro 5). En relación con la distribución Actual A, la categoría MA aumentó 1,297 ha, la categoría A disminuyó 896 ha y mA aumentó 1,312 ha. El incremento de MA sustituyó la mayor parte de la categoría A y el de mA ocupó áreas de la categoría N dispersas en la zona Oeste de la Reserva en el Estado de Michoacán (Figura 19).

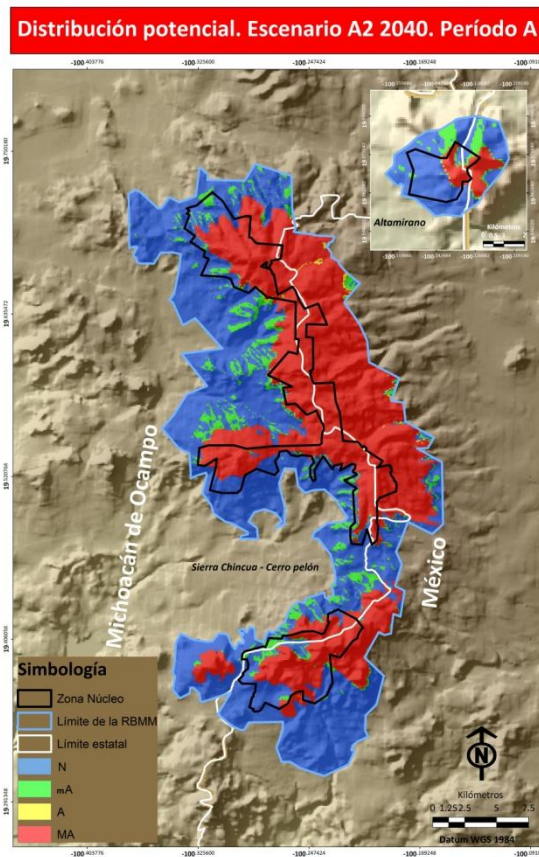


Figura 19. Distribución potencial de *S. mundus* en el período generacional A con el escenario A2 (A2 A).

Para la distribución potencial con el escenario A1B hacia el año 2040 durante el período generacional A (A1B A), se registraron 25,956 ha de área de aptitud para *S. mundus*, la cual representa 46.11 % de la RBMM, 0.44 % menos que Actual A.

La categoría MA presentó 25,072 ha, la categoría A únicamente 29 ha y mA 855 ha (Cuadro 5). En relación con Actual A, la categoría MA de la distribución A1B A aumentó 2,097 ha y sustituyó la mayor parte de las áreas de las categorías A y mA (Figura 20).

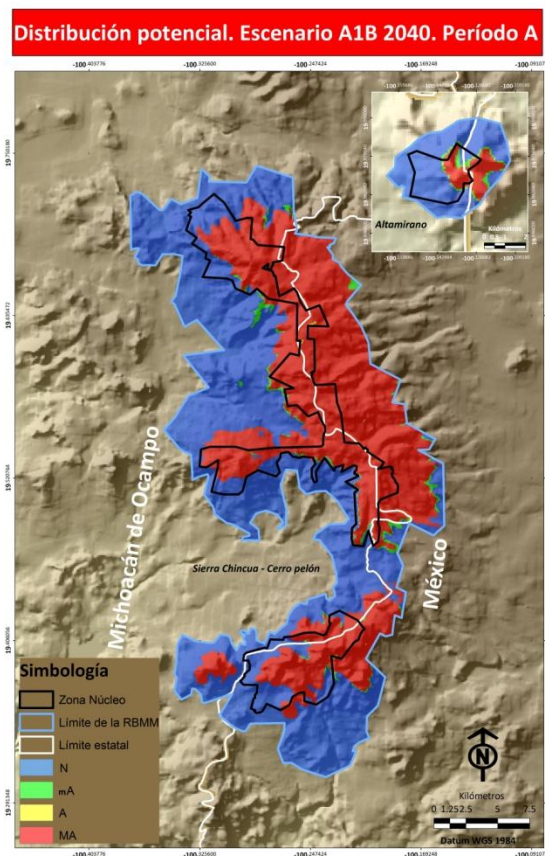


Figura 20. Distribución potencial de *S. mundus* en el período generacional A con el escenario A1B (A1B A).

La comparación entre las distribuciones potenciales bajo escenarios de cambio climático A2 A y A1B A, indicó mayor área de aptitud para *S. mundus* en A A2 (27,906 ha) que en A1B A (25,957 ha). Esta diferencia es de 1,949 ha y se observa en las áreas dispersas en la zona Oeste de la RBMM. Sin embargo, el área de aptitud en la categoría MA de la distribución A1B A fue mayor que en la distribución A2 A por 800 ha.

Con respecto a las coberturas climáticas utilizadas en las distribuciones potenciales descritas anteriormente, correspondientes al período generacional A, el rango de temperaturas para Actual A fue de 4.3 - 22.8 °C y el de precipitación de 585 - 768.8 mm; A2 A empleó temperaturas de 5.5 - 24 °C y precipitación de 545.1 - 717.3 mm; y A1B A temperaturas de 5.8 - 24.3 °C y precipitación de 595.9 - 771 mm (Cuadro 6).

Cuadro 6. Rangos de las coberturas climáticas del período generacional A.

Distribución	Rangos			
	Temperatura media (°C)	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)	Precipitación (mm)
Actual A	10.5 - 16.8	16.7 - 22.8	4.3 - 10.9	585.0 - 768.8
A2 A	11.7 - 18.0	17.9 - 24.0	5.5 - 12.1	545.1 - 717.3
A1B A	12.0 - 18.3	18.2 - 24.3	5.8 - 12.4	595.9 - 771.0

En relación con las coberturas climáticas de la distribución Actual A, las temperaturas aumentaron 1.2 °C en A2 A y 1.5 °C en A1B A, y la precipitación disminuyó 45.7 mm en A2 A y aumentó 6.6 mm en A1B A.

Las áreas potenciales totales de la distribución A2 A superan las registradas en A1B, y esto se dio cuando la temperatura aumentó 1.2 °C y la precipitación se redujo 45.7 mm. Sin embargo, en la distribución A1B A se dio un aumento de área de aptitud para *S. mundus*, en la categoría MA respecto de A2 A, con incrementos en la temperatura de 0.3 °C más y 52.3 mm en la precipitación.

Para la distribución potencial actual de *S. mundus* en el período generacional B (Actual B), que comprende de octubre a mayo, se registró un área con aptitud de 31,514 ha (Cuadro 7), la cual representa el 56 % del área total de la RBMM.

El área potencial es ocupada principalmente por la categoría muy apta (MA) con 25,568 ha, la categoría apta (A) presentó 2,057 ha y marginalmente apta (mA) 3,889 ha. Éstas se distribuyeron en la mayor parte de la Reserva correspondiente al Estado de México y la zona núcleo comprendida en el Estado de Michoacán (Figura 21).

Cuadro 7. Áreas de las distribuciones potenciales del período generacional B.

Distribución	Categorías de aptitud				Área total de aptitud
	N	mA	A	MA	
	Hectáreas (ha)				
Actual B	24,745	3,889	2,057	25,568	31,514
A2 B	25,515	4,115	1,735	24,894	30,744
A1B B	19,379	5,526	2,780	28,574	36,880

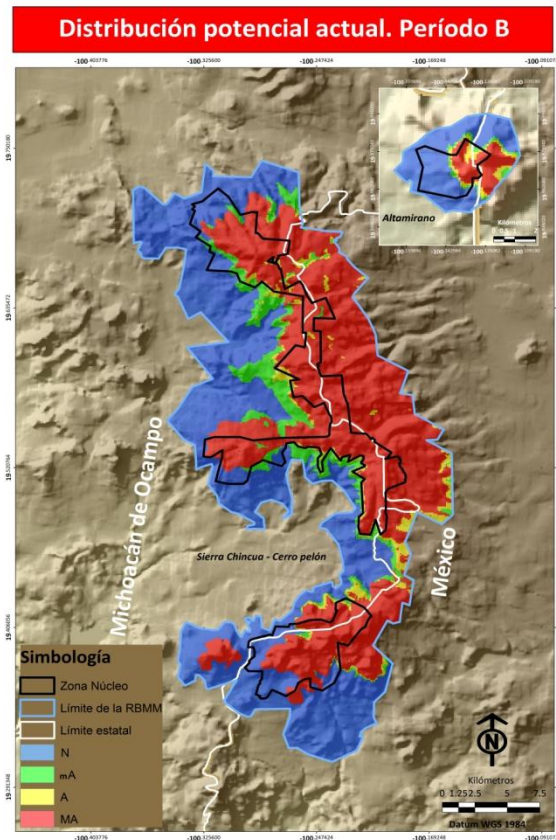


Figura 21. Distribución potencial actual de *S. mundus* en el período generacional B (Actual B).

En la distribución potencial con el escenario A2 para el año 2040 durante el período generacional B (A2 B), se presentó un área potencial para la presencia de *S. mundus* de 30,744 ha, que equivale a 54.6 % del total de la RBMM, lo que representó una disminución de 1.37 % respecto de Actual B.

La categoría MA presentó un área de 28,574 ha, en A 2,780 ha y para mA 5,526 ha (Cuadro 7). En comparación con Actual B, las áreas de todas las categorías en la distribución A1B B aumentaron, MA 3,006 ha, A 723 ha y mA 1,637 ha; la categoría MA de A1B sustituyó gran parte de A, a su vez la categoría A sustituyó a mA y ésta ocupó áreas de la categoría N (Figura 23).

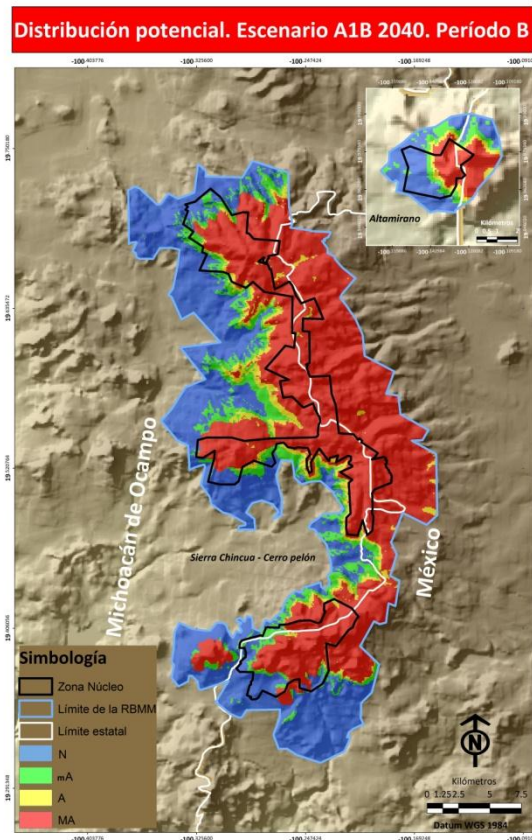


Figura 23. Distribución potencial de *S. mundus* en el período generacional B con el escenario A1B (A1B B).

Entre las distribuciones A2 B y A1B B se registró una diferencia de 6,136 ha, donde A1B presentó mayor área potencial para la presencia de *S. mundus* (36,880 ha) que A2 B (30,744 ha).

En relación a la distribución A2 B, la categoría MA de A1B sustituyó gran parte de A, a su vez la categoría A sustituyó a mA y ésta ocupó áreas de la categoría N.

Con respecto a las coberturas climáticas utilizadas en las distribuciones potenciales descritas anteriormente, correspondientes al período generacional B, el rango de temperatura de la distribución Actual B fue de 0.7 - 23.3 °C y el de precipitación de 190.6 - 237.6 mm; para las distribuciones con escenarios de cambio climático se emplearon temperaturas de 1.9 - 24.5 °C y precipitaciones de 192.5 - 239.6 mm en A2 B y de 194.1 - 241.5 mm en A1B B (Cuadro 8).

Cuadro 8. Rangos de las coberturas climáticas del período generacional B.

Distribución	Rangos por variable climática			
	Temperatura media (°C)	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)	Precipitación (mm)
Actual B	9.0 - 15.1	17.3 - 23.3	0.7 - 7.0	190.6 - 237.6
A2 B	10.2 - 16.3	18.5 - 24.5	1.9 - 8.2	192.5 - 239.6
A1B B	10.2 - 16.3	18.5 - 24.5	1.9 - 8.2	194.1 - 241.5

Al comparar las temperaturas actuales del periodo B con los dos escenarios con cambio climático aumentaron 1.2 °C y la precipitación incrementó 2 mm en A2 B y 3.7 en A1B B. Las áreas potenciales de la distribución A2 B disminuyeron en relación con Actual B.

Sin embargo, las áreas potenciales de la distribución A1B B aumentaron con incrementos en la temperatura de 1.2 °C y precipitación de 3.7 mm, situación que es semejante al comportamiento de la distribución A1B A.

En la comparación de las coberturas climáticas actuales (A y B), el rango de temperatura fue más amplio y los límites máximos fueron mayores en el período generacional B, donde se observaron mayores áreas potenciales (Figura 24).

Las distribuciones con los dos escenarios de cambio climático tuvieron mayor área potencial para *S. mundus* en A1B que en A2, para las categorías con mayor aptitud, principalmente por el incremento de la temperatura y la precipitación.

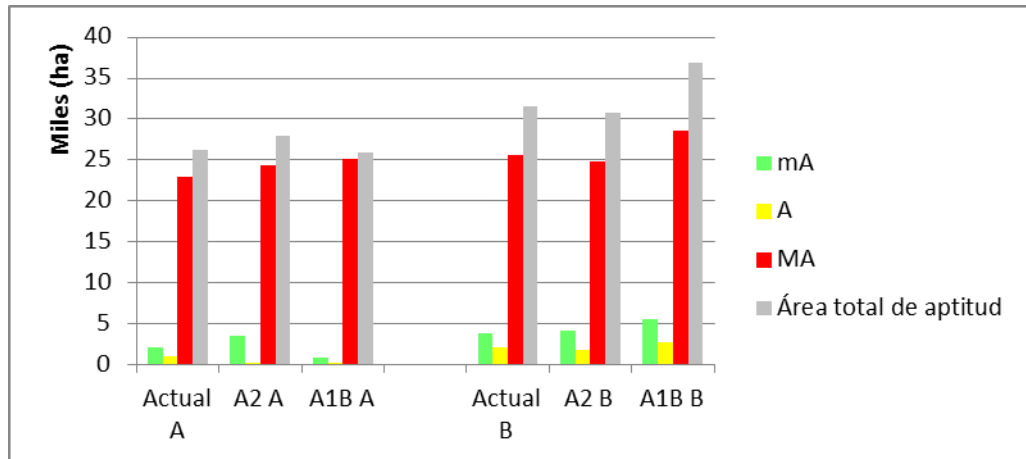


Figura 24. Áreas potenciales de las distribuciones potenciales actuales y bajo los dos escenarios de cambio climático.

En el sitio Altamirano de la RBMM, todas las distribuciones presentaron áreas potenciales para *S. mundus* (Figuras 25 y 26) y, aunque no es considerado en la cobertura de oyamel para el modelaje, es parte de la Reserva debido a que dicho sitio está cubierto por este tipo de vegetación.

También se identificó un área constante en todas las distribuciones en el corredor Sierra Chincua - Cerro Pelón, la cual parecida a la cobertura de oyamel utilizada en el modelaje y tiene sentido considerando la especificidad de *S. mundus* a *A. religiosa*. Sin embargo, en las figuras 25 y 26 se puede apreciar que todas las distribuciones potenciales (actuales y bajo los dos escenarios de cambio climático en ambos períodos generacionales) presentan áreas que se localizan fuera de la cobertura de oyamel.

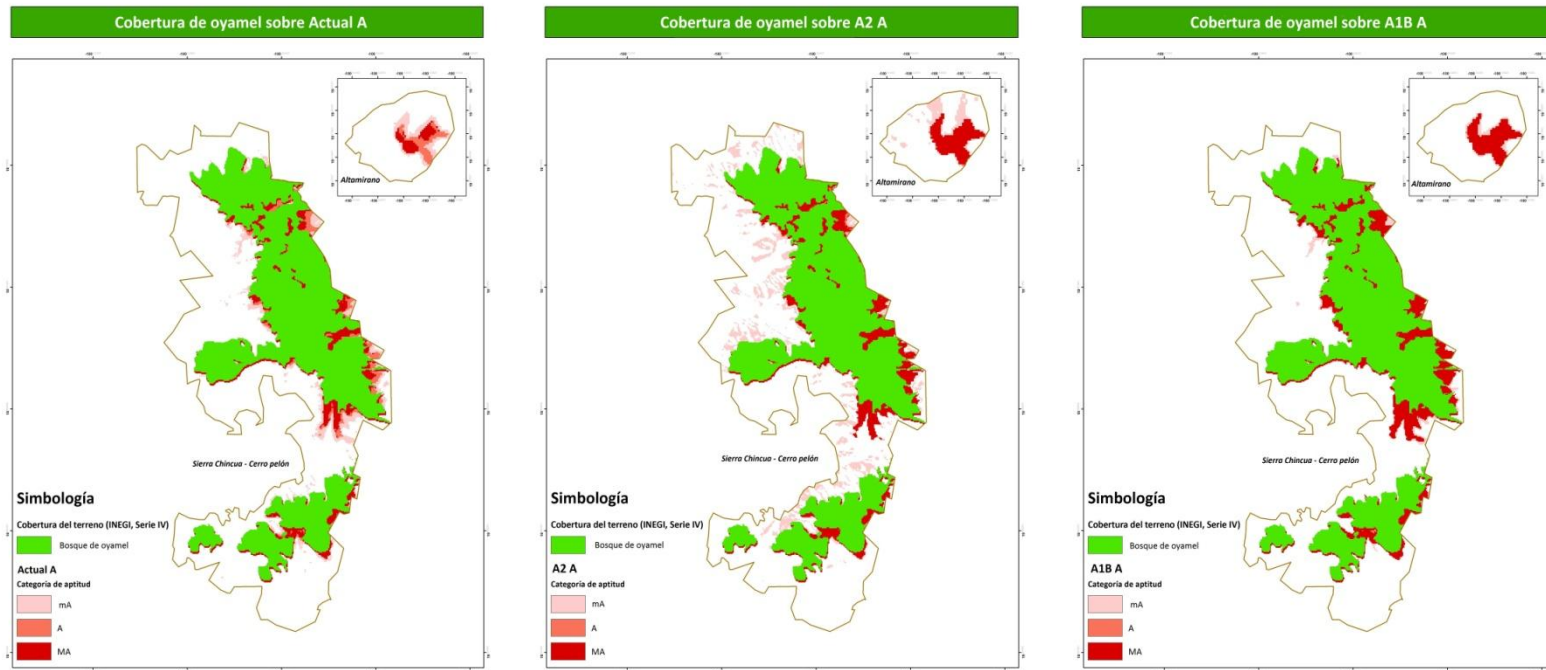


Figura 25. Cobertura de oyamel sobre las distribuciones del período generacional A.

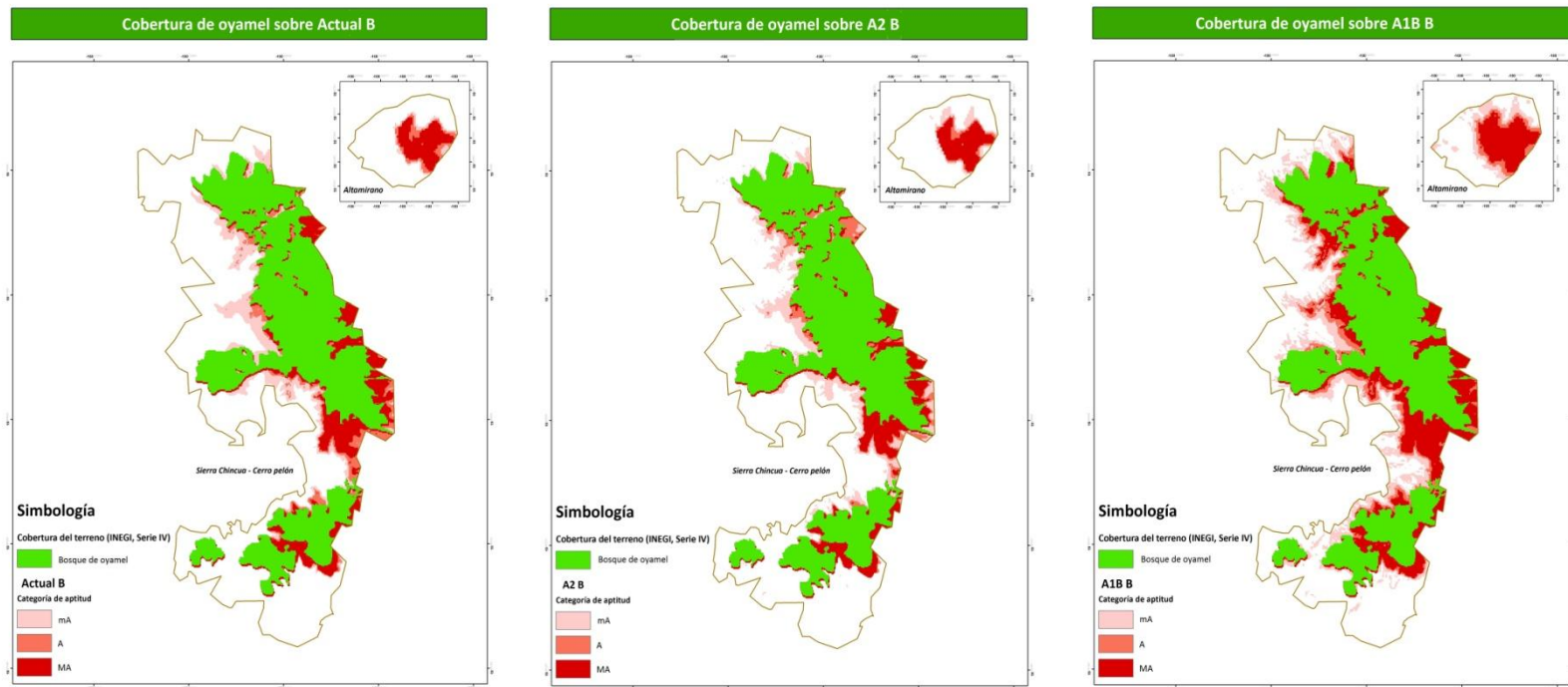


Figura 26. Cobertura de oyamel sobre las distribuciones del período generacional B.

Respecto de las coberturas topográficas utilizadas en todas las distribuciones potenciales, los valores de exposición para la presencia de *S. mundus* se orientaron mayormente hacia el Noroeste, Norte, Noreste, Este, Oeste y en menor cantidad hacia las direcciones Sur.

En el caso de la pendiente, la presencia de *S. mundus* se registró en un rango de 0.1 - 30 %. (Cuadro 9).

Cuadro 9. Valores de las coberturas topográficas.

	Valores								
Exposición (frecuencia)	PLANO	N	NE	E	SE	S	SO	O	NO
	1	7	6	6	2	0	5	6	8
Pendiente (%)	0.1 – 30								

6.3. Validación de las distribuciones potenciales actuales

El análisis estadístico mediante la prueba “umbral – dependiente”, basada en el cálculo de χ^2 , indicó que GARP tiene un poder predictivo significativamente diferente del azar con valores de $P = 1.97582e-82$ ($P < \alpha = 0.05$) en el período A y, $P = 9.56248e-60$ ($P < \alpha = 0.05$) en el período B.

La concordancia de las localidades de validación fue 9 de 9 (Figura 27) en ambos períodos generacionales, lo que indicó un error de comisión de 2.37 % en la distribución potencial actual del período generacional A y de 3.27 % en la del período generacional B.

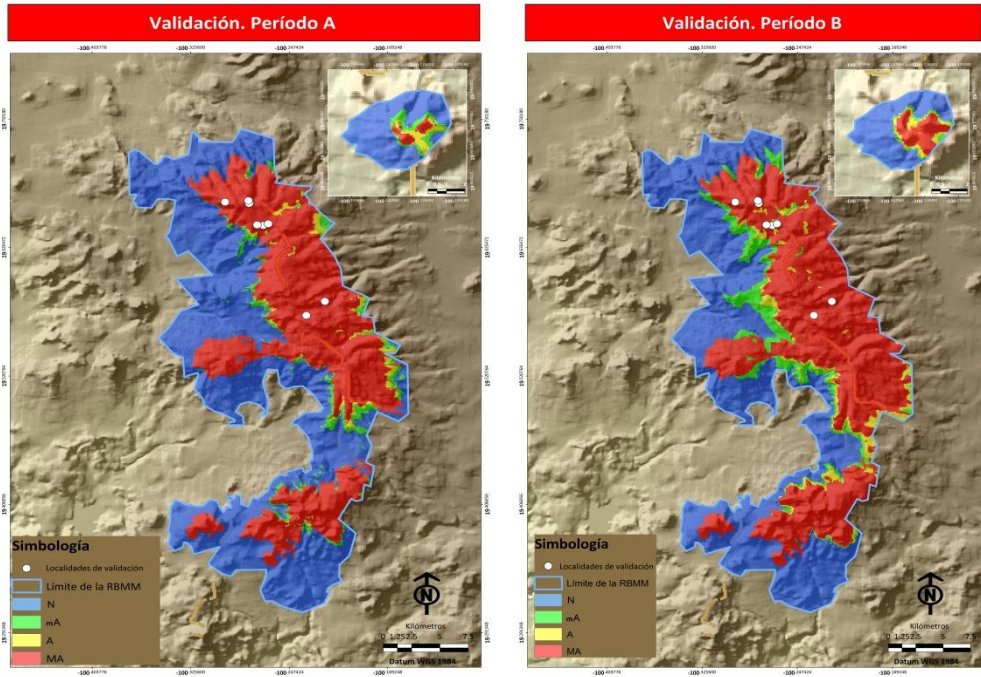


Figura 27. Localidades de validación en las distribuciones actuales.

7. DISCUSIÓN

7.1. Localidades de presencia de *Scolytus mundus*

Las localidades de presencia de *S. mundus* en la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca (RBMM) fueron nueve y se consideró que eran insuficientes, ya que la cantidad total de éstas deben dividirse en dos grupos: uno para el modelaje y el otro para la validación estadística (Peterson *et al.*, 2011). El modelaje con cinco localidades de presencia o menos se ha señalado como poco representativo (Paredes *et al.*, 2011), debido a que los rangos de variables que se consideran en el modelaje podrían no responder a las características de la especie. Por esta razón, se tomaron las localidades de los bosques de oyamel del Eje Volcánico Transversal donde se ha registrado la presencia de *S. mundus* (Cibrián *et al.*, 1995), que en conjunto con las nueve localidades de la RBMM sumaron 41.

La falta de localidades de presencia de *S. mundus*, la carencia de datos y de coordenadas geográficas en las colectas son situaciones que limitaron el análisis de este estudio. Estas se consideran como algunos de los problemas clave en la determinación de áreas potenciales con modelos de nicho ecológico en plagas forestales y casi cualquier especie, aún con los esfuerzos que instituciones nacionales e internacionales hacen por generar redes de información sobre biodiversidad (Soberón y Peterson, 2004; Urlich y Hooper, 2008).

7.2. Coberturas ambientales y áreas de distribución potencial de *S. mundus*

La forma de agrupar las coberturas climáticas de temperatura (media, máxima y mínima) y precipitación en dos períodos, el primero de junio a septiembre (período A) y el segundo de octubre a mayo (período B), fue de acuerdo con el ciclo de vida y reproducción de *S. mundus* (Hernández, 1979; Cibrián *et al.*, 1995). Lo anterior se basó en que cualquier estadio de desarrollo del descortezador (huevo, pupa, larva o

adulto) representa su permanencia en el bosque de oyamel, ya sea en pleno vuelo atacando árboles o formando galerías dentro de éstos.

El período generacional A es menos amplio que el B, además de que considera sólo una estacionalidad (verano), que corresponde a la temporada donde las temperaturas mínimas son las menos extremas y la precipitación es la más alta. Sin embargo en el período B, donde se contempla la temperatura máxima más elevada y la precipitación más baja, la distribución potencial presentó mayor área que la del período A en condiciones climáticas actuales. Considerando que el aumento de la temperatura puede influir directamente en el desarrollo de insectos forestales (Whyllie y Speight, 2012), es posible que las máximas alcanzadas en el período B hayan determinado la diferencia de área respecto del período A.

Los rangos de temperaturas registrados para *S. mundus* en este estudio, son semejantes a los que permiten el desarrollo óptimo de otros descortezadores que atacan pinos como *Dendroctonus frontalis* y de insectos de bosques templados (Craighead, 1950; Gagne *et al.*, 1980; Forest Service, 1985).

Los incrementos de temperatura y precipitación en la mayoría de las coberturas climáticas con los dos escenarios de cambio climático, respecto de las actuales, propiciaron los aumentos en las áreas potenciales de *S. mundus*, independientemente del período generacional. El posible comportamiento de las áreas potenciales en proyecciones a futuro indica, como en *S. mundus* y en la mayoría de los casos, que las plagas forestales podrían aumentar sus rangos de expansión y ocupar nuevas áreas si la temperatura aumenta y se presentan variaciones en la precipitación (Williams y Liebhold, 1995; Battisti, 2008; Moore y Allard; 2008; Ladányi y Horváth, 2010). La importancia de la temperatura y precipitación, como algunos de los principales factores que definen la distribución potencial, se han documentado poco para descortezadores de bosques templados (Mendoza, 2011).

Aunque no se ha modelado distribución potencial considerando las interacciones entre los componentes del nicho de ninguna especie, algunos autores suponen que

los efectos del cambio climático sobre las áreas potenciales de plagas son producto de complejas interacciones donde alguno de los factores del hábitat entre el insecto y su hospedero puede presentar estrés (Williams y Liebhold, 1995; Logan *et al.*, 2003). En relación con *S. mundus*, es preciso considerar las condiciones del oyamel (*Abies religiosa*) como hospedero, ya que los cambios en el clima pueden alterar la distribución de dicha especie y por ende la de *S. mundus*. Considerando que además de la temperatura y precipitación, los probables cambios en la distribución de especies en general y de plagas forestales podría estar determinada por la combinación de otros atributos en el mapa (Logan *et al.*, 2003; Naoki *et al.*, 2006), en el presente trabajo se contempló la exposición, pendiente y la cobertura de oyamel.

Las coberturas de exposición y pendiente, en conjunto con las climáticas (temperatura y precipitación), fueron utilizadas en la distribución potencial de *S. mundus* considerando que pueden ser de gran utilidad para obtener modelos con mayor exactitud (Pliscoff y Fuentes, 2011).

Las exposiciones hacia direcciones Norte, Este y Oeste donde se registró *S. mundus* concuerdan con las preferidas para *A. religiosa* de acuerdo con Madrigal (1964), considerando que el oyamel es su único hospedero. Sin embargo, las presencias del descortezador que se orientan hacia el Sureste y Sur tienen poca y nula relevancia, respectivamente. Por lo anterior, se esperaba que la distribución potencial de *S. mundus* se restringiera a las áreas dentro del bosque de oyamel orientadas hacia las direcciones preferidas por el descortezador, circunstancia que no pudo observarse en las proyecciones aún con ayuda de la sombra del modelo digital de elevación.

Considerando que el rango de la pendiente para *S. mundus* en el presente estudio fue de 0.1 – 30 % y el de *A. religiosa* es de 17 a 60% según Rzedowski (2006), al igual que con la exposición, se esperaba que las distribuciones potenciales fueran restringidas al bosque de oyamel de la RBMM distribuido en dicho rango. Sin embargo, los resultados no fueron así, ya que las áreas potenciales de *S. mundus* en todas las proyecciones sobrepasan el área del bosque, es decir, que el modelaje

pudo haber considerado las pendientes por encima del 30% hasta el 60% donde no se ha registrado dicho descortezador.

La cobertura del terreno correspondiente al bosque de oyamel utilizado para las distribuciones potenciales de *S. mundus* fue el elemento de carácter biológico más importante para el modelaje y del cual se esperaba que las predicciones se hicieran más precisas dentro de la Reserva. En las distribuciones potenciales, tanto actuales como las que utilizaron los escenarios de cambio climático (A2 y A1B), se observó que las áreas con posible presencia de *S. mundus* se ubican en el sitio Altamirano. Considerando las características que definen la distribución potencial (Soberón y Nakamura, 2009; Peterson *et al.*, 2011), lo anterior indica que en ese lugar existen las condiciones ambientales donde *S. mundus* puede distribuirse, circunstancia que es apreciable contemplando que ahí se encuentran extensiones de oyamel. Sin embargo, en tales distribuciones también se observó que en el sitio Sierra Chincua – Cerro Pelón existen áreas potenciales para dicho descortezador que sobrepasaron al bosque de oyamel. Esto sugiere que las áreas potenciales proyectadas por GARP estarían sobreestimadas para esas zonas, lo cual es una condición en constante discusión para este modelo (Elith y Graham, 2006).

Cuando se compararon los resultados de la distribución potencial de *S. mundus* con las áreas potenciales para el oyamel determinadas por Báez (2012) en la zona núcleo de la RBMM, se observó que los rangos de las coberturas topográficas para *S. mundus* fueron más acotados que para las empleadas en *A. religiosa*, lo cual sugiere que GARP podría prescindir de los límites en tales coberturas. En cuanto a los resultados, se observó que los mapas de predicción son semejantes para la zona núcleo en ambos estudios. Cabe mencionar que para generar las áreas potenciales de oyamel, esta autora empleó las mismas coberturas climáticas y topográficas, aunque la técnica de modelaje fue diferente a la empleada para *S. mundus*.

El uso de GARP para generar las áreas potenciales de *S. mundus* se basó en las observaciones de Naoki *et al.* (2006), quienes determinaron la distribución potencial de tres especies de vida silvestre utilizando diferentes modelos de nicho ecológico

(BIOCLIM, DOMAIN, GARP y LOGIT) y comprobaron que GARP es de los mejores para predecir distribuciones de especies especialistas. Los mapas de predicción se generaron con resolución de 1 Km² y concluyeron en la necesidad de utilizar coberturas topográficas con resolución más fina y coberturas de vegetación para determinar distribuciones más precisas. Sin embargo, el modelaje de la distribución potencial de *S. mundus* contempló los elementos topográficos de exposición y pendiente así como la vegetación (bosque de oyamel) con una mayor resolución 0.081 Km² y se determinó que todo el bosque de oyamel considerado en el modelaje podría presentar dicho descortezador en cualquiera de las distribuciones. Es decir que, pese a que el presente trabajo consideró lo sugerido por Naoki *et al.* (2006), no se obtuvieron áreas de distribución más precisas.

La distribución potencial de *S. mundus* también fue comparada con los estudios de Oberhauser y Peterson (2003), quienes determinaron las potenciales para la mariposa monarca (*Danaus plexippus*), especie que ocupa el oyamel como elemento principal de su hábitat, al igual que *S. mundus*. Las áreas potenciales de la mariposa abarcaron toda el área de oyamel en la RBMM conocida actualmente, fueron generadas utilizando el modelo GARP y la zona de análisis fue delimitada por 22 localidades de presencia de *D. plexippus* en el Estado de México y Michoacán. Estos autores emplearon coberturas climáticas y topográficas con 1 Km² de resolución, tales como temperatura (media, máxima y mínima), precipitación, presión de vapor, nubosidad media de enero y anual, altitud, exposición y pendiente; y la cobertura de oyamel basada en imágenes AVHRR. En contraste, en el presente trabajo se usó una resolución mayor (0.081 Km²) para todas las coberturas y se obtuvieron resultados similares. Por lo anterior, puede considerarse que al parecer GARP no fue sensible al aumento en la resolución para la zona de modelaje.

Estos mismos autores, argumentan que el nicho ecológico de la mariposa monarca está limitado a la presencia de los bosques de oyamel y que la escala global utilizada en las predicciones tiene suficiente detalle para permitir inferencias. Sin embargo, la distribución de *S. mundus* también está delimitada a dicha vegetación y no es un hecho que en condiciones climáticas actuales se pueda encontrar *S. mundus* en

cualquier localidad con oyamel. La mariposa monarca no abarca todo el bosque de oyamel, sino que se focaliza en ciertos puntos de la Reserva (Báez, 2012), por lo que puede interpretarse que el modelaje con GARP de *D. plexippus* generado por Oberhauser y Peterson (2003) también tuvo una sobreestimación en la distribución.

La determinación de áreas potenciales con GARP para las diferentes especies puede responder a diferentes circunstancias. *S. mundus* es una plaga, su presencia no está bien documentada y no se cuenta con información ambiental específica de las condiciones ambientales donde se desarrolla. La mayoría de los estudios que utilizan GARP tienen fines de conservación, biogeografía, evolución, ecología y el manejo de especies invasivas (Peterson *et al.*, 2002; Anderson *et al.*, 2003; Oberhauser y Peterson, 2003; Naoki *et al.*, 2006; Benito y Peñas, 2007), pocos se enfocan en la distribución de plagas forestales (Peterson *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2009). En tales estudios, se presentan resultados con mapas de distribución en regiones que abarcan mayores dimensiones que las del presente estudio y de los cuales se determina alto poder predictivo por parte del modelo.

La distribución potencial de *S. mundus* y de las especies en general, utilizando modelos de nicho ecológico, sugiere una mayor cantidad de localidades de presencia así como de coberturas ambientales, las cuales deberán tener mejor descripción y considerar las interacciones entre los componentes del nicho, esto para obtener modelos con mayor exactitud a nivel local (Mackey y Lindenmayer, 2001; Logan *et al.*, 2003; Peterson *et al.*, 2011; Pliscoff y Fuentes, 2011).

7.3. Validación de las distribuciones actuales

Para la validación de las distribuciones potenciales actuales de *S. mundus*, se utilizaron los únicos elementos disponibles como las localidades de presencia correctamente predichas no incluidas en el modelaje, que en este caso fueron 9 de 9, las cuales permitieron calcular el error de omisión y comisión con la proporción del área de estudio y la proporción del área predicha como potencial (Peterson *et al.*,

2002; Anderson *et al.*, 2003; Oberhauser y Peterson, 2003; Peterson *et al.*, 2004; Naoki *et al.*, 2006; Benito y Peñas, 2007; Wang *et al.*, 2009; Peterson *et al.*, 2011).

Sin embargo, el poder predictivo de GARP en el presente trabajo (y en los citados anteriormente) indicó errores de comisión (sobrepredicción) bajos, de 2.37 % en la distribución potencial del período generacional A y 3.27 % la del período generacional B. Considerando que la presencia de *S. mundus* se restringe a la cobertura de oyamel, los bajos errores de comisión se atribuyeron a que toda el área de la cobertura de oyamel fue determinada como potencial para *S. mundus*.

La sobrepredicción como el error de comisión ha sido discutida por Anderson *et al.* (2003) y corroborado en distintos trabajos donde se utiliza GARP (Martínez, 2006; Domínguez, 2007). El error de comisión en la distribución de *S. mundus* se vio en las áreas del corredor Chincua Cerro - Pelón de la RBMM que se distribuyeron fuera de la cobertura de oyamel en este sitio y se cree que se debió a que GARP prescindió de los rangos de algunas coberturas ambientales. Lo anterior pudo deberse a que el algoritmo puede utilizar combinaciones ambientales que la especie no ocupa (Pearson *et al.*, 2006), circunstancia que parece ocurrir con todas las distribuciones potenciales o que la ausencia de la especie en el ambiente real obedezca a factores biológicos ajenos al medio abiótico (Soberón y Peterson, 2005), los cuales desafortunadamente no se han documentado ampliamente para *S. mundus*.

8. CONCLUSIONES

La distribución potencial actual de *Scolytus mundus* Wood del período generacional que comprende de octubre a mayo, presentó mayores áreas potenciales que durante el período generacional de junio a septiembre.

Las dos distribuciones potenciales de *S. mundus* con el escenario A1B para el año 2040, presentaron mayores áreas con elevada aptitud que las actuales, así como para las del escenario A2 del mismo año.

Las condiciones ambientales determinantes para la distribución potencial de *S. mundus* con GARP fueron las temperaturas, precipitación y la cobertura de oyamel.

No es recomendable la utilización de GARP para determinar las áreas potenciales de *S. mundus* en áreas como la RBMM, con la información disponible sobre las localidades de presencia y las coberturas ambientales.

8.1. Recomendaciones

Es necesario hacer investigaciones más específicas sobre *S. mundus* en campo y bajo condiciones controladas de laboratorio y/o invernadero para conocer detalles sobre el ciclo de vida y requerimientos ambientales de esta especie.

Para determinar distribuciones potenciales más precisas de *S. mundus* en la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca utilizando GARP, es deseable reunir una mayor cantidad de localidades de presencia en la zona y más coberturas ambientales con información específica del descortezador.

Se recomienda utilizar otros modelos de distribución de especies con el objetivo de observar si alguno tiene mayor exactitud.

9. LITERATURA CITADA

- Anderson, R. 2003. *Real vs. srtefactual absences in species distributions: tests for Oryzomys albigularis (Rodentia: Muridae) in Venezuela*. En: *Maximum entropy modeling of species geographic distributions*. Phillips, S., R. Anderson and R. Schapire. 2006. *Ecological Modelling*. 190: 231 - 259.
- Anderson, R., D. Lew and A. T. Peterson. 2003. *Evaluating predictive models of species' distributions: criteria for selecting optimal models*. *Ecological Modelling* 162 : 211 - 232.
- Anderson, R., M. Gómez-Laverde and A. T. Peterson. 2002. *Geographical distributions of spiny pocket mice in South America: insights from predictive models*. *Global Ecology & Biogeography II*: 131 - 141.
- Atkinson, T. H. 2013. *Bark and Ambrosia Beetles*.
http://www.barkbeetles.info/mexico_chklist_target_species.php?lookUp=1148&image=2201_scolytus_mundus_f_lat_at&curPage=0#images (Marzo de 2013).
- Austin, M. 1987. *Models for the analysis of species' response to environmental gradients*. En: *Modelación de la distribución de especies y ecosistemas en el tiempo y en el espacio: una revisión de las nuevas herramientas y enfoques disponibles*. Pliscoff, P. y T. Fuentes. 2011. *Revista de Geografía Norte Grande*. Chile. 48: 61 - 79
- Ávalos, M. 2004. *Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático, PICC*. En: *Cambio climático: una visión desde México*. Martínez y Fernández (compiladores). Talleres de Jiménez Editores e Impresores, S. A. de C. V. México, D. F. pp. 125 - 141.
- Báez, A. 2012. *Modelación del hábitat invernal de la mariposa monarca ante escenarios de cambio climático*. Tesis de licenciatura. UNAM. México. 79 p.
- Battisti, A. 2008. *Forests and climate change – lessons from insects*. *iForest – Biogeosciences and Forestry*. 1: 1 - 5.
- Benito, B. y J. Peñas. 2007. *Aplicación de modelos de distribución de especies a la conservación de la biodiversidad en el sureste de la Península Ibérica*.

Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica. 7: 100 – 119.

- Bouchard, P., Y. Bousquet, A. Davies, M. Alonso, J. Lawrence, C. Lyal, A. Newton, C. Reid, M. Schmitt, A. Ślipiński and A. Smith. 2011. *Family-group names in Coleoptera (Insecta)*. ZooKeys. 88: 1 – 972.
- Burgos, A., A. Fonseca y H. Santiago. 2012. *Insectos de importancia forestal en las Lagunas de Zempoala*. Hypatia. 36 http://hypatia.morelos.gob.mx/index.php?option=com_content&task=view&id=622&Itemid=556 (Septiembre de 2012).
- Burroughs, W. 2001. *Climate Change: A Multidisciplinary Approach*. Cambridge University Press. U.S.A. pp. 1.
- Casas, M.C. y M. Alarcón. 1999. *Meteorología y clima*. Barcelona, España. UPC Ediciones. pp. 117.
- Casper, J. L. 2010. *Changing Ecosystems: Effects of Global Warming*. New York. Infobase Publishing. pp. 3 – 7.
- Chown, S. and S. Nicholson. 2009. *Insect Physiological Ecology: Mechanisms and Patterns*. Oxford University Press. United Kingdom. pp. 75 – 78.
- Cibrián, D., D. Alvarado y S. E. García. 2007. *Enfermedades Forestales en México / Forest Diseases of México*. UACH, CP, CONAFOR-SEMARNAT. México. pp. 216 - 219, 444 - 447, 554, 558.
- Cibrián, D., J. Guerra y T. Méndez. 1993. *El género Scolytus (Coleoptera: Scolytidae) como plaga de árboles de importancia urbana y forestal*. En: Memoria del XXVIII Congreso Nacional de Entomología. Cholula, Puebla. Sociedad Mexicana de Entomología. pp. 96 – 97.
- Cibrián, D., T. Mendez, R. Campos, H. Yates III y J. Flores. 1995. *Insectos Forestales de México / Forest Insects of Mexico*. UACH. México. pp. 330 – 333.
- CONANP. 2001. *Programa de Manejo Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca*. CONANP. México. 138 p.

- Cornejo, G. y G. Ibarra. 2008. *Flora ilustrada de la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca*. CIECO (UNAM) – CONABIO. México. pp. 8 – 31.
- Coulson, N. R. y J. A. Witter. 1990. *Entomología Forestal: Ecología y control*. Limusa. México. pp. 103, 110, 119, 176 – 180.
- Craighead, F. 1950. *Insect Enemies of Eastern Forests*. U.S.D.A. Forest Service. U.S.A. 657: pp. 11.
- Díaz P., G. 2003. Reporte Anual de Investigación e Innovación Tecnológica. 2007. INIFAP. México. pp. 37 - 38 .
- Domínguez, A. 2007. *Efecto del cambio climático en la distribución del conejo endémico de México Romerolagus diazi (Lagomorpha: Leporidae)*. Tesis de Licenciatura. UNAM. México. 65 p.
- Elith, J and C. Graham. 2006. *Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data*. *Ecography*. 29: 129 – 151.
- ESRI. 2012. *ArcGIS Resource Center. Desktop Help 10.0 - El tamaño de la celda y remuestreo en el análisis*. <http://help.arcgis.com/es/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#//00590000001m000000> (Febrero de 2012).
- FAO. 2011. *Guide to implementation of phytosanitary standards in forestry*. FAO FORESTRY PAPER 164. Rome, Italy. pp. 1 – 2.
- Forest Service. 1985. *Estern Forest Insects*. U.S.D.A. Forest Service. U. S. A. Misc. Publ. 1426: 4 – 5.
- Furniss, R. L. and V. M. Carolin. 1977. *Western Forest Insects*. U.S.D.A. Forest Service. U. S. A. Misc. Publ. 1339: 11 – 12.
- Gagne, J., P. Sharpe, R. Coulson and T. Wagner. 1980. *Modeling southern pine beetle reemergence and emergence as functions of temperature*. Symposium Proceedings: Modeling Southern Pine Beetle Populations. U.S.D.A. Forest Service. U. S. A. 1630: 30 – 39.
- Garduño, N. 2011. *Diagnóstico Fitosanitario Forestal: Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca en el Estado de México*. Gobierno del Estado de México.

<http://transparencia.edomex.gob.mx/sma/informacion/publicaciones/ARCHIVO%20A18.pdf> (Diciembre de 2011).

- Gitay, H., A. Suárez, R. Watson y D. J. Dokken. 2002. *Cambio climático y biodiversidad*. Documento técnico V del IPCC. Ginebra, Suiza. pp. 1 – 14.
- Gliessman, S. 2002. *Agroecología: Procesos ecológicos en agricultura sostenible*. LITOCAT. Turrialba, Costa Rica. pp. 189.
- Gordon, M. 1965. *Les principaux types de profils écologiques*. En: *Modelos de distribución de especies: Una revisión sintética*. Mateo, R., A. Felicísimo y J. Muñoz. 2011. *Revista Chilena de Historia Natural*. 84: 217 – 240.
- Granados, D. y G. López. 2001. *Declinación Forestal*. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*. México. 7: 5-13
- Grinnell, J. 1917a. *Field Tests of Theories Concerning Distributional Control*. The University of Chicago Press - *The American Naturalist*. 52(602): 115 – 128.
- Grinnell, J. 1917b. *The Niche - Relationships of the California Thrasher*. University of California Press - *The Auk*. 34(4): 427 – 433.
- Hernández, E. 1979. *Observaciones sobre la Biología de Scolytus mundus Wood, un descortezador de Abies religiosa (H.B.K) Sch. et Cham en el Parque Nacional "El Chico", Hidalgo*. Tesis de Licenciatura. UACH. México. 132 p.
- Hutchinson, E. G. 1957. *Concluding Remarks*. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*. 22: 415 – 427.
- INEGI. 2011a. *¿Qué es un Modelo Digital de Elevación (MDE)?*. <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/queesMDE.aspx> (Noviembre de 2011).
- INEGI. 2011b. *Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) 2.0*. <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/Descarga.aspx> (Noviembre de 2011).

- IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*). 1997. *Introducción a los modelos climáticos simples utilizados en el Segundo Informe de Evaluación del IPCC*. Ginebra, Suiza. pp. 3.
- IPCC. 2000. *Escenarios de Emisiones – Resumen para responsables de políticas*. Informe especial del Grupo de trabajo III del IPCC. Ginebra Suiza. 21 p.
- IPCC. 2007. *Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Equipo de redacción principal: Pachauri, R. K. y Reisinger, A. IPCC. Ginebra, Suiza. 104 p.
- Kansas University. 2011. *DesktopGarp User's Manual*. <http://www.nhm.ku.edu/desktopgarp/UsersManual.html> (Diciembre de 2011).
- Ladányi, M. and L. Horváth. 2010. *A review on the potential climate change impact on insect population-General and agricultural aspects*. Applied Ecology and Environmental Research. 8(2): 143 – 152.
- Leary, N., C. Conde, J. Kulkarni, A. Nyong and J. Pulhin. 2008. *Climate Change and Vulnerability*. UK and USA: The International START Secretariat. 2: 3 – 30.
- Logan, J., J. Régnière and J. Powell. 2003. *Assessing the impacts of global warming on forest pest dynamics*. Frontiers in Ecology and the Environment. 1: 130 – 137.
- López, J. 2007. *Análisis de cambio de la cobertura forestal en la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca (2006-2007)*. WWF - FMCN. México. 36 p.
- Mackey, B. and D. Lindenmayer. 2001. *Towards a hierarchical framework for modelling the spatial distribution of animals*. Journal of Biogeography. 28: 1147 – 1166.
- 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. Escuela Nacional de Ciencias Biológicas. IPN. México. 111 p.
- Magaña, V. 2004. *El cambio climático global: comprender el problema*. En: *Cambio climático: una visión desde México*. Martínez y Fernández (compiladores). Talleres de Jiménez Editores e Impresores, S. A. de C. V. México, D. F. pp. 17 - 27.
 - 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*. 40 p. <http://zimbra.ine.gob.mx/escenarios/> (Abril de 2012).
 - Martínez, E. 2006. *Efecto del cambio climático en la distribución espacio – temporal de dos lagomorfos en México*. Tesis de Maestría. UNAM. México. 66 p.
 - Martínez, J. y A. Fernández. 2004. *Cambio climático: Una visión desde México*. INE - SEMARNAT. México. 525 p.
 - Mateo, R., A. Felicísimo y J. Muñoz. 2011. *Modelos de distribución de especies: Una revisión sintética*. Revista Chilena de Historia Natural. 84: 217 – 240.
 - Mendoza, G. 2011. *Distribución Potencial de Dendroctonus rizophagus en la Sierra Madre Occidental y su Aplicación para la Generación de un Modelo de Riesgo para el Municipio de Casas Grandes, Chihuahua*. Tesis de Doctorado. IPN. México. 96 p.
 - Moore, B. and G. Allard. 2008. *Climate change impacts on forest health*. FAO, Forestry department. Rome, Italy. 35 p.
 - Nair, K. S. S. 2007. *Tropical Forest Insect Pests: Ecology, Impact and Management*. Cambridge University Press. New York, U.S.A. pp. 122 – 123.
 - Naoki, K., Gómez, M., López, R., Meneses, R. y Vargas, J. 2006. *Comparación de modelos de distribución de especies para predecir la*

distribución potencial de vida silvestre en Bolivia. *Ecología en Bolivia*, 41 (1): 65 – 78.

- Nix, H. 1986. *A biogeographic analysis of Australian elapid snakes*. En: *Modelación de la distribución de especies y ecosistemas en el tiempo y en el espacio: una revisión de las nuevas herramientas y enfoques disponibles*. Pliscoff, P. y T. Fuentes. *Revista de Geografía Norte Grande*. 48: 61 – 79.
- Oberhauser, K. and A. T. Peterson. 2003. *Modeling current and future potential wintering distributions of eastern North American monarch butterflies*. *PNAS*. *Ecology* 100(24): 14063 – 14068.
- Obitko, M. 1998. *Genetic Algorithms*. <http://www.obitko.com/tutorials/genetic-algorithms/> (Diciembre de 2012).
- Padilla G. H. 1987. *Glosario práctico de términos forestales*. UACH - Limusa. México. pp. 98, 185, 189.
- Paredes, D., A. Ramírez y M. Martínez. 2011. *Distribución y representatividad de las especies del género Crotalus en las áreas naturales protegidas de México*. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. 82: 689 – 700.
- Payne, K. and D.R.B. Stockwell. 1996?. *GARP Modelling System User's Guide and Technical Reference*. 67 p. <http://web.archive.org/web/20051127012700/http://biodi.sdsc.edu/Doc/GARP/Manual/manual.html#Introduction> (Noviembre de 2011).
- Pearson, R., W. Thuiller, B. Aráujo, E. Martínez - Meyer, L. Brotons, C. McClean, L. Miles, P. Segurado, T. Dawson and D. Lees. 2006. *Model-based uncertainty in species range prediction*. *Journal of Biogeography*. 33: 1704 – 1711.
- Peterson, A. T., J. Soberón, R. Pearson, R. Anderson, E. Martínez - Meyer, M. Nakamura and M. Bastos. 2011. *Ecological Niches and Geographic Distributions*. New Jersey: Princeton University Press. U. S. A. 316 p.
- Peterson, A. T., L. Ball and K. Cohoon. 2002 *Predicting distributions of Mexican birds using ecological niche modeling methods*. *Ibis*. 144 (on-line): E27 - E32.

- Peterson, A. T., R. Scachetti - Pereira and W. Hargrove. 2004. *Potential geographic distribution of Anoplophora glabripennis (Coleoptera: Cerambycidae) in North America*. American Midland Naturalist. 151(1): 170 – 178.
- Plischoff, P. y T. Fuentes. 2011. *Modelación de la distribución de especies y ecosistemas en el tiempo y en el espacio: una revisión de las nuevas herramientas y enfoques disponibles*. Revista de Geografía Norte Grande. Chile. 48: 61 – 79.
- Rzedowski, J. 2006. *Vegetación de México*. CONABIO. 1ra. Edición digital. México. pp. 295 – 327.
- Sánchez, A., L. López y D. Granados. 2006. *Semejanza florística entre los bosques de Abies religiosa (H.B.K.) Cham. & Schltdl. de la Faja Volcánica Transmexicana*. Investigaciones Geográficas. México. 56: 62 – 76.
- SEMARNAT. (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2003. *Informe de la situación del medio ambiente en México: Compendio de estadísticas ambientales 2002*. SEMARNAT. México. pp. 220 – 221.
- SEMARNAT. 2005. *Gerencia de Sanidad Forestal – CONAFOR*. México. http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_04/Reportes/D3_FORESTAL/D3_RFORESTA06/D3_RFORESTA06_01.htm (Mayo de 2012).
- Soberón, J. 2012. *Nichos y Áreas de Distribución*. CONABIO. <https://sites.google.com/site/nichesandareasofdistribution/sobre-los-autores/jorge-soberon> (Mayo de 2012).
- Soberón, J. and A. T. Peterson. 2004. *Biodiversity informatics: managing and applying primary biodiversity data*. Philosophical transactions of The Royal Society of London. Biological Sciences. 359(1444): 689 – 698.
- Soberón, J. and A. T. Peterson. 2005. *Interpretation of Models of Fundamental Ecological Niches and Species' Distributional Areas*. Biodiversity Informatics. 2: 1-10.
- Soberón, J. and M. Nakamura. 2009. *Niches and distributional areas: Concepts, methods, and assumptions*. PNAS. 106: 19644 – 19650.

- Speight, M., M. Hunter and A. Watt. 1999. *Ecology of insects: concepts and applications*. En: *Forests and climate change – lessons from insects*. A. Battisti. 2008. iForest – Biogeosciences and Forestry. 1 : 1 - 5.
- Stockwell, D. and D. Peters. 1999. *The GARP modeling system: problems and solutions to automated spatial prediction*. International Journal of Geographical Information Science 13: 143 – 158.
- Tanner, V. and S. L. Wood. 1968. *The Great Basin Naturalist*. Utah. Brigham Young University. U. S. A. XXVIII: 13 – 14.
- Urlichs, C. and K. Hooper. 2008. *Predicting insect distributions from climatic and habitat data*. BioControl. 53: 881 – 894.
- Villa, J. Com. Pers. En: *Pest risk assessment of the importation into the United States of unprocessed Pinus and Abies logs from Mexico*. Tkacz, B., H. Harold, G. DeNitto, A. Eglitis, J. Hanson, J. Kliejunas, W. Wallner, J. O'Brien and E. Smith. 1998. U.S.D.A. Forest Service. U.S.A. 116 p.
- Wang, X., X. Huang, L. Jiang and X. Xiang. 2009. *Predicting potential distribution of chestnut phylloxerid (Hemiptera: Phylloxeridae) based on GARP and Maxent ecological niche models*. Journal of Applied Entomology. 134:45 – 54.
- Whyllie, F. R., and M. R. Speight, 2012. *Insect Pests in Tropical Forestry*. Australian Centre for International Agricultural Research. Australia. p. 51 – 56.
- Williams, D. and A. Liebhold. 1995. *Herbivorous insects and global change: potential changes in the spatial distribution of forest defoliator outbreaks*. Journal of Biogeography. 22: 665 - 671.
- Wood, S. L. 1982. *The Bark and Ambrosia Beetles of North and Central America (Coleoptera: Scolytidae), a Taxonomic Monograph*. Utah. Brigham Young University. Great Basin Naturalist Memoirs. 6: 439 – 440.

10. ANEXO

A.1. Localidades de presencia de *Scolytus mundus* Wood.

INSTITUCIÓN/FUENTE	LOCALIDAD	MUNICIPIO/DELEGACIÓN	ENTIDAD	LATITUD (Grados decimales)	LONGITUD (Grados decimales)	FECHA DE COLECTA	FUNCIÓN
Dr. D. Cibrián. 2012. Comunicación personal. División de Ciencias Forestales - UACH	Desierto de los Leones	Cuajimalpa	D.F.	19.3176	-99.3149	Década de los 80's	
				19.3115	-99.3216		
				19.2968	-99.3206		
				19.3012	-99.3174		
				19.3036	-99.3156		
				19.3031	-99.3231		
	-	Perote	VER.	19.4783	-97.1955	2012	
Colección Entomológica. Instituto de Fitosanidad – COLPOS	-	Mineral del Chico	HGO.	20.2002	-98.7283	22/10/1975	Modelaje
	Cerro Tláloc	Tequesquahuac	MEX.	19.4419	-98.7556	24/04/1980	
				19.4414	-98.7555	10/12/1980	
				19.4411	-98.7557	19/08/1981	
	Mexicapa	Ocuilán		19.0471	-99.3759	06/04/1983	
	Villarreal	Terrenate	TLAX.	19.5398	-97.8931	28/01/1978	
	-	Terrenate		19.5403	-97.8917	-/02/1981	
Ayahualulco	-	VER.	19.4623	-97.1804	22/02/1989		
Colección Científica de Entomología Forestal. División de Ciencias Forestales - UACH	-	Mineral del Chico	HGO.	20.2023	-98.7157	14/05/1977	
				20.2034	-98.7155	15/10/1978	
				20.2045	-98.7165	05/12/1984	
	Los Saucos	Valle de Bravo	MEX.	19.1863	-99.9867	14/10/1991	
	-	Apulco	PUE.	19.5935	-97.7317	23/02/1978	
				19.5928	-97.7308	30/11/1978	
Villarreal	Terrenate	TLAX.	19.5083	-97.9031	23/02/1978		
Laboratorio de Análisis en Sanidad Forestal (LARSF) - SEMARNAT	-	Mineral del Chico	HGO.	20.1992	-98.7229	27/07/1988	
		San Felipe del Progreso	MEX.	19.7619	-99.9995	-/05/2001	
	Ejido Pedra Ancha	Chignahuapan	PUE.	19.7915	-98.2235	14/06/1994	
Laboratorio de Artrópodos (Insectos Forestales). Escuela Nacional de Ciencias Biológicas - IPN	El Cuatezón y El Zacatonal	Almoleya	HGO.	19.7666	-98.2457	16/03/1981	
	Las Vigas			19.7556	-98.2002	-	
Laboratorio de Parasitología Vegetal. CIIB - UAEM	Lagunas de Zempoala	-	MOR.	19.0546	-99.3111	1986	

INSTITUCIÓN/FUENTE	LOCALIDAD	MUNICIPIO/DELEGACIÓN	ENTIDAD	LATITUD (Grados decimales)	LONGITUD (Grados decimales)	FECHA DE COLECTA	FUNCIÓN
Tanner y Wood (1968)	Tlaxco (18 Km N)		PUE.	19.7584	-98.1894	1968	
Laboratorio de Artrópodos (Insectos Forestales). Escuela Nacional de Ciencias Biológicas - IPN	Toma del Agua	Tlaxco	TLAX.	19.6603	-98.0944	30/06/1981	
	-	Mariano Arista		19.204	-98.0433	22/01/1999	
Dirección General de la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca	RBMM. Zona Federal	-	MICH.	19.6752	-100.2787	2009	Validación
				19.675	-100.2792	2011	
				19.6775	-100.2799		
				19.6762	-100.2984	2009	
	RBMM		19.6553	-100.2681	2011		
	RBMM. Llano de las papas		19.6568	-100.264			
	RBMM. Santa Ana		19.6558	-100.2729			
	RBMM		19.575	-100.2338			
	MEX.	19.5875	-100.2191				