

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES



**DISTRIBUCIÓN ACTUAL Y FUTURA DE ÁREAS POTENCIALES PARA
EL ESTABLECIMIENTO DE PLANTACIONES FORESTALES DE
Cedrela odorata L, EN LA PENÍNSULA DE YUCATÁN**

Por:

Ing. Gyorgy Eduardo Manzanilla Quijada

Como requisito parcial para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS FORESTALES

Julio, 2018

**DISTRIBUCIÓN ACTUAL Y FUTURA DE ÁREAS POTENCIALES PARA
EL ESTABLECIMIENTO DE PLANTACIONES FORESTALES DE *Cedrela
odorata* L, EN LA PENÍNSULA DE YUCATÁN**

APROBACIÓN DE TESIS



Dr. Eduardo Javier Treviño Garza

Director



Dr. Oscar Alberto Aguirre Calderón

Codirector



Dr. José Israel Yerena Yamallel

Asesor



Mc. Ulises Manzanilla Quiñones

Codirector externo

Julio, 2018

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo brindado para la realización del presente estudio a través de la beca.

A la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León, por todas las facilidades otorgadas en el desarrollo de la investigación.

Al Laboratorio de Geomática de la Facultad de Ciencias Forestales.

A los miembros de mi comité por el interés hacia mi investigación, conformado por el Dr. Eduardo Javier Treviño Garza como director de tesis por brindarme la oportunidad de permanecer en su equipo de trabajo, al Dr. Oscar Alberto Aguirre Calderón, Dr. José Israel Yerena Yamallel y M.C. Ulises Manzanilla Quiñones por las observaciones, sugerencias, correcciones, recomendaciones y todos los comentarios para mejoras este trabajo de tesis.

A todos mis profesores que fueron el pilar y fortaleza en mi formación académica, gracias por todos los conocimientos compartidos.

A todos mis amigos y compañeros que de alguna manera contribuyeron a la realización de este trabajo.

DEDICATORIAS

Al ser supremo que nos permite existir.

A mis padres y mis hermanos, gracias por su amor.

A Reyna Yolanda Castellanos García, con amor y gratitud.

A mi gran amigo José Manuel Cornejo Cisneros, por su gran amistad.

A todos los que todavía creen que es importante “cuidar de las plantas y los animales”, que disfrutan de una puesta de sol y que se indignan ante las barbaridades que cometemos contra la naturaleza.

ÍNDICE

Paginas

ÍNDICE DE TABLAS	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VI
SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS	VIII
RESUMEN	IX
ABSTRACT	X
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	3
2.1 Cambio climático	3
2.2 México y el cambio climático	5
2.3 Nicho ecológico	6
2.4 Modelado de distribución de especies	8
2.5 Técnicas de modelación	10
2.5.1 Algoritmo MaxEnt	12
2.6 Sistemas de Información Geográfica	13
2.7 Plantaciones forestales comerciales	14
2.7.1 Situación de las plantaciones forestales en el mundo	14
2.7.2 Situación de las plantaciones forestales en México	15
2.8 <i>Cedrela odorata</i> L.	16
2.8.1 Taxonomía	17
2.8.2 Nombre común	17
2.8.3 Distribución geográfica	18
2.8.4 Descripción botánica	18
2.8.5 Importancia ecológica	21
2.8.6 Importancia económica y usos	21
2.8.7 Plagas y enfermedades	22

3.	JUSTIFICACIÓN	23
4.	HIPÓTESIS	24
5.	OBJETIVOS	24
5.1	General.....	24
5.2	Específicos	24
6.	MATERIALES Y MÉTODOS	25
6.1	Ubicación geográfica del área de estudio.....	25
6.1.1	Clima.....	25
6.1.2	Vegetación.....	27
6.1.3	Suelo.....	29
6.2	Bases de datos.....	31
6.2.1	Clima actual	31
6.2.2	Clima a futuro.....	31
6.2.3	<i>Cedrela odorata</i> L	31
6.2.4	Depuración de las bases de datos.....	32
6.2.5	Variables bioclimáticas, ecogeográficas actual y futura	32
6.2.6	Delimitación del área de modelación	34
6.3	Metodología.....	34
6.3.1	Zonificación climática actual y escenario de cambio climático en la Península de Yucatán.	34
6.3.2	Diferencias entre el escenario climático actual y futuro	35
6.3.3	Vulnerabilidad ante el cambio climático	35
6.3.4	Distribución de <i>Cedrela odorata</i> L, en la Península de Yucatán....	35
6.3.5	Modelado de distribución de la especie	36
6.3.6	Validación de los modelos de distribución de la especie	38
6.3.7	Contribución de las variables	39
6.3.8	Áreas de calidad de hábitat	39

6.3.9	Distribución de áreas potenciales	39
6.3.10	Modelación bajo escenarios de cambio climático de <i>C. odorata</i> L, en la Península de Yucatán.	40
7	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	41
7.1	Zonificación climática actual y escenario de cambio climático en la Península de Yucatán.	41
7.1.1	Diferencias entre el escenario climático actual y futuro	42
7.1.2	Vulnerabilidad ante el cambio climático	42
7.2	Distribución de <i>Cedrela odorata</i> L, en la Península de Yucatán.	47
7.2.1	Evaluación del modelo de distribución de la especie.....	48
7.2.2	Contribución de las variables	50
7.2.3	Áreas de calidad de hábitat	51
7.2.4	Distribución de áreas potenciales	53
7.3	Modelación bajo escenarios de cambio climático de <i>C. odorata</i> L, en la Península de Yucatán	54
7.3.1	Contribución de las variables a futuro.....	54
7.3.2	Distribución de áreas potenciales bajo escenarios de cambio climático.....	55
8	CONCLUSIONES.....	59
9	BIBLIOGRAFÍA	61

ÍNDICE DE TABLAS

	Paginas
Tabla 1. Tipos de clima en la Península de Yucatán.	26
Tabla 2. Tipos de vegetación en la Península de Yucatán.	28
Tabla 3. Tipos suelo en la Península de Yucatán	30
Tabla 4. Variables bioclimáticas utilizadas en la distribución potencial de <i>C. odorata</i> L, en la Península de Yucatán.	33
Tabla 5. Criterios y fuentes de datos empleados en la generación de los modelos de distribución.	36
Tabla 6. Criterios empleados en la generación de los modelos de distribución	37
Tabla 7. Diferencia entre el clima actual y futuro	42
Tabla 8. Descripción del nivel de riesgo, modificación, hectáreas y porcentaje de afectación en precipitación y temperatura por el cambio climático al año 2039.	43
Tabla 9. Distribución de <i>C. odorata</i> L, en la Península de Yucatán	48
Tabla 10. Resultados de las pruebas de Roc parcial y de Z para los 10 modelos.	50
Tabla 11. Categorías de calidad de hábitat y la superficie que ocupan en el área de estudio.	52
Tabla 12. Resultados de la prueba Roc parcial y Z de los modelos de distribución bajo escenarios de cambio climático.	54
Tabla 13. Superficie en hectáreas y porcentaje actual y futura de <i>c. odorata</i> L. en la Península de Yucatán.	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Paginas

Figura 1. Representación gráfica del nicho realizado (área gris oscuro) y el nicho fundamental (área gris claro) (Hutchinson, 1957).	7
Figura 2. Diagrama BAM. Donde B representa las variables bióticas, A las variables abióticas, M la región que ha sido accesible para la especie. El área gris representa el nicho realizado; DA: distribución actual, DP: distribución potencial y DH: distribución histórica. Tomado y modificado de (Soberón & Peterson 2005).	10
Figura 3. Mapa de distribución de <i>C. odorata</i> L. en México (Tomado de Pennington & Sarukhan, 2005).	18
Figura 4. Cedro rojo (<i>Cedrela odorata</i> L). Morfología: A) árbol adulto, B) ramas con flores, C) inflorescencia, D) frutos cerrados, E) frutos abiertos, F) tronco con corteza, G) semillas y H) madera. (Bonilla Sánchez, 2014).	20
Figura 5. Ubicación geográfica del área de estudio	25
Figura 6. Tipos de clima en el área de estudio (Elaboración propia a partir de datos de CONABIO, 1998).	27
Figura 7. Tipos de vegetación en el área de estudio (elaboración propia a partir de datos de INEGI 2016).	29
Figura 8. Tipos de suelo en el área de estudio (elaboración propia a partir de datos de SEMARNAP, 1998).	30
Figura 9. Niveles de vulnerabilidad al cambio climático en PPT	44
Figura 10. Niveles de vulnerabilidad al cambio climático en TMAX	44
Figura 11. Niveles de vulnerabilidad al cambio climático en TMED	45
Figura 12. Niveles de vulnerabilidad al cambio climático en TMIN	45
Figura 13. Distribución actual de <i>C. odorata</i> L, en la Península de Yucatán	48
Figura 14. Curva operada por el receptor (ROC)	49
Figura 15. Contribución de las variables más importantes en los modelos de distribución de <i>Cedrela odorata</i> L.	51

- Figura 16. Áreas de calidad de hábitat de *C. odorata* L., en la Península de Yucatán. 52
- Figura 17. Áreas potenciales para el establecimiento de plantaciones forestales comerciales de *C. odorata* L., en la Península de Yucatán. 53
- Figura 18. Porcentajes de contribución de las variables más importantes de los modelos GFDL_CM3 y MIROC_ESM. 55
- Figura 19. Superficie actual y futura del modelo GFDL_CM3 para *C. odorata* L, en la Península de Yucatán. 56
- Figura 20. Superficie actual y futura del modelo MIROC_ESM para *C. odorata* L, en la Península de Yucatán. 57

SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

A continuación, se enlistan las abreviaturas de uso común y su significado en el presente trabajo de tesis.

AUC: Área Bajo la Curva

CC: Cambio Climático

CMNUCC: Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático

CONABIO: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad

CONAFOR: Comisión Nacional Forestal

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación

GBIF: Fondo Mundial de Información Sobre la Biodiversidad

GEI: Gases de Efecto Invernadero

GFDL: Laboratorio de Dinámica de Fluidos Geofísicos

INE: Instituto Nacional de Ecología

INECC: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático

INEGI: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática

IPCC: Panel intergubernamental de Cambio Climático

MAXENT: Máxima Entropía

MCG: Modelo de Circulación Global

MDE: Modelo de Distribución de Especies

PFC: Plantaciones Forestales Comerciales

REA: Fiabilidad del Ensamble Ponderado

ROC: Características del Operador Receptor (Receiver Operating Characteristic)

SEMARNAT: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

SIG: Sistemas de Información Geográfica

UNIATMOS: Unidad de Información para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales

RESUMEN

En el mundo y en México, el principal problema de los bosques y selvas es la sobreexplotación de especies arbóreas consideradas como maderas valiosas. Los Modelos de nicho ecológico son una herramienta que permiten conocer áreas aptas para el crecimiento y desarrollo de una especie, a su vez, estas ayudan a predecir los posibles impactos del cambio climático en la distribución de las especies. El objetivo de este trabajo fue delimitar áreas potenciales actuales y bajo escenarios de cambio climático para el establecimiento de plantaciones forestales comerciales de *Cedrela odorata* L. en la Península de Yucatán, México. Se utilizaron los datos de registros de presencia de la plataforma Acceso libre de Información sobre Biodiversidad Global (GBIF), árboles tropicales de México y del Inventario Nacional Forestal y Suelos (INFyS). Se eliminaron los registros duplicados y se eliminó la autocorrelación espacial. Se utilizaron datos de variables ambientales actuales y las variables climáticas de escenarios futuros para México en formato ASCII. La distribución actual y futura de la especie se realizó a través del software MaxEnt. Los *grids* de salida se clasificaron en tres categorías de calidad de hábitat: Baja, Media y Alta. Para generar el mapa de las áreas potenciales de cedro rojo, se transformaron los valores de la categoría de calidad de hábitat de las salidas continuas a binarias (Apto y No apto). De acuerdo a los resultados obtenidos, la superficie potencial actual estimada para el establecimiento de plantaciones forestales comerciales es de 404,917 ha. La proyección a futuro del modelo GFDL_CM3 estima una reducción en la superficie apta para plantaciones forestales de cedro rojo en un 31%, por otra parte, el escenario del modelo MIROC_ESM estima una reducción hasta del 44.8% de la superficie apta para el cedro rojo en la Península de Yucatán.

Palabras claves: Distribución de especies, MaxEnt, Plantaciones forestales comerciales.

ABSTRACT

In the world and in Mexico, the main problem of forests and jungles is the overexploitation of tree species considered as valuable woods. Ecological niche models are a tool that allows us to know areas suitable for the growth and development of a species, in turn, they help predict the possible impacts of climate change on the distribution of species. The objective of this work was to delimit current potential areas and under climate change scenarios for the establishment of commercial forest plantations of *Cedrela odorata* L. in the Yucatan peninsula, Mexico. The data of records of presence of the platform Free access to information on Global Biodiversity (GBIF), tropical trees of Mexico and the National Forestry and Soils Inventory (INFyS) were used. The duplicate records were eliminated and the spatial autocorrelation was eliminated. Data from current environmental variables and the climatic variables of future scenarios for Mexico were used in ASCII format. The current and future distribution of the species was made through the MaxEnt software. The output grids were classified into three categories of habitat quality: Low, Medium and High. To generate the map of the potential areas of red cedar, the values of the habitat quality category of the continuous to binary outputs (Suitable and Unfit) were transformed. According to the results obtained, the estimated current potential area for the establishment of commercial forest plantations is 404,917 ha. The future projection of the model GFDL_CM3 estimates a reduction in the area suitable for forest plantations of red cedar by 31%, on the other hand, the scenario of the model MIROC_ESM estimates a reduction of up to 44.8% of the area suitable for red cedar in the Yucatan peninsula.

Keywords: Distribution of species, MaxEnt, Commercial forest plantations.

1. INTRODUCCIÓN

El hombre ha ejercido una presión y perturbación sobre el medio ambiente desde tiempos remotos. En la actualidad las actividades humanas están provocando uno de los conflictos ambientales más graves a los que ha tenido que enfrentarse la humanidad (Hoekstra *et al.*, 2005; Loreau *et al.*, 2006). El cambio climático es un fenómeno global que se ha documentado a partir de la segunda mitad del siglo XX, desde entonces, se han invertido muchos recursos en el entendimiento del fenómeno y sus consecuencias en la distribución de las especies (Martínez-Meyer, 2005).

Un gran problema que afecta a la conservación de la biodiversidad es el efecto del cambio climático, actualmente constituye una de las mayores preocupaciones alrededor del mundo, principalmente por la importancia global de sus efectos, la incertidumbre del comportamiento futuro y por la necesidad de lograr compromisos para mitigar e iniciar un proceso de adaptación (IPCC, 2007a). En este sentido la biodiversidad del planeta presentaría cambios en sus rangos de distribución de las especies, como desplazamientos altimétricos de los ecosistemas, fragmentación del hábitat y cambios en el funcionamiento de los ecosistemas (Jiménez *et al.*, 2010).

Uno de los principales problemas de los bosques y selvas en México es la sobreexplotación de especies arbóreas consideradas como maderas valiosas (Martínez & García, 2007). El cedro rojo (*Cedrela odorata* L) por su calidad, durabilidad y color de la madera es una especie que aporta grandes beneficios económicos a la industria maderable (Bravo *et al.*, 2007). El cedro rojo, pertenece a la familia *Meliaceae*. Esta especie representa un enorme potencial e importancia forestal tanto económica como social debido a los múltiples usos de su madera y su elevado valor comercial.

Sin embargo, el abasto de esta importante materia prima ha causado daños al suelo como la extensa pérdida de cobertura vegetal, la cual ocasiona problemas de erosión. Por otra parte, el cambio de uso de suelo ejercido en las últimas décadas por el crecimiento demográfico ha propiciado la degradación de los ecosistemas tropicales en donde se encuentran las poblaciones naturales de *C. odorata* L. Estos ecosistemas tienen una gran importancia ecológica y económica surgiendo la necesidad de proteger y manejar dichas áreas mediante actividades de reforestación, restauración y conservación (De la Torre *et al.*, 2008).

En México, *C. odorata* L se encuentra dentro de la categoría “sujeta a protección especial” en la Norma Oficial Mexicana 059, por lo cual existe la necesidad de promover su recuperación y conservación, junto con las otras especies que coexisten dentro su hábitat. Las plantaciones forestales son de suma importancia en la solución del problema de la deforestación y disminución de bienes y servicios derivados del manejo sustentable del bosque, debido a que estas acciones contribuyen a la restauración de áreas deterioradas (López & Musálem, 2007).

En función de la problemática revisada, se pretende modelar el clima a futuro con el fin de predecir las áreas del cedro rojo que podrían ser afectadas por el cambio climático. Los Modelos de Circulación General (MCG) son simulaciones del posible comportamiento del clima a futuro, las cuales están basados en la dinámica y química de la atmosfera, la vegetación, relieve y las emisiones de bióxido de carbono (FIC, 2011); sin embargo, para delimitar la distribución espacial de una especie en un espacio ecológico se utilizan distintas reglas o algoritmos matemáticos, como los modelos de distribución de especies (MDE) que son herramientas utilizadas para predecir la distribución (actual y potencial) de las especies (Sandoval & Real, 2005). El uso integrado de los modelos de distribución de especies y los modelos de circulación global ayudan a evaluar el posible impacto del cambio climático sobre la distribución de las especies (Peterson, 2006; Jeschke & Strayer, 2008; Peterson *et al.*, 2011).

2. ANTECEDENTES

2.1 Cambio climático

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

En el forzamiento externo o forzamiento radiactivo se encuentra en parte el resultado del incremento en las concentraciones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) como son: vapor de agua, bióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y clorofluorocarbonos (CFC); atribuyendo los incrementos a la acción del hombre con una certidumbre superior al 90% (IPCC, 2007a). Cuanto mayor es la concentración de los GEI, menor es la cantidad de radiación infrarroja que el planeta refleja libremente al espacio exterior. Al aumentar su concentración, se incrementa la cantidad de calor atrapado en la atmósfera, dando origen a que se eleve la temperatura superficial del planeta.

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

Existen evidencias de que los patrones o tendencias de precipitación y temperatura están cambiando en muchas partes del mundo (Watson *et al.*, 1997;

Watson, 2001) y esto se encuentra asociado a las acciones humanas, principalmente a la quema de combustibles fósiles y al proceso del cambio de uso de suelo, que son los principales factores que han modificado el clima (IPCC, 2007b).

A partir del inicio de la Revolución Industrial, en especial en la segunda mitad del siglo pasado, la humanidad ha modificado de manera gradual el medio ambiente a escala global (Ludevid, 1997). Este calentamiento inducido ha modificado los elementos climatológicos, causando un cambio climático que afecta, entre otros, a los ecosistemas del planeta (Euscátegui, 2002). Como consecuencia, un elemento importante de la investigación actual es el análisis de tendencias de variaciones de series de registros de datos climáticos históricos (Molnár & Ramírez, 2001). Dichos datos han sido capturados, medidos y proyectados a diversos horizontes de tiempo y escalas por diversas instituciones del país.

Desde la Primera Comunicación de México ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre cambio climático del año 2000, se han generado escenarios de cambio climático, utilizando las salidas de los Modelos GFDLR3.0, obteniéndose así escenarios de precipitación y temperatura para las 13 regiones de México (INE, 2000). Dichos escenarios se generaron utilizando series de datos de 92 estaciones meteorológicas para temperatura y 279 para precipitación del periodo 1951-1980.

Durante la Tercera Comunicación Nacional celebrada en el año 2006, se generaron escenarios climáticos utilizando el software MAGICC/SCENGEN 4.1, el cual consta de dos partes, la primera es un Modelo simple del clima (MAGICC), que estima los incrementos de la temperatura global en función de las diferentes emisiones de GEI. La otra parte (SCENGEN), combina el MAGICC con los resultados de los MCG para desplegar la información en un mapa reticular con resolución de 5° x 5° a distintos horizontes o escalas de tiempo (INE, 2006).

Para la Cuarta Comunicación del año 2009, se generaron proyecciones utilizando una climatología de alta resolución ($1^\circ \times 1^\circ$ y $10^\circ \times 10^\circ$, respectivamente) para el periodo de 1950 a 2000, esto fue posible gracias al apoyo del grupo UNIATMOS del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM (INE, 2009). Con lo cual se construyeron los escenarios utilizando la metodología empleada por los grupos de trabajo I, II y III del Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC, 2007b).

Para la Quinta Comunicación de México en el año 2012, se elaboró la regionalización SEDEPECC que es el Sistema para la Exhibición de Datos del Ensamble Ponderado de Escenarios de cambio climático para México (INECC, 2012). Los datos se obtuvieron a partir de datos climáticos que incorporan distintos escenarios de cambio climático, proyectadas a varias décadas a futuro para México. Para la obtención de cada escenario, la información de cada Modelo se ponderó de acuerdo con los datos climáticos actuales conocidos (Montero & Pérez, 2008).

2.2 México y el cambio climático

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

La evidencia científica documentada sugiere que las especies no se adaptan fácilmente a cambios drásticos y rápidos. Sin embargo, CONANP (2010a) establece que México es uno de los pocos países en el mundo donde, teóricamente, podría ser factible conservar la mayor parte de su biota, a pesar del impacto del cambio climático. Los factores que apoyan esta hipótesis son:

- i. La ubicación geográfica de México como área de convergencia de las Bioregiones Holártica y Neotropical, lo cual determina que muchas especies de flora y fauna coexistan de manera natural.
- ii. La variación de las condiciones climáticas estacionales en México posibilita la supervivencia de especies del trópico húmedo originarias de zonas más ecuatoriales y otras especies templadas de afinidad Holártica de latitudes boreales.
- iii. Diversos grados altitudinales posibilitaría la migración y movimiento de especies, las cuales podrían desplazarse de manera horizontal y vertical dentro del paisaje de acuerdo con sus umbrales de tolerancia y adaptación, para mantener su distribución dentro de las zonas climáticas más aptas en respuesta al cambio climático.

La mayoría de los estudios climáticos realizados en México muestran una tendencia de aumento de temperatura y disminución de la precipitación, trayendo como consecuencia un incremento de la superficie del clima árido (Villers & Trejo, 2010).

2.3 Nicho ecológico

El término fue desarrollado por primera vez por Grinnell en 1917 para referirse a todas las características del medio ambiente, las cuales le permiten a una especie sobrevivir y reproducirse.

Posteriormente, Elton (1927) introdujo el papel fundamental de la especie dentro de su comunidad, en su nueva definición del concepto. Estos autores están detrás de controversias pasadas y actuales. La definición más aceptada es la propuesta por Hutchinson (1957) quien formalizó el concepto de nicho ecológico con un modelo geométrico de múltiples dimensiones, donde cada dimensión corresponde a uno de los factores ambientales. De esta forma, el nicho ecológico

involucra a todos los recursos presentes del ambiente, las adaptaciones de los organismos y cómo estos se relacionan. Así también, el autor distinguió los conceptos de nicho fundamental (NF) y nicho realizado (NR).

El nicho fundamental (NF) se define como el intervalo de condiciones ambientales en el que una especie puede existir indefinidamente. Por otra parte, el nicho realizado (NR) es el espacio ambiental donde las especies existen en interacción con otros organismos (plantas, animales herbívoros, microorganismos, etc.). Este espacio está restringido por la suma de interacciones negativas como la competencia y predación, las cuales disminuyen la presencia de la especie, así como de las interacciones positivas como la disponibilidad de recursos, que expanden el intervalo ambiental en el que la especie puede establecerse (Hutchinson, 1957) (Figura 1).

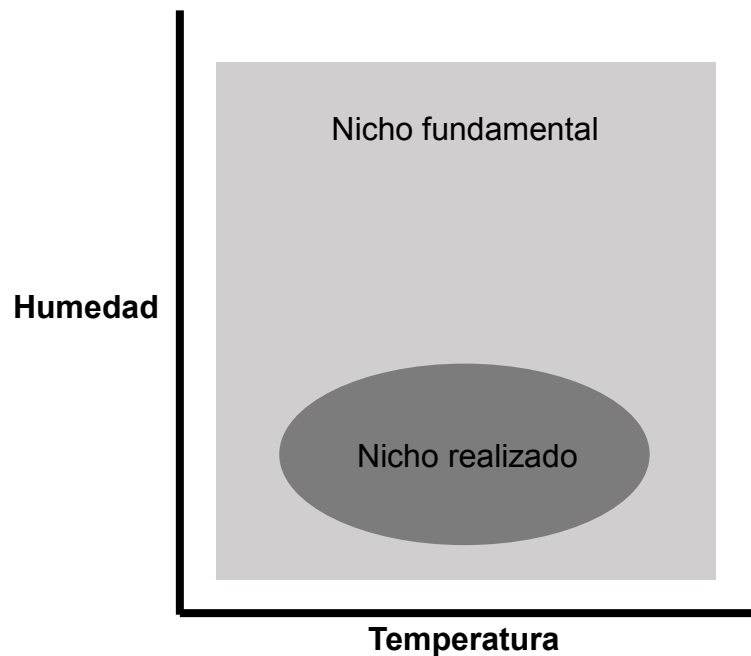


Figura 1. Representación gráfica del nicho realizado (área gris oscuro) y el nicho fundamental (área gris claro) (Hutchinson, 1957).

2.4 Modelado de distribución de especies

La modelación de distribución de las especies tiene diversas aplicaciones en los campos de la biología, biogeografía, conservación, evolución ecología, manejo de invasión de especies, entre otras, esto se debe a la buena capacidad predictiva de los modelos (Anderson & Martínez-Meyer, 2004).

Durante las últimas décadas, nuestra capacidad tecnológica se ha incrementado notablemente. En la actualidad, contamos con metodologías y programas de computación capaces de manejar grandes cantidades de datos. Un ejemplo de ellos son los Sistemas de Información Geográfica (Pliscoff & Fuentes-Castillo, 2011). Por otro lado, una de las herramientas útiles para el estudio de la distribución de las especies, es la modelación de distribución de especies (MDE). La modelación espacial de especies tiene como propósito identificar sitios adecuados para el establecimiento, desarrollo y supervivencia de una especie (Guisan & Zimmermann, 2000; Loyn *et al.*, 2004; Soberón & Nakamura, 2009). El procedimiento para generar un modelo de distribución de especies implica seis pasos básicos (Guisan y Zimmermann, 2000):

- i. Definición del modelo conceptual y el sistema que será simulado (campo del conocimiento), selección del algoritmo de modelación y el área de estudio (resolución y extensión).
- ii. Preparación de la información (capas ambientales y registros de presencia).
- iii. Aplicación del algoritmo de modelación y desempeño del modelo.
- iv. Evolución del modelo (pruebas estadísticas).
- v. Predicciones espaciales.
- vi. Aplicación del modelo (interpretación).

El primer paso de la modelación espacial, tiene que ver con la elección de la configuración del diagrama BAM, el cual se ajusta a los objetivos del trabajo.

El diagrama BAM fue propuesto por (Soberón & Peterson 2005), donde se ilustra los dominios que determinan las áreas de distribución de las especies. En este diagrama, la A representa la región del espacio con las condiciones abióticas (clima, tipo de suelos, elevación, pendiente, etc.) requeridas para la presencia de la especie (Nicho Fundamental, Hutchinson, 1957); la B, representa el espacio que contiene las interacciones bióticas (depredación, competencia, etc.) y M, representa la región que ha sido accesible para la especie a través de un determinado tiempo (capacidad de dispersión o movimiento de la especie analizada). La interacción A y B representa la extensión geográfica del nicho realizado (NR) de la especie, es decir, los sitios que cuentan con las condiciones ambientales adecuadas y las intersecciones bióticas favorables para que la especie pueda estar presente. La intersección de AB y M, representan la distribución actual, definida como DA; y es la región con condiciones bióticas y abióticas adecuadas para la especie y donde ha podido moverse y permanecer. La distribución potencial (DP), es el área que cuenta con factores bióticos y abióticos favorables para la especie, pero que, por falta de tiempo o limitantes geográficas, aun no se ha expandido hacia esas áreas. La distribución histórica (DH) se refiere a los sitios en donde ha estado, pero debido a cambios climáticos u orográficos (intersección A con M) se ha extinguido de esa zona; o bien, por la agregación de nuevas especies, mayor competencia u otros factores bióticos (intersección B con M) que limitaron su distribución hacia la actual (Figura 2) (Soberon y Peterson 2005).

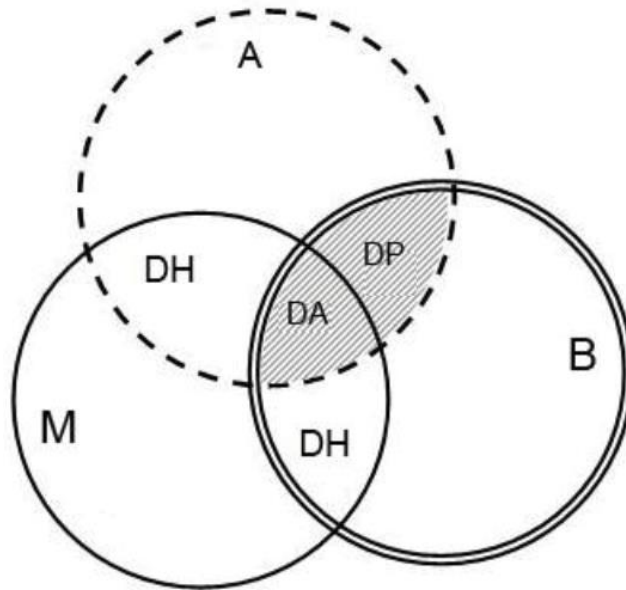


Figura 2. Diagrama BAM. Donde B representa las variables bióticas, A las variables abióticas, M la región que ha sido accesible para la especie. El área gris representa el nicho realizado; DA: distribución actual, DP: distribución potencial y DH: distribución histórica. Tomado y modificado de (Soberón & Peterson 2005).

Es importante resaltar que si un área geográfica presenta un nicho adecuado para la especie, esto no significa que la especie se encuentre ahí. Las limitaciones de dispersión y barreras geográficas impiden ocupar todas las áreas geográficas que tiene un ambiente que cabe dentro el nicho realizado. También es probable que en muchas áreas donde una especie pueda estar presente, es posible que ya no exista debido a la eliminación del ambiente natural por factores antropogénicos (Scheldeman *et al.* 2011).

2.5 Técnicas de modelación

Existen numerosos algoritmos para realizar modelos de distribución de especies (Franklin, 2010) así como diversas plataformas para ello. Para elegir el algoritmo a usar, primero se debe considerar los datos con los que se cuenta. Los modelos de distribución de especies pueden generarse en principio con cualquier clasificador estadístico apropiado para el tipo de variable modelizada, dicotómica

si se cuenta con datos de presencia/ausencia y continua si son datos de abundancia (Mateo *et al.*, 2011). Pliscoff & Fuentes-Castillo (2011) distinguen cinco grandes familias de técnicas de modelación de la distribución geográfica de las especies/ecosistemas, las relacionadas a:

- i. Modelos estadísticos de regresiones (GLM, GAM): que permiten establecer de forma clara el modelo estadístico que describe la relación entre las variables descriptivas y la presencia conocida de las especies/ecosistemas. Además, en evaluaciones comparativas entre técnicas de modelación, estos métodos han sido identificados como una de las técnicas de mejor resultado en la proyección sobre el espacio geográfico (Elith *et al.*, 2006).
- ii. Métodos de clasificación (RF, BRT): se basan en clasificaciones basadas en reglas, donde se asigna una clase para cada combinación de las variables predictivas que generan el modelo de distribución (Guisan & Zimmermann, 2000). Han sido identificados como los modelos con mejores resultados al momento de discriminar la importancia de las variables para la definición del modelo final, pero a su vez, la caracterización del conjunto de reglas que define el modelo final es muy compleja, por lo que se hace difícil de interpretar (Pliscoff & Fuentes-Castillo, 2011).
- iii. Métodos de sobre o capa climática (BIOCLIM, ENFA): se basan en el establecimiento de combinaciones de rangos de valores mínimos y máximos, entre las variables utilizadas para la definición del nicho. Donde se define un espacio o "sobre" en que se da la combinación de valores deseada, dentro del espacio n-dimensional de las variables (Busby, 1991; en Pliscoff & Fuentes-Castillo, 2011).

- iv. Métodos basados en algoritmos específicos (GARP, MAXENT): En los últimos años ha tomado auge el uso de técnicas basadas en algoritmos específicos, los que han significado un aumento exponencial en el número de publicaciones y estudios asociados a la modelación de la distribución geográfica de las especies y ecosistemas, por la facilidad de su aplicación y la rapidez con que se pueden obtener resultados (Pliscoff & Fuentes-Castillo, 2011). El software MaxEnt es un ejemplo de este tipo de método, el cual será explicado posteriormente con mayor detalle, ya que será la técnica de modelación utilizada en la presente investigación.

- v. Métodos de ensambles de técnicas (BIOMOD): los modelos de consenso nacen con el objetivo de disminuir las incertidumbres asociadas con los modelos de distribución, especialmente en relación a la validez estadística de los resultados (Pliscoff & Fuentes-Castillo, 2011).

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

2.5.1 Algoritmo MaxEnt

MaxEnt es un programa basado en el principio de Máxima Entropía, con el cual se realizan modelos de distribución geográfica de especies. Fue desarrollado por Phillips y colaboradores en 2004, con financiamiento de la Universidad de Princeton del Centro para la Biodiversidad y Conservación y el Museo de Historia Natural de América.

El software ha sido calificado como la mejor aproximación para estimar las distribuciones de especies a partir de datos ambientales y registros de solo presencia (Phillips *et al.*, 2006; Franklin, 2010). El desempeño probado de MaxEnt se considera mejor que otros algoritmos (Elith *et al.*, 2006).

A pesar de que existe una amplia gama de modelos similares, MaxEnt posee tres ventajas por sobre los demás: primero, solo requiere de datos de presencia, en comparación con otros programas que necesitan datos de presencia y ausencia real (Kumar *et al.*, 2014). Segundo, su buen desempeño en comparación con otros 16 métodos similares (Elith *et al.*, 2006), especialmente con un número pequeño de muestras (Elith *et al.*, 2006; Phillips *et al.*, 2006) y tercero, su disponibilidad de acceso libre, además MaxEnt tiene la ventaja adicional de poder utilizar variables continuas y categóricas (Baldwin, 2009).

El archivo de salida del programa representa un índice de similitud con valores que varían de 0 (inadecuado para la especie) hasta 1 (idóneo para la especie) (Phillips *et al.* 2006).

2.6 Sistemas de Información Geográfica

Un SIG es una herramienta de análisis espacial para resolver problemas por medio de modelos que permiten encontrar patrones y entender cuáles son los eventos que dan origen a los fenómenos que se estudian. Este término fue acuñado por primera vez por el geógrafo Roger Tomlinson en 1963, y en 1964 desarrolló el primer SIG con el nombre de Canadian Geographic Information System (CGIS) (Buzai, 2000). Estos sistemas funcionan como herramientas de carácter estadístico, operaciones matriciales, funciones topológicas y teoría de cálculos; permiten ingresar, estructurar, organizar, modelar, analizar, interpretar, representar y visualizar datos espaciales geográficamente referenciados y asociados a una base de datos alfanumérica (Duque, 2008).

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

2.7 Plantaciones forestales comerciales

Las plantaciones forestales comerciales se consideran una alternativa para disminuir la presión que se ha ejercido sobre los bosques naturales, factor detonante del desequilibrio ecológico (Arteaga-Martínez & Pérez-Castillo, 2001). Se le denomina plantación forestal a la cubierta vegetal artificial establecida donde previamente había o no bosque, pero se establecen especies diferentes a las nativas que originalmente existieron y basada en el conocimiento silvícola (CONAFOR, 2011).

Las plantaciones forestales pueden ser maderables y no maderables, dentro de la maderable se encuentra la que tiene orientación para la producción de madera para celulosa y para la industria forestal mecánica, con un incremento anual mínimo de 12 a 15 m³ de madera por hectárea, mientras que las no maderables se destinan para la obtención de productos como leña y carbón vegetal (CONAFOR, 2011).

2.7.1 Situación de las plantaciones forestales en el mundo

A nivel mundial la superficie de bosques es de aproximadamente 3,869 millones de ha, de las cuales solo 187 millones hectáreas son de plantaciones forestales, lo que representa el 4.8% del total de la superficie forestal mundial, siendo Asia el lugar donde se concentra el mayor porcentaje de plantaciones forestales con

el 62% lo que representa 116 millones de hectáreas, seguida por Europa con 17% que representa 32 millones de hectáreas y América del Norte y Central con un 9% (CONAFOR, 2011).

Según la FAO (2005), el 80% de las plantaciones forestales a nivel mundial se concentra en 10 países, de los cuales China ocupa el primer lugar en superficie plantada, con más de 45 millones de hectáreas, seguido por India con más de 32 millones, la Federación Rusa con 17 millones y Estados Unidos con 16 millones de hectáreas.

Las diferentes especies del género *Pinus* son las que más se utilizan en las PFC, las cuales ocupan el primer lugar con poco más del 20%, le sigue el género *Eucalyptus* con el 10%, *Hevea* con el 5%, *Acacia* con el 4%, y *Tectona* con el 3%, otras latifoliadas en conjunto ocupan el 18% y las coníferas ajenas al género *Pinus* ocupan el 11% (CONAFOR, 2011).

2.7.2 Situación de las plantaciones forestales en México

En México la superficie cubierta por PFC a nivel nacional es de aproximadamente 117,479 hectáreas, de las cuales las especies maderables cubren un 85.2% que representa (100,131 ha). Las especies no maderables cubren el 14.8% que representa (17,348 ha), siendo los estados de Veracruz, Tabasco y Campeche los que mayor superficie plantada de especies maderables reportan. Las especies maderables que más se plantan a nivel nacional son los géneros *Eucalyptus* y *Pinus*, junto con *Cedrela odorata* cubren una superficie mayor al 55% de la superficie total plantada (CONAFOR, 2011).

Dentro de la superficie por especie se distinguen dos grupos: las tropicales que cubren un 83% del total de la superficie y las templadas con el 17%; dentro de las tropicales se encuentran los géneros *Cedrela*, *Swietenia*, *Eucalyptus*, *Tectona* y *Gmelina*, dentro de los primeros géneros se incluyen el cedro rojo y la caoba

respectivamente las cuales son las dos especies nativas más importantes de México por el alto valor de su madera en el mercado (CONAFOR, 2011).

Los principales retos de México en la actividad forestal es detener la deforestación y aumentar la producción de bienes y servicios, en cuanto al primer punto la deforestación se ha reducido de 350 000 ha por año en la década de los 90, a 155 000 en el periodo de 2005 a 2010. El segundo punto ha sido abordado mediante el establecimiento de plantaciones forestales, ya sea para restauración o con fines comerciales con el objetivo de reducir la presión sobre los bosques naturales (FAO, 2010; CONAFOR, 2012).

2.8 *Cedrela odorata* L.

Cedrela odorata L, es una especie forestal característica de las regiones tropicales, se conoce comúnmente como cedro rojo, es una de las especies de mayor valor económico ya que se le considera una madera valiosa, utilizada principalmente para la fabricación de muebles de alta calidad. Al igual que la caoba son pilares de la producción de madera tropical en México, debido a su alto valor económico, la especie ha sido severamente afectada por la selección disgénica y la deforestación, al fragmentar y disminuir sus poblaciones naturales (Sánchez *et al.*, 2003; Martínez-Ventó *et al.*, 2010; CONAFOR, 2011).

Es por esto que el cedro rojo está protegido por varias organizaciones como: NOM-059-SEMARNAT-2010 como especie en protección especial (SEMARNAT, 2010); CITES (Conservación sobre el comercio internacional de especies amenazadas de fauna y flora silvestre) apéndice III para los países de Bolivia, Colombia, Guatemala y Perú (CITES, 2015); IUCN (Unión internacional para la conservación de la naturaleza) considera a *Cedrela odorata* vulnerable en su lista roja (IUCN, 2015).

2.8.1 Taxonomía

El género *Cedrela* pertenece a la familia Meliaceae la cual, incluye cerca de 50 géneros y 800 especies distribuidas en las regiones tropicales y subtropicales de América, Asia, África, Australia y Nueva Zelanda (Guevara, 1988).

El Cedro rojo fue descrito originalmente por Linnaeus en 1759 en su obra *Sistema Naturae*. Actualmente está clasificado dentro del siguiente arreglo taxonómico:

Reino: *Plantae*

División: *Magnoliophytha*

Clase: *Magnoliopsida*

Orden: *Sapindales*

Familia: *Meliaceae*

Género: *Cedrela*

Especie: *odorata* Lindley

Nombre científico: *Cedrela odorata* Lindley.

2.8.2 Nombre común

En México, al cedro rojo se le conoce con los siguientes nombres comunes: cedro tropical (Chiapas); calcidra (Puebla); cedro rojo, cedro colorado (Oaxaca y Veracruz); cedro real (Veracruz). En lenguas indígenas: mayall hühche, kújché, kúché, kújeché, kúlché, kúnché, kúyché (Yucatán, Campeche, Quintana Roo); náhuatlíll, ticuáhuítl (Veracruz); zoquell, acuy (Chiapas); chinantecoll, moni (Oaxaca); mixell, pucsnum-qui-ui (Oaxaca); huastecoll, icté (San Luis Potosí); totonacoll, puksnúm kiwi (Veracruz); tzeltallí, chujté, chucjté, chujtá (Chiapas) (Manzanilla *et al.*, 2001; CNIC, 2005).

En otros países se le conoce como: cedro cebollo (Panamá), cedro amargo (Venezuela), ceder (Trinidad, Tobago, Jamaica), red ceder (Honduras británicas),

acajou roge (Guadalupe y Martinica), cedro macho (Cuba), cedro; cedro cebollo, cedro amargo, cedro caobo, cedro caqueta, cedro rosado y cedro rojo (Colombia) (Guevara, 1988; CNIC, 2005).

2.8.3 Distribución geográfica

En México, el cedro rojo se puede encontrar como especie silvestre o como árbol cultivado y protegido en diversas áreas de cultivo, huertos y plantaciones. En México, *Cedrela odorata* L se encuentra en la vertiente del Golfo, distribuyéndose desde el sur de Tamaulipas y sureste de San Luis Potosí hasta la Península de Yucatán; en la vertiente del Pacífico, desde Sonora hasta Guerrero y la depresión Central y la costa de Chiapas (Pennington & Sarukhan, 2005) (Figura 3).



Figura 3. Mapa de distribución de *C. odorata* L. en México (Tomado de Pennington & Sarukhan, 2005).

2.8.4 Descripción botánica

Es un árbol monoico de hasta 35 m de altura y 1.7 m de diámetro a la altura del pecho, presenta copa ancha y redonda con ramificaciones gruesas con lenticelas

redondas en ramas jóvenes. Corteza externa fisurada con las costillas escamosas, pardo grisáceo a moreno rojiza; la capa interna rosada y cambia a pardo amarillenta, fibrosa y de sabor amarga. Hojas compuestas alternas, paripinnadas y grandes, hasta de 1m de largo. Peciolos de 8 a 10 mm de largo, delgados, compuestas por 10 a 22 foliolos opuestos, oblicuamente lanceolados, comúnmente de 4.5 a 14 cm de largo y 2 a 4.5 cm de ancho (Figura 4) (Pennington & Sarukhan, 2005).

El periodo de floración y fructificación en México se presenta en los meses de marzo a abril. Las flores son masculinas y femeninas en la misma inflorescencia de hasta 35 cm de largas, los pedicelos son de 1 a 2 mm de largo, tienen el cáliz esparcidamente pulverulento, los lóbulos agudos, pétalos oblongos de color crema verdoso de 5 a 6 mm de largo. Los frutos son cápsulas con dehiscencia longitudinal septicida (se abre en cinco carpelos) presentan de 4 a 7 cm de largo; en estado inmaduro, poseen un color verde y al madurar se tornan leñosos de color café oscuro con la superficie externa lenticelada y lisa; este fruto se desprende una vez liberadas las semillas, cada fruto tiene de 20 a 25 semillas pequeñas y alargadas. Las semillas son aladas, de color pardo, elíptica, miden 1.2 a 4.0 cm de largo y entre 5 a 8 mm de ancho, con la parte seminal hacia el ápice del fruto; la testa es de color castaño rojizo; el embrión es recto, comprimido, color blanco o crema y ocupa gran parte de la cavidad de la semilla; tiene dos cotiledones grandes, planos (Benítez *et al.*, 2004).

Las características de su madera han colocado al cedro rojo entre las denominadas “maderas valiosas” (Calderón de Rzedowski & German, 1993). La madera se utiliza y comercializa desde hace mucho tiempo, de modo que en muchos países ha sido sobreexplotada, ocasionando que las poblaciones se encuentren en peligro (Pennington & Sarukhan, 2005). Tal situación ha conducido a que *C. odorata* se encuentre amenazada tanto por la pérdida de su hábitat, como por la tala incontrolada a la que ha sido sometida en los últimos años. Incluso en México, autores como Parraguirre *et al.*, (2007), mencionan que

la vertiente del Golfo de México, Chiapas y la Península de Yucatán, los individuos de cedro rojo han desaparecido parcialmente de los bosques naturales y solo es posible localizarlos en parques, calles, jardines, traspatio, plantaciones y sistemas agrosilvícolas.



Figura 4. Cedro rojo (*Cedrela odorata* L). Morfología: A) árbol adulto, B) ramas con flores, C) inflorescencia, D) frutos cerrados, E) frutos abiertos, F) tronco con corteza, G) semillas y H) madera. (Bonilla Sánchez, 2014).

2.8.5 Importancia ecológica

El cedro rojo puede considerarse como una especie secundaria y primaria a la vez, pues se ha reportado como especie pionera en la vegetación secundaria de diversas selvas, y también como elemento frecuente en el estrato superior de las selvas maduras. Se encuentra asociado con selva tropical caducifolia, perennifolia, subcaducifolia, subperennifolia, sabana y palmar. Es una especie con alto potencial para las reforestaciones de zonas degradadas de selva, zonas secas y áridas. Existen muchas experiencias de siembra en México, donde se considera que genera un efecto restaurador y brinda servicios ecosistémicos y ayuda a la recuperación de terrenos degradados. Se ha empleado también para rehabilitar o remediar sitios donde hubo explotación minera, para la conservación de suelo y el control de la erosión (Andrade & Solís, 2004).

2.8.6 Importancia económica y usos

Esta especie presenta una gran importancia económica debido a que es utilizada para la industria como materia prima en la elaboración de muebles finos, instrumentos musicales especialmente guitarras, chapas decorativas entre otros usos. Por estas razones Patiño (1997) asegura que esta especie ha sido aprovechada de una manera disgénica por el alto valor comercial, empobreciendo las áreas naturales de bosques y selvas en México y el extranjero. Desafortunadamente, en los últimos años, estos ecosistemas han sido impactados hasta en un 50% debido a las altas tasas de deforestación, quedando solamente poblaciones relictas en sitios poco accesibles (Mas *et al.*, 2003; Velázquez *et al.*, 2001).

Cedrela odorata L, recibe considerablemente atención debido al alto valor comercial de su madera, considerada valiosa, con sus adecuadas propiedades físico-mecánicas, y a su resistencia al ataque de termitas (Muñoz, 2003).

La madera es blanda y fácil de trabajar, se emplea principalmente en la elaboración de muebles finos, puertas y ventanas, gabinetes, decoración de interiores, carpintería en general, cajas de puros, cubiertas y forros de embarcaciones, lambrín, parquet, triplay, chapa, ebanistería en general, postes, embalaje, aparatos de precisión (CONAFOR, 2011).

2.8.7 Plagas y enfermedades

El cedro rojo es una especie apta para ser cultivada en plantaciones comerciales, debido a que son de rápido crecimiento y excelente forma, además del gran valor y aceptación de su madera. La plaga más dañina para el cedro es el “barrenador de las *Meliáceas*”, el lepidóptero *Hypsipy grandella*, que además de causar una ramificación excesiva y un crecimiento atrofiado, suele descortezar la base del tronco, lo que puede causar la muerte de las plántulas. Debido a lo anterior, lo más recomendable es utilizar plantas cada vez más grandes y resistentes a esta plaga, o bien, mezclar la plantación con otras especies de árboles, evitando las plantaciones puras. En algunos casos se han registrado ataques del insecto fitófago *Tetranychus mexicanus*; de las hormigas corta hojas del género *Atta*; del escarabajo de la familia *Escolitidae* *Xyleborus morigerus* y de los escarabajos de la familia *Buprestidae*, género *Chrysobothris*. Otra plaga identificada es el *Sematoneura grijpmaque* perfora las semillas (Gómez *et al.*, 2007).

3. JUSTIFICACIÓN

C. odorata L., es una especie maderable considerada como valiosa, la cual ha sido severamente afectada por la deforestación. Además, el aprovechamiento de esta especie está restringida a la protección de elementos en condiciones naturales, la escasez de arbolado ha provocado que se incluya en la lista roja de la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010 como especie sujeta a protección especial y a tratados internacionales como el Apéndice III del CITES. En este sentido, el poder delimitar las condiciones ambientales que hacen posible la residencia de una especie en un espacio geográfico, provee información de los requerimientos que la especie necesita para perpetuarse en el tiempo. A través del uso de herramientas como el modelado de la distribución espacial de especies y los modelos de circulación global, es posible conocer el área o las áreas geográficas que ocupa o pudiera ocupar, o que se verían afectadas para el cedro rojo.

Por lo anteriormente expuesto, se plantea la hipótesis y objetivos a probar y cumplir en el presente trabajo de investigación:

4. HIPÓTESIS

La Península de Yucatán presenta las condiciones ideales para el establecimiento de plantaciones forestales comerciales de Cedro Rojo (*Cedrela odorata* L), las cuales se mantendrán a pesar de las amenazas del cambio climático.

5. OBJETIVOS

5.1 General

- Delimitar áreas potenciales actuales y bajo escenarios de cambio climático para el establecimiento de plantaciones forestales comerciales de la especie *Cedrela odorata* L. en la Península de Yucatán, México.

➤

5.2 Específicos

- Realizar una zonificación climática actual y futura en la Península de Yucatán.
- Estimar la distribución actual y bajo escenarios de cambio climático de *C. odorata* L. en la Península de Yucatán.
- Determinar las variables ambientales más importantes del periodo actual y bajo escenarios de cambio climático de *C. odorata* L.
- Delimitar las áreas potenciales actuales de *C. odorata* L, para el establecimiento de plantaciones forestales en la Península de Yucatán.
- Estimar la superficie reducida por el cambio climático en la Península de Yucatán.
- Identificar áreas de refugio de *C. odorata* L, ante los efectos del cambio climático.

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Ubicación geográfica del área de estudio

La Península de Yucatán se encuentra ubicada entre las coordenadas geográficas 22°31'43.4" y 17°48'51.6" Latitud Norte y 92°20'11.6" y 86°42'36.4" Longitud Oeste, hacia el sureste de México y comprende una superficie de 139,840 km², abarcando los estados de Campeche, Quintana Roo y Yucatán. Es una gran plataforma de rocas calcáreas y es la provincia geológicamente más joven de México; el terreno es plano, con altitud promedio de 50 msnm y sólo en el centro-sur se encuentran elevaciones mayores 350 msnm (Figura 5) (INEGI, 2015).

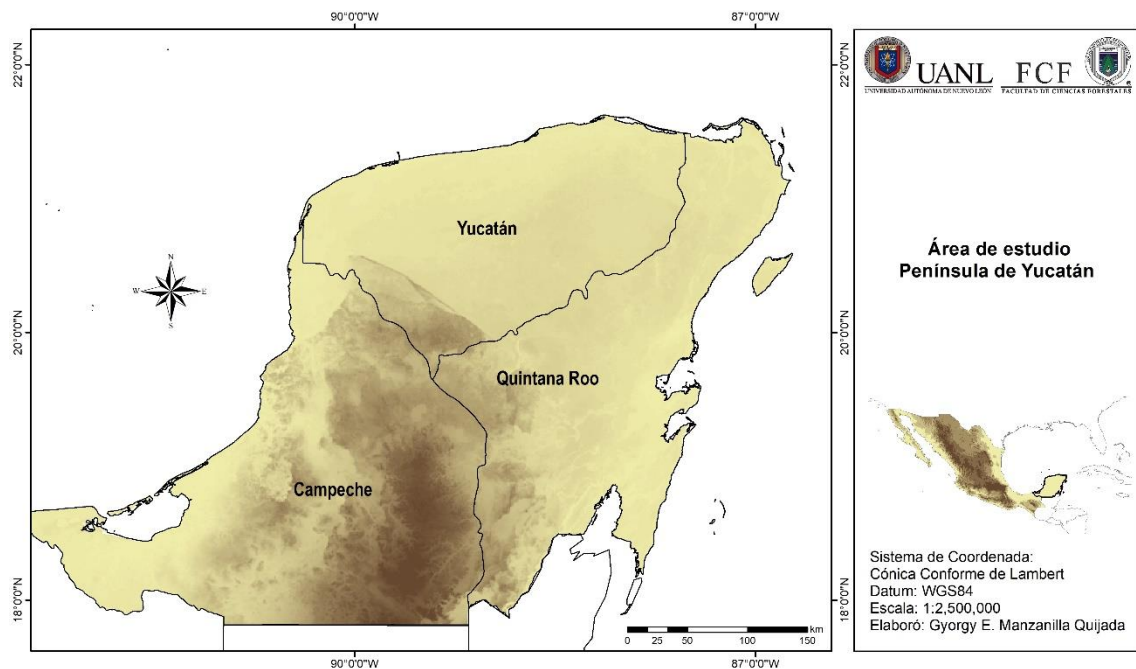


Figura 5. Ubicación geográfica del área de estudio

6.1.1 Clima

En la Península de Yucatán se presentan tres tipos de clima con sus subtipos y variaciones. De acuerdo con el sistema de köppen modificado por García (1998),

el clima dominante es del tipo Aw tropical subhúmedo, con temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes más frío mayor de 18°C, con lluvias en verano y precipitación del mes más seco entre 0 y 60 mm, junto con sus subtipos Awo, con sus variaciones Awo (x'), subtipo Aw1 con sus variaciones Aw1 (x'), y subtipo Aw2 con sus variaciones Aw (x') ocupan el 97.2% del área. Al Suroeste, el 1.5% corresponde al clima Am tropical monzónico con sus variaciones Am (f) cálido húmedo, temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes más frío mayor de 18°C, con lluvias en verano y precipitación del mes más seco menor de 60 mm. Al Noroeste el 1.3% de superficie corresponde al tipo de clima Bs seco estepario con su subtipo Bs1 (h') w semiárido cálido, con temperatura media anual mayor de 22°C, temperatura del mes más frío mayor de 18°C, con lluvias de verano y Bs0 (h') (x') árido cálido, con temperatura media anual mayor de 22°C, con temperatura del mes más frío mayor de 18°C, con lluvias repartidas en todo año. (Tabla 1) y (Figura 6).

Tabla 1. Tipos de clima en la Península de Yucatán.

Clima	Subtipo y Variaciones	Superficie (Ha)	Porcentaje (%)*
Am	Am(f)	204373	1.5
Aw	Aw1	2076738	14.9
	Aw1(x')	6329166	45.5
	Aw2	633520	4.6
	Aw2(x')	1066867	7.7
	Awo	2050794	14.7
	Awo(x')	1362616	9.8
Bs	BS1(h')w	127958	0.9
	BSo(h')(x')	56256	0.4

*En relación con la superficie total del área de estudio.

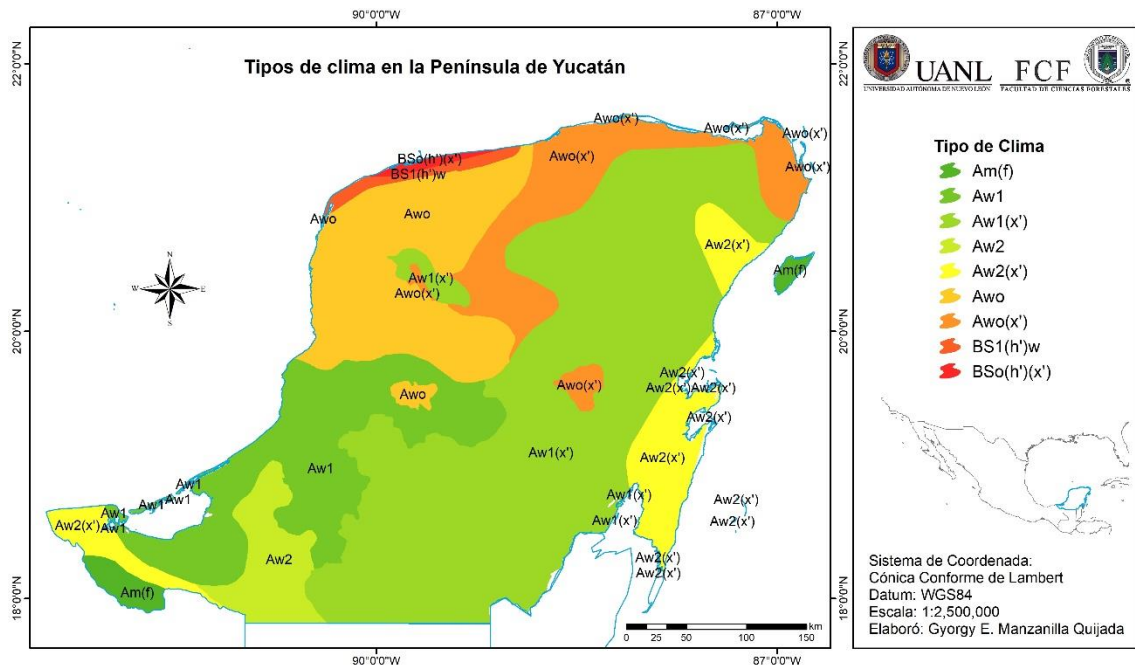


Figura 6. Tipos de clima en el área de estudio (Elaboración propia a partir de datos de CONABIO, 1998).

6.1.2 Vegetación

La vegetación de la Península de Yucatán está conformado por selvas altas; perennifolia, subperennifolia, selvas bajas; caducifolia, espinosa subperennifolia, perennifolia y subperennifolia, selvas medianas; caducifolias, subcaducifolias y subperennifolia, además existe vegetación de manglar, palma natural, pastizal halófilo, popal, sabana, tular dunas costeras, vegetación de peten y vegetación halófila e hidrófila, en conjunto estos tipos de vegetación representan el 21.6 % de la superficie peninsular. Los tipos de vegetación secundaria, que abarcan desde selvas arbóreas y arbustivas altas, medias, bajas y espinosas; caducifolias, perennifolias, subcaducifolias, subperennifolia ocupan una superficie del 56.2% y otros tipos de vegetación que corresponden a zonas urbanas, pastizal inducido o cultivado, arias sin vegetación y agricultura de temporal anual o permanente, ocupan una superficie del 22.2% (INEGI, 2016) (Tabla 2) y (Figura 7).

Tabla 2. Tipos de vegetación en la Península de Yucatán.

Clave	Vegetación	Superficie (Ha)	Porcentaje (%)*
VM	Manglar	441654	3.2
VPN	Palmar natural	3847	0.03
PH	Pastizal halófilo	10642	0.1
VA	Popal	25180	0.2
VS	sabana	85622	0.6
SAP	Selva alta perennifolia	7193	0.1
SAQ	Selva alta subperennifolia	56553	0.4
SBC	Selva baja caducifolia	894	0.01
SBQ	Selva baja espinosa subperennifolia	422687	3.1
SBP	Selva baja perennifolia	1483	0.0
SBS	Selva baja subcaducifolia	19952	0.1
SBQP	Selva baja subperennifolia	81489	0.6
SMC	Selva mediana caducifolia	50	0.01
SMS	Selva mediana subcaducifolia	70760	0.5
SMQ	Selva mediana subperennifolia	1276181	9.2
VT	Tular	422537	3.1
VU	Vegetación de dunas costeras	11694	0.1
PT	Vegetación de peten	43299	0.3
VHH	Vegetación halófila hidrófila	2948	0.02
VS	Vegetación secundaria	7781785	56.3
OTV	Otros tipos de vegetación	3067711	22.2

*En relación con la superficie total del área de estudio.

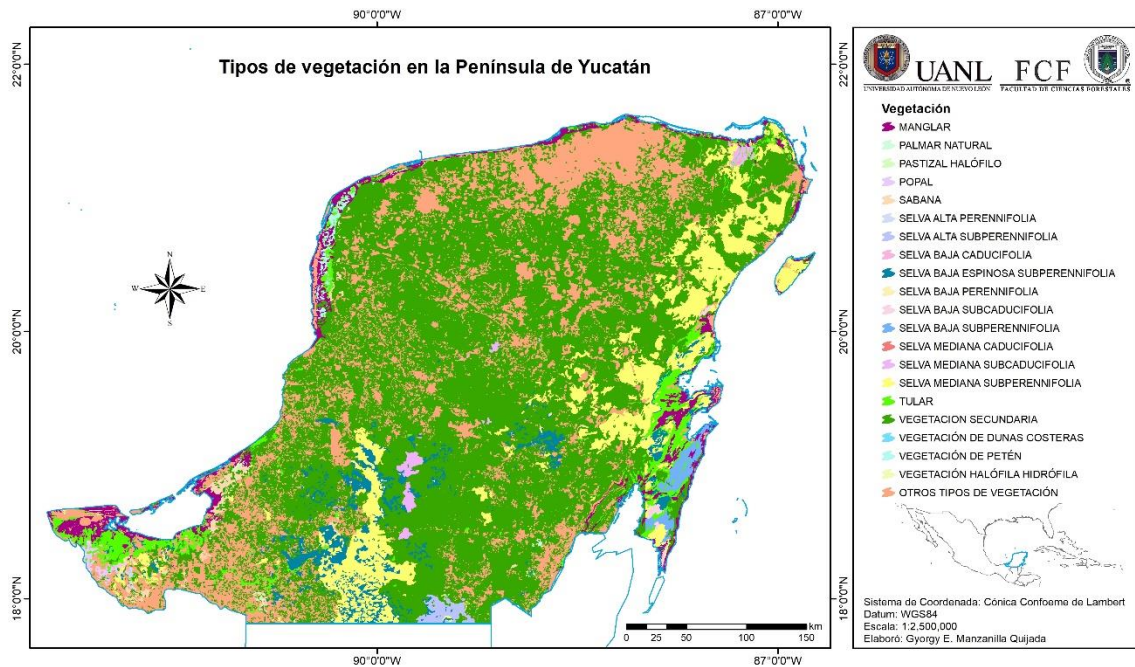


Figura 7. Tipos de vegetación en el área de estudio (elaboración propia a partir de datos de INEGI 2016).

6.1.3 Suelo

En la Península de Yucatán existen seis tipos de suelo, el leptosol (LP) es el suelo dominante con 72.9% del total de la superficie, son someros, de escasa cantidad de tierra fina y gran cantidad de piedras o afloramientos de roca. Al suroeste y sureste de la Península el 11.2% de la superficie corresponde al gleysol (GL) son suelos jóvenes que se desarrollan sobre suelos no muy consolidados, de colores claros y pobres en materia orgánica. Al suroeste el 5.7% lo ocupa el vertisol (VR) son suelos en alto contenido de arcilla que se expanden con la humedad y se contraen con la sequía, lo que ocasionar grietas. Al Sur el 5.2% representa el suelo regosol (RG) capa de material suelto que cubre la roca, claros o pobres en materia orgánica. Al centro de la Península el luvisol (LV) representa el 3.2% con enriquecimiento de arcilla en el subsuelo y generalmente son rojos o amarillentos y al noroeste el 1.7% de la superficie corresponde al suelo solonchak (SC) son salinos, se presentan en algunas costas y lechos de lagos (Tabla 3) y (Figura 8) (SEMARNAP, 1998).

Tabla 3. Tipos suelo en la Península de Yucatán

Clave	Suelo	Hectáreas (Ha)	Por ciento (%)
GL	Gleysol	1560988	11.2
LP	Leptosol	10152934	72.9
LV	Luvisol	451311	3.2
RG	Regosol	724070	5.2
SC	Solonchak	233706	1.7
VR	Vertisol	797711	5.7

*En relación con la superficie total del área de estudio.

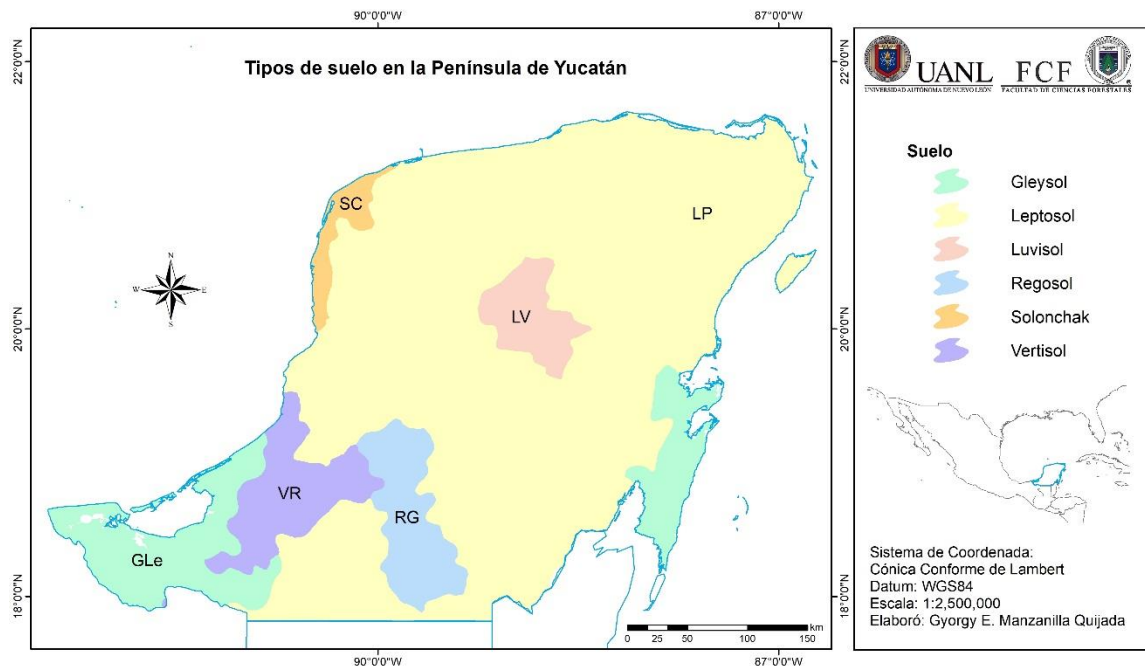


Figura 8. Tipos de suelo en el área de estudio (elaboración propia a partir de datos de SEMARNAP, 1998).

6.2 Bases de datos

6.2.1 Clima actual

Se obtuvieron las capas climáticas mensuales actuales para precipitación y temperatura máxima, media y mínima de las series históricas de tiempo del clima, las cuales representan el promedio del comportamiento climático del periodo 1902-2011 y tienen una resolución espacial de 1 km² y se encuentran disponibles en formato ASCII en la página: <http://atlasclimatico.unam.mx/atlas/kml/>, dicha plataforma es administrada por la Unidad de Información para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales (UNIATMOS) del Centro de Ciencias de la Atmosfera de la Universidad Nacional Autónoma de México.

6.2.2 Clima a futuro

Se descargaron los valores mensuales para precipitación y temperatura del Modelo de Circulación Global (MCG) ENSAMBLE REA con un forzamiento radiactivo RCP de 4.5 proyectado a un horizonte (futuro cercano: 2015-2039) para todo el país a una escala espacial de 1 km², el cual se encuentran disponible en formato ASCII en la página: http://atlasclimatico.unam.mx/AECC_descargas/, la cual pertenece a la Unidad de Información para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales (UNIATMOS) de la UNAM.

6.2.3 *Cedrela odorata* L

Para generar los modelos de distribución de especies fue necesario disponer de una base de datos robusta y actualizada. En la presente investigación se consultaron diversas fuentes (GBIF, Arboles Tropicales de México y INFyS) donde se obtuvieron los registros de presencia de la especie *C. odorata* L, en la primera consulta se obtuvieron 23 registros de la base de datos del GBIF por sus siglas en inglés *Global Biodiversity Information Facility*, disponible en

(<<http://www.gbif.org>> consultado en septiembre de 2016), dicha plataforma recopila información disponible de herbarios del mundo. En la segunda consulta se obtuvieron 38 registros de la información vectorial del libro de Árboles Tropicales de México de (Pennington & Sarukhán 2005) y, por último, con 166 registros obtenida de la base de datos del Inventario nacional Forestal y Suelos “INFyS” 2004-2009 (CONAFOR, 2009).

6.2.4 Depuración de las bases de datos

Debido a la excesiva redundancia en la información de las bases de datos, estos fueron depurados en varias fases antes de iniciar con la generación de los modelos de distribución de la especie. Se revisaron y analizaron cada una de las bases. Se utilizó la aplicación Niche Toolbox de la CONABIO (Osorio-Olvera *et al.*, 2016) para seleccionar los registros ubicados en el área de estudio. Posteriormente en esa misma aplicación, se eliminó la autocorrelación espacial (dejando un solo registro por cada 1 km²) (Peterson & Nakazawa, 2008), también se eliminaron los registros mal georreferenciados, duplicados y los puntos ubicados dentro de zonas urbanas.

6.2.5 Variables bioclimáticas, ecogeográficas actual y futura

Se descargaron las 19 variables bioclimáticas con una resolución espacial de (1 km²) en formato ASCII de Bioclimas Neotropicales disponible en el portal (<http://www.bioclimasneotropicales.org/>) (Consultado en septiembre 2016) (Tabla 4), la cual contiene capas con información climática mensual para la precipitación y temperatura máxima y mínima del periodo (1910-2009) (Cuervo-Robayo *et al.*, 2013) y las variables a futuro de los Modelos de Circulación Global (MCG) GFDL_CM3 (Laboratorio de Dinámica de Fluidos Geofísicos de Estados Unidos) y MIROC_ESM (Atmósfera e Instituto de Investigación Oceánica (Universidad de Tokio), Instituto Nacional de Estudios Ambientales, y Agencia Japonesa de Ciencia y Tecnología Marina-Tierra) proyectados al año 2030, a las cuales se le

anexaron las variables ecogeográficas de pendiente (%), orientación (°) y altitud (m) obtenidas a partir del modelo digital de elevación con resolución de 90 m, la capa edafología se generó de la información vectorial disponible de la (CONABIO 1998), y la vegetación se obtuvo de la serie V uso de vegetación de México (INEGI 2013).

Tabla 4. Variables bioclimáticas utilizadas en la distribución potencial de *C. odorata* L, en la Península de Yucatán.

Código	Variables bioclimáticas
Bio01	Temperatura media anual
Bio02	Rango de temperatura diurno medio (Temp. Máx. – Temp. Mín.)
Bio03	Isotermalidad (Bio2 / Bio7) (* 100)
Bio04	Estacionalidad de temperatura (desviación estándar * 100)
Bio05	Temperatura máxima del mes más caliente
Bio06	Temperatura mínima del mes más frío
Bio07	Rango de temperatura anual (Bio5 – Bio6)
Bio08	Temperatura media del trimestre más húmedo
Bio09	Temperatura media del trimestre más seco
Bio10	Temperatura media del trimestre >más caliente
Bio11	Temperatura media del trimestre más frío
Bio12	Precipitación total anual
Bio13	Precipitación del mes más húmedo
Bio14	Precipitación del mes más seco
Bio15	Estacionalidad de la precipitación (coeficiente de variación)
Bio16	Precipitación del trimestre más húmedo
Bio17	Precipitación del trimestre más seco
Bio18	Precipitación del trimestre más caliente
Bio19	Precipitación del trimestre más frío

Se realizó un análisis de multicolinealidad con el fin de eliminar la autocorrelación espacial, el cual sirvió para evitar variables correlacionadas entre sí (Peterson &

Nakazawa, 2008). Donde se descartaron aquellas variables con un coeficiente de correlación mayor de $r \geq 0.80$, lo cual ayudo a maximizar la contribución de las variables en los modelos de distribución (Peterson & Nakazawa, 2008 y Martínez-Méndez *et al.*, 2016). Posteriormente, se realizó una comparación entre el modelado de distribución realizada con las 19 variables y la de modelación efectuada a partir de la selección de las variables menos redundantes.

6.2.6 Delimitación del área de modelación

El área M de una especie, es el espacio geográfico donde una especie se ha reportado su presencia o donde se supone que podría estar de acuerdo con el conocimiento biológico y su capacidad de dispersión que se tiene de ella (Soberón & Peterson, 2005). El uso de barreras biogeográficas en modelación espacial evita generar áreas de distribución sobreestimadas (Martínez-Meyer, 2005).

6.3 Metodología

6.3.1 Zonificación climática actual y escenario de cambio climático en la Península de Yucatán.

Una vez descargadas las capas climáticas actual y futuro estas fueron recortadas y ajustadas al tamaño del área de estudio, este proceso se realizó en el programa ArcMap 10.3 (ESRI, 2014). Posteriormente con ayuda del módulo Algebra de Mapas, se sumaron los valores de las 12 capas mensuales de precipitación y de temperatura, obteniéndose así los valores de precipitación acumulada anual y temperatura máxima, media y mínima promedio anual para el presente y futuro 2039.

6.3.2 Diferencias entre el escenario climático actual y futuro

Para estimar las diferencias entre el clima actual y el proyectado a futuro (2039), se cargaron las capas anuales de precipitación y temperatura de ambos periodos al programa ArcMap 10.3 (ESRI, 2014) donde se utilizó la herramienta Algebra de Mapas para calcular la diferencia entre el clima actual y futuro, restando las capas climáticas futuras menos las del presente, lo cual permitió estimar las modificaciones en precipitación y temperatura, estas fueron clasificadas en categorías con intervalos iguales.

6.3.3 Vulnerabilidad ante el cambio climático

Los niveles de vulnerabilidad por el cambio climático en la Península de Yucatán se observaron por medio de las diferencias generadas entre el clima actual y futuro del Modelo de Circulación Global. Las discrepancias climáticas fueron clasificadas utilizando la extensión Reclass del programa ArcMap 10.3 (ESRI, 2014) en cinco categorías de afectación con valores de modificación con intervalos iguales, las cuales de acuerdo a sus valores de modificación en precipitación y temperatura se definieron en niveles de afectación: Muy bajo, Bajo, Medio, Alto y Muy alto.

6.3.4 Distribución de *Cedrela odorata* L, en la Península de Yucatán

El mapa de distribución se realizó usando los puntos de presencia de la especie, que fueron obtenidos en las bases de datos. Los puntos fueron graficados en el polígono de la Península de Yucatán. Este mapa se elaboró con el programa ArcMap 10.3 donde se incluyó la capa de los puntos geográficos de la especie y la capa del área de estudio.

6.3.5 Modelado de distribución de la especie

Los Modelos de distribución de la especie, se realizaron mediante el algoritmo MaxEnt versión 3.3.3 (disponible en: <http://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent>), el cual utiliza una técnica que se basa en el principio de máxima entropía para escoger modelos consistentes con la información disponible (Phillips *et al.*, 2006). Para una mejor evaluación de los datos, se construyeron 50 modelos con diferentes combinaciones, tal como se muestra en la (Tabla 5).

Tabla 5. Criterios y fuentes de datos empleados en la generación de los modelos de distribución.

Modelos	Fuente	Datos
10	INFyS	166
10	GBIF y Arboles Tropicales de México	50
10	GBIF, Arboles Tropicales de México e INFyS	216
10	GBIF, Arboles Tropicales de México e INFyS 25%	91
10	GBIF, Arboles Tropicales de México e INFyS 50%	133

Para realizar la modelación fueron necesarios los registros de presencia de la especie (puntos) estos deben estar contenidos en una hoja de cálculo con extensión “.csv” separado por comas, y las variables ambientales en formato “ASCII”, los cuales son formatos aceptados por el programa.

Para realizar esta selección e interpretar los resultados de forma adecuada, se hizo una revisión de la literatura. Las principales configuraciones se observan en la (Tabla 6), donde se generaron y probaron 10 modelos de distribución, de los cuales a cinco se les aplicó un replicado interno de tipo “Bootstrap” y cinco con replicado “Crossvalidate”. Se utilizaron diferentes reglas de aplicación de umbral y un número máximo de iteraciones de 1,000 con un límite de convergencia de 0.00001. Se desactivaron las casillas *Extrapolate* y *Do clamping* con el fin de

evitar extrapolaciones en los valores extremos de las variables y sobreajustar los modelos (Elith *et al.*, 2011).

Se utilizaron el 75% de los registros de presencia seleccionados al azar para entrenar los modelos y el 25% para validarlos (Phillips *et al.*, 2006). Se crearon curvas de respuesta y la prueba de Jackknife.

El formato de salida analizado fue logístico, el cual indica un índice de similitud de condiciones idóneas para la especie, en donde los valores oscilan de 0 a 1, donde valores cercanos a 0 señalan condiciones ambientales no idóneas, mientras que valores cercanos a 1 sugieren condiciones ambientales adecuadas para la especie (Phillips *et al.*, 2006 y Coitiño *et al.*, 2013).

Tabla 6. Criterios empleados en la generación de los modelos de distribución

Modelo	Replicado	Aplicación de regla de umbral	Replicas
M1	Bootstrap	Sensibilidad y especificidad de entrenamiento iguales	1000
M2	Bootstrap	Máxima sensibilidad de entrenamiento más especificidad	1000
M3	Bootstrap	Igual sensibilidad y especificidad de prueba	1000
M4	Bootstrap	Máxima sensibilidad de prueba más especificidad	1000
M5	Bootstrap	Sin aplicación de regla de umbral	500
M6	Validación cruzada	Sensibilidad y especificidad de entrenamiento iguales	1000
M7	Validación cruzada	Máxima sensibilidad de entrenamiento más especificidad	1000
M8	Validación cruzada	Igual sensibilidad y especificidad de prueba	1000
M9	Validación cruzada	Máxima sensibilidad de prueba más especificidad	1000
M10	Validación cruzada	Sin aplicación de regla de umbral	500

6.3.6 Validación de los modelos de distribución de la especie

Los modelos se evaluaron por medio de los valores del área bajo la curva (AUC) del análisis de las características de funcionamiento del receptor (ROC) que se obtiene comparando la proporción de falsos y verdaderos positivos, permitiendo evaluar una clasificación mediante sus propios errores generados (Marquet *et al.*, 2011). Para esto se generaron tres valores: datos de entrenamiento (*Training Data*), datos de validación (*Validation Data*) y predicción al azar (*Random Prediction*). En la interpretación; si las curvas de entrenamiento y prueba se encuentran por debajo de la diagonal de predicción (0.5), el modelo es igual que uno hecho al azar; en cambio, si las curvas de entrenamiento y de prueba se encuentran sobre la curva de predicción al azar, significará que el modelo tiene cierto grado de confiabilidad (Phillips *et al.*, 2006). Sin embargo, esta validación ha sido cuestionada por no considerar datos de ausencias verdaderas (Peterson *et al.*, 2008). Por lo que fue necesario complementar el análisis mediante una prueba de ROC parcial, la cual ayudo a contrarrestar las deficiencias de la curva ROC (Peterson *et al.*, 2008). Este análisis se realizó con el programa *Tool for Partial-ROC* (Narayani, 2008). La prueba genera valores de 1 a 2 donde un valor con promedio de ratio de 1 representa un modelo igual a uno hecho al azar (Peterson *et al.*, 2008 y Garza-López *et al.*, 2016). Una vez generados los archivos se introdujeron al programa ROC Parcial, usando un umbral con una confiabilidad del 95%, con 1,000 interacciones para el cálculo de la versión parcial del análisis del área bajo la curva (AUC).

Se realizó la prueba estadística de Z, la cual brindo un mayor soporte estadístico a los modelos ($p < 0.01$). Posteriormente se seleccionó el modelo con base en el valor más alto del análisis Roc parcial, menor error estándar y valor significativo de Z.

6.3.7 Contribución de las variables

Para identificar las variables de mayor importancia en la contribución de la generación de los modelos de distribución de la especie, se utilizó la prueba Jackknife (Phillips *et al.*, 2006). Este análisis permite conocer que variables predicen de manera efectiva áreas aptas para la distribución de la especie.

6.3.8 Áreas de calidad de hábitat

Se proyectó el modelo seleccionado con el mejor desempeño y ajuste estadístico a un espacio geográfico mediante el uso del programa ArcMap 10.3, donde se reclasificaron los valores del modelo seleccionado en tres categorías iguales de calidad de hábitat Baja, Media y Alta. Una vez que se obtuvo el mapa, se estimó la superficie ocupada por cada categoría en el área de estudio.

6.3.9 Distribución de áreas potenciales

Para generar el mapa de las áreas potenciales, se transformó el modelo continuo a binario (Aptas y No aptas), donde se utilizó el valor de la categoría de calidad de hábitat alta, descartando las áreas que no reunieron con las características específicas para la especie, dejaron solo aquellas que sí tuvieron dichas características. El cual se basó en los siguientes niveles de aptitud:

Áreas aptas: Comprende las áreas que garantizan la adaptación, al presentar condiciones ambientales ideales para su establecimiento y desarrollo de la especie.

Áreas no aptas: Comprende áreas que no presentan condiciones propicias para el establecimiento y desarrollo de la especie.

6.3.10 Modelación bajo escenarios de cambio climático de *C. odorata* L, en la Península de Yucatán.

Para generar los modelos de distribución bajo escenarios de cambio climático se transfirieron los parámetros del modelo de distribución actual con el mejor ajuste y desempeño estadístico (Anderson & Raza, 2010; Morrone & Escalante, 2016) al programa MaxEnt Ver. 3.3.3. Se cargaron las variables ambientales en formato ASCII y los registros de la especie en csv. Se utilizaron el 75% de los registros de la especie para entrenar los modelos y el 25% restante para validarlos (Phillips *et al.*, 2006) y se desactivaron las opciones *Extrapolate* y *Do clamping* con el fin de evitar extrapolaciones y sobreajuste en los modelos (Elith *et al.*, 2011) y la salida de los modelos fue del tipo logística.

De acuerdo con el forzamiento radiactivo empleado, los escenarios de cambio climático simulan la afectación del clima en la distribución de una especie. Dicha proyección se clasifica en conservadores RCP 4.5 (emisiones de CO₂ constantes) y extremas RCP 8.5 (emisiones de CO₂ en aumento) (Fernández-Eguiarte *et al.*, 2015).

7 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 Zonificación climática actual y escenario de cambio climático en la Península de Yucatán.

Se observan los valores actuales y futuros, proyectados al horizonte 2039 y su diferencia en precipitación y temperatura máxima, media y mínima para la Península de Yucatán, México.

Los resultados para el clima actual indican valores en la precipitación promedio anual acumulada de 536 hasta 2002 mm, en cuanto a temperatura máxima promedio anual los valores oscilan de 29.2 hasta 34.9 °C. Para la temperatura media promedio anual se registraron valores de 23.6 hasta 27.7 °C, y para la temperatura mínima promedio anual los valores fueron de 17.1 hasta 23.7 °C para la zona.

Los resultados de la proyección climática a futuro para el año 2039 señalan una disminución en precipitación promedio anual, con un rango de 405 hasta 1890 mm. Para la temperatura máxima promedio anual los valores indicaron un rango que va de 29.9 hasta 34.4 °C. Para la temperatura media promedio anual los valores fueron de 25.5 hasta 28 °C y para la temperatura mínima promedio anual los valores oscilan de 19.4 hasta 23.3 °C para la zona.

7.1.1 Diferencias entre el escenario climático actual y futuro

De acuerdo con el escenario de cambio climático para la precipitación acumulada promedio anual proyectada al año 2039, se identificaron cambios que muestran una disminución en precipitación con valores que oscilan de -358 a un aumento de 184 mm, siendo las partes más afectadas ubicadas al norte de la Península. Para el caso de la temperatura máxima promedio anual, se detectó una tendencia de aumento hasta 2.8 °C, las zonas más afectadas se ubicaron hacia el centro y sureste de la Península. En cuanto al análisis de alteración en la temperatura media promedio anual, se identificó un patrón de aumento hasta 3.2 °C, localizando las zonas más afectadas hacia el centro de la Península. Para la temperatura mínima promedio anual, esta variable fue un claro aumento abrupto de hasta 4.1 °C (Tabla 7), afectando la mayor parte del noroeste y en bajas proporciones, la parte sureste de la Península.

Tabla 7. Diferencia entre el clima actual y futuro

Variables climáticas	ENSAMBLE REA 4.5
Precipitación acumulada anual	-358
Temperatura máxima promedio anual	+2.8
Temperatura media promedio anual	+3.2
Temperatura mínima promedio anual	+ 4.1

Valores promedio anual en aumento (+) y disminución (-) para cada variable analizada en la Península de Yucatán.

7.1.2 Vulnerabilidad ante el cambio climático

Los niveles de afectación para escenario de cambio climático al año 2039, indican la existencia de alteraciones en precipitación y temperatura.

Tabla 8. Descripción del nivel de riesgo, modificación, hectáreas y porcentaje de afectación en precipitación y temperatura por el cambio climático al año 2039.

VARIABLES CLIMÁTICAS	Nivel de riesgo	Modificaciones	Superficie afectada (ha)	(%) de afectación
Precipitación acumulada anual	Muy alta	-358 a -249	16,911	0.1
	Alta	-249 a -141	3,803,713	27.2
	Media	-141 a -33	10,015,672	71.7
	Baja	-33 a 76	141,709	1.0
	Muy baja	76 a 184	894	0.01
Temperatura máxima promedio anual	Muy baja	-2 a -1.0	10,488	0.1
	Baja	-1.0 a -0.1	2,195,560	15.7
	Media	-0.1 a 0.9	11,509,596	82.3
	Alta	0.9 a 1.8	262,118	1.9
	Muy alta	1.8 a 2.8	1,138	0.01
Temperatura media promedio anual	Muy baja	-0.9 a -0.03	6,342	0.1
	Baja	-0.03 a 0.8	3,764,770	26.9
	Media	0.8 a 1.6	10,192,667	72.9
	Alta	1.6 a 2.4	14,553	0.1
	Muy alta	2.4 a 3.2	569	0.004
Temperatura mínima promedio anual	Muy baja	-1.0 a 0.02	6,260	0.04
	Baja	0.02 a 1.1	1,567,340	11.2
	Media	1.1 a 2.1	11,936,513	85.4
	Alta	2.1 a 3.1	467,080	3.3
	Muy alta	3.1 a 4.1	1,707	0.01

Los resultados señalan que un 72.7% del área sufriría alguna modificación en sus patrones anuales de precipitación (Figura 9). Un rango de 84.2% se vería severamente afectada por el incremento en la temperatura máxima promedio anual (Figura 10). El aumento de la temperatura media promedio anual alteraría un 72.9% de la superficie (Figura 11) y un 88.7% de la zona aumentaría notablemente su temperatura mínima promedio anual (Figura 12). El promedio

del incremento en la temperatura máxima, media y mínima afectaría un 82% del área de estudio. Donde la mayor parte del area de estudio se volvería más caliente durante el verano e invierno a futuro.

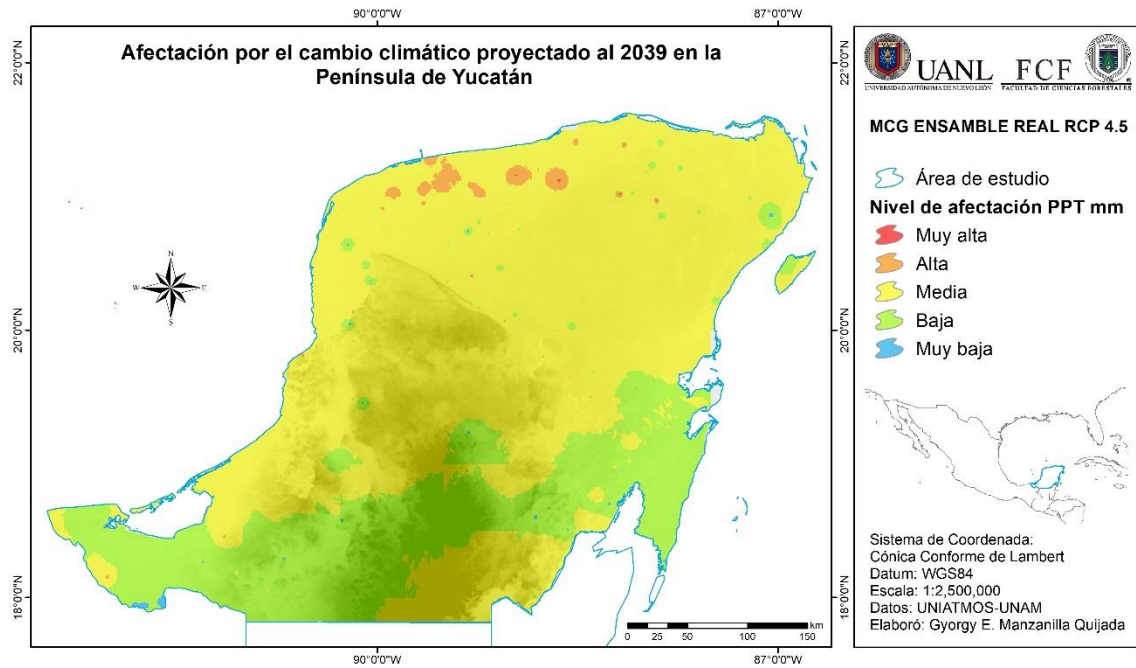


Figura 9. Niveles de vulnerabilidad al cambio climático en PPT

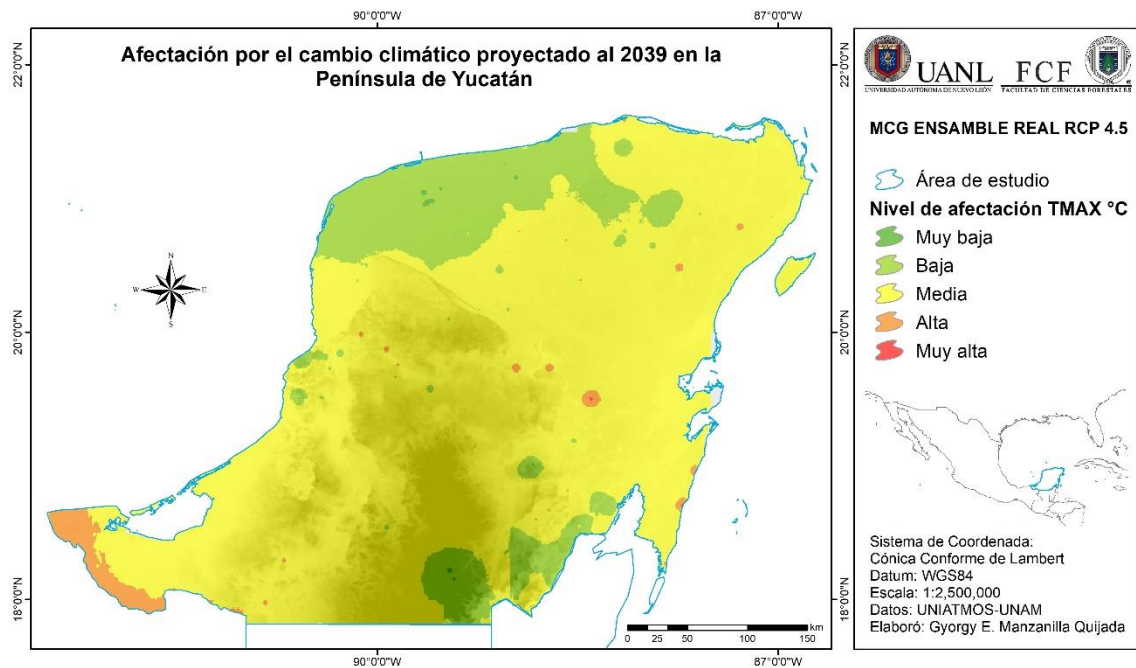


Figura 10. Niveles de vulnerabilidad al cambio climático en TMAX

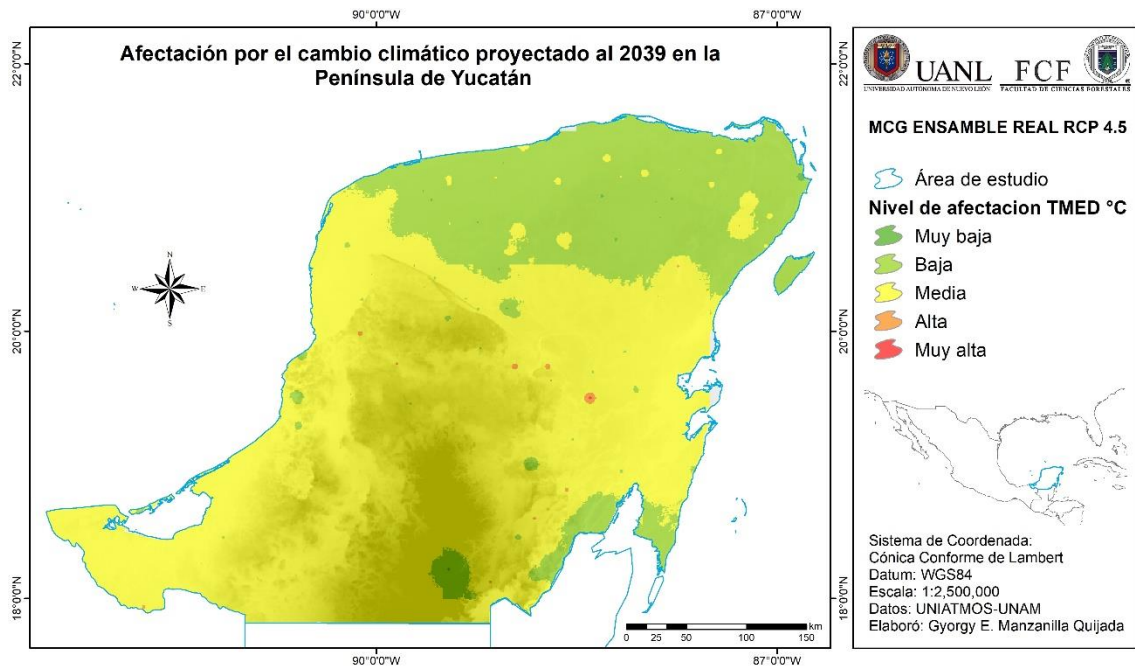


Figura 11. Niveles de vulnerabilidad al cambio climático en TMED

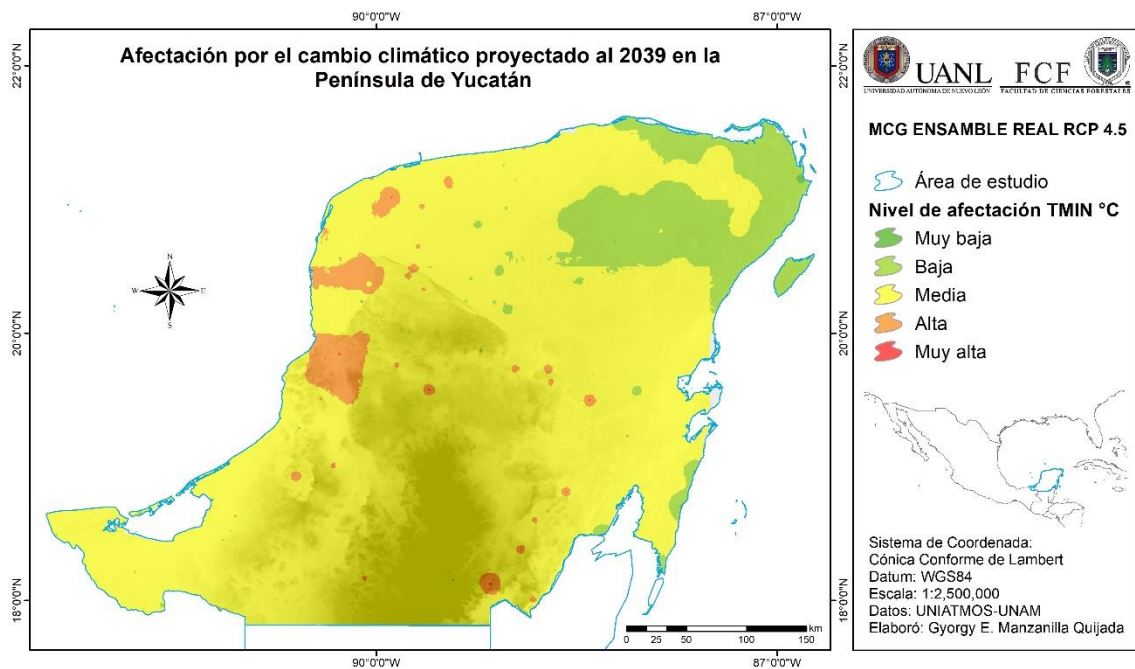


Figura 12. Niveles de vulnerabilidad al cambio climático en TMIN

Diversos autores en el mundo y en México coinciden en que las principales consecuencias del cambio climático son el aumento en temperatura y el comportamiento errático en precipitación, como aumento, disminución o

desplazamiento de las lluvias a otras regiones geográficas. Diversos estudios han demostrado y señalan que el calentamiento global afecta severamente a la biodiversidad en diferentes formas y escalas (Jiménez, 2009).

De acuerdo al IV informe del IPCC (2007) si la temperatura global media se excede en 1.5 a 2.5°C, aproximadamente del 20 a 30% de las especies de plantas y animales posiblemente se encontrarán en un aumento de peligro de extinción. Estas proyecciones son preocupantes especialmente en las áreas que se caracterizan por poseer una alta riqueza de biodiversidad, en este sentido, las selvas de la Península de Yucatán presentarían cambios en la distribución de sus especies y podrían verse amenazados cada vez más por las plagas y los incendios, volviéndose más vulnerables a las especies invasoras. Estudios realizados sobre el cambio climático en la Comunidad Andina, indican que el riesgo de extinción será probablemente mayor en especies con limitados rangos climáticos, requerimientos restringidos de hábitat y dificultades para regenerarse (CAN, 2007).

Garreaud (2011) predice un aumento en la temperatura media global de hasta 2 °C para el 2050. Por otra parte, Magaña *et al.* (2000) señala que las proyecciones de los escenarios de cambio climático para México en el siglo XXI indican tendencias de aumento en la temperatura promedio anual de 0.5 a 2 °C para el 2039 y de hasta 3.7 °C para finales de siglo. Según los resultados en este estudio, el escenario proyectado para el mismo año 2039 se espera un cambio en aumento de temperatura promedio anual de hasta 3.24 °C. Lo anterior concuerda con el pronóstico de aumento del escenario de cambio climático para ese mismo tiempo.

CONAFOR (2013) menciona que los incrementos en temperatura podrían ser más notables en el norte del país, donde en la próxima década la temperatura podría aumentar hasta 2 °C, lo que se traduciría en periodos de sequía más largos hacia el norte del país.

De acuerdo con el IPCC (2014) un aumento de 1 a 2 °C representaría un daño moderado a la biodiversidad y economía de todo el mundo, mientras que un aumento de >3.5 °C resultaría letal para la mayoría de los ecosistemas terrestres y marinos, produciéndose así extinciones del 40 al 70% de las especies del mundo (IPCC, 2007a).

La CONANP (2015) sugiere para el caso de la precipitación una disminución de hasta 84% en algunas zonas del país para el año 2039. Sin embargo, en otras zonas como las tropicales y templadas, al sur y occidente del país, la planicie costera del Pacífico, la Península de Yucatán, la vertiente del Golfo de México y las partes intermedias de las cadenas montañosas, se proyecta un aumento en la intensidad de la precipitación, lo que podría incrementar las posibilidades de ocurrencia de inundaciones y deslaves (Manson *et al.* 2009; INECC, 2012). En este trabajo el escenario para el mismo año 2039 se esperan cambios en la precipitación con un descenso de aproximadamente -358 a un aumento de 184 mm, con un nivel de afectación del 71.7 % en la Península de Yucatán.

7.2 Distribución de *Cedrela odorata* L, en la Península de Yucatán.

Los resultados de los procesos de modelación indicaron que los modelos efectuados con todas las variables presentaron el mejor desempeño en comparación con los modelos realizados con las variables seleccionadas.

Los resultados de modelación de las diferentes combinaciones, muestran que el mejor desempeño y ajuste fueron los 10 modelos construidos con las bases de datos del GBIF (Global Biodiversity Information Facility) y Arboles Tropicales de México con 50 registros de presencia. La Figura 13 representa el mapa de la distribución de *C. odorata* L, con una superficie correspondiente al 8.9% de la especie presente y la ausente con 91.1% en la Península de Yucatán, se observa que la especie se distribuye en ciertas áreas del estado de Campeche, Quintana Roo y Yucatán.

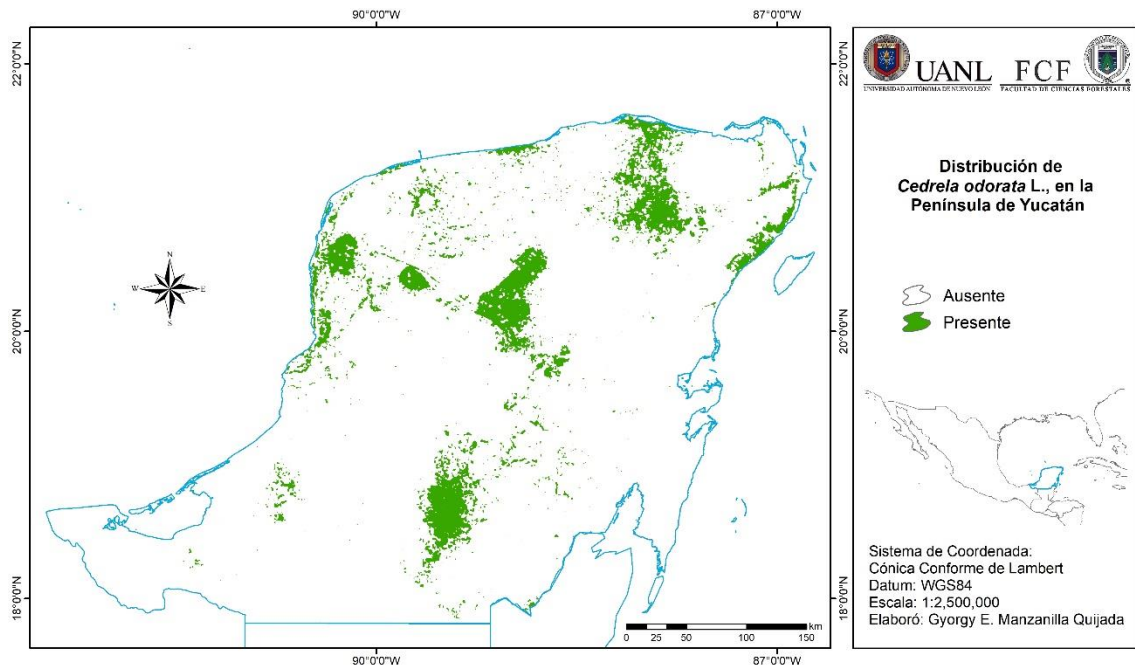


Figura 13. Distribución actual de *C. odorata* L, en la Península de Yucatán

Tabla 9. Distribución de *C. odorata* L, en la Península de Yucatán

Ausencia	Superficie (ha)	%*
Ausente	12,743,970	91.1
Presente	1,240,030	8.9

*En relación con la superficie total del área de estudio.

7.2.1 Evaluación del modelo de distribución de la especie

El modelo de mejor desempeño de distribución de *Cedrele odorata* L, destaca que los valores de AUC presentan niveles altos, sobrepasando los 0.8, lo que significaría que los modelos poseen buen desempeño. Los valores obtenidos del area bajo la curva (AUC) de la prueba de ROC se registraron valores con datos de entrenamiento de 0.893 y de 0.805 para los datos de validación respectivamente (Figura 14). En este sentido, podemos decir que el modelo fue consistente para clasificar la presencia e idoneidad de la distribución de la especie.

Lo anterior concuerda con lo expuesto por Araújo *et al.* 2005, Araújo & Guisan 2006, Peterson *et al.*, 2011 y aplicado por Miranda *et al.*, 2016 si los modelos con valores mayores de $AUC > 0.9$ para los puntos de entrenamiento y de prueba se consideran excelente o de alta confiabilidad. De igual manera un modelo con valor mayor de $AUC > 0.7$ se considera un modelo bueno y si el valor de AUC es mucho menor se considera como mala.

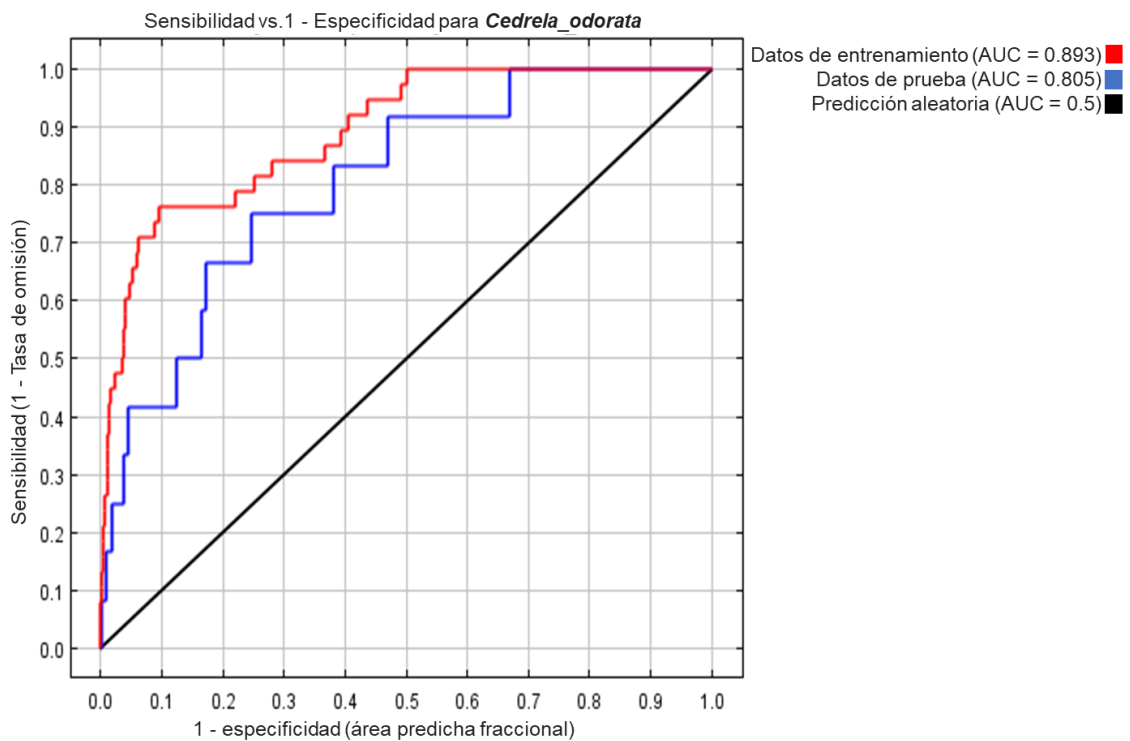


Figura 14. Curva operada por el receptor (ROC)

La prueba de ROC parcial indico que los modelos fueron significativamente mejores que al azar ($AUC > 1$) con valores mayores de 1 a 2, donde el 1 representa un modelo igual o peor que uno hecho al azar; mientras más cercano sea el valor a 2, el modelo tendrá un mejor ajuste y desempeño. La prueba de Z efectuada para los modelos resultó ser significativa ($p < 0.01$) (Tabla 10).

Tabla 10. Resultados de las pruebas de Roc parcial y de Z para los 10 modelos.

Modelos	Roc-parcial (promedio ratios)	Error estándar	Prueba de Z
M1B	1.447	0.106	$p < 0.01$
M2B	1.550	0.110	$p < 0.01$
M3B	1.552	0.112	$p < 0.01$
M4B	1.549	0.113	$p < 0.01$
M5B	1.531	0.112	$p < 0.01$
M6CV	1.533	0.112	$p < 0.01$
M7CV	1.554	0.116	$p < 0.01$
M8CV	1.546	0.112	$p < 0.01$
M9CV	1.538	0.111	$p < 0.01$
M10CV	1.533	0.114	$p < 0.01$

De los diez modelos generados, el que presento el mejor ajuste estadístico en las pruebas estadísticas de Roc parcial, Error estándar y Prueba de Z, fue el modelo M7CV.

7.2.2 Contribución de las variables

En la Figura 15 se observa el porcentaje de contribución de las variables ambientales más importante en los modelos de distribución de *Cedrelela odorata* L., donde la variable vegetación, fue la que mayor contribución presento en la generación de los modelos de distribución con un 34.7%, seguido de la precipitación del mes más húmedo con 14.6%.

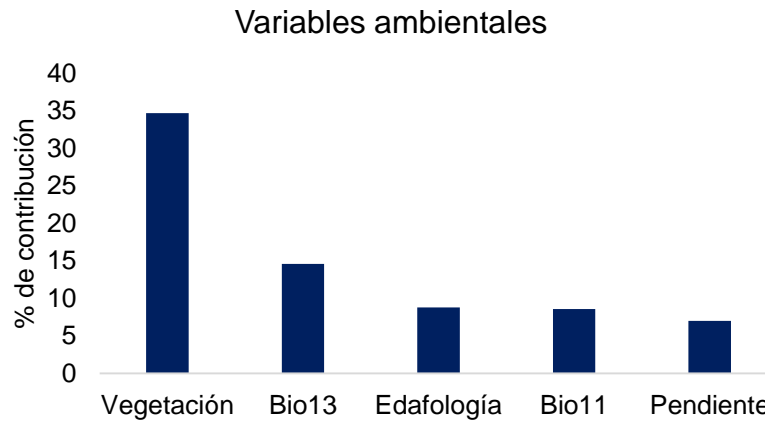


Figura 15. Contribución de las variables más importantes en los modelos de distribución de *Cedrela odorata* L.

La vegetación, la precipitación del mes más húmedo, la edafología, la temperatura media del trimestre más frío y la pendiente, explicaron en un 73.7% la generación de los modelos de distribución actual para cedro rojo.

CNIC (2005) menciona que el cedro rojo requiere para su óptimo desarrollo y crecimiento satisfactorio precipitaciones de 1,200 y 2,500 mm anuales, con temperaturas medias de 25 °C y altitudes de 0 hasta 1,500 msnm.

Manzanilla *et al.*, 2001 mencionan que el cedro rojo puede sobrevivir en lugares con precipitaciones de 3000 mm anuales siendo el límite extremo de su distribución natural, pero su establecimiento requiere mayores dificultades, también puede sobrevivir en lugares con precipitaciones inferiores a los 1000 mm pero crece muy lentamente y con fustes mal conformados, con temperaturas promedio durante el mes más caluroso del año de 33 °C y una temperatura mínima durante el mes más frío del año de 14 °C.

7.2.3 Áreas de calidad de hábitat

Se puede observar que las áreas de calidad “Alta” corresponden al 2.9% del total de la superficie del área de estudio, las áreas de calidad “Media” representan una

superficie de 19.2%, y las áreas de calidad “Baja” ocupan el 77.9%, siendo la categoría que posee la mayor superficie. En la Tabla 11 se observa la superficie descrita en hectáreas para cada una de las categorías mencionadas.

Tabla 11. Categorías de calidad de hábitat y la superficie que ocupan en el área de estudio.

Áreas	Superficie (ha)	Porcentaje (%)*
Alta	404,917	2.9
Media	2,682,842	19.2
Baja	10,891,140	77.9

*En relación con la superficie total del área de estudio.

El gradiente de colores representa las áreas de calidad, donde el color rojo indica las áreas con calidad alta, la cual reúne las condiciones ideales para el establecimiento y desarrollo de la especie, conforme la paleta de colores se va tornando verde, se considera que las áreas con esta coloración no presentan condiciones propicias para la especie. (Figura 16).

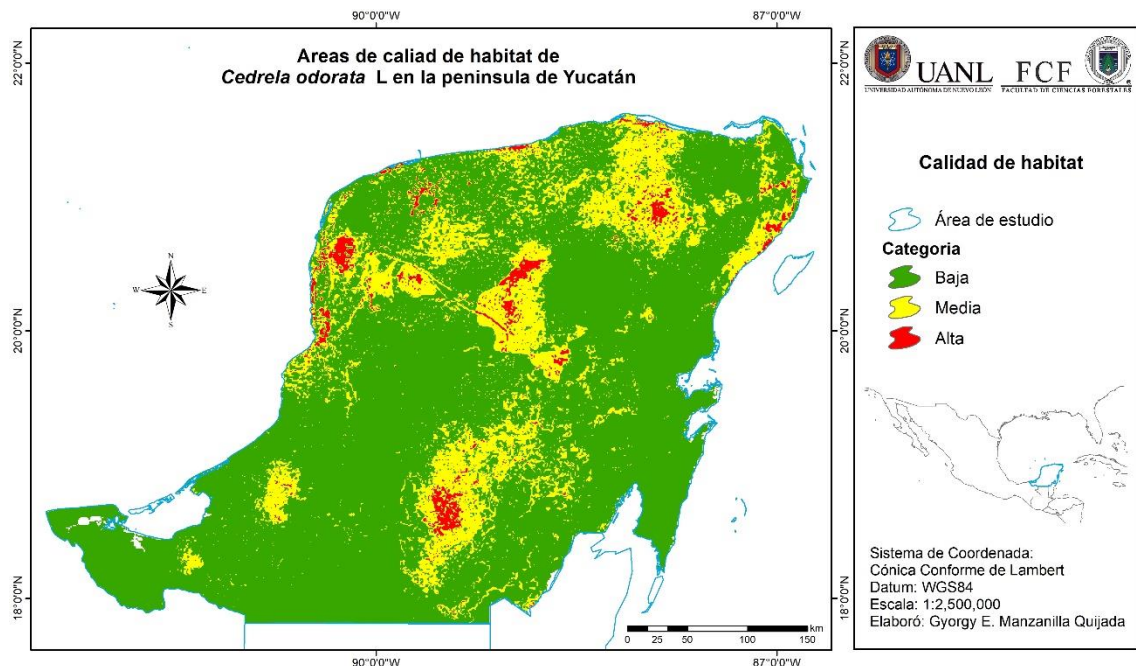


Figura 16. Áreas de calidad de hábitat de *C. odorata* L., en la Península de Yucatán.

7.2.4 Distribución de áreas potenciales

Se elaboró un mapa con las áreas potenciales de la especie *C. odorata* L, la escala de color verde en el mapa de la figura 17, representa las áreas con alto potencial para el establecimiento de la especie, que, de acuerdo con los resultados obtenidos, la superficie que reúne las condiciones aptas para el establecimiento de plantaciones forestales comerciales de cedro rojo fue de 404,917 hectáreas en la Península de Yucatán.

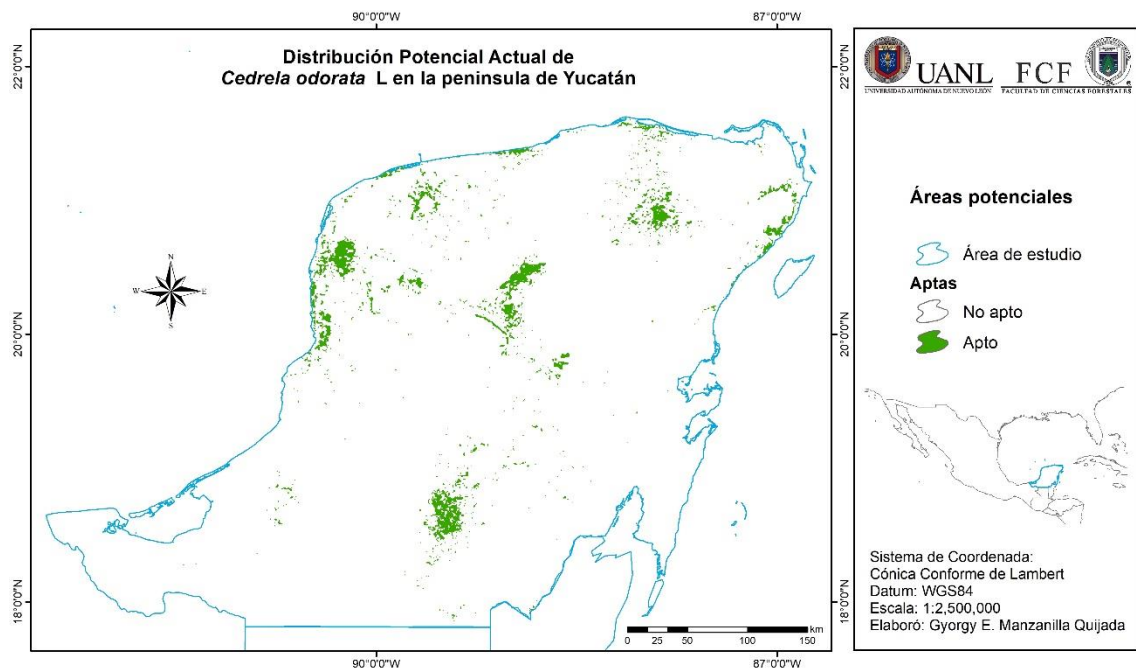


Figura 17. Áreas potenciales para el establecimiento de plantaciones forestales comerciales de *C. odorata* L., en la Península de Yucatán.

Los resultados obtenidos de las áreas predichas, fueron favorecedores estadísticamente de acuerdo con (Araújo *et al.*, 2005, Liu *et al.*, 2005, Araújo & Guisan, 2006, Miller *et al.*, 2007, Newbold *et al.*, 2009, Álvarez *et al.*, 2013, Dormann *et al.*, 2013, Merow *et al.*, 2013, Romo *et al.*, 2013, Ortíz-Yusty *et al.*, 2014, Cartaya *et al.*, 2016, Figueroa *et al.*, 2016, Loaiza & Roque, 2016, Phillips *et al.*, 2017) concuerda con otras aproximaciones para esta especie y el hábitat donde se desarrolla (Patiño, 1997, Rodríguez *et al.*, 2003, Pennington & Sarukhán, 2005, Gómez *et al.*, 2007 & Garza-López *et al.*, 2016). Por lo que la especie se

encontrar en las áreas potenciales como lo menciona (Soberón & Peterson 2005), al explicarlo en el diagrama BAM, lo que hace que las modelaciones de este tipo representen el nicho ecológico y la amplitud de distribución de las especies (Broennimann *et al.*, 2006).

7.3 Modelación bajo escenarios de cambio climático de *C. odorata* L, en la Península de Yucatán

Los valores obtenidos del AUC de la prueba de ROC fueron de 0.962 a 0.957 para los datos de entrenamiento y de 0.731 a 0.751 para los datos de validación, lo que indica que el desempeño de los modelos de distribución bajo escenarios de cambio climático fue bueno. Los resultados de las pruebas de Roc parcial y Z presentaron un desempeño estadístico bueno.

Tabla 12. Resultados de la prueba Roc parcial y Z de los modelos de distribución bajo escenarios de cambio climático.

Modelos	Roc-parcial (promedio ratios)	Error estándar	Prueba de Z
GFDL_CM3	1.111	0.119	$p < 0.01$
MIROC_ESM	1.111	0.087	$p < 0.01$

7.3.1 Contribución de las variables a futuro

Las variables ambientales de mayor importancia para el periodo 2030 fueron la vegetación, temperatura media del trimestre más frío (Bio11) y la edafología, con una contribución en el modelo GFDL_CM3 de 93.3% y 95.2% para el modelo MIROC_ESM (Figura 18).

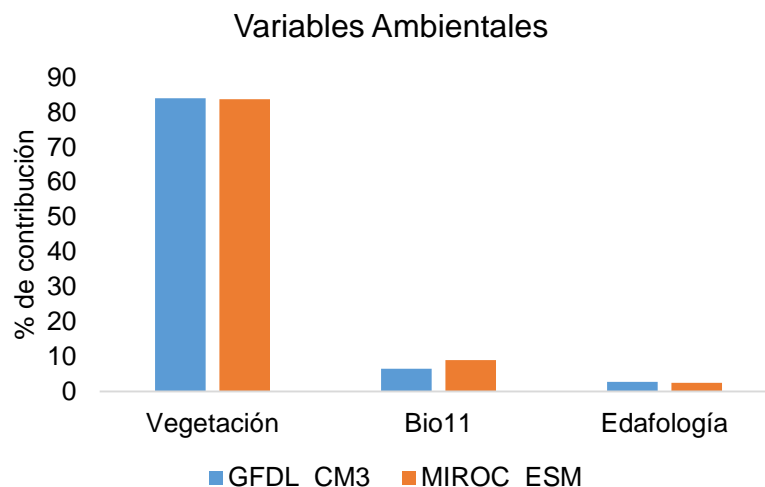


Figura 18. Porcentajes de contribución de las variables más importantes de los modelos GFDL_CM3 y MIROC_ESM.

Donde la vegetación fue la variable determinante a futuro en la distribución de *C. odorata* L, en la Península de Yucatán.

7.3.2 Distribución de áreas potenciales bajo escenarios de cambio climático

En la Tabla 13 se describe la superficie estimada actual y bajo escenarios de cambio climático de *C. odorata* L, al año 2030 en la Península de Yucatán.

Tabla 13. Superficie en hectáreas y porcentaje actual y futura de *c. odorata* L. en la Península de Yucatán.

Escenarios	Superficie (ha)	Porciento (%)*
Actual	404,917	2.9
GFDL_CM3	277037	2
MIROC_ESM	226138	1.6

*En relación con la superficie total del área de estudio.

De acuerdo con los resultados de los modelos de circulación global a futuro, se observa una reducción de áreas aptas para el crecimiento y desarrollo de cedro rojo. Los resultados del modelo GFDL_CM3, estiman una reducción respecto al actual de 31%, mientras que el modelo MIROC_ESM estima una reducción respecto al actual de 44.8% en la superficie idónea de cedro rojo en la Península de Yucatán. Si bien en ambos casos los impactos producidos por el cambio climático en el futuro, son de importancia por la pérdida de hábitat, cabe señalar que lamentablemente las áreas de *C. odorata* L, se está perdiendo debido a actividades antropogénicas.

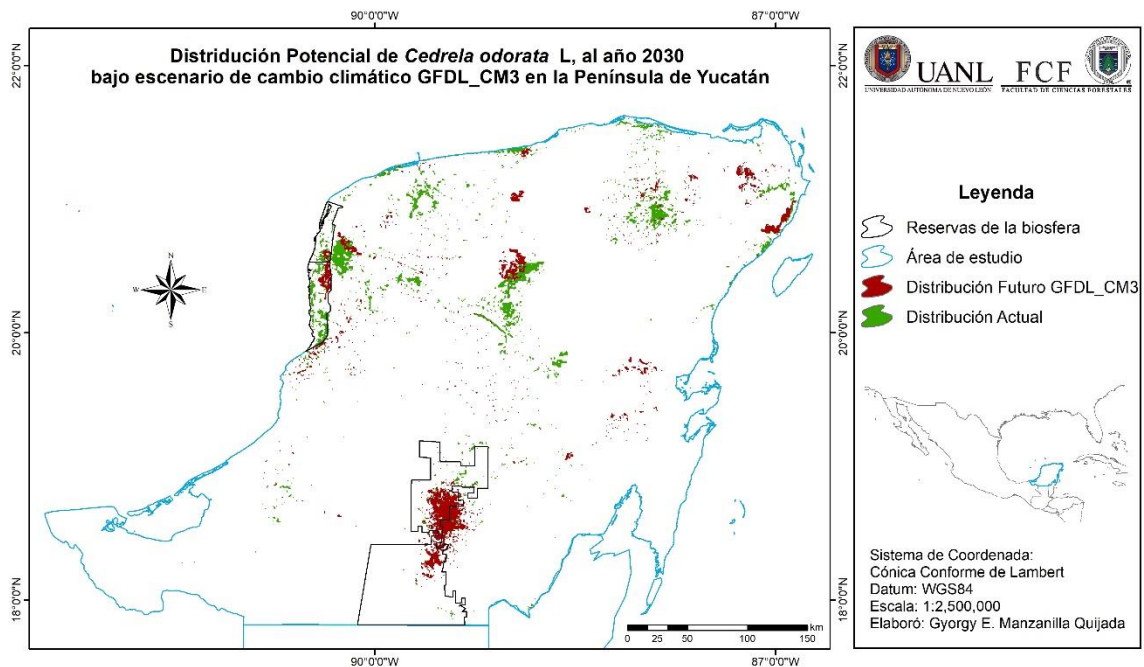


Figura 19. Superficie actual y futura del modelo GFDL_CM3 para *C. odorata* L, en la Península de Yucatán.

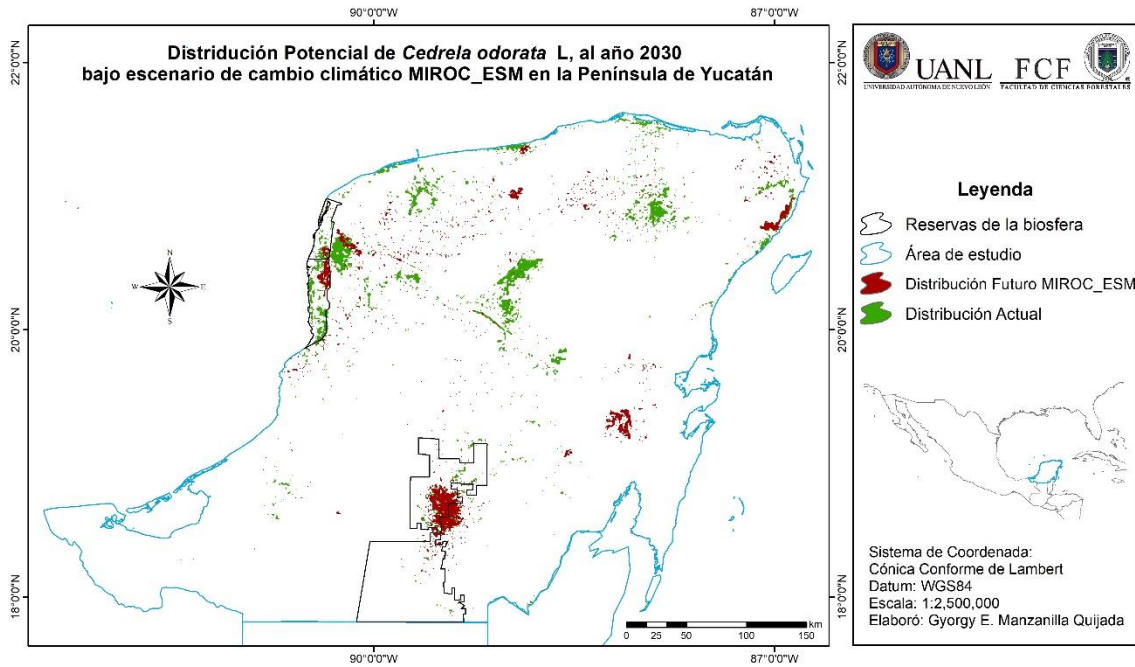


Figura 20. Superficie actual y futura del modelo MIROC_ESM para *C. odorata* L, en la Península de Yucatán.

Los modelos bajo escenarios de cambio climático estiman una reducción en la distribución potencial a futuro de la especie. La combinación entre altas temperaturas y disminuciones en las precipitaciones, serían la causa principal de la desaparición de áreas idóneas de *C. odorata* L, en gran parte de la distribución actual en la Península de Yucatán. Sin embargo, estos escenarios de cambio climático señalan un área de refugio marcada en el estado de Campeche. Estos resultados pueden ser la pauta para realizar planes y programas de manejo y conservación futuros *in situ* de la especie, tal y como lo proponen Obregón *et al.* (2014) y López-Garza *et al.*, (2016).

Las Reservas de la biosfera de Calakmul, Los Petenes y Ría Celestun, ayudarían como refugios para la especie *C. odorata* L, ante los efectos del cambio climático en la Península de Yucatán (Figura 19 y 20).

La orografía con mayor elevación se encuentra en la reserva de Calakmul, al crear un clima más húmedo y menos cálido que el resto de la Península,

compensarían en alguna medida la reducción de su hábitat, haciendo de la reserva una región propicia para la especie. Las áreas más planas de la zona norte de la Península, se verán expuestas al cambio climático, reduciendo el hábitat de la especie.

Martínez & Galindo-Leal, (2002) mencionan que la región de Calakmul, con altitudes promedio de 250-350 m.s.n.m. (altitudes modestas pero superiores al promedio de la Península de Yucatán), donde el relieve crea una sombra orográfica en las laderas y planicies occidentales, crearía una barrera mitigadora contra el aumento de la temperatura.

8 CONCLUSIONES

Indudablemente el clima del planeta ha cambiado y sigue en constante cambio, modificando los ecosistemas del mundo incluyendo la Península de Yucatán.

En la Península de Yucatán *C. odorata* L., es de importancia económica y se encuentra bajo categoría de protección, el cual es susceptible a los cambios bruscos en precipitación y temperatura, por lo que un aumento en temperatura y una disminución drástica en precipitación, la obligaría a desplazarse hacia otras zonas.

En la Península de Yucatán existen condiciones climáticas, ambientales y topográficas adecuadas para el establecimiento de plantaciones forestales comerciales. Las variables actuales que determinan la distribución de la especie fueron, el tipo de vegetación, la precipitación del periodo más lluvioso, la edafología, la temperatura media del trimestre más frío y la pendiente, indicando un aporte del 73.7% de la información de mayor utilidad en la explicación del modelo. Las variables ambientales más importantes a futuro fueron la vegetación, temperatura media del trimestre más frío y la edafología con una contribución en los modelos GFDL_CM3 de 93.3% y para MIROC_ESM 95.2%.

La superficie con potencial actual para *C. odorata* L, para el establecimiento de plantaciones forestales comerciales es de 404,917 ha. La proyección bajo escenarios de cambio climático a 2030, estima una reducción mínima de áreas boscosas de *C. odorata* L, de 31% hasta un máximo de 44.8% en la Península de Yucatán.

El estudio del cambio climático a través de los diversos modelos de circulación global permite simular y predecir el clima futuro de una región, zona o área en particular, y esto a su vez ayudan a tomar decisiones de adaptación o mitigación ante los efectos del fenómeno.

Los escenarios de cambio climático generados para la Península de Yucatán indican que el clima a futuro cercano será más cálido y seco.

Las Reservas de la biosfera Los Petenes, Ría Celestun y Calakmul funcionarían como refugios para la especie *C. odorata* L, lo cual ayudaría a conservar su mayor población natural a futuro.

9 BIBLIOGRAFÍA

- Aguirre C., L. M. y C. Chamba L. (2010). Patrones de comportamiento de 10 especies vegetales del páramo del Parque Nacional Podocarpus ante escenarios de cambio climático. Tesis de Ing. Forestal. Área Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables. Universidad Nacional de Loja. Loja, Ecuador. 92 p.
- Álvarez, G. J. R., A. Seseña R., J. Venegas T., M. L. Sillero A. & J. A. Rodríguez A. (2013). Autoecología de las principales especies de *Pinus* en Andalucía. Sexto Congreso Forestal Español. Ed. Sociedad Española de Ciencias Forestales. Vitoria-Gasteiz, España. 19 pp.
- Anderson, R. P. & Raza, A. (2010). The effect of the extent of the study región on GIS of species geographic distributions and estimates of niche evolution: Preliminary test with montane rodents (genus *Nephelomys*) in Venezuela. *Journal of Biogeography*, 37:1378-1393. En <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2010.02290.x>
- Anderson, R. P., & Martinez-Meyer, E. (2004). Modeling species geographic distributions for preliminary conservation assessments: an implementation with the spiny pocket mice (*Heteromys*) of Ecuador. *Biological Conservation*, 116(2),167-179.
- Andrade Torres, A., & Solís Ramos, L.Y. (2004). Las bondades del cedro rojo. *Revista de Divulgación Científica y Tecnología de la Universidad Veracruzana*. Vol. 17. No. 3. México. En <https://cdigital.uv.mx/bitstream/123456789/5611/2/20043P17.pdf>
- Araújo, M. B. & Guisan, A. (2006). Five (or so) challenges for species distribution modeling. *Journal of Biogeography* 33(10): 1677-1688. En <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2006.01584.x>
- Araújo, M. B., Pearson R.G., Thuiller W., & Erhard, M. (2005). Validation of species climate impact models under climate change. *Global Change Biology* 11: 1504-1513. En <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.01000.x>
- Arteaga Martínez, B., & Pérez Castillo, A. (2001). *Pinus maximinoi* HE Moore: Una especie prometedora para plantaciones forestales comerciales en el

- trópico. *Foresta Veracruzana*, 3(2). En <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49703211>
- Baldwin, R. A. (2009) Use of maximum entropy modeling in wildlife research. *Entropy*, 11(4), 854-866. En <https://doi.org/10.3390/e11040854>
- Benítez Badillo, G., Pulido Salas M., & Zamora. E. (2004). *Arboles Multiusos Nativos de Veracruz para Reforestación, Restauración y Plantaciones* (No. C/634.920972 B4) Instituto de Ecología, A.C. Xalapa Veracruz, Sistema de Investigación Golfo de México. CONAFOR. pp. 20-25.
- Bonilla Sánchez, A. P. (2014). Microinjertación in vitro de *erythrina edulis* m. familia (fabaceae). Ibagué: Universidad del Tolima, 2014. <http://repository.ut.edu.co/handle/001/1112>
- Bravo Medel A., Guillén, G., de Jconsejer, M., Posadas, S., Hernández de la Rosa, P., Lazalde & Acosta Mireles, M. (2007). *Estimación maderable y evaluación financiera de plantaciones forestales comerciales de cedro y caoba en Oaxaca, México*. (No. TESIS.). Colegio de Posgraduados, Campus Montecillo, Texcoco estado de México. pp 99.
- Broennimann, O., Thuiller, W., Hughes, G., Midgley, G.F, Alkemade, J.R, & Guisan A. (2006). Do geographic distribution, niche property and life form explain plants' vulnerability to global change? *Global Change Biology* 12(6): 1079-1093. En <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01157.x>
- Busby, J. (1991). BIOCLIM-a bioclimate analysis and prediction system. *Plant protection quarterly (Australia)*.
- Buzai D. (2000). La exploración geodigital. Lugar Editorial S.A. Buenos Aires, Argentina. 180 p.
- Calderón, G. D. R. & Germán, M. T. (1993). Meliaceae. En: J. Rzedowski y G. d. R. Calderón, (Ed.). *Flora del bajío y regiones adyacentes*. Fascículo 11. Instituto de Ecología, A.C. (INECOL). *Patzcuaro, Michoacán*. Pp. 1-9.
- CAN. (2007). Panorama del cambio climático en la Comunidad Andina. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Agencia Española de Cooperación Internacional. Lima, Perú 66 p.

- Cartaya, S., Anchundia, C. y Mantuano, R. (2016). Distribución geográfica potencial de la especie *Cunucus paca* en el Occidente de Ecuador. LA GRANJA: Revista de Ciencias de la Vida 24(2): 134-149. DOI: <http://dx.doi.org/10.17163/lgr.n24.2016.11>.
- CITES. (2015). Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres. Apéndices I, II y III, en vigor a partir del 4 de abril de 2017. En <http://www.cites.org/sites/default/files/esp/app/2015/S-Appendices-2015-02-15.pdf>
- CNIC. (2005). Árboles encontrados en zonas cafetaleras. Colombia. 149 p.
- Coitiño, H. I., Montenegro, F., Fallabrino, A., González, E. M. y Hernández, D. (2013). Distribución actual y potencial de *Cabassous tatouay* y *Tamandua tetradactyla* en el límite sur de su distribución: implicancias para su conservación en Uruguay. Edentata, 14:23-34. En <https://doi.org/10.5537/020.014.0104>
- CONAFOR. (2009). Inventario Nacional Forestal y de Suelo 2004-2009. Comisión Nacional Forestal. Zapopan, Jalisco Disponible en: <https://datos.gob.mx/busca/dataset/inventario-nacional-forestal-y-de-suelos>
- CONAFOR. (2011). Situación Actual Perspectivas de las Plantaciones Forestales Comerciales en México. Colegio de Posgraduados. México. 10 p. En <http://www.conafor.gob.mx/biblioteca/PFC.pdf>
- CONAFOR. (2012). Programa de desarrollo de plantaciones forestales a 15 años de su creación. México. En http://www.conafor.gob.mx/biblioteca/documentos/programa_de_desarrollo_de_pfc_a_15_anos_de_su_creacion.pdf
- CONAFOR. (2013). Bosques, cambio climático y REDD+ en México. Guía básica. Segunda edición (2013). Comisión Nacional Forestal. Zapopan, Jalisco, México. En http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/35/4034Gu%C3%ADa%20B%C3%A1sica%20de%20Bosques,%20Cambio%20Clim%C3%A1tico%20y%20REDD_%20.pdf
- CONANP. 2010a. Estrategia de cambio climático para áreas protegidas. SEMARNAT. México, D.F. 25 p

- CONANP. 2015. Estrategia de cambio climático desde las Áreas Naturales Protegidas: Una Convocatoria para la Resiliencia de México (2015-2020). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 62 p.
- Cuervo-Robayo, A.P., Téllez-Valdés, O., Gómez-Albores, M.A., Venegas-Barrera, C.S., Manjarrez, J. & Martínez-Meyer, E. (2013) *An update of high-resolution monthly climate surfaces for Mexico. International Journal of Climatology*. 34(7), 2427-2437. En <https://doi.org/10.1002/joc.3848>
- De la Torre A., López C., Yglesias E., & Cornelius J.P. (2008). Genetic (AFLP) diversity of nine *Cedrela odorata* populations in Madre de Dios, southern Peruvian Amazon. *Forest Ecology and Management* 255(2), 334–339. En <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.09.058>
- Delgado, T. C. (2008). Evolución de la Diversidad Vegetal en Ecuador ante un Escenario de Cambio Global. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Ciencias Biológicas. Departamento de Biología Vegetal I. 303 p. En <http://eprints.ucm.es/12066/1/T30592.pdf>
- Dormann, C. F., J. Elith, S. Bacher, C. Buchmann, G. Carl, G. Carré, J. R. García, M., B. Gruber, B. Lafourcade, P. J. Leitao, T. Münkemüller, C. McClean, P. E. Osborne, B. Reuneking, B. Schoröder, A. K. Skidmore, D. Zurell & S. Lautenbach. (2013). Collinearity: A review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography* 36(1): 27-46. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2012.07348.x>
- Duque, M. (2008). Modelación cartográfica hidrológica de la cuenca hidrográfica del Río La Chimba para determinar la potencialidad del aprovechamiento del recurso agua mediante herramienta SIG en la cuenca y en el área de influencia del proyecto de riego Cayambe Tabacundo. ESPE/SANGOLQUÍ/2008). Tesis de Ingeniería. Escuela Politécnica del Trabajo. Sangolquí, Ecuador. 246 p. En <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/797>
- Elith, J., Graham, C. H., Anderson, R. P., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A., Hijmans, R. J., Huettmann, F., Leathwick, J. R., Lehmann, A., Li, J., Lohmann, L. G., Loiselle, B. A., Manion, G., Moritz, C., Nakamura, M., Nakazawa, Y., Overton, J. Mc., Peterson, A. T., Phillips, S. J., Richardson, K. S., Scachetti-Pereira, R.,

- Schapire, R. E., Soberón, J., Williams, S., Wisz, M. S. and Zimmermann, N. E. (2006). Novel methods improve prediction of species distributions from occurrence data. *Ecography* 29:129–151.
- Elith, J., Phillips, S. J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y. E. & Yates, C. J. (2011). A statistical explanation of MaxEnt for ecologist. *Diversity and Distributions*, 17(1), 43-57. En <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2010.00725.x>
- Elton G (1927) *Animal Ecology*. London. Pp 296.
- ESRI. (2014). *ArcGis Desktop: 10.3 Environmental Systems Research Institute*, Redlands, CA.
- Euscátegui, C. (2002). *Estado de los glaciares en Colombia y análisis de la dinámica glacial en el Parque los Nevados asociados al cambio climático global*. (Doctoral dissertation, MSc thesis. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias).85 p.
- FAO. (2005). *Situación de los bosques del mundo*. Roma, Italia.129 p.
- FAO. (2010). *Evaluación Global de los Recursos Forestales*. Francia. En <http://www.fao.org/docrep/013/i1757s/i1757s.pdf>
- Fernández-Eguiarte, A., Zavala-Hidalgo, J., Romero-Centeno, R., Conde-Álvarez, A. C. & Trejo-Vázquez, R. I. (2015). Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impacto, vulnerabilidad y adaptación en México y Centroamérica. Centro de Ciencias de la Atmosfera, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 22 p. En http://atlasclimatico.unam.mx/inecc/Atlas_2_190215_documentacion.pdf
- FIC, (2011). *Taller de formación en escenarios de cambio climático y aplicaciones meteorológicas operativas*. (Fundación para la Investigación del Clima). Managua, Nicaragua. 133 Diap.
- Figuroa, J., Stucchi, M., & R. Rojas-Vera Pinto. (2016). Modelación de la distribución del oso andino *Tremarctos ornatus* en el bosque seco del Marañón (Perú). *Revista Mexicana de Biodiversidad* 87(1), 230-238. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rmb.2016.01.008>

- Franklin, J. (2010). *Mapping species distribution: Spatial inference and prediction*. Ecology, Biodiversity and Conservation. Cambridge University Press.
- García, E. (1998). Climas (clasificación de Köppen, modificado por García). Escala 1:1 000 000. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). México.
- Garreaud, R. (2011). Cambio climático: Bases físicas e impactos en Chile. *Revista Tierra Adentro INIA-Chile*. 93, 13-19. En http://dgf.uchile.cl/rene/PUBS/inia_RGS_final.pdf
- Garza-López, M., J. M. Ortega-Rodríguez, F. J. Zamudio-Sánchez, J. F. López-Toledo, F. A. Domínguez-Álvarez & Sáenz-Romero, C. (2016). Calakmul como refugio de *Swietenia macrophylla* King ante el cambio climático. *Botanical Sciences* 94(1): 43- 50. DOI: <http://dx.doi.org/10.17129/botsci.500>
- Gómez Restrepo, M. L., Murillo, T., & Lázaroauthor, J. (2007). Manejo de las semillas y la propagación de diez especies forestales del bosque húmedo tropical. Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia CORANTIOQUIA. Medellín: CORANTIOQUIA, ISSN 2011-4087. 32 p.
- Gómez, J. D., Monterroso Rivas, A. I., & Tinoco Rueda, J. Á. (2007). Distribución del cedro rojo (*Cedrela odorata* L.) en el estado de Hidalgo, bajo condiciones actuales y escenarios de cambios climáticos. *Madera y Bosques* 13(2): 299-49. En <http://www.redalyc.org/html/617/61713204/>
- Grinnell, J. (1917). The niche-relationships of the California thrasher. *The Auk* 34(4), 427-433. En <http://www.jstor.org/stable/4072271>
- Guevara, G. (1988). *Experiencias Colombianas con Cedro (Cedrela odorata L.)* (No. 21816). Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal (CONIF). Convenio CONIF-Holanda. Ed. Gente Nueva. Bogotá Colombia. 78 p.
- Guisan, A., & Zimmermann, N. E. (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling* 135(2-3), 147-186. En [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(00\)00354-9](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(00)00354-9)
- Hoekstra, J. M., Boucher, T. M., Ricketts, T.H. & Roberts, C. (2005). Confronting a biome crisis: global disparities of habitat loss and protection. *Ecology Letters* 8(1), 23-29. En <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2004.00686.x>

- Hutchinson, G. E. (1957). Concluding remarks. Cold Spring Harbour Symposium on Quantitative Biology 22: 415–427.
- INE. (2000). Primera comunicación nacional ante la convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático (CMNUCC), Instituto Nacional de Ecología, México.
- INE. (2006). Tercera comunicación nacional ante la convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático (CMNUCC), Instituto Nacional de Ecología, México.
- INE. (2009). Cuarta comunicación nacional ante la convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático (CMNUCC), Comisión Intersecretarial de cambio climático, México.
- INECC. (2012). Quinta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), Comisión Intersecretarial de cambio climático, México.
- INEGI. (2013). Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación, serie V, escala: 1:250000 edición; 2ª Instituto Nacional de Estadísticas y Geografía. México.
- INEGI. (2015). Características edafológicas, fisiográficas e hidrológicas de México, Instituto Nacional de Geografía y Estadística. Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/inegi/spc/doc/INTERNET/1GEOGRAFIADEMEXICO/MANUAL_CARAC_EDA_FIS_VS_ENERO_29_2008.pdf > (consultado marzo 2017).
- INEGI. (2016). Conjunto de datos vectoriales de Uso de suelo y vegetación, escala: 1: 250,000. serie VI. edición; 2ª Instituto Nacional de Estadísticas y Geografía. México.
- IPCC. (2007a). Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Summary for Policymakers. Disponible en: http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports Shtml Fecha de consulta: enero 2018. 114 p.
- IPCC. (2002). Cambio climático y biodiversidad. Documento técnico V. Gitay H., Suárez A., Watson R. & Dokken D. (Eds.). OMM-PNUMA. Ginebra, Suiza. 93 p.

- IPCC. (2007). Summary for policymakers of the synthesis report of the IPCC Fourth assessment, Intergovernmental Panel on Climate Change, New York.
- IPCC. (2007b). 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. Ginebra, Suiza. 976 p.
- IPCC. (2014). Cambio climático 2014. Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Resumen para responsables de políticas. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea y L.L. White (eds.). Ginebra, Suiza. 34 p.
- IUCN, (2015). International Union for Conservation of Nature. The IUCN Rrd List of Threatened Species. Consultado en noviembre del 2017. En <http://www.iucnredlist.org/>
- Jeschke, J. M. & Strayer, D. L. (2008). Usefulness of bioclimatic models for studying climate change and invasive species. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1134:1–24. En <https://doi.org/10.1196/annals.1439.002>
- Jiménez M., Chain, A., & Locatelli, B. (2010). Efectos del cambio climático en la distribución de zonas de vida en Centroamérica. Comunicación técnica en Recursos Naturales y Ambiente (*CATIE*). Turrialba, Costa Rica. No. 59-60 p. 32-40.
- Jiménez Méndez, M. (2009). Resiliencia de los ecosistemas naturales terrestres de Costa Rica al cambio climático. Tesis de Maestro en Ciencias. Escuela de Posgrado, Programa de Educación para el Desarrollo y la Conservación del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (*CATIE*). Turrialba, Costa Rica. 140 p. En <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A3235e/A3235e.pdf>
- Kumar, S., Graham, J., West, A. M., & Evangelista, P. H. (2014). Using district-level occurrences in MaxEnt for predicting the invasion potential of an exotic insect pest

- in India. *Computers and Electronics in Agriculture*, 103, 55-62. En <https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.02.007>
- Linnaeus, C. (1759). *Regnum Vegetabile* (Vol. 2). En *Systema Naturae* (10a ed.) Stockholm: Laurentius Salvius.
- Liu, C., Berry, P. M., Dawson, T. P. & Pearson, R. G. (2005). Selecting thresholds of occurrence in the prediction of species distributions. *Ecography* 28(3), 385-393. DOI: 10.1111/j.0906-7590.2005.03957.x
- Loaiza, C. R. & Roque, J. G. (2016). Revalidación taxonómica y distribución potencial de *Armatocereus brevispinus* Madsen (Cactaceae). *Revista peruana de biología* 23(1): 35-41. DOI: [http:// dx.doi.org/10.15381/rpb.v23i1.11831](http://dx.doi.org/10.15381/rpb.v23i1.11831)
- López-Sánchez, E. & Musálem, M. A. (2007). Sistemas agroforestales con cedro rojo, cedro nogal y primavera, una alternativa para el desarrollo de plantaciones forestales comerciales en los Tuxtla, Veracruz, México. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Medio Ambiente* 13(1) 59-66. En <http://www.redalyc.org/html/629/62913109/>
- Loreau, M., Oteng-Yeboah, A., Arroyo, M.T., Babin, D., Barbault, R., Donoghue, M. & Ma, K. (2006). Diversity without representation. *Nature* 442 (7100) 245-246.
- Loyn, R., McNabb, E. G., Volonina, L., Willing, R. & Jenness, J. (2004). Prediction of low distributions: Spatial modeling as a tool for conserving owls in ecologically sustainable forest management in Victoria Australia. En: Rodríguez-Estrella y Borjórquez (ed.). *Spatial análisis in raptor ecology and conservation*. Centro de Investigaciones Biológicas del Noreste – Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, 57-74 pp.
- Ludevid Anglada, M. (1997). *El Cambio Global en el medio ambiente*. (E. Alfaomega Ed.). Barcelona, España.
- Magaña, V., Conde., C., Sánchez., O., & Gay, C. (2000). Evaluación de escenarios regionales de clima actual y de cambio climático futuro para México en Gay, C. (Ed. 2000). *México: una visión hacia el siglo XXI. México, El cambio climático en México*. 15-21 p. En <https://www.researchgate.net/publication/267721218>

- Mancebo S. Q., E. Ortega P., A. Valentín C., B. Martín R. & L. Martín (2008). Libro SIG: aprendiendo a manejar los SIG en la gestión ambiental. Madrid, España. 109 p.
- Manson, R. H., Jardel Peláez, E. J. M., & Escalante-Sandoval, C. (2009). Perturbaciones y desastres naturales: impactos sobre las ecorregiones, la biodiversidad y el bienestar socioeconómico. *Capital natural de México*, vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio. Conabio, México, pp. 131-184.
- Manzanilla B. H., Martínez D. M. & Martínez, M. A. (2001). Monografías de especies nativas promisorias para el establecimiento de plantaciones forestales comerciales en Jalisco cedro y rosa morada. Programa de Desarrollo Forestal de Jalisco. *Documento Técnico*. No. 30. FIPRODEFO. 51-73 p.
- Marquet, P. A. A. M., Labra, F., Abades, S., & Cavieres, L. (2011). Estudio de vulnerabilidad de la biodiversidad terrestre en la eco-región mediterránea, a nivel de ecosistemas y especies, y medidas de adaptación frente a escenarios de cambio climático. *Ministerio de Medio Ambiente. Santiago, Chile*.
- Martínez Ramos M., & García Orth, X. (2007). Sucesión ecológica y restauración de las selvas húmedas. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* (80) pp. 69-84. En <http://www.redalyc.org/html/577/57708008/>
- Martínez, E., & Galindo Leal, C. (2002). La vegetación de Calakmul, Campeche, México: Clasificación, descripción y distribución. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, (71).
- Martínez-Méndez, N., Aguirre-Planter, E., Eguiarte, L. E. & Jaramillo-Correa, J. P. (2016). Modelado de nicho ecológico de las especies del género *Abies* (*Pinaceae*) en México: Algunas implicaciones taxonómicas y para la conservación. *Botanical Sciences*, 1:5-24. En <http://dx.doi.org/10.17129/botsci.508>
- Martínez-Meyer, E. (2005). Climate change and biodiversity: Some considerations in forecasting shifts in species potential distributions. *Biodiversity Informatics*, 2:45-55. En <https://doi.org/10.17161/bi.v2i0.8>
- Martínez-Vento, N., Estrada-Ortiz, J., Góngora-Rojas, F., López-Castilla, R., Martínez-González, L., & Curbelo-Gómez, S. (2010). Bioplaguicida de

- Azadirachta indica A. Juss (Nim) y la poda, una alternativa para el control de *Hypsipyla grandella* Zeller en plantaciones de *Cedrela odorata* L. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 16(1), 61-68. En <http://dx.doi.org/10.5154/r.rchscfa.2009.03.006>
- Mas J. F., Velázquez A., Días J. R., Mayorga R., Alcántara C., Castro R., Fernández T., Pérez A. & Bocco G. (2003). Assessing land use/cover changes in Mexico: a wall-to-wall multirate GIS database. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003. IGARSS'03. Proceedings. 2003 IEEE International* (Vol. 5, pp. 3359-3361). IEEE. En <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1294782>
- Mateo, R. G., Felicísimo, A. M. & Muñoz, J. (2011). Modelos de distribución de especies: una revisión sintética. *Revista Chilena de Historia Natural*, 84(2), 217-240. En <http://dx.doi.org/10.4067/S0716-078X2011000200008>
- Merow, C., Smith, M. J. & Silander, J. A. (2013). A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter. *Ecography* 36(10): 1058-1069. DOI: 10.1111/j.1600-0587.2013.07872.x
- Miller, J., J. Franklin & R. Aspinall. (2007). Incorporating spatial dependence in predictive vegetation models. *Ecological Modelling* 202: 225-242. DOI: 10.1111/j.0033-0124.2005.00470.x
- Miranda, Sierra, C. A., Geada López, G., & Sotolongo, Sospedra R. (2016). Modelación de la distribución potencial de *Pinus tropicalis* en el occidente de Cuba. *Avances* 18(1): 28-35. En <https://rc.upr.edu.cu/jspui/handle/DICT/2574>
- Molnár, P. & Ramírez, J. A. (2001). Recent trends in precipitation and streamflow in the Rio Puerco Basin. *Journal of climate*, 14(10), 2317-2328. En [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014<2317:RTIPAS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<2317:RTIPAS>2.0.CO;2)
- Montero, M. J., & Pérez, J. L. (2008). Regionalización de proyecciones climáticas en México de precipitación y temperatura en superficie utilizando el método REA para el siglo XXI. *Efectos del Cambio Climático en los Recursos Hídricos de México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Mor. pp*, 11-21.

- Morrone, J. J., & Escalante, T. (2016). Introducción a la biogeografía. *Universidad Nacional Autónoma de México, México*, 315.
- Muñoz, S. (2003). Embriogénesis somática en cedro (*Cedrela odorata* Linnaeus) a partir de cotiledones. Tesis de pre-grado, Universidad Nacional Agraria La Molina, Facultad de Ciencias, La Molina, departamento de Lima, Perú. 111 pp.
- Narayani, B. (2008). Tool for Partial-ROC (Biodiversity Institute, Lawrence, KS), ver 1.0
- Newbold, T., Gilbert, F., Zalat, S., El-Gabbas A., & Reader, T. (2009). Climate-based models of spatial patterns of richness in Egypt's butterfly and mammal fauna. *Journal of Biogeography* 36: 2085-2095. En <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2009.02140.x>
- Obregón, R., Arenas-Castro, S., Gil-T, F., Jordano, D., & Fernández-Haeger, J. (2014). Biología, ecología y modelo de distribución de las especies del género *Pseudophilotes* Beuret, 1958 en Andalucía (Sur de España) (Lepidoptera: Lycaenidae). *SHILAP Revista lepidoptera* 42 (168): 501-515. En <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=45540983001>
- Ortiz-Yusty, C., Restrepo, A., & Páez, V. P. (2014). Distribución potencial de *Podocnemis lewyana* (Reptilia: Podocnemididae) y su posible fluctuación bajo escenarios de cambio climático global. *Acta biológica colombiana* 19(3): 471-481. En <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=319031647013>
- Osorio-Olvera, L., Barve, V., Barve, N., & Soberón, J. (2016). Nichetoolbox: desde la obtención de datos de biodiversidad hasta la evaluación de modelos de distribución de especies en un entorno de GUI amigable, paquete R versión 0.2. 0.0. En <http://shiny.conabio.gob.mx:3838/nichetoolb2/> Fecha de consulta (27/Noviembre/2016).
- Parraguirre, C., V. Sánchez, R. Hernández, T. Marín, A. Sánchez, A. Rueda, *et al.* (2007). *Cedrela odorata* L. (cedro rojo) y su relación con *Hypsipyla grandella* en México. Resúmenes XVII Congreso Mexicano de Botánica. Pp. 95-96.
- Patiño, V. F. (1997). Recursos Genéticos de *Swietenia* y *Cedrela* en los Neotrópicos. *Propuesta para Acciones Coordinadas* (No. FAO 634.97325 P298). FAO, Roma (Italia). Dirección de Recursos Forestales. Dept. de Montes. p. 58.

- Pennington, T. D. & J. Sarukhán. (2005). Árboles tropicales de México. Manual para la identificación de las principales especies. 3a ed. Universidad Nacional Autónoma de México; Fondo de Cultura Económica. México, D.F., México. 523 pp.
- Peterson, A. T. & Nakazawa, Y. (2008). Environmental data sets matter in ecological niche modelling: an example with *Solenopsis invicta* and *Solenopsis richteri*. *Global Ecology and Biogeography*, 17:135-144. En <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2007.00347.x>
- Peterson, A. T. (2006). Uses and requirements of ecological niche models and related distributional models. *Biodiversity Informatics*. 3:59–72. En <https://doi.org/10.17161/bi.v3i0.29>
- Peterson, A. T., Papes, M., & Soberón J. (2008). Rethinking receiver operating characteristic analysis applications in ecological niche modeling. *Ecological Modelling* 213(1), 63-72. En <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.11.008>
- Peterson, A. T., Soberón J., Pearson, R.G., Anderson, R. P., Martínez-Meyer, E., Nakamura, M. & Araújo, M. B. (2011). Ecological Niches and Geographic Distributions. (Monographs in Population Biology 49). Nueva Jersey: Princeton University Press.
- Peterson, T. A., Tian, H., Martínez-Meyer, E., Soberon, J., Sánchez-Cordero, V., & Huntley, B. (2005). Modeling distributional shifts of individual species and biomes. *Climate change and biodiversity*, 211-228.
- Phillips, S. J., Anderson, R. P. & Schaphire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3-4), 231-259. En <https://doi.org/10.1016/j.euerradel.2005.03.026>
- Phillips, S. J., R. P. Anderson, M. Dudík, R. E. Schapire & M. Blair. (2017). Opening the black box: an open-source release of Maxent. *Ecography* 4(7), 887-893. En <https://doi.org/10.1111/ecog.03049>
- Phillips, S.J., Dudik, M., & Schapire, R. E. (2004). A maximum entropy approach to species distribution modeling. *Proceedings of the twenty-first international conference on Machine learning* (p. 83). ACM.

- Pliscoff, P., & Fuentes-Castillo, T. (2011). Modelación de la distribución de especies y ecosistemas de tiempo y en el espacio: una revisión de las nueva herramientas y enfoques disponibles. *Revista de Geografía Norte Grande*, (48), 61-79. En <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022011000100005>
- Rodríguez, R., Daquinta, M., Capote, I., Pina, D., Lezcano, Y., & González, J. (2003). Nuevos aportes a la micro-propagación de *Swietenia macrophylla* X *Swietenia mahogany* (Caoba híbrida) y *Cedrela odorata* (Cedro). *Cultivos tropicales* 24(3), 23-27. En <https://www.researchgate.net/publication/311796387>
- Romo, H., Sanabria, P., & García-Barros, E. (2013). Predicción de los impactos del cambio climático en la distribución sobre las especies de Lepidoptera. El caso del género *Boloria* Moore, 1900 en la Península Ibérica (Lepidoptera: Nymphalidae). *SHILAP Revista de Lepidopterología* 41(162), 267-287. En <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=45529157007>
- Sánchez Monsalvo, V., Salazar García, J. G., Vargas Hernández, J., López Upton, J., & Jasso Mata, J. (2003). Parámetros genéticos y respuesta a la selección en características del crecimiento de *Cedrela odorata* L. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 26(1). En <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61026103>
- Sandoval, V., & Real, P. (2005). Modelación y prognosis estadística y cartográfica del cambio en el uso de la tierra. *Bosque (Valdivia)*, 26(1), 55-63. En <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002005000100006>
- Scheldeman, X., & van Zonneveld, M. (2011). Manual de Capacitación en Análisis Espacial de Diversidad y Distribución de Plantas. *Bioversity International, Roma, Italia*. pp. 186.
- SEMARNAP. (1998). Subsecretaría de Recursos Naturales. 'Mapa de suelos dominantes de la República Mexicana'. (Primera aproximación 1996). Escala 1:4000000. México.
- SEMARNAT. (2010). Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010. Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo. México D.F.: Diario oficial de la federación.

http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/435/1/NOM_059_SEMARNAT_2010

- Soberón J., & Nakamura, M. (2009). Niches and distributional areas: concepts, methods and assumptions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(Supplement 2),19644-196520. En <https://doi.org/10.1073/pnas.0901637106>
- Soberón, J., & Peterson, A. T. (2005). Interpretation of models of fundamental ecological niches and species distribution áreas. *Biodiversity Information*, 2:1-10. En <https://doi.org/10.17161/bi.v2i0.4>
- Velázquez, A., Mas J. F., Mayorga-Saucedo, R., Palacio J. L., Bocco G., Gómez-Rodríguez, G., Luna G.L., Trejo I., López G.J., Palma M., Peralta A., Prado M.J. & González M.F. (2001). El inventario forestal nacional 2000. Potencial de usos y alcances. *Ciencias*, 64, 13-19.
- Villers-Ruiz, L., & Trejo- Vázquez, I. (2010). El cambio climático y la vegetación en México. *México: una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México. Instituto Nacional de Ecología. Universidad Nacional Autónoma de México, US Country Studies Program*, 57-66. En <https://www.uv.mx/personal/tcarmona/files/2010/08/Villers-y-Trejo-.pdf>
- Watson, R. (2001). *Climate Change Ginebra, Suiza: The Intergovernmental Panel on Climate Change, Ginebra.*
- Watson, R., Zinyowera, M., & Moss, R. (1997). Impactos regionales del cambio climático: evaluación de la vulnerabilidad. *Informe especial del Grupo de trabajo II del IPCC*. Cambridge, England: Cambridge University Press.