



Idoneidad de hábitat para *Swietenia macrophylla* en escenarios de **cambio climático** en México

Habitat suitability for *Swietenia macrophylla* in climate change scenarios in Mexico

Gregorio Ramírez-Magil¹, Francisco Botello^{2,3} y Angélica Navarro-Martínez^{1*}

¹ El Colegio de la Frontera Sur. Chetumal, Quintana Roo.

² Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Biología. Departamento de Zoología. Ciudad de México, México.
francisco.botello@ib.unam.mx

³ Conservación Biológica y Desarrollo Social, A. C. Departamento de monitoreo biológico y planeación de conservación, Ciudad de México, México.
franciscobotello@conbiodes.com

* Autora de correspondencia. manava@ecosur.mx

RESUMEN

Los modelos de nicho ecológico permiten determinar la idoneidad de hábitat de las especies. El objetivo del presente estudio fue determinar la idoneidad de hábitat de *Swietenia macrophylla* King (caoba) en dos escenarios de cambio climático en México. Para la modelación se empleó el algoritmo *MaxEnt* 3.3.3. Como fuente primaria de información se utilizaron los registros de la especie obtenidos del Inventario Nacional Forestal y de Suelos 2009-2014. Los predictores fueron los *raster* de 19 variables bioclimáticas de las interpolaciones de datos observados y representativos de 1960-1990, 2050 (promedio de 2041 a 2060) y 2070 (promedio de 2061-2080), los RCP 4.5 y el modelo de circulación general MRI-CGCM3 de *Worldclim*, con una resolución espacial aproximada a 1 km² y el *raster* de edafología de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad con una resolución espacial de 90 m². Para el escenario 2050 se proyecta una pérdida de hábitat idóneo de 39.79%; mientras que para el escenario 2070, esta es de 47.60% respecto al escenario presente. Se concluye que en los dos escenarios las condiciones de hábitat idóneo permanecerán principalmente en los estados de Campeche y Quintana Roo, pero este último conservará cerca de 50% del hábitat idóneo. Los resultados permitirán generar estrategias de conservación, aprovechamiento y mitigación del impacto del cambio climático que aseguren la sobrevivencia y aprovechamiento de la caoba y los ecosistemas en los que habita.

PALABRAS CLAVE: caoba, conservación, distribución, hábitat idóneo, *MaxEnt*, variables bioclimáticas.

ABSTRACT

Ecological niche models allow determination of the habitat suitability of species. The objective of the present study was to determine habitat suitability for *Swietenia macrophylla* King (mahogany) under two scenarios of climate change in Mexico. For the modeling, the *MaxEnt* 3.3.3 algorithm was used. The species records of the 2009-2014 National Forest and the Soils Inventory were used as the primary source of information. The predictors were the raster of the observed and representative data interpolations for 19 bioclimatic variables, from 1960-1990, 2050 (average from 2041 to 2060), and 2070 (average from 2061-2080), RCP 4.5, the general circulation model MRI-*Worldclim* CGCM3 with a spatial resolution of approximately 1 km², and the *Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad* edaphology raster with a spatial resolution of 90 m². For the 2050 scenario, a loss of suitable habitat of 39.8% is projected, while for the 2070 scenario this loss is 47.6% compared to the 1960-1990 scenario. It is concluded that under both future scenarios, suitable habitat conditions will remain mainly in the states of Campeche and Quintana Roo, the latter of which will conserve about 50% of the suitable habitat. These results permit the development of strategies for the conservation, use and mitigation of the impact of climate change to ensure the survival and use of mahogany and the ecosystems in which it inhabits.

KEYWORDS: mahogany, conservation, distribution, suitable habitat, *MaxEnt*, bioclimatic variables.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el cambio climático está ocasionando variaciones ambientales regionales y globales en la temperatura y la precipitación (Boyd e Ibararán, 2010; Useros-Fernández, 2013; Quesada-Quirós, Acosta-Vargas, Arias-Aguilar y Rodríguez-González, 2017; Martín-Murillo, Rivera-Alejo y Castizo-Robles, 2018). Dichos cambios afectan la fenología y distribución de las plantas por sus requerimientos específicos de luz y humedad para su desarrollo y sobrevivencia (Deschênes y Greenstone, 2004; Parmesan, 2006). Cuando los límites de tolerancia a estas variables se alteran, las especies no pueden establecerse, crecer o reproducirse (Begon, Townsend y Harper, 2006).

Para comprender los impactos del ambiente en la biodiversidad se han desarrollado una variedad de modelos que asocian variables bioclimáticas a los registros de presencia de las especies y asumen que, para algunas especies, el clima es uno de los factores más importantes en su distribución (Parmesan, 2006; Hof, 2010). Dichos modelos han resultado importantes herramientas que, apoyadas con los sistemas de información geográfica (SIG), han permitido modelar la distribución presente y futura de diversas especies y ecosistemas (Mateo, Felicísimo y Muñoz, 2011; Martínez-Meyer, Díaz-Porras, Townsend y Yáñez-Arenas, 2013; Merow, Smith, y Silander, 2013; Osorio-Olvera, Falconi y Soberón, 2016; Navarro-Martínez, Ellis, Hernández-Gómez, Romero-Montero y Sánchez-Sánchez, 2018). Algunos de estos modelos están basados en el concepto del nicho ecológico, que determina los límites de tolerancia de las especies a las variables ambientales más allá de los cuales estas no pueden sobrevivir, crecer o reproducirse (Illoldi-Rangel y Escalante, 2008; Dawson y Spannagle, 2009; Navarro-Martínez *et al.*, 2018). Adicionalmente, es posible incorporar las fluctuaciones en las variables climáticas y simular el efecto de cambios en las mismas (Magaña, Conde, Sánchez y Gay, 2003; Gómez-Díaz, Monterroso-Rivas y Tinoco-Rueda, 2007; Villamonte-Cuneo, 2018). Esto permite comprender las posibles respuestas de los bosques al cambio climático, reflejadas en los procesos ecológicos, la estructura, composición y distri-

bución de las especies (Soberón y Peterson, 2005; Bellard, Bertelsmeier, Leadley, Thuiller y Courchamp, 2012).

Investigaciones que emplean los modelos de nicho ecológico (MNE) para determinar la idoneidad del hábitat han sugerido que, en escenarios de cambio climático, las especies experimentarán reducción en su área de distribución. Esta problemática ha sido abordada en el área forestal (Gómez-Díaz *et al.*, 2007; Benito-Garzón, Sánchez de Dios y Sainz-Ollero, 2008; Benito-Garzón, Alía, Robson y Zavala, 2011; Benito-Garzón, Ruíz-Benito y Zavala, 2013; Gutiérrez y Trejo, 2014; Leguía, Locatelli e Imbach, 2009), agrícola (Ibáñez-Campos, 2011; Tinoco-Rueda, Gómez-Díaz y Monterroso-Rivas, 2011), de conservación de la biodiversidad (Romo, Sanabria y García-Barrios, 2013) y del impacto de especies invasoras (Peterson, 2003; Martínez-Meyer, Cuervo-Robayo y Ortiz-Haro, 2016); contribuyendo al entendimiento de la magnitud y dirección de los cambios provocados por el cambio climático (Guisan *et al.*, 2007). Lo anterior permite hacer recomendaciones a los responsables del manejo forestal a escala local y regional, en el mediano y largo plazo, promoviendo la conservación de las especies aprovechadas y sus hábitats (Navarro-Martínez *et al.*, 2018).

La caoba (*Swietenia macrophylla* King) es una especie maderable emblemática de las selvas del neotrópico (Snnok, 2000; Negreros-Castillo *et al.*, 2014). En México, esta especie tiene una larga historia de aprovechamiento que data de inicios del siglo XIX (Galletti, 1994; Navarro-Martínez, 2015). Debido a la intensa extracción selectiva de los individuos de mayor talla de esta especie, en los últimos años las poblaciones naturales con potencial comercial han sido consideradas prácticamente extintas (Patiño-Valera, 1997; Calvo y Rivera, 2000), motivo por el que, desde 2003 la especie ha sido incluida en el apéndice II de la Convención Sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (Cites) (Grogan y Barreto, 2005; Cites, 2003). Además, se estima que el área de distribución original de la caoba en Mesoamérica ha disminuido drásticamente. Se calcula que para este año México había perdido 76% de los bosques tropicales con caoba (Calvo y Rivera, 2000) y que para finales del siglo XX



solo se conservaba 36% de su área original. Sin embargo, algunos autores consideran que estas estimaciones son especulativas (Kometter *et al.*, 2004).

OBJETIVOS

Conocer el hábitat idóneo de *Swietenia macrophylla* King (caoba) en México y proyectar su distribución en dos escenarios futuros de cambio climático.

MATERIALES Y MÉTODOS

La especie

Swietenia macrophylla King (caoba) es un árbol con altura hasta de 70 m y diámetro a la altura del pecho hasta de 3.5 m, con contrafuertes de 2 m a 3 m de alto (Pennington y Sarukhán 2005), aunque en la actualidad es difícil encontrar en la selva individuos con dichas dimensiones (Navarro-Martínez, 2015). Se desarrolla en zonas con temperatura anual promedio igual o superior a 24 °C, precipitación anual entre 1000 mm y 2000 mm. También crece en zonas subtropicales, en altitudes que van desde el nivel del mar hasta 1500 m s.n.m.; se ha registrado que su mayor distribución se presenta entre los 391 m y 750 m s.n.m. Crece en diversos suelos, ricos y pobres en nutrientes; secos y bien drenados y con exceso de humedad; así como kársticos abundantes en calcio y magnesio (Juárez, Espinoza y Cedeño, 1989; Chávelas y Contreras, 1999; Morales-Ortiz y Herrera-Tuz, 2009; Negreros-Castillo *et al.*, 2014), pH de neutro a alcalino (entre 6.9 a 7.7) y ricos en materia orgánica (Cordero y Boshier, 2003).

Área de estudio

El área de estudio se definió con base en la distribución de la especie obtenida de los registros de presencia en la base de datos del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS) para el período 2009-2014, así como en las Provincias Biogeográficas de México propuestas por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio) (Espinosa-Organista, Ocegueda-Cruz, Aguilar-Zúñiga, Flores-Villela y Llorente-Bousquets, 2008; Morrone, 2019), organizadas en un arreglo jerárquico

y regionalizadas con base en la distribución de plantas (Rzedowski, 2006; Rzedowski y Reyna-Trujillo 1990), anfibios y reptiles (Casas-Andreu y Reyna-Trujillo 1990), mamíferos (Ramírez-Pulido y Castro-Campillo 1990), vegetación y rasgos morfotectónicos (Ferrusquía-Villafranca 1990) y distribución de las aves (Escalante, Navarro y Peterson, 1993). Se consideraron las siguientes provincias: 1. de Oaxaca, 2. Los Altos de Chiapas, 3. del Soconusco, 4. del Pacífico, 5. del Golfo de México, 6. Yucateca, 7. del Petén (Tabla 1).

Base de datos

Como insumo de datos principales se utilizó un total de 623 registros de presencia de caoba en donde se distribuye de manera natural en México, descartando 353 registros duplicados (más de un árbol en el sitio de muestreo). Cabe mencionar que en la base del INFyS no hubo registros fuera del área de distribución histórica conocida de *Swietenia macrophylla* (Pennington y Sarukhán, 2005; Negreros-Castillo *et al.*, 2014).

Variables ecológicas y bioclimáticas

Para el modelado de hábitat idóneo se utilizó el conjunto de variables bioclimáticas de condiciones presentes (1960-1990), 2050 (promedio de 2041 a 2060) y 2070 (promedio de 2061-2080) de *Worldclim* (s/f), con una resolución espacial de un kilómetro cuadrado (30 arc-segundos) y el *raster* de edafología obtenido de la página web de la Conabio, con una resolución espacial de 90 m² (3 arc-segundos).

El *raster* de edafología se reproyectó con los *raster* de las 19 variables bioclimáticas, de 90 m² a 1 km², para homologar sus parámetros de extensión y hacerlos compatibles entre sí, y con ello generar los modelos de distribución potencial. Para determinar el área de extensión de modelado (movilidad (M)) (Barve *et al.*, 2011), se sobrepusieron los puntos de registro de la especie con los polígonos de provincias biogeográficas, los *raster* de las 19 variables bioclimáticas y el de edafología para los tres escenarios y se generó un buffer de 5 km como zona de amortiguamiento (Soberón y Peterson, 2005).

TABLA 1. Principales características de las provincias biogeográficas en México. En paréntesis se indica el porcentaje del tipo de vegetación de cada provincia.

Provincia	Zona	Clima	Tipo de vegetación (%)
1. Oaxaca	Sierra Madre de Oaxaca Sierra de Zongolica, Ver.		Bosque Mesófilo de montaña (44)
			Selva perennifolia (17)
			Bosque de coníferas (15)
			Bosque de encinos (11)
			Selva caducifolia (10)
Matorral xerófito (3)			
2. Los Altos de Chiapas	Mesetas y serranías del N de Chiapas	Templado-húmedo	Bosque de coníferas (47)
	Sierra de Cuchumatanes (Guatemala)	1000 mm precipitación promedio anual	Bosque de encinos (21) Bosque Mesófilo de montaña (20)
3. Soconusco	Sierra Madre de Chiapas-Guatemala	+ 1500 mm precipitación promedio anual	Bosque de coníferas (35) Bosque Mesófilo de montaña (31) Selva alta perennifolia (25)
4. Pacífico	Río Piaxtla – Chiapas	Cálidos-subhúmedos 500-1500 mm Año ⁻¹ 0 m -400 m s.n.m.	Selva caducifolia (60)
5. Golfo de México	Río San Fernando – Río Candelaria	1000 mm – 2000 mm Precipitación promedio anual	Selvas alta y mediana perennifolias (57) Vegetación hidrófila (8)
6. Yucateca	Península de Yucatán	Tropical húmedo (95) semiárido (5)	Selva baja caducifolia (85)
7. Petén	SE Península de Yucatán – Petén (Guatemala) y Belice		Selva alta perennifolia (72)
	Sierra de los Cuchumatanes hasta la Bahía de Amatique		Selva baja espinosa (17)

Se utilizó la herramienta *Extract by mask* del menú *Spatial analyst tools* del programa ArcMap 10.4.1 para extraer de los *raster* de las 19 variables bioclimáticas las celdas que corresponden al área definida como máscara (México), con la opción *Environment Settings*.

Para evitar problemas de multicolinealidad y descartar las variables redundantes, se realizó un análisis de

correlación (Venette, 2017), eliminando 13 de ellas que presentaron una alta correlación ($r > 0.7$). De tal forma que las variables para generar el modelo fueron: Bio2 (oscilación diurna de la temperatura), Bio4 (temperatura estacional), Bio6 (temperatura mínima del mes más frío), Bio8 (temperatura media del trimestre más húmedo), Bio15



(estacionalidad de la precipitación), Bio18 (precipitación del trimestre más cálido) y edafología.

Idoneidad de hábitat

Escenario presente

El modelo de idoneidad de hábitat se obtuvo mediante el algoritmo *MaxEnt* (Máxima entropía, por sus siglas en inglés) (Phillips, Anderson y Schapire, 2006), este se basa en el concepto de nicho ecológico y ha sido ampliamente empleado para conocer la distribución potencial de diversas especies y ecosistemas. Se utilizaron 270 registros de presencia de caoba, la variable de edafología y las seis variables bioclimáticas seleccionadas.

Para generar el modelo de idoneidad se utilizó 80% de los registros de presencia de caoba seleccionados al azar, se establecieron los parámetros de modelado con un número máximo de 500 iteraciones y un límite de convergencia de 0.00001, un formato de salida lógico con valores de 0 (ausencia) y 1 (máxima idoneidad) (Alfaro-Reyna *et al.*, 2014). Para la generación del modelo en *MaxEnt* se utilizó 95% de los datos y solo 5% para probarlo. Se consideró un valor mínimo de 0.8 de la prueba de *Receiver Operating Characteristic* (ROC) para tomar como válido el modelo y se utilizó la prueba de *Jackknife* para medir la importancia de cada variable en el modelo (Lobo, Jiménez-Valverde y Real, 2007).

De manera adicional, se utilizó 20% de los registros de presencia para validar de manera independiente el modelo de salida con el programa *Partial Roc* (Osorio-Olvera, Barbe, Barbe, Soberón y Falconi, 2018). Se establecieron los parámetros en un valor de error de omisión aceptado de $E = 0.05$, 50% de datos al azar para cada submuestreo y 500 iteraciones para evaluar el área bajo la curva (AUC), donde la significancia se expresa como la razón entre el modelo predicho y el modelo aleatorio, cuyo valor debe ser mayor a 1, y se obtuvieron los valores estadísticos mínimo, máximo, media y desviación estándar, siendo todos los valores mayores o iguales a 1, lo que indica un buen ajuste del modelo de hábitat idóneo presente para *Swietenia macrophylla*.

Escenarios 2050 y 2070

Para la proyección de los escenarios futuros (2050 y 2070) se usaron los mismos registros de presencia de la especie (INPyS) y las mismas variables bioclimáticas que para el escenario presente. Además, se utilizaron el modelo de circulación general MRI-CGCM3 y las vías de concentración representativas (RCP, por sus siglas en inglés) 4.5 por el que asumen que las emisiones mundiales anuales de GEI (medidas en equivalentes de CO₂), alcanzan su punto máximo alrededor del año 2040, y luego disminuyen; lo que es más acorde con los escenarios futuros de proyección propuestos. A diferencia de la RCP 2.6 que no representa cambios significativos entre los escenarios, ya que asume que las emisiones anuales mundiales de GEI alcanzan su punto máximo entre 2010-2020 y luego disminuyen., las RCP 6 y 8.5 son escenarios más lejanos en el tiempo (Hijmans, Cameron, Parra, Jones y Jarvis, 2005).

La proyección espacial de los escenarios presente, 2050 y 2070, se visualizó con el programa *ArxMap* 10.4.1 y se utilizaron los valores de máximas sensibilidad y especificidad de 0.254, 0.238 y 0.275 (presente, 2050 y 2070, respectivamente), como umbral para reclasificarlos con valores de 0 (ausencia) y 1 (presencia). A partir de la reclasificación se obtuvo un mapa de presencia, se extrajo el número de píxeles con presencia a escala de país y estado, se convirtieron a número de hectáreas para comparar los cambios en las superficies de un escenario con respecto a otro.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Escenario presente

El modelo generado con *MaxEnt* sugiere que las variables con mayor contribución a la idoneidad del hábitat de la caoba en México son: la edafología (32.4%), la estacionalidad de la precipitación (Bio15, 14.7%) y la oscilación diurna de la temperatura (Bio2, 8.5%) (Tabla 2). Estos resultados parecen razonables cuando se sabe que, de manera natural *Swietenia macrophylla* presenta una gran plasticidad para adaptarse a diversas condiciones climáticas y edáficas (Mayhew y Newton, 1998); aunque prefiere los suelos profundos y bien drenados (Miranda, 1978), de

origen calizo y aluvial, localmente conocidos como tzek'kel (litosol y rendzina), ak'alche (gleysol), ya'ax hom (vertisol) (Juárez, 1988; Negreros-Castillo y Mize 2013), abundantes en la península de Yucatán y, donde la especie encuentra su límite más norteño (Navarro *et al.*, 2018) en el mundo.

Además, de acuerdo con el modelo, la superficie de área idónea para *S. macrophylla* en México fue de 8 935 108.92 ha, incluyendo los estados de Campeche, Chiapas, Michoacán, Oaxaca, Puebla, Quintana Roo, Tabasco, Veracruz y Yucatán (Fig. 1A). De estos, Campeche y Quintana Roo tuvieron la mayor proporción de hábitat idóneo con 41.0% y 32%, respectivamente (Tabla 3). Estos valores corresponden con la distribución natural de la caoba en México y los hallazgos de Navarro-Martínez *et al.* (2018), quienes encontraron que en la península de Yucatán aún existe una amplia zona en la que la caoba encuentra las condiciones adecuadas para su desarrollo, sobrevivencia y reproducción, aunque en bajas densidades. Para el caso de los estados fuera de la península de Yucatán, particularmente, Puebla y Guerrero, cabe mencionar que no existen registros históricos ni actuales de presencia de *Swietenia macrophylla*. Sin embargo, hay que tomar en cuenta que los modelos como el que ha sido usado en este estudio estiman la idoneidad de hábitat aún cuando la especie no necesariamente se encuentra presente (Navarro-Martínez, 2015).

En la actualidad, los registros de presencia de caoba en el estado de Yucatán son prácticamente inexistentes (INFyS, 20004-2007 y 2009-2014), pero el modelo predice

una pequeña área idónea hacia el noreste en el área natural protegida de Ría Celestún, esto coincide con los modelos de distribución potencial de caoba desarrollado por Argüelles-Suárez (1999), Alfaro-Reyna *et al.* (2014) y Navarro-Martínez *et al.* (2018), quienes encontraron que existe una pequeña población de *S. macrophylla* dentro de la reserva. Asimismo, el modelo proyectó la presencia de condiciones de sitio adecuadas para la caoba hacia la zona central de la península de Yucatán, en la región Calakmul-Balam Ka'ax, donde convergen los estados de Quintana Roo y Campeche en el Corredor Biológico Mesoamericano-México (CBM-M), que es un área de gran importancia nacional e internacional para la conservación de los ecosistemas tropicales mexicanos y su biodiversidad (Conabio, 2018).

El modelo estudiado sugiere que, en Quintana Roo, la distribución alcanza los límites en el municipio de Lázaro Cárdenas, lo que coincide con lo señalado por Synnott (2009) para Kantunilkín (inventario de 1996), El Naranjal (2005) y Héroe de Nacozari (2004). Lo anterior corresponde con la distribución actual de la especie (INFyS, 2014). Además, son las selvas de Quintana Roo en las que se encuentran las poblaciones de *Swietenia macrophylla* más conservadas en México, a pesar de la larga historia de aprovechamiento maderable y la frecuente incidencia de perturbaciones naturales, factores determinantes en la dinámica de las selvas quintanarroenses (Vester y Navarro-Martínez, 2005).

TABLA 2. Variables bioclimáticas consideradas para la proyección de los períodos de condiciones presentes (1960-1990) y futuros (2050, promedio de 2041 a 2060; y 2070, promedio de 2061-2080), y edafología.

Clave	Variable	Contribución porcentual	Importancia	Fuente
Edafología		32.4	7.3	Conabio
BIO15	Estacionalidad de la precipitación.	14.7	8.7	Worldclim
BIO2	Oscilación diurna de la temperatura.	8.5	17.1	Worldclim
BIO4	Temperatura estacional.	8.2	26.0	Worldclim
BIO6	Temperatura mínima del mes más frío.	4.5	16.7	Worldclim
BIO8	Temperatura media del trimestre más húmedo.	3.3	20.3	Worldclim
BIO18	Precipitación del trimestre más cálido.	0.4	1.4	Worldclim

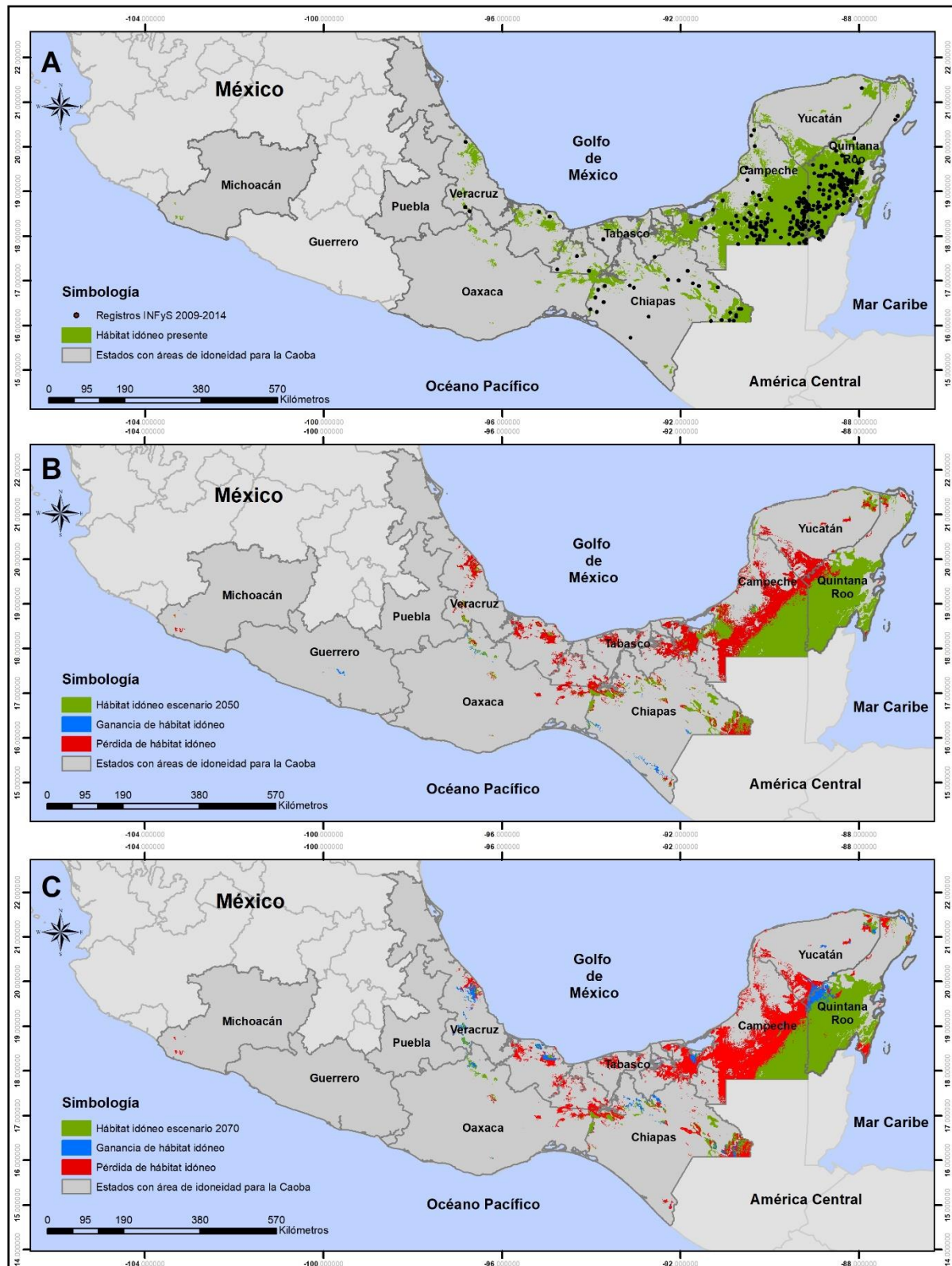


FIGURA 1. Mapa de idoneidad de *Sietenia macrophylla* King en México: (A) escenario presente (1960-1990), (B) escenario 2050 (promedio de 2041 a 2060) y (C) escenario 2070 (promedio de 2061-2080).

Los puntos indican los registros de presencia del INFYS 2009-2014.

TABLA 3. Superficies estimadas en porcentaje y ha de *Swietenia macrophylla* King, en escenarios de hábitat idóneo presente y futuros (2050 y 2070) en México.

Estado	Escenario presente		Escenario 2050		Escenario 2070	
	%	ha	%	ha	%	ha
Campeche	41.04	3 666 743.55	37.16	1 998 956.88	24.96	1 169 863.74
Quintana Roo	32.01	2 860 051.32	48.65	2 617 100.91	56.89	2 665 967.76
Chiapas	8.71	778 496.49	9.54	513 404.64	8.97	420 341.40
Veracruz	5.85	523 005.03	0.91	49 212.81	4.24	198 494.55
Yucatán	5.49	490 311.81	1.82	98 079.66	2.75	128 783.61
Tabasco	4.63	413 768.16	0.09	4 843.44	0.10	4 843.44
Oaxaca	2.14	190 883.43	1.56	84 760.20	2.05	95 917.41
Michoacán	0.13	11 589.66	0.03	1 902.78	0.01	345.96
Puebla	0.00	259.47	0.01	518.94	0.03	1 297.35
Guerrero			0.20	10 551.78	0.00	86.49
México	100.00	8 935 108.92	100.0	5 379 332.04	100.0	4 685 941.71

TABLA 4. Estadísticos de *Partial ROC* para estimar la diferencia entre el modelo predicho y el modelo aleatorio.

Mínimo	1.60
Máximo	1.95
Media	1.82
Desviación estándar	0.06

De acuerdo con la prueba de razón de significancia, el modelo de hábitat idóneo para *Swietenia macrophylla* presenta un buen ajuste a los registros de la especie probados ya que las variables estadísticas (mínimo, máximo y media) presentaron valores mayores o iguales a 1 (Tabla 4). Estos resultados coinciden con el hallazgo de Navarro-Martínez *et al.*, (2018) quienes encontraron que *MaxEnt* resulta adecuado para inferir cuáles son los requerimientos ecológicos de la especie.

Escenario futuro 2050

Para el escenario 2050, se identificó una superficie de hábitat idóneo de 5 379 332 ha, lo que representa una pérdida de hábitat de 39.79% respecto al escenario presente (Fig. 1B). Aunque en la actualidad se carece de registros de

presencia de *Swietenia macrophylla* en los estados Guerrero y Puebla, el modelo predice que para 2050 se duplica el área de idoneidad respecto al escenario presente para el primer estado y, para Guerrero proyecta una superficie de 10 552 ha. Los estados de Tabasco y Veracruz presentan la mayor pérdida de hábitat idóneo con 98.8% y 90.6%; mientras que la disminución en la proporción de área idónea para Yucatán, Campeche y Chiapas es de 80.0%, 45.5% y 34.0%, respectivamente. Esta reducción probablemente se debe a que las emisiones de gases efecto invernadero alcanzan su punto máximo en el año 2040; además de que en los últimos 50 años ha habido una importante expansión de la superficie ganadera y agrícola en los estados de Campeche y Yucatán (Ellis *et al.* 2017); mientras que en el estado de Chiapas el área de distribución natural de la caoba también ha sido ha sufrido una importante pérdida de superficie forestal en las últimas décadas por actividades humanas (Cayuela, 2006; Covaleda *et al.*, 2014). Sin embargo, para este periodo, el estado de Campeche aún conserva 37% de hábitat nacional idóneo; mientras que para Quintana Roo, el modelo predice una restricción del área de distribución significativa, pero mantiene 48.6% del hábitat idóneo para la caoba (Tabla 3).



Escenario futuro 2070

En el escenario 2070 se identificó una superficie de hábitat idóneo de 4 685 942 ha para *Swietenia macrophylla* en México, lo que representa una pérdida de 47.60% respecto al escenario presente y de 12.89% del escenario 2050. Para los estados de Puebla, Veracruz, Yucatán y Oaxaca, el modelo sugiere un incremento en las áreas de idoneidad de 303%, 150%, 31% y 13% respectivamente (Tabla 3). El modelo predice que 90.8% del hábitat idóneo se concentrará principalmente en los estados de Quintana Roo, Campeche y Chiapas, con una proporción de 56.9%, 25.0% y 9.0%, respectivamente (Tabla 4); esto indica que Quintana Roo representará para esta fecha un área relevante para la preservación de la caoba en México (Fig. 1C). La disminución del hábitat idóneo para este año 2070 se explica debido a que, aunque las condiciones climáticas alcanzarán su punto máximo de incremento en los GEI en el año 2040, irán disminuyendo hacia el año 2070 (Hijmans *et al.*, 2005).

Las variables explicativas del modelo responden a la ecología descrita para la especie, la que indican que la caoba se desarrolla mejor en suelos leptosoles y redzinas (Negreros-Castillo *et al.*, 2014), en sitios con precipitación anual promedio de 1388 mm (Vester y Navarro, 2007) y temperatura mínima promedio del mes más frío de 16.4 °C (Cordero y Boshier, 2003), lo que para este caso coincide con las selvas mediana y baja subperennifolia y alta subperennifolia, principales hábitat de esta importante especie (Vester y Navarro, 2007; INFyS, 2009-2014).

La idoneidad de hábitat para el año 2050 disminuye en 45%, probablemente debido a la reducción de la precipitación y el aumento de la temperatura esperada para esta fecha. Aunque esta pérdida de hábitat idóneo se podría incrementar si se consideran las estimaciones de pérdida significativa del área de distribución natural de la caoba propuesta por Calvo y Rivera (2000). Por ejemplo, para México en la década de 1990, se estimó una pérdida de 76% de los bosques tropicales con caoba y para finales del siglo XX solo se esperaba contar con 36% del área original. Para este periodo, el modelo aquí presentado proyecta una reducción de 32% de hábitat idóneo para la caoba en la

península de Yucatán, contrario al estudio realizado por Garza-López *et al.* (2016), quienes sugieren que se reducirá en 60% para el 2030, pero la mayor proporción de hábitat idóneo se encontrará en la zona sur del estado de Campeche, especialmente en la reserva de la biosfera de Calakmul con una mayor pérdida en Quintana Roo. Lo anterior puede explicarse por los patrones climáticos encontrados por Márdero-Jiménez (2011), que muestran una fuerte disminución en la precipitación promedio en la zona, con el incremento de sequías y la mayor concentración de lluvias en la zona centro-sur de Quintana Roo.

Adicionalmente, hay que considerar que en la península de Yucatán, particularmente en Quintana Roo y Campeche, se conservan las mejores poblaciones de caoba, a pesar de la larga historia de aprovechamiento -de alrededor de 300 años-, las que siguen siendo una importante fuente de ingresos económicos para las comunidades de origen maya (Hammond, 1982; Pennington y Sarukhán, 2005; Rancancoj, 2006; Navarro-Martínez *et al.*, 2018), que a través de la práctica tradicional de roza-tumba-quema (RTQ) realizan un manejo sustentable de la selva, favoreciendo su regeneración (Negreros-Castillo, Snook y Mize, 2003; Negreros-Castillo *et al.*, 2018). Son estas razones un factor importante para fomentar el manejo sostenible de la especie y asegurar su permanencia en el corto, mediano y largo plazo.

CONCLUSIONES

En la actualidad, el área de hábitat idóneo para la caoba en México cubre una superficie de 8 935 109 ha que disminuye a 5 379 332 ha para el escenario del año 2050 y a 4 685 942 ha para 2070, lo que representa una pérdida de hábitat del 39.8% y 47.6% en relación con el escenario presente, respectivamente. La tendencia general entre los escenarios presente, 2050 y 2070 es una disminución de hábitat. Sin embargo, para el escenario 2070, para algunos estados como Quintana Roo, Yucatán, Oaxaca, Veracruz y Puebla, el modelo predice un aumento en la superficie de hábitat idóneo. Lo anterior probablemente es debido a que en el año 2040 se alcanza el punto máximo de gases efecto

invernadero, que resulta en una disminución de hábitats idóneos para el escenario 2050 y una ganancia para el escenario 2070. En los tres escenarios, las mejores condiciones de hábitat para la caoba permanecerán en la península de Yucatán, principalmente en los estados de Campeche y Quintana Roo. Quintana Roo conservará 50% del hábitat idóneo para los escenarios 2050 y 2070. Esta región representa uno de los relictos continuos de vegetación tropical en México, lo cual implica un reto para su permanencia, dada la presión sobre los recursos naturales por el cambio de uso de suelo, la deforestación y los incendios forestales. Los resultados de este trabajo representan una oportunidad para dirigir el manejo de las poblaciones naturales de *S. macrophylla* y la restauración de sitios transformados en el área de distribución natural de esta importante especie para comunidades y ejidos en la región.

RECONOCIMIENTOS

A la beca 278323 otorgada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología para el desarrollo de la presente investigación. A la Comisión Nacional Forestal por los registros de caoba otorgados para la realización de la presente investigación.

REFERENCIAS

- Alfaro-Reyna, T., Rodríguez-Santiago, B., Maya-Martínez, A., García-Cuevas, X., Lomas-Barrié, C. T., Ramírez-Magil, G. M., & Murrieta-Bautista, J. L. (2014). *Árboles de importancia económica para la Península de Yucatán*. Quintana Roo, México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (Inifap)-Centro de Investigación Regional Sureste (Cirse).
- Argüelles-Suárez, L. A. (1999). *Diagnóstico de las poblaciones de caoba en México*. Memorias de Taller Regional. Guatemala: PROARCAS/CAPAS.
- Barve, N., Barve, V., Jiménez-Valverde, A., Lira-Noriega, A., Maher, S. P., Peterson, A. T., & Villalobos, F. (2011). The crucial role of the accessible area in ecological niche modeling and species distribution modeling. *Ecological Modelling*, 222(11), 1810-1819. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2011.02.011
- Begon, M., Townsend, C. R., & Harper, J. L. (2006). *Ecology: from individuals to ecosystems*. United States of America: Blackwell Publishing Ltd.
- Bellard, C., Bertelsmeier, C., Leadley, P., Thuiller, W., & Courchamp, F. (2012). Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology Letter*, 15(4), 365-377. doi: 10.1111/j.1461-0248.2011.01736.x
- Benito-Garzón, M., Sánchez-de Dios, R., & Sainz-Ollero, H. (2008). Effects of climate change on the distribution of Iberian tree species. *Applied Vegetation Science*, 11(2), 169-178. doi: 10.3170/2008-7-18348
- Benito-Garzón, M., Alía R., Robson, T. M., & Zavala, M. A. (2011). Intra-specific variability and plasticity influence potential tree species distributions under climate change. *Global Ecology and Biogeography*, 20, 766-778. doi: 10.1111/j.1466-8238.2010.00646.x
- Benito-Garzón, M., Ruiz-Benito, P., & Zavala, M. A. (2013). Interspecific inferences in tree growth and mortality responses to environmental drivers determine potential species distributional limits in Iberian forests. *Global Ecology and Biogeography*, 22, 1141-1151. doi: 10.1111/geb.12075
- Boyd, R. & Ibarraán, M. A. (2008). Extreme events and adaptation: an exploratory analysis of drought in Mexico. In *Environmental and Development Economics*, 14(3). doi: 10.1017/S1355770X08004956
- Calvo, J. & Rivera H. (2000). *El estado de la caoba en Mesoamérica*. Memorias de Taller Regional. Guatemala: PROARCAS/CAPAS.
- Casas-Andreu, G. & Reyna-Trujillo, T. (1990). Provincias herpetofaunísticas. Mapa IV.8.6. En *Atlas Nacional de México*, México: Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
- Cayuela, L. (2006). Deforestación y fragmentación de bosques tropicales montanos en los Altos de Chiapas, México. Efectos sobre la diversidad de árboles. *Ecosistemas*, 15(3), 191-196.
- Chávelas P., J. & Contreras, G. J. A. (1999). *Fenología de diez especies forestales del estado de Quintana Roo*, Chetumal, Quintana Roo: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (Inifap).
- Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres [Cites] (2003). *Segunda reunión del Grupo de Trabajo sobre Caoba (Swietenia macrophylla)*. Informe Nacional México. Recuperado de <https://docplayer.es/25636882-Segunda-reunion-del-grupo-de-trabajo-sobre-caoba.html>
- Cordero, J. & Boshier, D. H. (eds.). (2003). *Árboles de Centroamérica: un manual para extensionistas*. Turrialba, Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de Investigación y la Enseñanza (Catie).
- Covalada, S., Aguilar, S., Ranero, A., Marín, I., & Paz, F. (2014). *Diagnóstico sobre determinantes de deforestación en Chiapas*. México: USAID/Alianza México REDD+.



- Deschênes, O. & Greenstone, M. (2011). Climate change, mortality, and adaptation: evidence from annual fluctuations in weather in the US. *Applied Economics*, 3(4), 152-185. doi: 10.1257/app.3.4.152
- Ellis, E. A., Hernández-Gómez, I. U., Romero-Montero, J. A. (2017). Processes and causes of forest cover change in the Yucatan Peninsula. *Ecosistemas*, 26(1), 101-111. doi: 10.7818/ECOS.2017.26-1.16
- Escalante, P., Navarro, A. G., & Peterson, A. T. (1993). A geographic, ecological, and historical analysis of land birds diversity in Mexico. En T.P. Ramamoorthy, R. Bye & A. Lot (Eds.), *Biological Diversity of Mexico: Origins and Distribution* (pp. 281-307). Nueva York: Oxford University Press.
- Espinosa-Organista, D., Ocegueda-Cruz, S., Aguilar-Zúñiga, C., Flores-Villela, O., & Llorente-Bousquets, J. (2008). El conocimiento biogeográfico de las especies y su regionalización natural. En *Capital natural de México* (33-65). México: Conabio.
- Ferrusquía-Villafranca, I. (1990). Provincias biogeográficas con base en rasgos morfotectónicos. Mapa IV.8.10. En *Atlas Nacional de México*. México: Instituto de Geografía, UNAM.
- Galletti, H. (1994). Actividades forestales y su desarrollo histórico. Estudio integral de la frontera México-Belice. *Análisis socioeconómico* (131-198). Chetumal, Quintana Roo: Centro de Investigaciones de Quintana Roo.
- Garza-López, M., Ortega-Rodríguez, J. M., Zamudio-Sánchez, F. J., López-Toledo, J. F., Domínguez-Álvarez, F. A., & Sáenz-Romero, C. (2016). Calakmul como refugio de *Svietenia macrophylla* King ante el cambio climático. *Botanical Sciences*, 94(1), 43-50. doi: 10.17129/botsci.500
- Gómez-Díaz, J. D., Monterroso-Rivas, A. I., & Tinoco-Rueda, J. A. (2007). Distribución del cedro rojo (*Cedrela odorata* L.) en el estado de Hidalgo, bajo condiciones actuales y escenarios de cambio climático. *Madera y Bosques*, 13(2), 29-49. doi: 10.21829/myb.2007.1321227
- Grogan, J. & Barreto, P. (2005). Big-leaf mahogany on CITES Appendix II: big challenge, big opportunity. *Conservation Biology*, 19(3), 973-976.
- Guisan, A., Zimmermann, N. E., Elith, J., Graham, C. H., Phillips, S., & Peterson, A. T. (2007). What the matter for predicting the occurrences of trees: techniques, data or species' characteristics? *Ecological Monographs*, 77(4), 615-630.
- Gutiérrez, E. & Trejo, I. (2014). Efecto del cambio climático en la distribución potencial de cinco especies arbóreas de bosque templado en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85, 179-188. doi: 10.7550/rmb.37737
- Hammond, N. (1982). *Ancient Maya civilization*. New Brunswick, New Jersey, USA: Rutgers University Press.
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., & Jarvis, A. (2005). Very high-resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25, 1965-1978. doi: 10.1002/joc.1276
- Hof, C. (2010). *Species distributions and climate change: current patterns and future scenarios for biodiversity*. Dinamarca: Science University of Copenhagen, Department of Biology Faculty.
- Ibáñez-Campos, D. (2011). Efectos del cambio climático en las actividades agrarias y forestales. GeoGraphos. *Revista Digital para Estudiantes de Geografía y Ciencias Sociales*, 2(11), 1-27. Recuperado de <https://geographos.ua.es/article/view/2011-v2-efectos-del-cambio-climatico-en-las-actividades-agrarias-y-forestales>
- Illoldi-Rangel, E. & Escalante, T. (2008). De los modelos de nicho ecológico a las áreas de distribución geográfica. *Biogeografía*, 3, 7-12.
- Juárez, B. C. (1988). *Análisis del incremento periódico de caoba (Svietenia macrophylla King) y cedro (Cedrela odorata L.) en un relicto de selva en el estado de Campeche*. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Juárez, G., V. A., Espinoza, B., & Cedeño, S. O. (1989). Observaciones fenológicas en 70 especies forestales tropicales y su importancia en la producción. En Memoria de *Congreso Forestal Mexicano* (874-882). Toluca, Edo. México.
- Kometter, R. F., Martinez, M., Blundell, A. G., Gullison, R. E., Steininger, M. K., & Rice, R. E. (2004). Impacts of unsustainable mahogany logging in Bolivia and Peru. *Ecology and Society*, 9(1), 1-12. Recuperado de <http://www.ecologyandsociety.org/vol9/iss1/art12/>
- Leguía, E. J., Locatelli, B., & Imbach, P. (2009). Impacto del cambio climático en plantaciones forestales en Centroamérica. *Recursos Naturales y Ambiente* 56-57, 150-159. Recuperado de http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/11554/6367/1/Impacto_del_cambio_climatico_en_plantaciones_forestales_en_Centroamerica.pdf
- Lobo, J. M., Jiménez-Valverde, A., & Real, R. (2007). AUC: a misleading measure of the performance of predictive distribution models. *Global Ecology and Biogeography*, 17(2), 145-151. doi: 10.1111/j.1466-8238.2007.00358.x
- Magaña, V., Conde, C., Sánchez, O., & Gay, C. (2003). Evaluación de escenarios regionales de clima actual y de cambio climático futuro para México. En C. Gay (Ed.). *México: Una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México* (pp. 1-18). México: Instituto Nacional de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México.

- Márdero-Jiménez, S. S. (2011). *Secuías y efectos en las prácticas agrícolas de familias campesinas del Sur de la Península de Yucatán*. Tesis de Maestría, El Colegio de la Frontera Sur. Chetumal, Quintana Roo, México.
- Martín-Murillo, L., Rivera-Alejo, J., & Castizo-Robles, R. (2018). *Cambio climático y desarrollo sostenible en Iberoamérica*. España: Diputación de Huelva.
- Martínez-Meyer, E., Díaz-Porras, D., Townsend, P. y Yáñez-Arenas, C. (2013). Ecological niche structure and range wide abundance patterns of species. *Biology Letters*, 9, 1–5. doi: 10.1098/rsbl.2012.0637
- Martínez-Meyer, E., Cuervo-Robayo, A. P., & Ortiz-Haro, G. A. (2016). *Modelación de la distribución potencial actual y futura de las especies invasoras de mayor riesgo para México*. México: Conabio-GEF-PNUD.
- Mateo, R., Felicísimo, A., & Muñoz J. (2011). Modelos de distribución de especies: Una revisión sintética. *Revista chilena de historia natural*, 84, 217–240. doi: 10.4067/S0716-078X2011000200008
- Mayhew, J. E. & Newton, A. C. (1998). *The silviculture of mahogany*. London, UK: Wallingford, Institute of Ecology and Research Management, University of Edinburgh.
- Merow, C. M. J., Smith, J. A., & Silander, J. R. (2013). A practical guide to MaxEnt for modeling species 'distribution: what it does, and why inputs and settings matter. *Ecography*, 36, 1058–1069. doi: 10.1111/j.1600-0587.2013.07872.x
- Miranda, F. (1978). *Vegetación de la Península Yucateca*. México: Colegio de Postgraduados.
- Morales-Ortiz, E. R. & Herrera-Tuz, L. G. (2009). *Cedro (Cedrela odorata L.) protocolo para su colecta, beneficio y almacenaje*. México (pp. 1-23). México: Comisión Nacional Forestal (Conafor).
- Morrone, J. J. (2019). Regionalización biogeográfica y evolución biótica de México: encrucijada de la biodiversidad del Nuevo Mundo. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 90, 1-68. doi: 10.22201/ib.20078706e.2019.90.2980
- Navarro-Martínez, M. A. (2015). *Diagnóstico del estado actual de Swietenia macrophylla King (caoba) en los bosques manejados de Quintana Roo, México: perspectivas para su manejo*. Tesis de doctorado. Universidad Veracruzana, Xalapa-Enríquez, Veracruz, México.
- Navarro-Martínez, A., Ellis, E. A., Hernández-Gómez, I., Romero-Montero, J. A., & Sánchez-Sánchez, O. (2018). Distribution and abundance of big-leaf mahogany (*Swietenia macrophylla*) on the Yucatan Peninsula, Mexico. *Tropical Conservation Science*, 11, 1-17. doi: 10.1177/1940082918766875
- Negreros-Castillo, P., Snook, L. K., & Mize, C. (2003). Regenerating mahogany (*Swietenia macrophylla*) from seed in Quintana Roo, Mexico: the effects of sowing methods and clearing treatment. *Forest Ecology and Management*, 183, 351-362. doi: 10.1016/S0378-1127(03)00143-9
- Negreros-Castillo, P. & Mize, C. W. (2013). Soil-site preferences for mahogany (*Swietenia macrophylla* King) in the Yucatan Peninsula. *New Forest*, 44(1), 85-99. doi: 10.1007/s11056-011-9303-7
- Negreros-Castillo, P., Cámara-Cabrales, L., Devall, M. S., Fajvan, M. A., Mendoza-Briseño, M. A., Mize, C. W., & Navarro-Martínez, A. (2014). *Silviculture of the Mahogany forest of Quintana Roo, Mexico, Criteria and recommendations*. México: Comisión Nacional Forestal (Conafor).
- Negreros-Castillo, P., Martínez-Salazar, I., Álvarez-Aquino, C., Navarro-Martínez, A., Mize, C. W. (2018). Survival and growth of *Swietenia macrophylla* seedlings from seeds sown into slashand burn fields in Quintana Roo, Mexico. *Bois et Forêts des Tropiques*, 337, 17-26. doi: 10.19182/bft2018.337.a31628
- Osorio-Olvera, L. A., Falconi, M. y Soberón, J. (2016). Sobre la relación entre idoneidad del hábitat y la abundancia poblacional bajo diferentes escenarios de dispersión. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 87, 1080–1088. doi: 10.1016/j.rmb.2016.07.001
- Osorio-Olvera, L., Barve, V., Barve, N., Soberón, J., & Falconi, M. (2018). Ntbox: From getting biodiversity data to evaluating species distribution models in a friendly GUI environment. R package version 0.2.5.4. <https://github.com/luismurao/ntbox>
- Parmesan, C. (2006). Ecological and Evolutionary Responses to Recent Climate Change. *Annual Review Ecological Evolution Systems*, 37, 637–669. doi: 10.1146/annurev.ecolsys.37.091305.110100
- Patiño-Valera, F. (1997). *Recursos genéticos de Swietenia y Cedrela en los neotrópicos: Propuesta para acciones coordinadas*. Roma, Italia: Departamento de Montes, FAO.
- Pennington, T. D. & Sarukhán K., J. (2005). *Árboles tropicales de México. Manual para la identificación de las principales especies*. México: Ediciones Científicas Universitarias, UNAM-FCE.
- Peterson, A. T. (2003). Predicting the geography of species' invasions via ecological niche modeling. *Quarterly Review of Biology*, 78, 419-433. doi: 10.1086/378926
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190, 231–259. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026
- Quesada-Quirós, M., Acosta-Vargas, L. G., Arias-Aguilar, D., & Rodríguez-González, A. (2017). Modelación de nichos ecológicos basado en tres escenarios de cambio climático para cinco especies



- de plantas en zonas altas de Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 14(34), 1-12.
- Ramírez-Pulido, J. & Castro-Campillo, A. (1990). Provincias mastofaunísticas 1:4000000 Mapa IV.8.8A. *Atlas Nacional de México*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Rancoj, V. M. (2006). *Socioeconomía maya precolonial*. Guatemala: Cholsamaj.
- 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). *Revista de Lepidopterología*, 41(162), 267-286.
- Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México*. México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Rzedowski, J., & Reyna-Trujillo, T. (1990). Provincias florísticas. Mapa IV.8.3. En *Atlas Nacional de México*, México: Instituto de Geografía, UNAM.
- Snook, L. K. (2000). Regeneración y crecimiento de la caoba (*Swietenia macrophylla*) en las selvas naturales de Quintana Roo, México. *Revista Ciencia Forestal en México*, 25(87), 57-96.
- Soberón, J y Peterson, A. T. (2005). Interpretation of models fundamental ecological niches and species distribution areas. *Biodiversity Informatics*, 2, 1-10.
- Synnott, T. J. (2009). *La caoba en la península de Yucatán: ecología y regeneración*. México: Comisión Nacional para el Uso del Conocimiento y la Biodiversidad. Corredor Biológico Mesoamericano-México.
- Tinoco-Rueda, J. A., Gómez-Díaz J. D., & Monterroso-Rivas, A. I. (2011). Efectos del cambio climático en la distribución potencial del maíz en el estado de jalisco, México. *Terra Latinoamericana*, 29(2), 161-168.
- Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57321257006>
- Useros-Fernández, J. L. (2013). El cambio climático: sus causa y efectos medioambientales. *Anales de la Real Academia de Medicina y Cirugía de Valladolid*, 50, 71-98.
- Venette, R. C. (2017). Análisis del clima para evaluar los riesgos de los insectos forestales invasores: correspondencia simple con modelos avanzados. *Current Forestry Report*, 3, 255-268. doi: 10.1007/s40725-017-0061-4
- Vester, H. F. M. & Navarro-Martínez, M. A. 2005. Ecological issues in community tropical forest management in Quintana Roo, Mexico. En: Bray D.B., Merino Pérez L., Barry D. (Eds.). 2005. *The community forests of Mexico. Managing for sustainable landscapes*. Austin USA: Texas University Press.
- Vester, H. F. M & Navarro-Martínez, M. A. (2007). *Árboles maderables de Quintana Roo*. Quintana Roo, México: Coqcyt/Conabio/Ecosur.
- WorldClim (s/f). *Global climate and weather data*. Recuperado de <http://www.worldclim.org>
- Villamonte-Cuneco, G. O. (2018). *Modelamiento del efecto del cambio climático en el nicho ecológico fundamental de especies de podocarpáceas peruanas en Sudamérica*. Tesis de Licenciatura en Biología, Universidad Ricardo Palma. Lima Perú.

Manuscrito recibido el 08 de mayo de 2019

Aceptado el 4 de abril de 2020

Publicado el 28 de octubre de 2020

Este documento se debe citar como:

Ramírez M., G., Botello. F., & Navarro-Martínez, A. (2020). Idoneidad de hábitat para *Swietenia macrophylla* en escenarios de cambio climático en México. *Madera y Bosques*, 26(3), e2631954. doi: 10.21829/myb.2020.2631954



Madera y Bosques por Instituto de Ecología, A.C. se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercialCompartirIgual 4.0 Internacional.