

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES

**EL CENTRO DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN, MÉXICO, COMO
REFUGIO DE DOS ESPECIES FORESTALES ANTE LOS EFECTOS DEL
CAMBIO CLIMÁTICO**

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

PRESENTA:

MIRIAM GARZA LÓPEZ



DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
CIRCULO DE DOMINIOS PROFESIONALES

CHAPINGO, ESTADO DE MÉXICO, JUNIO DE 2015



Tesis realizada por **Miriam Garza López** bajo la dirección del comité asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS, EN CIENCIAS FORESTALES

DIRECTOR: _____

DR. FRANCISCO JOSÉ ZAMUDIO SÁNCHEZ

CODIRECTOR: _____

DR. CUAUHTÉMOC SÁENZ ROMERO

ASESOR: _____

DR. FRANCISCO ALBERTO DOMÍNGUEZ ALVAREZ

ASESOR: _____

M.C. JOSÉ FRANCISCO LÓPEZ TOLEDO

DEDICATORIA

A mi familia

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo, por el inmenso conocimiento académico y personal brindado en solo dos años

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para realizar los estudios de posgrado.

A los miembros del comité por sus valiosos comentarios y observaciones

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por la oportunidad de realizar la estancia académica, en especial al Dr. Juan Manuel Ortega y al Dr. Cuauhtémoc Sáenz, por el valioso conocimiento proporcionado durante la estancia.

A los maestros del posgrado y externos, por el conocimiento brindado

A Salvador Esparza y Álvaro Prudente por su apoyo con los SIGs.

A mis compañeros de generación, Marcela, Jovany, Paniagua, Andrey y Jaqueline, por ser mi familia durante la maestría.

A mis compañeros y amigos por hacer única las vivencias de dos años y medio, Lupita, Cesar, Dany, Rolas, Nemo, Ernesto, Vero, Karmen, Rodrigo, Oscar, Iván y Álvaro.

DATOS BIOGRÁFICOS

Miriam Garza López estudió Ingeniero en Manejo de Recursos Naturales en la Universidad Autónoma de Nuevo León, egresó en el año 2011. Posteriormente, trabajo un año en la Universidad Autónoma de Querétaro en proyectos de investigación. Estudió la Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales en la Universidad Autónoma Chapingo de enero de 2013 a junio de 2015.

EL CENTRO DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN, MÉXICO, COMO REFUGIO DE DOS ESPECIES FORESTALES ANTE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

THE CENTRE OF PENINSULA DE YUCATAN, MEXICO, AS REFUGE OF TWO FOREST SPECIES IN THE FACE OF CLIMATE CHANGE

RESUMEN

El modelado del hábitat climático propicio para la distribución potencial de especies es una herramienta poderosa para proyectar los impactos del cambio climático y sugerir medidas de manejo que permitan aminorar sus efectos negativos. Los objetivos del presente trabajo fueron: 1) determinar la distribución potencial del hábitat climático propicio para *Swietenia macrophylla* King y *Lysiloma latisiliquum* (L.) Benth. principalmente para la Península de Yucatán, México y para Guatemala, Belice y este de Honduras, 2) sugerir medidas de manejo para reacoplar las poblaciones contemporáneas al clima que les será propicio en la década centrada en el año 2030. Se obtuvieron registros geográficos para *S. macrophylla* y *L. latisiliquum* del Inventario Nacional Forestal y Suelos (INFS) y rejillas climáticas para clima contemporáneo (promedio 1961-1990), y futuro (década centrada en 2030), con escenarios de emisiones intermedias de gases de efecto invernadero. Se modeló la distribución potencial bajo el clima contemporáneo y futuro usando MaxEnt. Para el año 2030, el hábitat climático de *S. macrophylla* proyecta una pérdida del 60% para la Península de Yucatán, Guatemala, Belice y este de Honduras, mientras *L. latisiliquum* prevé una pérdida de hábitat climático del 43% en relación al contemporáneo. Ambas especies reducen su hábitat climático principalmente en el centro de la Península de Yucatán. Se propone recolectar semilla en la distribución actual y plantar en el centro de la Península, con el propósito de realizar conservación ex-situ, reacoplando las poblaciones al clima futuro que le es propicio.

Palabras claves: Cambio climático, *Lysiloma latisiliquum* (L.) Benth, Maxent, *Swietenia macrophylla* King

ABSTRACT

Suitable climate habitat modeling for potential distribution of species is a powerful tool which helps project climate change impacts and suggest management measures which may mitigate its negative effects. The objectives of this study were: 1) To determine the potential distribution of *Swietenia macrophylla* King and *Lysiloma latisiliquum* (L.) Benth. primarily for the Yucatan Peninsula, Mexico and for Guatemala, Belize and eastern Honduras, and 2) To suggest management actions intended for recoupling the contemporary populations to their projected suitable climate habitat by the decade centered in the year 2030. Geographical records for *S. macrophylla* were obtained from the Mexican National Forest and Soil Inventory (INFS) and the grids for contemporary (average 1961-1990) and future (decade centered on 2030), with intermediate greenhouse-effect gas concentration scenarios. Potential distribution under contemporary and future climate was modeled using MaxEnt. For the decade of 2030, climate habitat of *Swietenia macrophylla* projected a loss of 60% in the Yucatan Peninsula, Guatemala, Belize and eastern Honduras, while *L. latisiliquum* expected a climatic habitat loss of 43% in relation to contemporary distribution. Both species reduce their climate habitat mainly to the center of the Yucatan Peninsula. A proposal is made to collect seed in the current distribution area and establish ex situ conservation populations at the center of the Peninsula to try and recouple new populations to their future suitable climate habitat.

Keywords. Climate change, *Lysiloma latisiliquum* (L.) Benth, Maxent, *Swietenia macrophylla* King

Contenido

ÍNDICE DE CUADROS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1 Objetivos	2
1.2 Literatura citada.....	2
1. CALAKMUL COMO REFUGIO DE <i>SWIETENIA MACROPHYLLA</i> KING ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO	4
2.1. Resumen.....	5
2.2 Introducción.....	6
2.3 Materiales y métodos	7
2.4 Resultados	12
2.5 Discusión.....	15
2.6 Conclusiones	18
2.7 Literatura citada	19
2. REDUCCIÓN DEL HÁBITAT CLIMÁTICO PROPICIO PARA <i>Lysiloma</i> <i>Latisiliquum</i> (L.) Benth. (TZALAM) POR EL CAMBIO CLIMÁTICO	23
3.1 Resumen	24
3.2 Introducción	25
3.3 Materiales y métodos	26
3.3 Resultados y discusión	32
3.4 Conclusiones	40
3.5 Bibliografía	40
4. DISCUSIÓN GENERAL	44
5. CONCLUSIONES GENERALES.....	47
6. LITERATURA CITADA	47

ÍNDICE DE CUADROS

1. CALAKMUL COMO REFUGIO DE <i>SWIETENIA MACROPHYLLA</i> KING ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO	4
Cuadro 1. Variables climáticas estimadas para clima contemporáneo (1961-1990) y futuro (década centrada en el año 2030).....	9
Cuadro 2. Razón de curva ROC Parcial con 75% de localidades al azar	12
2. REDUCCIÓN DEL HÁBITAT CLIMÁTICO PROPICIO PARA <i>Lysiloma Latisiliquum</i> (L.) Benth. (TZALAM) POR EL CAMBIO CLIMÁTICO	23
Tabla 1. Variables climáticas estimadas para clima contemporáneo (1961-1990) y futuro (década centrada en el año 2030), para cada sitio de presencia y para <i>grids</i> (1 km ²) del área de estudio.....	28
Tabla 2. Razón de curva ROC Parcial con 75% de localidades al azar	32

ÍNCIDE DE FIGURAS

1. CALAKMUL COMO REFUGIO DE *SWIETENIA MACROPHYLLA* KING ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO 4

Figura 1. Mapa del hábitat climático propicio (área en rojo) de *Swietenia macrophylla* King para (a) clima contemporáneo (1961-1990), y (b) futuro (década centrada en el año 2030). Símbolos indican registros de presencia según el Inventario Nacional Forestal y de Suelos (CONAFOR, 2004-2009). . 14

Figura 2. Hábitat climático propicio para la década centrada en el año 2030 dentro de la Reserva de la Biosfera de Calakmul, Campeche 15

2. REDUCCIÓN DEL HÁBITAT CLIMÁTICO PROPICIO PARA *Lysiloma latisiliquum* (L.) Benth. (TZALAM) POR EL CAMBIO CLIMÁTICO..... 23

Figura 1. Mapa del hábitat climático propicio (área en azul) de *Lysiloma latisiliquum* (L.) para (a) clima contemporáneo (1961-1990), y (b) futuro (década centrada en el año 2030). Símbolos indican registros de presencia según el Inventario Nacional Forestal y de Suelo (INFS) (CONAFOR, 2004-2009)...... 34

Figura 2. Temperaturas medias del mes más frío (MTCM) para clima contemporáneo (a) y futuro (b) para la Península de Yucatán. 37

Figura 3. Grados día > 5° C (DD5) para clima contemporáneo (a) y futuro (b) para la Península de Yucatán. 39

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

Las especies maderables de alto valor comercial en la Península de Yucatán son la caoba (*Swietenia macrophylla* King) y el cedro (*Cedrela odorata* Cham. & Schltld.). Sin embargo, en la última década, una de las principales especie en volúmenes aprovechados y con demanda creciente es *Lysiloma latisiliquum* (L.) Benth. (Forster *et al.*, 2002).

Swietenia macrophylla King es una de las especies forestales más importantes en México y América Central. Desde el último siglo hasta hoy, la caoba, como se conoce comúnmente, es una de las especies ecológicamente más importantes de las selvas altas o medianas perennifolias o subperennifolias y también ha sido una de las especies más relevantes para el desarrollo de la industria forestal de América Latina en regiones tropicales (Vester y Navarro, 2003).

Lysiloma latisiliquum (L.) Benth., comúnmente conocido como Tzalam, se distribuye principalmente en bosques secos y caducifolios en Cuba, Haití, Puerto Rico, República Dominicana, las Bahamas, al sur de la Florida, México y norte de América Central (CATIE, 2003).

Un manejo forestal sustentable requiere del conocimiento del hábitat climático que es propicio para el mejor aprovechamiento de las especies prioritarias. A ello es necesario considerar los impactos que implicará el desacoplamiento que habrá entre las poblaciones de especies forestales y el clima que les es propicio, debido al cambio climático (Rehfeldt *et al.*, 2012).

La modelación del hábitat climático propicio o nicho climático, usando técnicas como GARP, MaxEnt o Random Forest, se utiliza cada vez más para examinar la vulnerabilidad de los Recursos Genéticos Forestales ante el cambio climático (Villers y Trejo, 2004; Téllez-Valdés *et al.*, 2006; Gómez-Mendoza y Arriaga, 2007; Ledig *et al.*, 2010; Sáenz-Romero *et al.*, 2010; Gómez-Díaz *et al.*, 2011; Sáenz-Romero *et al.*, 2012; Monterroso-Rivas *et al.*, 2013) a fin de comparar la distribución geográfica del hábitat climático propicio contemporáneo con el

futuro, y así poder sugerir medidas de manejo tendientes a aminorar los efectos negativos del cambio climático (FAO, 2012).

1.1 Objetivos

- Determinar la distribución potencial del hábitat climático propicio para *Swietenia macrophylla* King y *Lysiloma latisiliquum* (L.) Benth. primariamente para la Península de Yucatán, México y para Guatemala, Belice y este de Honduras.
- Sugerir medidas de manejo para reacoplar las poblaciones contemporáneas al clima que les será propicio en la década centrada en el año 2030.

1.2 Literatura citada

CATIE. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. 2003. Árboles de Centro América. Meliaceae *Swietenia macrophylla*. Turrialba, Costa Rica.

Forster, R.; Albrecht, H; Belisle, M.; Caballero, A.; Galletti, H.; Lacayo O.; Ortiz, S. y Robinson, D. 2002 Comunidades forestales y el mercadeo de maderas tropicales poco comerciales de Mesoamérica. Universidad de Quintana Roo. Quintana Roo, México. 158 p.

Gómez-Díaz, J.; Monterroso-Rivas, A.; Tinoco-Rueda, J.; Toledo-Medrano, M.; Conde-Alvarez, C. y Gay-García, C. 2011. Assessing current and potential patterns of 16 forest species driven by climate change scenarios in México. *Atmósfera*, 24:31–52.

Gómez-Mendoza, L. y Arriaga L. 2007. Modeling the effect of climate change on the distribution of Oak and Pine Species of Mexico. *Conservation Biology*, 6:1545-1555.

Ledig, F. T.; Rehfeldt, G. E.; Sáenz-Romero, C. y Flores-López, C. 2010. Projections of suitable habitat for rare species under global warming scenarios. *American Journal of Botany*, 97:970-987

Monterroso-Rivas, A.; Gómez-Díaz, J. y J. Tinoco-Rueda. 2013. Bosque mesófilo de montaña y escenarios de cambio climático: una evaluación en Hidalgo, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 19: 29–43.

Rehfeldt, G. E., Crookston, N. L., Sáenz, C. y Campbell E. 2012. North American vegetation model for land use planning in a changing climate: A statistical solution to large classification problems. *Ecological Applications*, 22:119-141.

Sáenz-Romero, C.; Rehfeldt, G. E.; Crookston, N. L.; Pierre, D.; St-Amant R.; Beaulieu, J. y Richardson, B. 2010. Spline models of contemporary, 2030, 2060 and 2090 climates for Mexico and their use in understanding climate-plant impacts on vegetation. *Climate Change*, 102:595-623.

Sáenz-Romero, C.; Rehfeldt, G. E.; Duval, P. y Linding-Cisneros R. A. 2012. *Abies religiosa* habitat prediction in climatic change scenarios and implications for monarch butterfly conservation in Mexico. *Forest Ecology and Management*, 275:98-106.

Téllez-Valdés, O.; Dávila-Aranda, P. y Lira-Saade, R. 2006. The effects of climate change on the long-term conservation of *Fagus grandiflora* var. *mexicana*, an important species of the cloud forest in eastern México. *Biodiversity and Conservation*, 15: 1095–1107.

Vester, F.M y Navarro-Martínez, M.A. 2007. Fichas ecológicas. Árboles Maderables de Quintana Roo. Primera edición. Fondo Mixto de Fomento a la Investigación Científica y Tecnológica. Pp. 139. Quintana Roo, México.

Villers, L. y I. Trejo. 2004. Evaluación de la vulnerabilidad en los ecosistemas forestales. In: Martínez J. y A. Fernández-Bremauntz. Cambio climático: una visión desde México. SEMARNAT-INE. 239-254 pp. México, D.F.

1. CALAKMUL COMO REFUGIO DE *SWIETENIA MACROPHYLLA* KING ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

Miriam Garza-López¹, Juan Manuel Ortega-Rodríguez², Francisco José Zamudio-Sánchez¹, José Francisco López-Toledo³, Francisco Alberto Domínguez-Álvarez¹ y Cuauhtémoc Sáenz-Romero^{4,5}

¹División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 Carretera México- Texcoco. 56230, Chapingo, Texcoco, Estado de México

²Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Edificio R, Ciudad Universitaria, Morelia, Michoacán, México

³Instituto Tecnológico de la Zona Maya. Km 21.5 Carretera Chetumal-Escárcega. 77965, Ejido Juan Sarabia, Quintana Roo, México

⁴Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (IIAF-UMSNH). Km 9.5 Carretera Morelia-Zinapécuaro. 58880, Tarímbaro, Michoacán, México.

⁵Dirección actual: Institut National de la Recherche Agronomique (*INRA*), Unité Mixte de Recherche 1202 Biodiversité Gènes & Communautés (*UMR 1202 BIOGECO*), F-33610 Cestas, France & Université de Bordeaux, UMR 1202 BIOGECO, F-33615 Pessac, France

2.1. Resumen

El modelado del hábitat climático propicio para la distribución potencial de especies es una herramienta poderosa para proyectar los impactos del cambio climático y sugerir medidas de manejo que permitan aminorar sus efectos negativos. Los objetivos del presente trabajo fueron: 1) determinar la distribución potencial del hábitat climático propicio para el árbol *Swietenia macrophylla* King primariamente para la Península de Yucatán, México y para Guatemala, Belice y este de Honduras 2) sugerir medidas de manejo para reacoplar las poblaciones contemporáneas al clima que les será propicio en la década centrada en el año 2030. Se obtuvieron registros geográficos para *S. macrophylla* del Inventario Nacional Forestal y Suelos (INFS) y *grids* climáticas para clima contemporáneo (promedio 1961-1990), y futuro (década centrada en 2030), con escenarios de concentraciones intermedias (6.0 W/m^2) de gases de efecto invernadero. Se modeló la distribución potencial bajo el clima contemporáneo y futuro usando MaxEnt. Para el año 2030 se proyecta una pérdida de hábitat climático del 60% en relación al contemporáneo para la Península de Yucatán, Guatemala, Belice y este de Honduras. El hábitat climático propicio prácticamente desaparece en Quintana Roo, desplazándose hacia la Reserva de la Biosfera de Calakmul. Se propone recolectar semilla en la distribución actual en Quintana Roo y plantar en esa Reserva, con el propósito de realizar conservación ex-situ, reacoplando las poblaciones al clima futuro que les es propicio.

Palabras clave. Cambio climático, MaxEnt, *Swietenia macrophylla* King, Península de Yucatán

Abstract.

The suitable climate habitat modeling for the potential distribution of species, is a powerful tool to project the climate change impacts and to suggest management measures that may mitigate its negative effects. The objectives of this study were: 1) To determine the potential distribution of *Swietenia macrophylla* King primarily for the Yucatan Peninsula, México and for Guatemala, Belize y eastern Honduras Mexico, and 2) To suggest management

actions for recoupling the contemporary populations to their suitable climate habitat by the decade centered in the year 2030. Geographical records for *S. macrophylla* were obtained from the Mexican National Forest and Soil Inventory (INFS) and the grids for contemporary (average 1961-1990) and future (decade centered on 2030), with intermediate greenhouse-effect gas concentration scenarios (6.0 W/m²). Potential distribution under the contemporary and future climate was modeled using MaxEnt. For the decade of 2030 it is projected a climatic habitat loss of 60% in relation to contemporary distribution at the Yucatan Peninsula, Guatemala, Belize and eastern Honduras. Suitable climate habitat practically disappears in Quintana Roo, moving to the Calakmul Biosphere Reserve. It is proposed to collect seed in the current distribution in Quintana Roo and planting inside the Reserve, with the purpose of conducting *ex situ* conservation populations, recoupling the populations to their future suitable climate.

Keywords. Climate change, MaxEnt, *Swietenia macrophylla* King, Yucatan Peninsula

2.2 Introducción

Swietenia macrophylla King es una de las especies forestales más importantes en México y América Central. Desde el último siglo hasta hoy, la caoba, como se conoce comúnmente, es una de las especies ecológicamente más importantes de las selvas altas o medianas perennifolias o subperennifolias y también ha sido una de las especies más relevantes para el desarrollo de la industria forestal de América Latina en regiones tropicales (Vester y Navarro, 2003; André *et al.*, 2008).

La caoba ha sido fuertemente explotada y presenta lo que es probablemente uno de los casos de erosión genética más notable en una especie de árbol tropical. En Centro América, subsiste en forma de pequeñas poblaciones fragmentadas y su viabilidad probablemente dependerá del flujo adecuado de genes entre ellas (Lemes *et al.*, 2003; André *et al.*, 2008). Al deterioro causado por la deforestación y el cambio de uso de suelo, ahora es necesario añadir el

desacoplamiento que habrá entre las poblaciones forestales y el clima que les es propicio, debido al cambio climático (Rehfeldt *et al.*, 2012).

La modelación del hábitat climático propicio o nicho climático, usando técnicas como GARP, MaxEnt o Random Forest, se utiliza cada vez más para examinar la vulnerabilidad de los Recursos Genéticos Forestales ante el cambio climático (Villers y Trejo, 2004; Téllez-Valdés *et al.*, 2006; Gómez-Mendoza y Arriaga, 2007; Ledig *et al.*, 2010; Sáenz-Romero *et al.*, 2010; Gómez-Díaz *et al.*, 2011; Sáenz-Romero *et al.*, 2012; Monterroso-Rivas *et al.*, 2013) a fin de comparar la distribución geográfica del hábitat climático propicio contemporáneo con el futuro, y así poder sugerir medidas de manejo tendientes a aminorar los efectos negativos del cambio climático (FAO, 2012).

Con base en lo anterior se plantearon los siguientes objetivos: 1) determinar la distribución potencial del hábitat climático propicio contemporáneo y futuro (década centrada en el año 2030) para *Swietenia macrophylla* King, para la Península de Yucatán, México y para Guatemala, Belice y este de Honduras 2) sugerir medidas de manejo para reacoplar las poblaciones contemporáneas al clima que les **será** propicio en la década centrada en el año 2030.

2.3 Materiales y métodos

Área de estudio. El área de estudio comprende primariamente la Península de Yucatán, ubicada en el sureste de México. La Península es una gran plataforma de rocas calcáreas y es la provincia geológicamente más joven de México; abarca los estados de Yucatán, Quintana Roo y Campeche (INEGI, 2015). El terreno de la Península de Yucatán es en general plano, con altitud promedio de 50 msnm y sólo en el centro-sur se encuentran elevaciones hasta de 350 metros. Los suelos predominantes son los leptosoles (suelos someros de escasa profundidad, escasa cantidad de tierra fina y gran cantidad de piedras o afloramientos de roca) (Tello, 2011; Bautista-Zúñiga, 2010). La mayor parte de la Península de Yucatán presenta un clima tropical con lluvias en verano (Aw) y seco estepario (Bs) el extremo noroeste de la Península. La

vegetación de la Península de Yucatán se rige principalmente por un gradiente de humedad que se incrementa de norte a sur, lo que provoca un mayor desarrollo estructural, formado principalmente por selvas baja caducifolia, selva mediana subcaducifolia, selva mediana subperennifolia, selva baja espinosa y manglar, entre otras (Díaz, 2011; Flores-Guido *et al.*, 2010).

Obtención de datos. Los registros de presencia de *S. macrophylla* King para México, se obtuvieron de la base de datos del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFS) 2004-2009. Debido a que el área de interés fue primariamente la Península de Yucatán, se incluyeron presencias para la Península de Yucatán, y los otros dos estados cercanos y con mayor número de presencias después de la Península: Chiapas y Tabasco. Las unidades de muestreo fueron conglomerados con 1600 m² de superficie separados a 5 x 5 km. (CONAFOR, 2009). Una vez obtenidos los registros, se procedió a la limpieza de los datos que consistió en eliminar las coordenadas geográficas duplicadas, con la finalidad de obtener las coordenadas por conglomerado (la base de datos original incluye coordenadas por parcela muestreada, pero dada la cercanía entre parcelas, las coordenadas resultan duplicadas).

Variables climáticas. Se descargaron las rejillas (*grids*) para la región estudiada (desde la Península de Yucatán hasta el este de Honduras) a una resolución de 1 km² para 17 variables climáticas (Cuadro 1), disponibles en: <http://forest.moscowfs.wsu.edu/>, del denominado “clima contemporáneo” (promedio del período 1961 a 1990) y clima futuro (promedio de la década centrada en el año 2030). Las estimaciones futuras se basan en el promedio de 18 modelos-escenarios climáticos, con trayectorias representativas de concentración de gases de efecto invernadero (llamadas RCP por su acrónimo en inglés), con una trayectoria intermedia (6.0 W/m², que equivale a que la concentración de CO₂ alcanzará su máximo en la década del 2080). Detalles de los modelos climáticos en Crookston y Rehfeldt (2014) y Rehfeldt *et al.*, (2014). Para el modelaje que dio origen a las rejillas de clima contemporáneo de México ver Sáenz-Romero *et al.* (2010).

Cuadro 1. Variables climáticas estimadas para clima contemporáneo (1961-1990) y futuro (década centrada en el año 2030).

Abreviación	Variable
MAT	Temperatura media anual (°C)
MAP	Precipitación media anual (mm)
GSP	Precipitación de temporada de crecimiento (mm)
MTCM	Temperatura media del mes más frío (°C)
MMIN	Temperatura media mínima (°C)
MTWM	Temperatura media del mes más cálido (°C)
MMAX	Temperatura media máxima (°C)
SDAY	Día juliano en la que ocurre la primera helada de primavera
FDAY	Día juliano en la que ocurre la primera helada de otoño
DD5	Grados día > 5°C a lo largo del año
GSDD5	Grados día > 5°C del periodo de crecimiento
D100	Suma de días en el que se acumulan 100 grados día > 5°C
DD0	Grados día < 0 ° C respecto a la temperatura media
SMRPB	Balance de precipitación: (Julio-Septiembre) / (Abril-junio)
SPRP	Precipitación de verano (mm)
SMRP	Precipitación de otoño (mm)
WINP	Precipitación de invierno (mm)

Es importante enfatizar la concepción subyacente bajo lo que se denominó clima “contemporáneo”. Se considera al período 1961-1990 como un clima similar al cual las poblaciones de especies forestales (inventariadas por el INFS), se adaptaron y crecieron; no se refiere al clima actual o presente (década 2000 – 2010 o similar), debido a que el cambio climático ha modificado el clima en las últimas décadas. En otras palabras, se asume que el clima promedio del período 1961-1990 es una estimación aceptable y a nuestro alcance de las condiciones que en su momento permitieron un equilibrio (o algo cercano a un equilibrio) entre la distribución de especies de plantas y el clima existente antes de que el cambio climático antropomórfico empezara a acumular sus efectos (Rehfeldt *et al.*, 2014; Sáenz-Romero *et al.*, 2015).

Para el futuro, se eligió enfocar el análisis para el promedio de la década centrada en el año 2030, y no un horizonte más lejano, ya que para las propuestas de manejo encaminadas a promover la adaptación de las poblaciones forestales a los climas futuros, debe considerarse lo siguiente: de llegarse a reubicar genotipos, éstos necesitan reubicarse en sitios con la anticipación requerida como para que a lo largo de su vida, crezcan en un sitio suficientemente propicio climáticamente como para alcanzar al menos la edad reproductiva. De reubicarse en un sitio en donde el clima propicio ocurrirá en un horizonte demasiado lejano (2080 ò 2090), se expondría en el presente a las plantas a daños por frío o heladas que podrían hacer inviable alcanzar la edad reproductiva (Sáenz-Romero *et al.*, 2012, Castellanos-Acuña *et al.*, 2015).

Modelado de clima contemporáneo. La distribución del hábitat climático propicio para la especie bajo el clima contemporáneo se modeló mediante el algoritmo MaxEnt. A este proceso también se le conoce como modelado de nicho ambiental (*environmental niche modeling* ENM, por su acrónimo en inglés) (Phillips *et al.*, 2006; Elith *et al.*, 2011). En nuestro caso, se modeló únicamente el nicho ambiental, que por considerar únicamente variables climáticas (sin incluir otras tales como tipo de suelo), podría definirse como nicho climático.

Se utilizaron 513 localidades de presencia y 17 variables climáticas que representan temperatura y precipitación promedio anual, temperaturas extremas mensuales, precipitación por períodos estacionales y el balance estacional de precipitación (Cuadro 1). Estas variables han sido usadas previamente en el modelaje del hábitat climático propicio de especies forestales de México para *Abies religiosa* (Sáenz-Romero *et al.*, 2012), *Pinus chiapensis* (Sáenz-Romero *et al.*, 2010) y *P. leiophylla* (Sáenz-Romero *et al.*, 2015). El modelo se construyó con el 75% de los registros de ocurrencia. El umbral de convergencia manejado fue 0.00001 con 500 interacciones como límite máximo para cada corrida. El formato de salida analizado fue logístico, el cual indica un hábitat óptimo de 0 ó 1, donde 0 es ausencia y 1 máxima idoneidad.

Se utilizó el método Jackknife, instrumentado en MaxEnt, el cual indica la contribución relativa de cada variable climática al modelo. La distribución

espacial del hábitat climático se obtuvo mediante la herramienta ArcMap 9.3 ®, obteniendo el número de píxeles y transformándolos a hectáreas. Finalmente, se generaron los mapas de la distribución de la especie en clima contemporáneo y 2030.

Validación del modelo climático. La validación del modelo se llevó a cabo mediante el programa ROC parcial (Barve, 2008). Se siguieron las recomendaciones de Peterson *et al.* (2008), usando un umbral esperado de error de $E = 5\%$. Se realizaron 1000 iteraciones para el cálculo de la versión parcial del análisis del área bajo la curva (AUC) y se expresaron los resultados como la razón entre la curva ROC observada, contra la esperada al azar, en donde ambas están truncadas al área delimitada por el umbral de error. Cuando se realiza el análisis de ROC parcial, solo es usada la porción del área en la curva ROC donde las predicciones del modelo son relevantes para el cálculo de la razón. Los valores de ésta abarcan el intervalo que va de 0 a 2, donde 1 equivale a un modelo totalmente al azar. La prueba se realizó con el 25% de los datos, que fueron separados al azar del total de las localidades de presencia de la especie.

El modelo obtenido con el 75% de los datos, se reclasificó con valores de 0 a 1, donde 0 es menos idoneidad y 1 mayor idoneidad para la presencia de la especie. Posteriormente se obtuvo el área que ocupa cada clase de presencia de la especie para el 25% de los datos. Una vez generados los archivos se introdujeron al programa ROC Parcial, con 1000 interacciones y 0.95 de tolerancia de error de omisión. Una vez generados los resultados se obtuvo la media, máximos, mínimos y desviación estándar.

Proyección de hábitat climático futuro. El hábitat climático futuro se proyectó mediante el algoritmo MaxEnt, el cual se alimentó con los registros geográficos, las *grids* de clima contemporáneo y clima futuro (2030). Esta herramienta, primeramente modela el hábitat climático propicio bajo el clima contemporáneo. Una vez terminado el modelaje construido con el clima contemporáneo, se repitió la proyección pero esta vez alimentando el modelo con las rejillas de variables climáticas para la década centrada en 2030, estimadas con el ensamble de 18 modelos-escenarios con trayectorias representativas de

concentración de gases de efecto invernadero intermedias (RCP 6.0 Watts/m²), disponibles en: <http://forest.moscowfsl.wsu.edu/>).

Se proyectó con la opción “Do clamping” de MaxEnt, el cual reduce la predicción en cada punto en las proyecciones por la diferencia entre la salida aparente y la no sujeta a ese punto. Es decir, que las variables ambientales y funciones se encuentran restringidas a la gama de valores encontrados durante el entrenamiento. Además se compararon la similitud ambiental de las variables contemporáneas con las variables futuras (2030). Esto para obtener las áreas que deben ser tratadas con precaución al momento de interpretar el modelo y las variables más disímiles con el clima futuro.

2.4 Resultados

Clima contemporáneo. Se generó un mapa de distribución potencial para *S. macrophylla* King en la Península de Yucatán. Se obtuvo un área con clima óptimo para el desarrollo de Caoba de 10'681,065 ha con clima contemporáneo. Para los estados de Quintana Roo, Campeche, Yucatán y Chiapas en México, además el modelo logro proyectar distribución potencial para Belice, Honduras y Guatemala (Figura 1a).

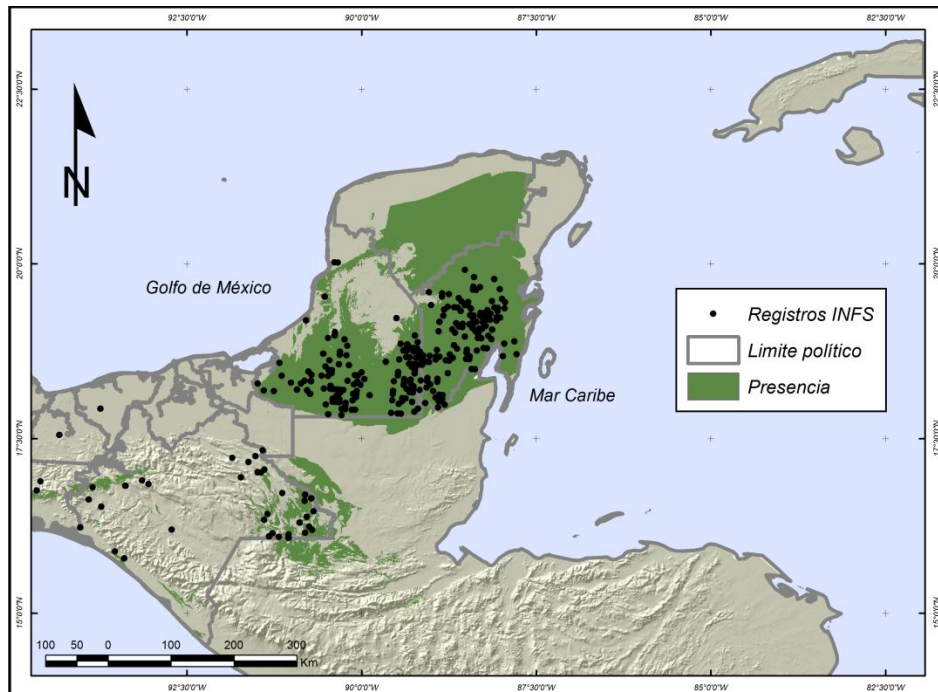
Validación del modelo. Mediante el análisis de la curva ROC parcial se obtuvieron valores superiores al umbral (≥ 1) para el clima contemporáneo (Cuadro 2). Lo que nos indica que el modelo tuvo una buena predicción del hábitat climático óptimo para el desarrollo de la especie (Peterson *et al.*, 2008). Mediante el método Jackknife instrumentado en MaxEnt se obtuvieron las variables de mayor contribución para la predicción del modelo, las cuales fueron MTCM (30.2%), MMIN (20.8%) y GSP (15.7%).

Cuadro 2. Razón de curva ROC Parcial con 75% de localidades al azar

Validación de curva ROC parcial	
Máximo	1.86
Mínimo	1.20
Media	1.82
Desviación estándar	0.05

Proyección para el clima futuro (2030). La proyección para 2030 (Figura 1b), estima un área con hábitat climático propicio de 4'249,017 ha. Esto implica una reducción del hábitat climático, respecto al contemporáneo, del 60%. La distribución se reduce dentro de la Península de Yucatán, confinándose principalmente al estado de Campeche, disminuyendo drásticamente en los estados de Chiapas y Yucatán. Para el Estado de Quintana Roo, prácticamente desaparece el hábitat climático de la especie, que notablemente se desplaza hacia el Oeste, hacia el Estado de Campeche. La distribución para Guatemala y Belice se reduce drásticamente y para Honduras proyecta nuevas zonas (en el extremo noroeste del país, en el Departamento de Gracias a Dios) que en la distribución contemporánea no aparecían (Figura 1a).

a)



b)

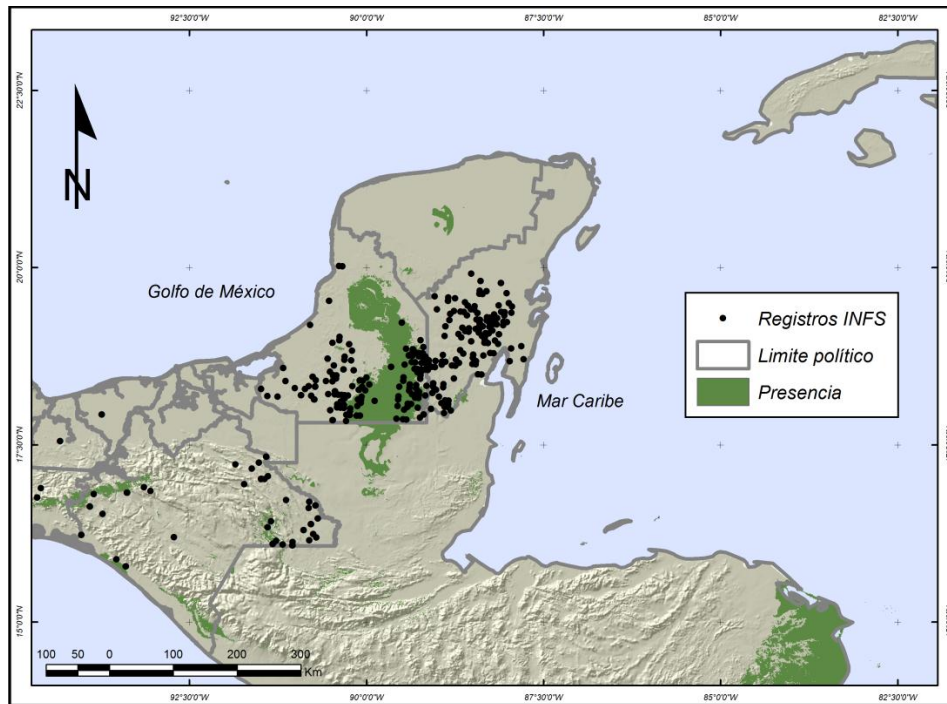


Figura 1. Mapa del hábitat climático propicio (área en rojo) de *Swietenia macrophylla* King para (a) clima contemporáneo (1961-1990), y (b) futuro (década centrada en el año 2030). Símbolos indican registros de presencia según el Inventario Nacional Forestal y de Suelos (CONAFOR, 2004-2009).

Es importante resaltar que la mayor parte del hábitat climático que se mantiene dentro de la Península de Yucatán para la década centrada en el 2030, se distribuye en lo que actualmente es la Reserva de la Biosfera de Calakmul (Figura 2).

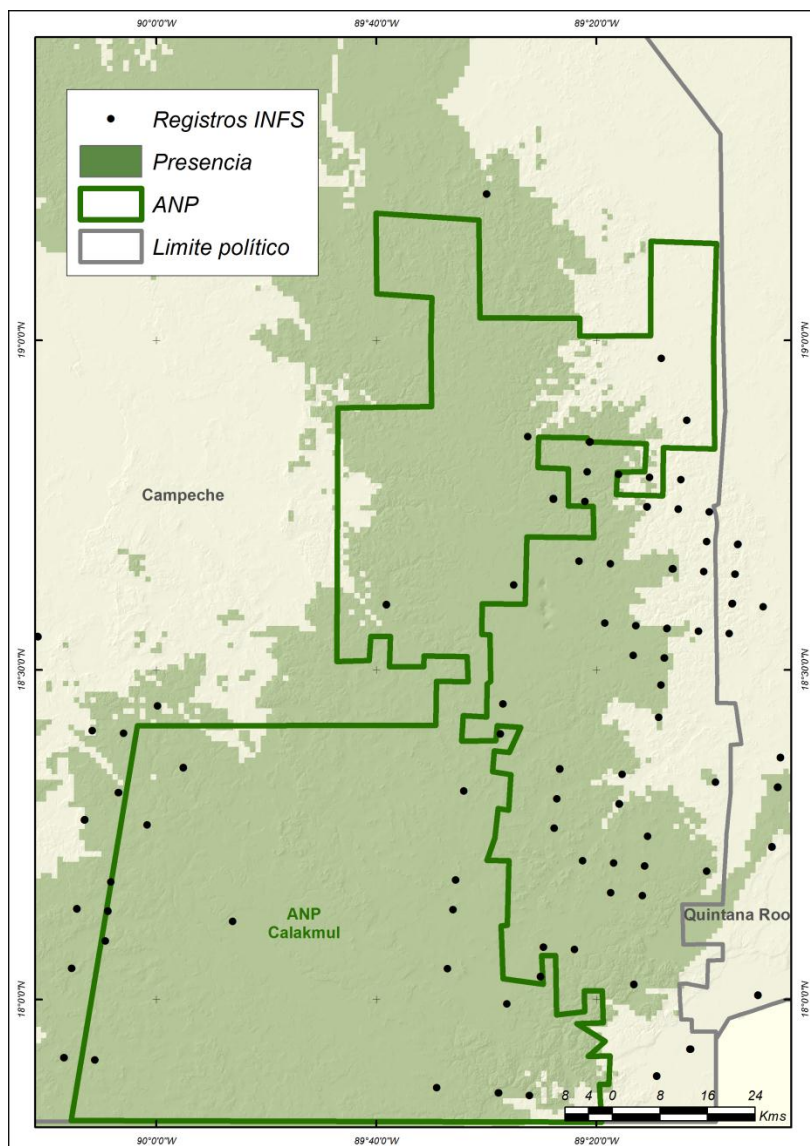


Figura 2. Hábitat climático propicio para la década centrada en el año 2030 dentro de la Reserva de la Biosfera de Calakmul, Campeche

2.5 Discusión

Clima contemporáneo. La distribución contemporánea modelada coincide con otros trabajos realizados por medio de colectas y muestreo de campo (Bauer y Francis, 1998; CATIE, 2003; CONAFOR, 2003 y Vester y Navarro, 2007).

Las variables obtenidas con mayor contribución para el modelo (MTCM, MIN y GSP) son congruentes con el hecho de que es una especie de zonas tropicales donde prácticamente no existe época de frío. Además la especie se desarrolla mejor con estación seca no mayor de cuatro meses, en extremos de humedad,

aparentemente tolera extremos de sequía únicamente de corta duración, temperatura media anual de 24 - 28 °C, temperatura máxima media del mes más cálido de 24 - 32 °C y temperatura media mínima del mes más frío de 11 - 22 °C (Bauer y Francis, 1998; CATIE, 2003; CONAFOR, 2003; Vester y Navarro, 2007; Grogan y Schulze, 2012).

Proyección para el clima futuro (2030). Es de esperar que la combinación de mayores temperaturas y menores precipitaciones, sean la causa de la desaparición del hábitat climático para caoba en gran parte de la distribución contemporánea en la Península de Yucatán. La disminución drástica del hábitat climático propicio para *S. macrophylla* coincide con otras proyecciones para biomas de México con diferentes modelos de circulación global y escenarios de emisiones de gases invernadero. Por ejemplo, Rehfeldt *et al.* (2012) proyecta para la Península de Yucatán climas propicios para biomas sin un análogo contemporáneo (en otras palabras, climas que no existen en la actualidad), debido a la interacción del incremento de las temperaturas y disminución de la precipitación debido al cambio climático. La predicción de climas no análogos en el futuro ha sido predicha también para el norte de Eurasia -debido a la prolongación de la temporada de crecimiento (Reu *et al.*, 2013), y para diversos biomas de los Andes Tropicales (Tovar *et al.*, 2013), con pérdidas de más del 30% de la superficie actual.

Reserva de la Biosfera Calakmul como refugio ex situ. La orografía con mayores elevaciones en la región de Calakmul, al crear un clima más húmedo y menos cálido que el resto de la Península, compensará en alguna medida el cambio climático, haciendo de Calakmul una región propicia como refugio para esa especie en la década centrada en el año 2030. La topografía mayormente plana de la zona norte de la Península de Yucatán hace que el relieve altitudinal tenga poca influencia sobre los patrones climáticos de la mayor parte de esa región, en donde los vientos provenientes del Caribe producen un gradiente de precipitaciones de noroeste a sureste, factor que aparentemente es el decisivo para la distribución de la vegetación. En cambio, en la región de Calakmul, con altitudes promedio de 250-350 msnm (altitudes modestas pero muy superiores al promedio de la Península de Yucatán), el relieve crea una sombra orográfica en las laderas y planicies occidentales, al interceptar los

vientos húmedos dominantes provenientes del sureste (Martínez y Galindo, 2002). Esto es congruente con Orellana-Loza *et al.*, (2002), quien a partir gráficas ombrotérmicas de 48 estaciones meteorológicas, proyecta para el año 2020 una sequía relativa más pronunciada y visible, con los máximos promedio de precipitación en septiembre, además menciona que las mayores cantidades de lluvia estarán presentes en el sur de Campeche y Quintana Roo.

Manejo y conservación de germoplasma. Con base en los resultados obtenidos, se recomienda establecer zonas productoras de germoplasma de caoba en el centro-sur del estado de Quintana Roo. Sin embargo, plantaciones de conservación *ex situ* e inclusive plantaciones comerciales forestales deberán establecerse en el hábitat climático predicho para el año 2030, lo que incluiría áreas de la Reserva de la Biósfera de Calakmul (Figura 2). Dicho de otra manera, sería necesario coleccionar semilla en las poblaciones actuales de Quintana Roo, producir planta en vivero, y plantar en Campeche.

Sin embargo, establecer plantaciones comerciales, e incluso de conservación *in situ*, sería una medida muy deseable de manejo adaptativo ante el cambio climático (en función de la evidencia aquí presentada), pero que entraría en contradicción con el marco regulatorio actual. De acuerdo con la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al ambiente (LGEEPA), Artículo 45, el segundo objetivo de un Área Natural Protegida (ANP) es “*Salvaguardar la diversidad genética de las especies silvestres de las que depende la continuidad evolutiva; así como asegurar la prevención y el aprovechamiento sustentable de la biodiversidad del territorio nacional, en particular las especies que están en peligro de extinción, las amenazadas, las endémicas, las raras y las que se encuentran sujetas a protección especial*”. Pero, en el Artículo 49, inciso II, menciona que en las zonas núcleo de las ANP’s queda expresamente prohibido “*Introducir ejemplares o poblaciones exóticas de la vida silvestre, así como organismos genéticamente modificados*”.

Lo anterior ilustra plenamente que el marco regulatorio actual se diseñó sin considerar los efectos del cambio climático, como si el clima fuera esencialmente estático. Por lo anterior, se propone realizar una modificación en el Artículo 49, que flexibilice el uso de reforestación con semilla no local. Ello

permitiría realizar una acción de mitigación a los efectos del cambio climático, medida en realidad encaminada a cumplir el objetivo último de la ley actual, que es lograr el manejo sustentable de los recursos genéticos forestales.

No hay duda que tales cambios en el marco normativo y el llevar a la práctica lo aquí propuesto, requerirá de una profunda modificación conceptual que sea socialmente aceptada de lo que es conservar un recurso natural para el futuro. Mayor es el reto considerando que la Reserva de Calakmul recientemente fue declarada Patrimonio de la Humanidad Mixto por la UNESCO, mixto por su elevada biodiversidad y sus sitios arqueológicos de la Cultura Maya (UNESCO, 2014). Pero justamente, un Patrimonio de la Humanidad merece ser conservado, sólo que la conservación en los tiempos del cambio climático, requiere de medidas impensables en el pasado.

Para próximos trabajos se sugiere: (a) Realizar ensayos de procedencia, a fin de limitar el movimiento de poblaciones dentro del espacio climático que le será propicio, dependiendo del grado de diferenciación genética. (b) Monitorear (tal vez en parcelas permanentes) los ataques de plagas y enfermedades, tales como el barrenador *Hypsipyla grandella*; es de esperar que el desfaseamiento entre las poblaciones actuales y el clima para el cual se han adaptado, inducirá un estrés y debilitamiento de los árboles, lo cual facilitará el ataque de plagas y enfermedades, tales como se ha documentado para otras especies forestales (Allen *et al.*, 2010; Sturrock *et al.*, 2011; Alfaro *et al.*, 2014).

2.6 Conclusiones

El hábitat climático propicio contemporáneo para *Swietenia macrophylla* (caoba) se estima en 10'681,065 ha en la Península de Yucatán, Belice, Guatemala y Honduras. La proyección del hábitat para la década centrada en el año 2030, estima una pérdida del 60% respecto al área total contemporánea. El hábitat propicio en el futuro se distribuye dentro de la Reserva de la Biosfera Calakmul (en el centro-sur de la Península de Yucatán) y aparecen nuevas áreas propicias en el noreste de Honduras (Departamento de Gracias a Dios). Se propone recolectar semilla en el centro-sur de Quintana Roo, producir planta en vivero y plantar en Calakmul, con el propósito de conservación

genética y reacoplamiento climático de las poblaciones naturales de caoba. Esto requeriría flexibilizar el marco regulatorio de las Áreas Naturales Protegidas, que actualmente impiden establecer especies en sitios en los que no son originarias.

2.7 Literatura citada

- Alfaro R.I., Fady B., Vendraminc G.G., Dawson I.K., Fleming R.A., Sáenz-Romero C., Lindig-Cisneros R., Murdock T., Vinceti B., Navarro C.M., Skråppa T., Baldinelli G.K., El-Kassaby Y.A. y Loo J. 2014. The role of forest genetic resources in responding to biotic and abiotic factors in the context of anthropogenic climate change. *Forest Ecology and Management*, 333: 76-87.
- Allen C.D., Macalady A.K., Chenchouni H., Bachelet D., McDowell N., Vennetier M., Kizberger T., Rigling A., Breshears D.D., Hogg E.H., Gonzalez P., Fensham R., Zhang Z., Castro J., Demidova N., Lim J.H., Allard G., Running S.W., Semerci A. y Cobb N. 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 259:660–684.
- Barve N. 2008. Tool for Partial-ROC (Biodiversity Institute, Lawrence, KS), ver 1.0.
- Bauer G. P. y Francis J. K. 1998. *Swietenia macrophylla* King. Honduras mahogany, caoba. U.S. Departamento de Agricultura, Servicio Forestal, Estación experimental Sureste Forestal. New Orleans. EUA.
- Bautista-Zúñiga F. 2010. El suelo. In R. Durán y M. Méndez. Eds. pp 14-16. Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán. Yucatán, México.
- Castellanos-Acuña D., Lindig-Cisneros R.A., y Sáenz-Romero C. 2015. Altitudinal assisted migration of Mexican pines as an adaptation to climate change. *Ecosphere*, 6(1), Article 2:1-16.
- CATIE. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. 2003. Árboles de Centro América. Meliaceae *Swietenia macrophylla*. Turrialba, Costa Rica.

- CONAFOR. Comisión Nacional Forestal. 2003. SIRE-Paquete Tecnológico. *Swietenia microphylla* King.
- CONAFOR. Comisión Nacional Forestal. 2009. Manual y procedimiento para el muestreo de campo. Inventario Nacional Forestal y de suelo 2004-2009. Comisión Nacional Forestal. Zapopan, Jalisco.
- Crookston N. y Rehfeldt G. E. 2014. Forest Climate Change: Potential Effects of Global Warming on Forests and Plant Climate Relationships in Western North America and Mexico <http://forest.moscowfsl.wsu.edu/climate/> (consultado abril 2014).
- Díaz A. E. 2011. Vegetación. In: C. Poza, N. Armijo y S. Calmé. Eds. *Riqueza biológica de Quintana Roo un análisis para su conservación*, pp. 62-72, México, D.F.
- Elith J. S., Phillips J., Hastie T., Dudick M., Chee Y. E. y Yates C. J. 2011. A statistic explanation of Maxent for ecologists. *Diversity and Distributions*, 17:43-57.
- FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. 2014. The state of the World's Forest Genetic Resources. Roma, Italia.
- Fernández-Concha G. C., Tapia-Muñoz J. L., Duno de Stefano R., Ramírez-Morillo I. M., Can-Itzá L., Hernández-Aguilar S. y Castillo A. 2012. La flora de la Península de Yucatán Mexicana: 250 años de conocimiento florístico. CONABIO, *Biodiversitas*, 101:6-10.
- Flores-Guido J.S., Durán-García R. y Ortiz-Díaz J. J. 2010. Comunidades vegetales Terrestres. In R. Durán y M. Méndez. Eds. pp 14-16. Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán. Yucatán, México.
- Gómez-Mendoza L. y Arriaga L. 2007. Modeling the effect of climate change on the distribution of Oak and Pine Spices of Mexico. *Conservation Biology*, 6:1545-1555.
- Gómez-Díaz J., Monterroso-Rivas A., Tinoco-Rueda J., Toledo-Medrano M., Conde-Alvarez C. y Gay-García C. 2011. Assessing current and potential patterns of 16 forest species driven by climate change scenarios in México. *Atmósfera*, 24:31-52.

- Grogan J. y Schulze M. 2012. The impact of annual and seasonal rainfall patterns on growth and phenology of emergent tree species in southeastern Amazonia, Brazil. *Biotropica*, 44:331-340.
- Islebe G. A. y Sánchez O. 2001. La vegetación de Quintana Roo: pasado y presente. *Foresta Veracruzana*, 3:47-51.
- INEGI. Instituto Nacional de Geografía y Estadística. 2015. Características edafológicas, fisiográficas e hidrológicas de México. <http://intranet.capacitacion.inegi.gob.mx> (consultado marzo 2015).
- Jump A. S., Mátyás C. y Peñuelas J. 2009. The altitude-forlatitude disparity in the range retractions of woody species. *Trends in Ecology and Evolution*, 24:694-701.
- LGEEPA. Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente. 2014. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F.
- Ledig F. T., Rehfeldt G. E., Sáenz-Romero C. y Flores-López C. 2010. Projections of suitable habitat for rare species under global warming scenarios. *American Journal of Botany*, 97:970-987.
- Lemes M. R., Gribel R., Proctor J. y Grattapaglia D. 2003. Population genetic structure of mahogany (*Swietenia Macrophylla* King, Meliaceae) across the Brazilian Amazon, based on variation in *Pinus hartwegii* populations and its application for adaptation to climate change. *Silvae Genetica*, 62:86–95.
- Martínez E. y Galindo C. 2002. La vegetación de Calakmul, Campeche, México: Clasificación, descripción y distribución. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 71:7-32.
- Monterroso-Rivas A., Gómez-Díaz J. y Tinoco-Rueda J. 2013. Bosque mesófilo de montaña y escenarios de cambio climático: una evaluación en Hidalgo, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 19: 29–43.
- Orellana R., Espadas C., Conde C. y Gay C. 2012. Atlas Escenarios de cambio climático en la Península de Yucatán. Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. Mérida, Yucatán, México.
- Peterson A. T. y Soberón J. 2008. Rethinking receiver operating characteristic analysis applications in ecological niche modelling. *Ecological Modelling*, 213:63-72.

- Phillips S. J., Anderson R. P., y Schapire R. E. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190:231-259.
- Rehfeldt G. E., Crookston N. L., Sáenz C. y Campbell E. 2012. North American vegetation model for land use planning in a changing climate: A statistical solution to large classification problems. *Ecological Applications*, 22:119-141
- Rehfeldt G. E., Jaquish B. C., López-Upton J., Sáenz-Romero C., StClair J. B., Leites L.P y Joyce D. G. 2014. Comparative genetic responses to climate for the varieties of *Pinus ponderosa* and *Pseudotsuga menziesii*: Realized climate niches. *Forest Ecology and Management*, 324:126-137.
- Reu B., Zaehle S., Bohn K., Pavlick R., Schmidtlein S., Williams J. W. y Kleidon A. 2013. Futre no-analogue vegetation produced by no-analogue combinations of temperature and insolation. *Global Ecology and Biogeography*, 23: 156-167.
- Sáenz-Romero C, Rehfeldt G. E., Crookston N. L., Pierre D., St-Amant R., Beaulieu J. y Richardson B. 2010. Spline models of contemporary, 2030, 2060 and 2090 climates for Mexico and their use in understanding climate-plant impacts on vegetation. *Climate Change*, 102:595-623.
- Sáenz-Romero C., Rehfeldt G. E., Duval P. y R.A. Linding-Cisneros. 2012. *Abies religiosa* habitat prediction in climatic change scenarios and implications for monarch butterfly conservation in Mexico. *Forest Ecology and Management*, 275:98-106.
- Sáenz-Romero C., Rehfeldt G. E., Ortega-Rodríguez J. M., Marín-Togo M. C. y Madrigal-Sánchez X. 2015. *Pinus leiophylla* suitable habitat for 1961-1990 and future climate. *Botanical Sciences*. En prensa.
- Statistical Analysis System (SAS Institute Inc). 2006. SAS/STAT 9.2 User's Guide. Cary, N.C., USA: Autor.
- Sturrock R. N., Frankel S. J., Brown A. V., Hennon P.E., Kliejunas J.T., Lewis K.J., Worrall J.J. y Woods A.J. 2011. Climate change and forest diseases. *Plant Pathology*, 60:133-149.
- Télez-Valdés O., Dávila-Aranda P. y Lira-Saade R. 2006. The effects of climate change on the long-term conservation of *Fagus grandiflora* var. *mexicana*, an important species of the cloud forest in eastern México. *Biodiversity and Conservation*, 15: 1095–1107.

- Tello-Taracena H. A. 2011. Suelo. *In* C. Poza, N. Armijo y S. Calmé. Eds. pp 57. Riqueza biológica de Quintana Roo un análisis para su conservación. México, D.F.
- Tovar C., Arnillas C. A., Cuesta F. y Buytaert W. 2013. Diverging Responses of Tropical Andean Biomes under Future Climate Conditions. *PLOS ONE*, 8:1-12.
- UNESCO. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. 2014. Tres sitios de América Latina y Alemania inscritos en la Lista del Patrimonio Mundial. <http://www.unesco.org/> (consultado octubre 2014).
- Villers L. y I. Trejo. 2004. Evaluación de la vulnerabilidad en los ecosistemas forestales. *In*: Martínez J. y A. Fernández-Bremauntz. Cambio climático: una visión desde México. SEMARNAT-INE. 239-254 pp. México, D.F.
- Viveros-Viveros H., Sáenz-Romero C., Vargas-Hernández J., López-Upton J., Ramírez-Valverde G. y Santacruz-Varela A. 2009. Altitudinal genetic variation in *Pinus hartwegii* Lindl. I: Height growth, shoot phenology, and frost damage in seedlings. *Forest Ecology and Management*, 257:836–842.

2. REDUCCIÓN DEL HÁBITAT CLIMÁTICO PROPICIO PARA *Lysiloma Latisiliquum* (L.) Benth. (TZALAM) POR EL CAMBIO CLIMÁTICO

Miriam Garza-López¹, Juan Manuel Ortega-Rodríguez², Francisco José Zamudio-Sánchez¹, José Francisco López-Toledo³, Francisco Alberto Domínguez-Álvarez¹ y Cuauhtémoc Sáenz-Romero^{4,5,*}

¹División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 Carretera México- Texcoco. 56230, Chapingo, Texcoco, Estado de México

²Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Edificio R, Ciudad Universitaria, Morelia, Michoacán, México Instituto

³Intituto Tecnológico de la Zona Maya. Km 21.5 Carretera Chetumal-Escárcega. 77965, Ejido Juan Sarabia, Quintana Roo, México

⁴Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (IIAF-UMSNH). Km 9.5 Carretera Morelia-Zinapécuaro. 58880, Tarímbaro, Michoacán, México.

⁵Dirección actual: Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), Unité Mixte de Recherche 1202 Biodiversité Gènes & Communautés (UMR 1202 BIOGECO), F-33610 Cestas, France & Université de Bordeaux, UMR 1202 BIOGECO, F-33615 Pessac, France

3.1 Resumen

El modelado del hábitat climático propicio para la distribución potencial de especies es una herramienta poderosa para proyectar los impactos del cambio climático y sugerir medidas de manejo que permitan aminorar sus efectos negativos. Los objetivos del presente trabajo fueron: 1) determinar la distribución potencial del hábitat climático propicio contemporáneo y futuro (década centrada en el año 2030) de *Lysiloma latisiliquum* (L.) Benth., en la Península de Yucatán, 2) sugerir medidas de manejo para reacoplar las poblaciones contemporáneas al clima que les será propicio en la década centrada en el año 2030. Se obtuvieron los registros geográficos para *L. latisiliquum* del Inventario Nacional Forestal y Suelos (INFS) y *grids* climáticas para clima contemporáneo (promedio 1961-1990), y futuro (década centrada en 2030), con escenarios de emisiones intermedias (6.0 W/m²) de concentraciones de gases de efecto invernadero. Se modeló la distribución potencial bajo el clima contemporáneo y futuro usando MaxEnt. Para el año 2030 se proyecta una pérdida de hábitat climático del 43% en relación al contemporáneo, confinándose principalmente en el centro de la Península de Yucatán. Se propone recolectar semilla en la distribución actual, principalmente en las poblaciones cercanas a la costa, y plantar el centro de la Península, además conservar germoplasma *ex situ*, con el propósito de reacoplar las poblaciones al clima futuro y asegurar la conservación de la diversidad genética del Tzalam.

Palabras clave. Cambio climático, *Lysiloma latisiliquum* (L.) Benth., MaxEnt

y Península de Yucatán.

Abstract

The suitable climate habitat modeling for the potential distribution of species, is a powerful tool to project the climate change impacts and to suggest management measures that may mitigate its negative effects. The objectives of this study were: 1) To determine the potential distribution of *Lysiloma latisiliquum* (L.) Benth. for the Yucatan Peninsula, and 2) To suggest management actions for recoupling the contemporary populations to their suitable climate habitat by the decade centered in the year 2030. Geographical records for *L. latisiliquum* were obtained from the Mexican National Forest and Soil Inventory (INFS) and the grids for contemporary (average 1961-1990) and future (decade centered on 2030), with intermediate greenhouse-effect gas emission scenarios. Potential distribution under the contemporary and future climate was modeled using MaxEnt. For the decade of 2030 it is projected a climatic habitat loss of 43% in relation to contemporary, distribution at the Yucatan Peninsula, confining mainly in the center of the Yucatan Peninsula. It is proposed to collect seed in the current distribution, mainly in populations near the coast, and plant the center of the peninsula, also conserve germplasm ex situ, in order to reattach the populations to future climate and ensure the conservation of the genetic diversity of Tzalam.

Index words. Climate change, *Lysiloma latisiliquum* (L.) Benth., MaxEnt, Yucatan Peninsula

3.2 Introducción

En los últimos años, el aprovechamiento forestal de especies tropicales maderables ha crecido. Tal es el caso de *Lysiloma latisiliquum* (L.) Benth., comúnmente conocido como Tzalam, que se distribuye principalmente en bosques secos y caducifolios en Cuba, Haití, Puerto Rico, República Dominicana, las Bahamas, al sur de la Florida, México y norte de América Central (CATIE, 2003). Después de las especies maderables de muy alto valor comercial, como la caoba (*Swietenia macrophylla* King) y el cedro (*Cedrela*

odorata Cham. & Schltl.), en la Península de Yucatán una de las principales especie en volúmenes aprovechados y con demanda creciente es el Tzalam (Forster *et al.*, 2002).

Un manejo forestal sustentable requiere del conocimiento del hábitat climático que es propicio para el mejor aprovechamiento de las especies prioritarias. A ello es necesario considerar los impactos que implicará el desacoplamiento que habrá entre las poblaciones de especies forestales y el clima que les es propicio, debido al cambio climático (Rehfeldt *et al.*, 2012).

La modelación del hábitat climático propicio usando técnicas como GARP, MaxEnt o RandomForest, se utiliza cada vez más para examinar la vulnerabilidad de los recursos genéticos forestales ante el cambio climático (Téllez-Valdés *et al.*, 2006; Gómez-Mendoza y Arriaga, 2007; Ledig *et al.*, 2010; Sáenz-Romero *et al.*, 2010; Gómez-Díaz *et al.*, 2011; Sáenz-Romero *et al.*, 2012; Monterroso-Rivas *et al.*, 2013), con el fin de comparar la distribución geográfica del hábitat climático propicio contemporáneo con el futuro, y así poder sugerir medidas de manejo tendientes a disminuir los efectos negativos del cambio climático.

Con base en lo anterior se plantearon los siguientes objetivos: 1) determinar la distribución potencial del hábitat climático propicio contemporáneo y futuro (década centrada en el año 2030) para *Lysiloma latisiliquum* (L.) Benth., para la Península de Yucatán, México 2) sugerir medidas de manejo para reacoplar las poblaciones contemporáneas al clima que les será propicio en la década centrada en el año 2030.

3.3 Materiales y métodos

Área de estudio

El área de estudio comprende primariamente la Península de Yucatán, ubicada en el sureste de México. La Península es una gran plataforma de rocas calcáreas y es la provincia geológicamente más joven de México; abarca los estados de Yucatán, Quintana Roo y Campeche (INEGI, 2015). El terreno de la Península de Yucatán es en general plano, con altitud promedio de 50 msnm

y sólo en el centro-sur se encuentra elevaciones hasta de 350 metros. Los suelos predominantes son los leptosoles, suelos someros de escasa profundidad, escasa cantidad de tierra fina y gran cantidad de piedras o afloramientos de roca (Tello, 2011; Bautista-Zúñiga, 2010). La mayor parte de la Península de Yucatán presenta un clima tropical con lluvias en verano (Aw) y seco estepario (Bs) el extremo noroeste de la Península. La vegetación de la Península de Yucatán se rige principalmente por un gradiente de humedad que se incrementa de norte a sur, lo que provoca un mayor desarrollo estructural, formado principalmente por selvas baja caducifolia, selva mediana subcaducifolia, selva mediana subperennifolia, selva baja espinosa, manglar, entre otras (Díaz, 2011; Flores-Guido *et al.*, 2010).

Obtención de datos

Los registros de presencia de *Lysiloma latisiliquum* (L.) Benth., se obtuvieron de la base de datos del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFS) 2004-2009. Debido a que el área de interés fue la Península de Yucatán, se incluyeron presencias para la Península de Yucatán, y los otros dos estados cercanos y con mayor número de presencias después de la Península: Chiapas y Tabasco. Las unidades de muestreo fueron conglomerados con 1600 m² de superficie separados a 5 x 5 km. (CONAFOR, 2009). Una vez obtenidos los registros, se procedió a la limpieza de los datos que consistió en eliminar las coordenadas geográficas duplicadas, con la finalidad de obtener las coordenadas por conglomerado (la base de datos original incluye coordenadas por sitios muestreada, pero dada la cercanía entre sitios, las coordenadas con una precisión de un centésimo de grado frecuentemente están duplicadas).

Variables climáticas

A partir de un modelo climático “spline” de clima contemporáneo (promedio del período 1961 a 1990) y clima futuro (promedio de la década centrada en el año 2030), disponibles en: <http://forest.moscowfsi.wsu.edu/>, se descargaron las rejillas (grids) de 15 variables climáticas que representan las características anuales y estacionales de temperatura y precipitación para Norteamérica, a una resolución de 1 km² (Tabla 1), y se recortaron para la región estudiada,

desde la Península de Yucatán hasta el noreste de Honduras. Se generaron cuatro variables derivadas: Índice anual de sequía (ADI), Índice de sequía para la temporada de crecimiento (GSDI), el diferencial de temperatura entre el mes más caliente y el más frío (TDIFF), el cociente de la precipitación de verano y la de primavera (PRATIO) y la interacción entre la precipitación de la temporada de crecimiento y TDIFF (GSPTD; ver detalles en Tabla 1). Las variables climáticas mencionadas han sido usadas previamente en el modelaje del hábitat climático propicio de especies forestales mexicanas, por ejemplo *Pinus chiapensis* (Martínez) Andersen, *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham. y *Pinus leiophylla* Schltdl. & Cham. (Sáenz-Romero *et al.*, 2010; 2012; 2015; respectivamente).

Tabla 1. Variables climáticas estimadas para clima contemporáneo (1961-1990) y futuro (década centrada en el año 2030), para cada sitio de presencia y para *grids* (1 km²) del área de estudio.

Abreviación	Variable
MAT	Temperatura media anual (°C)
MAP	Precipitación media anual (mm)
GSP	Precipitación de la temporada de crecimiento abril –septiembre (mm)
MTCM	Temperatura media del mes más frío (°C)
MMIN	Temperatura media mínima (°C)
MTWM	Temperatura media del mes más cálido (°C)
MMAX	Temperatura media máxima (°C)
DD5	Grados día > 5°C del periodo de crecimiento abril - septiembre
GSDD5	Grados día < 5°C del periodo de crecimiento abril - septiembre
D100	Suma de días en el que se acumulan 100 grados día > 5°C
DD0	Grados día < 0 ° C respecto a la temperatura media
MMINDD0	Grados día < 0 ° C respecto a la temperatura mínima
SPRP	Precipitación de verano (mm)
SMRP	Precipitación de otoño (mm)
WINP	Precipitación de invierno (mm)
ADI	Índice de aridez: $(DD5^{0.5})/MAP$

GSDI	Índice de aridez de la temporada de crecimiento: (GSDD5 ^{0.5})/GSP
GSPTD	(GSP x TDIFF)/100
TDIFF	Diferencia de temperatura de entre el mes más caliente y el más frío (MTWM-MTCM)
PRATIO	GSP/MAP

Las estimaciones del clima futuro se basan en el promedio de 18 modelos-escenarios climáticos, con trayectorias representativas de concentración de gases de efecto invernadero (llamadas RCP por su acrónimo en inglés), con una trayectoria intermedia (6.0 W/m², que equivale a que la concentración de CO₂ alcanzará su máximo en la década del 2080). Detalles de los modelos climáticos en Crookston y Rehfeldt (2014) y Rehfeldt *et al.*, (2014). Para el modelaje que dio origen a las rejillas de clima contemporáneo para México ver Sáenz-Romero *et al.* (2010).

Cabe resaltar el concepto de clima “contemporáneo”, se considera el período 1961-1990 como un clima similar al cual las poblaciones de especies forestales (inventariadas por el INFS), se adaptaron y crecieron; no se refiere al clima actual o presente (década 2000 – 2010 o similar), debido a que el cambio climático ha modificado el clima en las últimas décadas. En otras palabras, se asume que el clima promedio del período 1961-1990 es una estimación aceptable y a nuestro alcance de las condiciones que en su momento permitieron un equilibrio entre la distribución de especies vegetales y el clima existente antes de que el cambio climático antropomórfico empezara a acumular sus efectos (Rehfeldt *et al.*, 2014; Sáenz-Romero *et al.*, 2015).

Para el futuro, se eligió enfocar el análisis para el promedio de la década centrada en el año 2030, ya que para promover la adaptación de las poblaciones forestales a los climas futuros, debe considerarse lo siguiente: reubicar genotipos con anticipación para que crezcan en sitios propicios climáticamente como para alcanzar al menos la edad reproductiva. Reubicarse

en un sitio con proyecciones de clima propicio en un horizonte demasiado lejano, como el de 2080 ó 2090, eventualmente se expondría en el presente a las plantas a daños por frío, que podrían hacer inviable alcanzar la edad reproductiva (Sáenz-Romero *et al.*, 2012, Castellanos-Acuña *et al.*, 2015).

Modelado de clima contemporáneo

La distribución del hábitat climático propicio para la especie bajo el clima contemporáneo se modeló mediante el algoritmo MaxEnt. A este proceso también se le conoce como modelado de nicho ambiental (environmental niche modeling ENM, por su acrónimo en inglés) (Phillips *et al.*, 2006; Elith *et al.*, 2011). En nuestro caso, se modeló únicamente el nicho ambiental, por considerar únicamente variables climáticas (sin incluir otras como tipo de suelo).

Se utilizaron 615 localidades de presencia y 20 variables climáticas (Tabla 1). Cabe mencionar que se utilizó sólo el 10% de los registros del INFS (6150 para todo México), con la finalidad de evitar sobreestimación del modelo debido a la cantidad de datos. El 10 % de los datos se obtuvieron de manera aleatoria. El modelo se construyó con el 75% de los registros de ocurrencia. El umbral de convergencia fue 0.00001 con 500 interacciones como límite máximo para cada corrida. El formato de salida analizado fue logístico, el cual indica un hábitat óptimo de 0 ó 1, donde 0 es ausencia y 1 máxima idoneidad.

Se utilizó el método Jackknife, instrumentado en MaxEnt, el cual indica la contribución relativa de cada variable climática al modelo. La distribución espacial del hábitat climático se obtuvo mediante la herramienta ArcMap 9.3®, obteniendo el número de pixeles y transformándolos a hectáreas. Finalmente, se generaron los mapas de la distribución de la especie en clima contemporáneo y 2030.

Validación del modelo climático

La validación del modelo se llevó a cabo mediante el programa ROC parcial (Barve, 2008). Se siguieron las recomendaciones de Peterson y Soberón (2008), usando un umbral esperado de error de $E = 5\%$. Se realizaron 1,000 iteraciones para el cálculo de la versión parcial del análisis del área bajo la

curva (AUC) y se expresaron los resultados como la razón entre la curva ROC observada, contra la esperada al azar, en donde ambas están truncadas al área delimitada por el umbral de error. Cuando se realiza el análisis de ROC parcial, solo es usada la porción del área en la curva ROC donde las predicciones del modelo son relevantes para el cálculo de razón. Los valores de ésta abarcan el intervalo que va de 0 a 2, donde 1 equivale a un modelo totalmente al azar. La prueba se realizó con el 25% de los datos, que fueron separados al azar del total de las localidades de presencia de la especie.

El modelo obtenido con el 75% de los datos, se reclasificó con valores de 0 a 1, donde 0 es menos idoneidad y 1 mayor idoneidad para la presencia de la especie. Posteriormente se obtuvo el área que ocupa cada clase de presencia de la especie para el 25% de los datos. Una vez generados los archivos se introdujeron al programa ROC Parcial, con 1000 interacciones y 0.95 de tolerancia de error de omisión. Una vez generados los resultados se obtuvo la media, máximos, mínimos y desviación estándar.

Proyección de hábitat climático futuro

El hábitat climático futuro se proyectó mediante el algoritmo MaxEnt: una vez terminado el modelaje construido con el clima contemporáneo, se repitió la proyección pero esta vez alimentando el modelo con las rejillas de variables climáticas para la década centrada en 2030.

Se proyectó con la opción “Do clamping” de MaxEnt, el cual reduce la predicción en cada punto en las proyecciones por la diferencia entre la salida aparente y la no sujeta a ese punto. Además, se comparó la similitud ambiental de las variables contemporáneas con las variables futuras (2030).

Validación del modelo

Mediante el análisis de la curva ROC parcial obtuvo valores superiores al umbral (≥ 1) para el clima contemporáneo (Tabla 2). Lo que nos indica que el modelo tuvo una buena predicción del hábitat climática óptimo para el desarrollo de la especie.

Tabla 2. Razón de curva ROC Parcial con 75% de localidades al azar

Validación de curva ROC parcial	
Máximo	1.97
Mínimo	1.33
Media	1.92
Desviación estándar	0.07

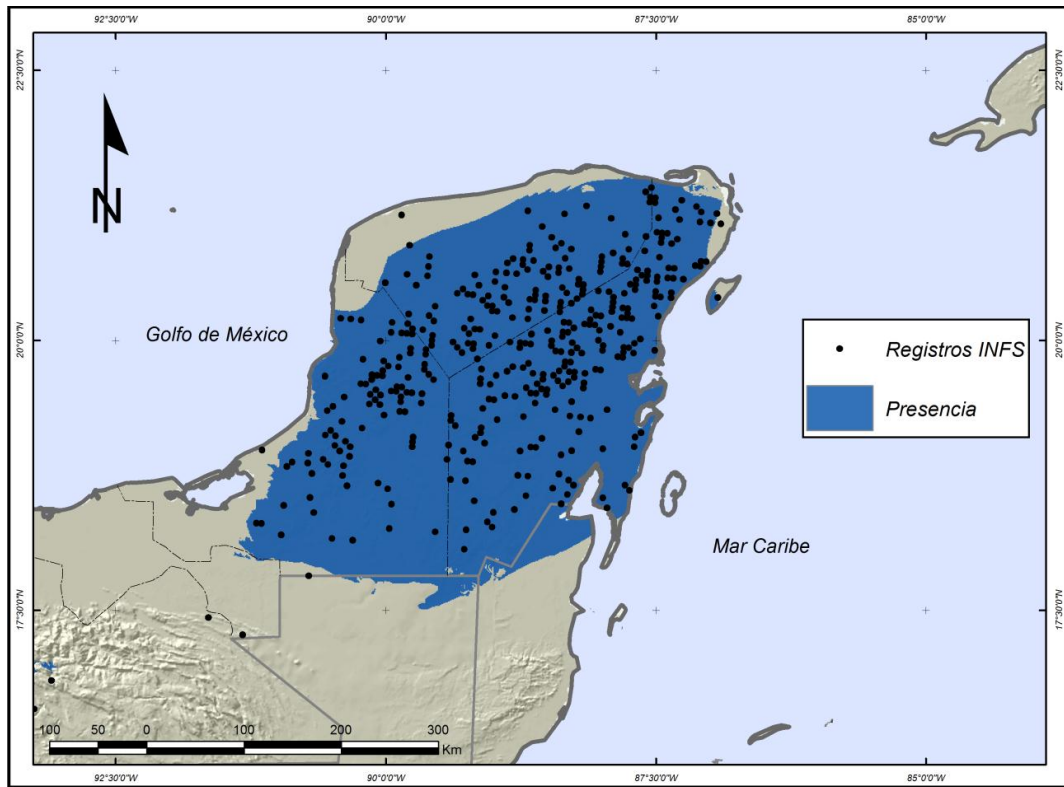
Los resultados muestran que los modelos obtenidos están por encima de las expectativas de modelos obtenidos al azar (Peterson y Soberón, 2008). La distribución modelada coincide con otros trabajos realizados por medio de colectas y muestreo de campo (CATIE, 2003 y Vester y Navarro, 2007).

3.3 Resultados y discusión

Clima contemporáneo

La distribución potencial para *L. latisiliquum* (Tzalam) en la Península de Yucatán modeló 12, 515,067 ha, aproximadamente, con hábitat climático propicio bajo clima contemporáneo (promedio 1961-1990), para los estados de Quintana Roo, Yucatán, Campeche y parte de Chiapas (Figura 1a).

a)



b)

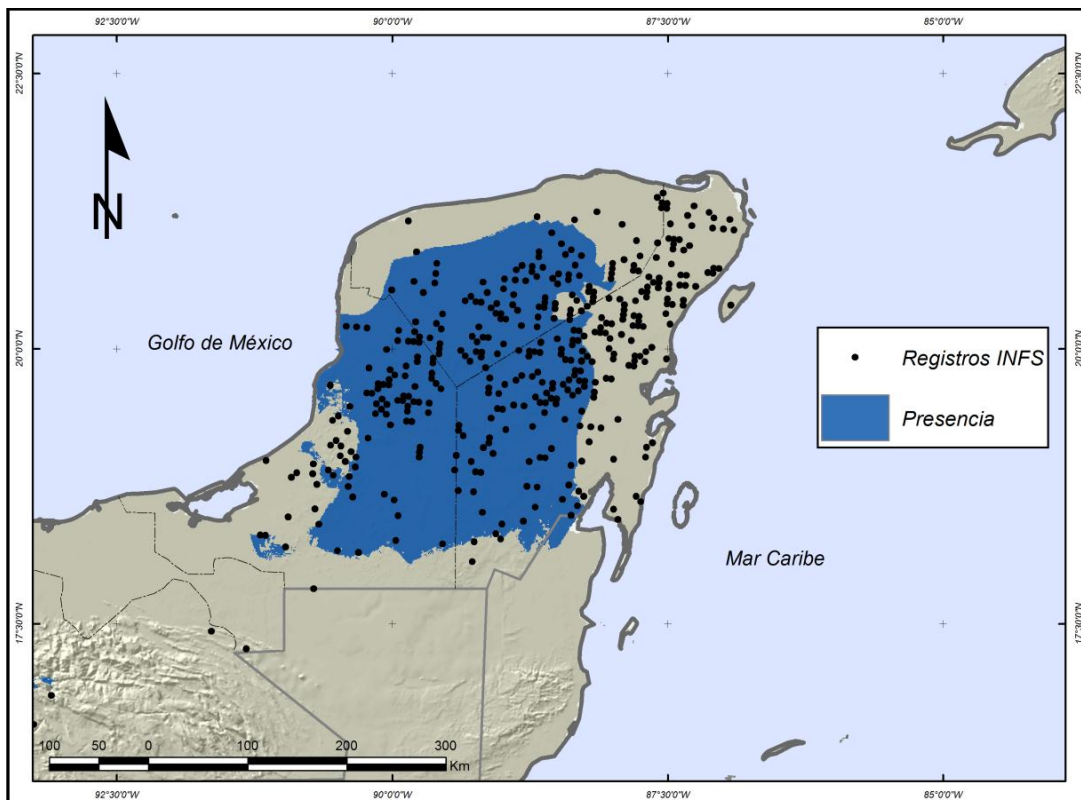


Figura 1. Mapa del hábitat climático propicio (área en azul) de *Lysiloma latisiliquum* (L.) para (a) clima contemporáneo (1961-1990), y (b) futuro (década centrada en el año 2030). Símbolos indican registros de presencia según el Inventario Nacional Forestal y de Suelo (INFS) (CONAFOR, 2004-2009).

Además, mediante la prueba de Jackknife implementada en Maxent se identificaron las variables de mayor contribución para la proyección del modelo, las cuales fueron DD5 (42.6 % de contribución a la explicación del modelo), MTCM (8.8 %), WINP (8.5 %), ADI y TDIFF (8.6%). Esto es congruente con el hecho de que es una especie de zonas tropicales donde prácticamente no existe época de frío, con estación seca no mayor de cuatro a seis meses, temperatura media anual de 23 - 26 ° C, pluviometría de 1100 a 2000 mm, la especie no tolera encharcamientos ni heladas (CATIE, 2003).

Proyección para el clima futuro (2030).

La proyección para 2030 (Figura 1b), estima un área con hábitat climático propicio de 7, 107,507 ha. Esto implica una reducción del hábitat climático, respecto al contemporáneo (Figura 1a), del 43 %. La distribución se reduce en las cercanías a las costas de la Península de Yucatán, confinándose principalmente al centro de la Península, disminuyendo pronunciadamente en la porción este del estado de Quintana Roo.

Una desaparición importante de hábitat climático para especies tropicales coincide con otros modelajes realizados, con diferentes modelos de circulación global y diferentes escenarios de emisiones de gases invernadero. Por ejemplo: la presente predicción de la disminución del hábitat para el Tzalam y su reducción al centro de la Península de Yucatán, es plenamente coincidente con las predicciones de biomas contemporáneos y futuros de Rehfeldt *et al.*, 2012. En esa proyección, se estima una expansión del hábitat climático propicio para el bosque seco deciduo de Yucatán (clasificación de biomas según Brown *et al.*, 1998), del extremo noroeste de la Península de Yucatán (justamente donde no se predice Tzalam bajo clima contemporáneo, Figura

1a), en la dirección sureste. Tal expansión se proyecta ocurrirá a costa de una relevante reducción del clima propicio para el bosque tropical semi-perennifolio, que es en el que ocurre actualmente el Tzalam (ver Figura 9 en Rehfeldt *et al.*, 2012).

El clima sin análogo contemporáneo han sido proyectados también por otros autores. Reu *et al.* (2013) predijeron vegetación no-análoga al clima del norte de Eurasia, y sugirió que las latitudes medias pueden ser más susceptibles a la formación de las asociaciones vegetales no-análogas, debido a la prolongación de la temporada de crecimiento, combinado con patrones estables de ciclones de insolación. Tovar *et al.* (2013) proyectan pérdida de más del 30% de superficie actual de diversos biomas de los Andes Tropicales.

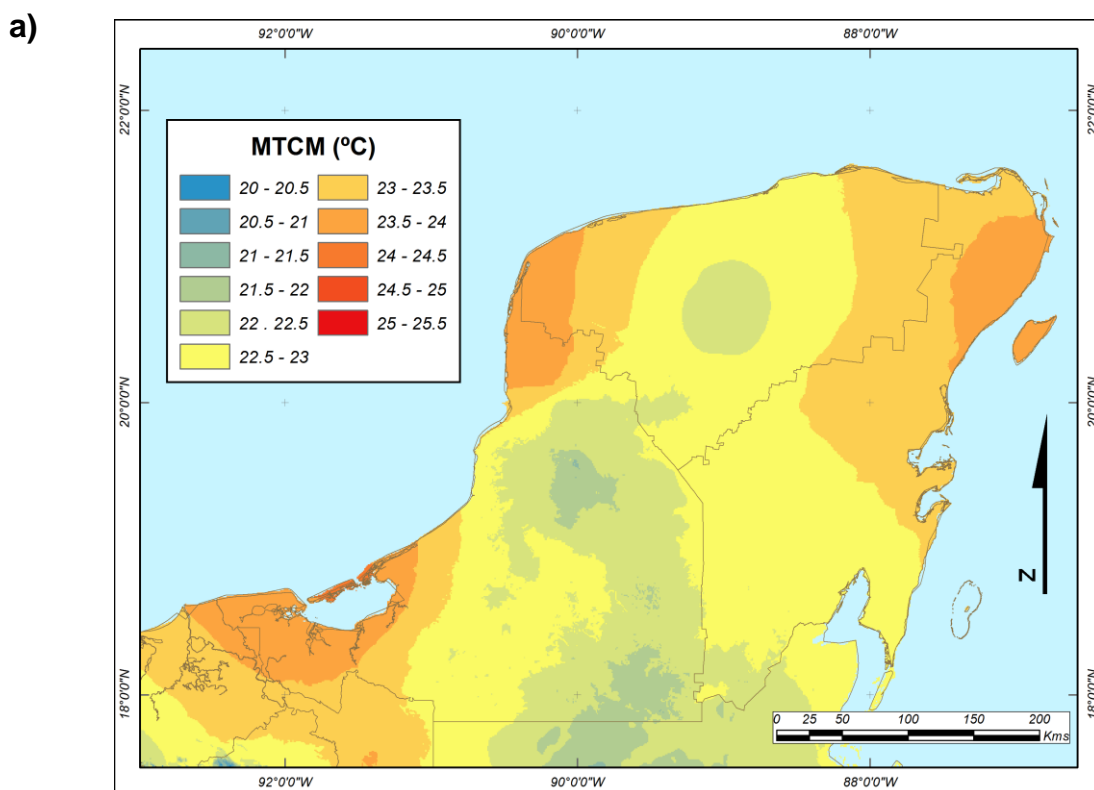
En nuestro caso, suponemos que el principal factor que ocasionará el cambio en la distribución del hábitat climático de la especie es el fenómeno de las brisas marinas, ya que influye en la precipitación y la temperatura, al desplazar las nubes hacia el suroeste, antes de agotar su humedad; de esta manera, modifican la trayectoria normal de las masas de aire húmedo, que al entrar en la tierra por las costas sigue un curso sensible orientado de este-sureste a oeste-noreste (Herrera, 2011), por esta razón en el centro-sur de la Península es menos caliente. Esto explica la proyección de la distribución de la especie en 2030, ya que el aumento de temperaturas y la disminución de precipitación serán más relevantes en las costas en comparación al centro de la Península, lo cual provocará la pérdida de las condiciones climáticas óptimas para el desarrollo de la especie en las zonas mencionadas (Figura 1b). Esto es congruente con Orellana-Loza *et al.*, (2002), quien a partir gráficas ombrotérmicas de 48 estaciones meteorológicas, proyecta para el año 2020 una sequía relativa más pronunciada y visible, sin embargo menciona que las mayores cantidades de lluvia estarán presentes en el sur de Campeche y Quintana Roo.

La proyección de reducción del hábitat climático de Tzalam hacia el centro de la Península, coincide con el modelaje para caoba en la que se proyecta reducción del 60 % del hábitat climático contemporáneo a 2030, limitándose a la Reserva de la Biosfera Calakmul (Garza-López *et al.*, 2015). En este caso,

la proyección para Tzalam tiene un comportamiento parecido, sin embargo al ser una especie con menores requerimientos de precipitaciones, en comparación a Caoba, posiblemente se verá menos afectada.

El cambio climático mencionando puede visualizarse comparando los valores de las variables determinantes para el desarrollo del Tzalam, como DD5 y MTCM, en mapas del clima contemporáneo y el predicho para la década del 2030.

Por ejemplo, la variable MTCM en clima contemporáneo muestra valores de 21.5 a 23.0 °C, en prácticamente toda la Península con excepción del norte de Quintana Roo, norte-este y norte-oeste de Campeche, donde es relativamente mas calido (Figura 2a, color anaranjado claro). Para 2030 se predice un incremento substancial, con valores que se incrementan hasta intervalos de 23.0 a 24.5 °C (Figura 2b, anaranjado fuerte).



b)

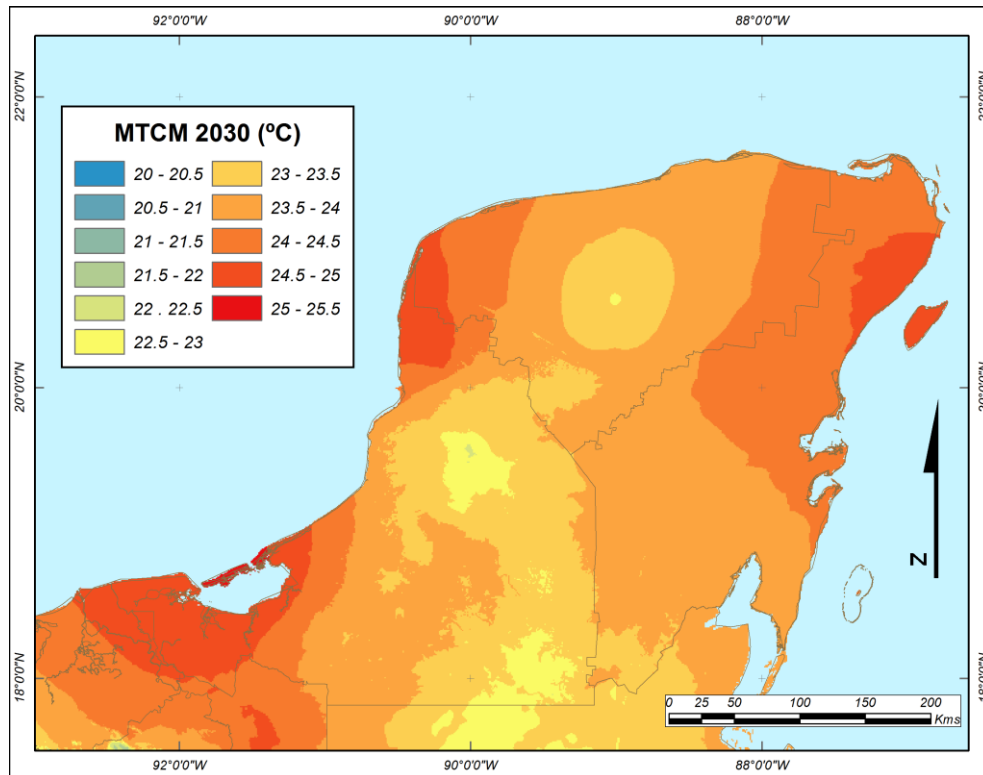
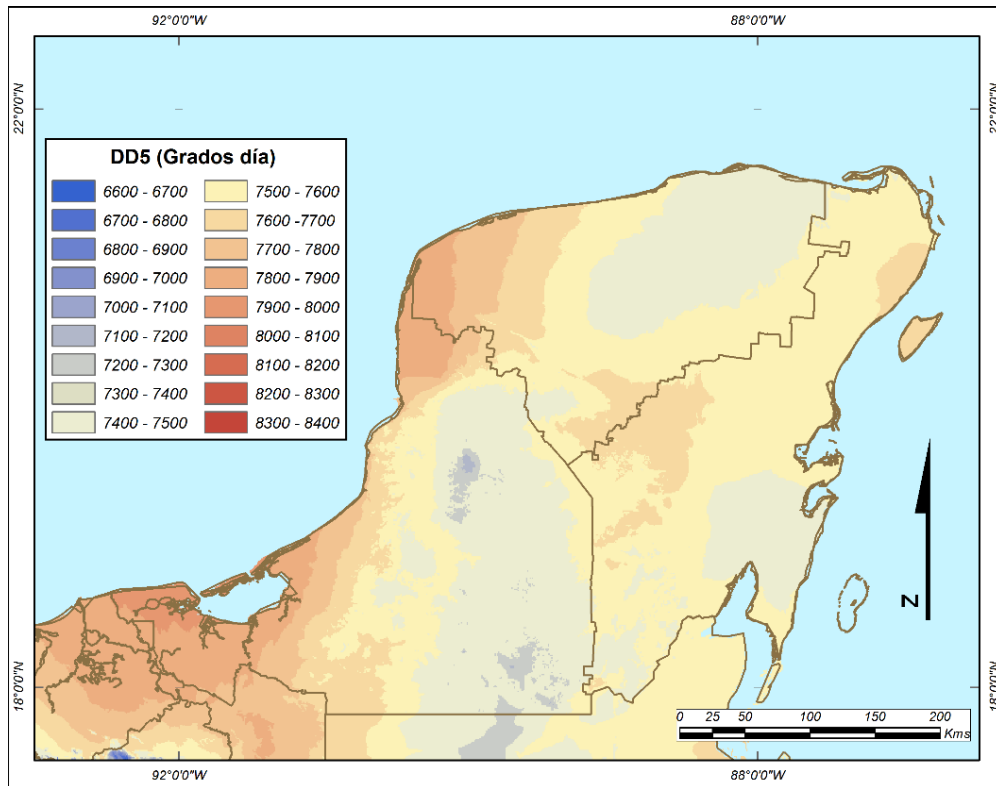


Figura 2. Temperaturas medias del mes más frío (MTCM) para clima contemporáneo (a) y futuro (b) para la Península de Yucatán.

La variable DD5 en clima contemporáneo presenta valores ente 7000 – 8000 grados día (Figura 3a), en gran parte de la Península y valores de 7000 – 7500 en el este de Campeche, norte de Yucatán y parte de la costa de Quintana Roo (Figura 3a, color amarillo). Sin embargo, para 2030 los valores de 7500 – 8000 se expanden notablemente (Figura 4b, color amarillo oscuro); en la costa del oeste de Campeche (costa del golfo de México), y en el centro de la Península, aparece un nuevo intervalo de valores aún más elevado: 8000 a 8500 grados día (Figura 4b, color rojo). Notar que en la actualidad no hay sitios con presencia de Tzalam con valores de DD5 arriba de 7900 grados día (Figura 3b); por tanto, los valores de más de 8000 grados día predichos para la década centrada en el año 2030 representarán un clima excesivamente cálido para las poblaciones de Tzalam, aún para aquellas que en la actualidad se encuentran en los sitios más cálidos de su distribución. El área con valores de DD5 arriba de 8000 grados día para el 2030, coincide con algunas área en que

desaparece el hábitat climático propicio para el Tzalam, con base en la proyección con MaxEnt (Figura 1b).

a)



b)

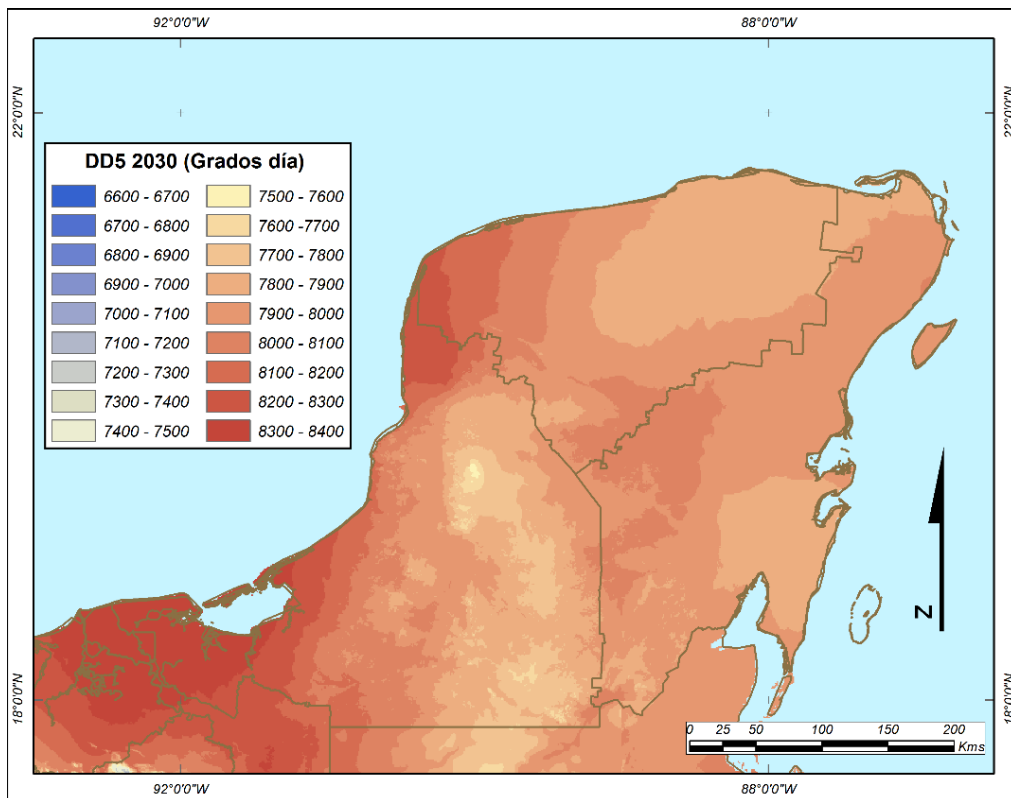


Figura 3. Grados día > 5° C (DD5) para clima contemporáneo (a) y futuro (b) para la Península de Yucatán.

Manejo y conservación de germoplasma

Con base en los resultados obtenidos, se recomienda establecer plantaciones de conservación genética *in situ* en el hábitat climático predicho para el año 2030, en el sur-oeste de Quintana Roo y centro-este de Yucatán (Figura 1b).

Dicho de otra manera, sería necesario colectar semilla en las poblaciones actuales, prioritariamente de las poblaciones naturales que quedarán fuera del hábitat climático propicio en el año 2030 (es decir, las cercanas a las costas), producir planta en vivero, y plantar en el centro de la Península de Yucatán, a fin de realinear las poblaciones de Tzalam con el clima que les es propicio, en las áreas de la Península que continuarán teniendo el clima adecuado en el futuro. Para próximos trabajos se sugiere realizar ensayos de procedencia, a fin de cuantificar el grado de diferenciación genética entre poblaciones, en caso de que exista, y considerar tal diferenciación para limitar el movimiento de germoplasma.

Considerando que esta especie se distribuye en un amplio rango de valores climáticos (derivado de su amplia distribución en la Península de Yucatán), es razonable suponer que será relativamente tolerante a los efectos del cambio climático, en comparación a otras especies de distribución más restringida. Por ello, también sería importante realizar un manejo silvícola encaminado a promover la regeneración natural en las poblaciones actuales, con el fin de incrementar el número de plántulas reclutadas, en las que pudiera operar la selección natural en un proceso de adaptación al cambio climático.

Un manejo silvícola que incluya la apertura de claros suficientemente grandes para satisfacer los requerimientos ambientales de esta especie, podría ser una prescripción deseable, ya que bajo sombra el Tzalam no puede competir contra otras especies. En caso de que la reforestación incluyera establecimiento de plantaciones comerciales, sería deseable incorporar genotipos derivados de un

proceso de selección orientada al mejoramiento de caracteres del fuste, ya que esta especie actualmente tiene coeficientes de aserrío muy bajos.

Finalmente, también se recomienda la conservación de germoplasma *ex situ*, ya sea en cuartos fríos, crioconservación o *in vivo*; ello con la finalidad de complementar ambos métodos y asegurar la conservación de la diversidad genética del Tzalam.

3.4 Conclusiones

El hábitat climático contemporáneo para *L. latisiliquum* se estima en 12, 515,067 ha en la Península de Yucatán. De acuerdo con la proyección para 2030, se prevé una pérdida de 43% de la distribución del hábitat climático contemporáneo, alejándose de las costas y concentrándose en el centro de la Península de Yucatán. Las variables de mayor contribución para la proyección del modelo fueron DD5 y MTCM, de acuerdo con el ensamble 60, MTCM incrementa aproximadamente 1 °C de clima contemporáneo a 2030, mientras DD5 cambia 100 grados día, ambas variables tiene valores diferentes en el centro de la Península. Con base en los resultados presentados, se propone recolectar semilla en la distribución actual, principalmente en las poblaciones cercanas a la costa, conservar germoplasma *ex situ* e *in situ* plantando en el centro de la Península, como una medida de mitigación ante los efectos del cambio climático y asegurar la conservación de la diversidad genética del Tzalam.

3.5 Bibliografía

- Barve N. (2008) Tool for Partial-ROC (Biodiversity Institute, Lawrence, KS), ver 1.0.
- Bautista-Zúñiga F. (2010) El suelo. *In*: Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán. R. Durán y M. Méndez (eds). CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA. Yucatán, México. pp: 14-16.

- Brown D. E., F. Reichenbacher y S. E. Franson. (1998) A classification of North American biotic communities. University of Utah Press, Salt Lake City, Utah, USA.
- Castellanos-Acuña D., R. A. Lindig-Cisneros y C. Sáenz-Romero (2015) Altitudinal assisted migration of Mexican pines as an adaptation to climate change. *Ecosphere* 6:1-16.
- CATIE. (2003) Leguminosae Mimosoideae *Lysiloma latisiliquum* (L) Benth. *In: Árboles de Centroamérica un Manual para Extensionistas*. J. Cordero y D.H. Boshier (eds). Turrialba, Costa Rica. pp: 685-688.
- CONAFOR. (2009) Manual y procedimiento para el muestreo de campo. Inventario Nacional Forestal y de suelo 2004-2009. Comisión Nacional Forestal. Zapopan, Jalisco. 87 p.
- CONAFOR. (2014) Inventario Estatal Forestal y de Suelos. Quintana Roo 2013. Zapopan, Jalisco. 119 p.
- Crookston N. y G. E. Rehfeldt (2014) Forest Climate Change: Potential Effects of Global Warming on Forests and Plant Climate Relationships in Western North America and Mexico. <http://forest.moscowfsi.wsu.edu/climate/> Consultado abril 2014.
- Díaz A. E. (2011) Vegetación. *In: Riqueza biológica de Quintana Roo un análisis para su conservación*. C. Poza, N. Armijo y S. Calmé (eds). CONABIO. México. D.F. pp: 62-72.
- Elith J. S., J. Phillips, T. Hastie, M. Dudick, Y. E. Chee y C. J. Yates (2011) A statistic explanation of Maxent for ecologists. *Diversity and Distributions* 17:43-57.
- FAO. (2014) The state of the World's Forest Genetic Resources. Roma, Italia. 276 p.
- Fernandez-Concha G. C., J. L. Tapia-Muñoz, R. Duno de Stefano, I. M. Ramírez-Morillo, L. Can-Itzá, S. Hernández-Aguilar y A. Castillo (2012) La flora de la Península de Yucatán Mexicana: 250 años de conocimiento florístico. *Biodiversitas* 101:6-10.
- Flores-Guido J.S., R. Durán-García y J. J. Ortiz-Díaz (2010). Comunidades vegetales Terrestres. *In: Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán*. R. Durán y M. Méndez (eds). CICY. Yucatán, México. pp: 125-129.

- Forster R., H. Albrecht, M. Belisle, A. Caballero, H. Galletti, O. Lacayo, S. Ortiz y D. Robinson (2002) Comunidades forestales y el mercadeo de maderas tropicales poco comerciales de Mesoamérica. Universidad de Quintana Roo. Quintana Roo, México. 158 p.
- Garza-López M., J. M. Ortega-Rodríguez, F. J. Zamudio-Sánchez, F.J. López-Toledo, F. A. Domínguez-Álvarez y C. Sáenz-Romero (2015) Calakmul como refugio de *Swietenia macrophylla* king ante el cambio climático. Botanical Sciences. En prensa.
- Gómez-Díaz J., A. Monterroso-Rivas, J. Tinoco-Rueda, M. Toledo-Medrano, C. Conde-Alvarez y C. Gay-García (2011) Assessing current and potential patterns of 16 forest species driven by climate change scenarios in México. *Atmósfera* 24:31–52.
- Gómez-Mendoza L. y L. Arriaga 2007. Modeling the effect of climate change on the distribution of Oak and Pine Species of Mexico. *Conservation Biology* 6:1545-1555.
- Herrera J. C. (2011) Clima. *In*: Riqueza biológica de Quintana Roo un análisis para su conservación. C. Poza, N. Armijo y S. Calmé (eds). CONABIO. México. D.F. pp: 50-55.
- Instituto Nacional de Geografía y Estadística INEGI (2015) Características edafológicas, fisiográficas e hidrológicas de México. <http://intranet.capacitacion.inegi.gob.mx> (consultado marzo 2015).
- Ledig F. T., G. E. Rehfeldt, C. Sáenz-Romero y C. Flores-López (2010) Projections of suitable habitat for rare species under global warming scenarios. *American Journal of Botany* 97:970-987.
- Monterroso-Rivas A., J. Gómez-Díaz y J. Tinoco-Rueda (2013) Bosque mesófilo de montaña y escenarios de cambio climático: una evaluación en Hidalgo, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 19: 29–43.
- Orellana R., C. Espadas, C. Conde y C. Gay (2012) Atlas Escenarios de cambio climático en la Península de Yucatán. Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. Mérida, Yucatán, México. 111 p.

- Peterson A.T. y J. Soberón (2008) Rethinking receiver operating characteristic analysis applications in ecological niche modelling. *Ecological Modelling* 213:63-72.
- Phillips S. J., R. P. Anderson y R. E. Schapire (2006) Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* 190: 231-259.
- Rehfeldt G. E., B. C. Jaquish, J. López-Upton, C. Sáenz- Romero, J. B. StClair, L. P. Leites y D. G. Joyce (2014) Comparative genetic responses to climate for the varieties of *Pinus ponderosa* and *Pseudotsuga menziesii*: Realized climate niches. *Forest Ecology and Management* 324:126-137.
- Rehfeldt G. E., N. L. Crookston, C. Sáenz-Romero y E. Campbell (2012) North American vegetation model for land use planning in a changing climate: A statistical solution to large classification problems. *Ecological Applications* 22:119-141.
- Reu B., S. Zaehle, K. Bohn, R. Pavlick, S. Schmidlein, J. W. Williams y A. Kleidon (2013) *Global Ecology and Biogeography* **23**:156–167.
- Sáenz-Romero C., G. E. Rehfeldt, J. M. Ortega-Rodríguez, M. C. Marín-Togo y X. Madrigal-Sánchez (2015) *Pinus leiophylla* suitable habitat for 1961-1990 and future climate. *Botanical Sciences*. En prensa.
- Sáenz-Romero C., G. E. Rehfeldt, J. C. Soto-Correa, S. Aguilar-Aguilar, V. Zamarripa-Morales y J. López-Upton (2012) Altitudinal genetic variation among *Pinus pseudostrabus* populations from Michoacán, México; two location shadehouse test results. *Revista Fitotecnia Mexicana* 35:111–120.
- Sáenz-Romero C., G. E. Rehfeldt, N. L. Crookston, D. Pierre, R. St-Amant, J. Beaulieu y B. Richardson (2010) Spline models of contemporary, 2030, 2060 and 2090 climates for Mexico and their use in understanding climate-plant impacts on vegetation. *Climatic Change* 102: 595-623.
- Téllez-Valdés O., P. Dávila-Aranda y R. Lira-Saade (2006) The effects of climate change on the long-term conservation of *Fagus grandiflora* var. *mexicana*, an important species of the cloud forest in eastern México. *Biodiversity and Conservation* 15: 1095–1107.

- Tello-Taracena H. A. (2011) Suelo. *In*: Riqueza biológica de Quintana Roo un análisis para su conservación. C. Poza, N. Armijo y S. Calmé (eds). CONABIO. México. D.F. pp: 50-55.
- Tello-Taracena H. A. y E. O. Castellanos-Martínez (2011) Características geográficas. *In*: Riqueza biológica de Quintana Roo un análisis para su conservación. C. Poza, N. Armijo y S. Calmé (eds). CONABIO. México. D.F. pp: 24-28.
- Tovar C., C. A. Arnillas, F. Cuesta y W. Buytaert (2013) Diverging Responses of Tropical Andean Biomes under Future Climate Conditions. PLOS ONE 8:1-12.

4. DISCUSIÓN GENERAL

Clima contemporáneo

La distribución potencial para *L. latisiliquum* (Tzalam) y *S. macrophylla* (Caoba) en la Península de Yucatán coincide con otros trabajos realizados por medio de colectas y muestreo de campo (Bauer y Francis, 1998; CATIE, 2003; CONAFOR, 2003 y Vester y Navarro, 2007).

Las variables obtenidas con mayor contribución para el modelo de *L. latisiliquum* fueron DD5 (42.6 % de contribución a la explicación del modelo), MTCM (8.8 %), WINP (8.5 %), ADI y TDIFF (8.6%). Esto es congruente con el hecho de que es una especie de zonas tropicales donde prácticamente no existe época de frío, con estación seca no mayor de cuatro a seis meses, temperatura media anual de 23 a 26 °C, pluviometría de 1100 a 2000 mm, la especie no tolera encharcamientos ni heladas (CATIE, 2003).

Para *S. macrophylla*, las variables con mayor contribución al modelo fueron MTCM, MIN y GSP, lo cual es congruente con el hecho de que es una especie de zonas tropicales donde prácticamente no existe época de frío. Además la especie se desarrolla mejor con estación seca no mayor de cuatro meses, en extremos de humedad, aparentemente tolera extremos de sequía únicamente de corta duración, temperatura media anual de 24 - 28 °C, temperatura máxima media del mes más cálido de 24 - 32 °C y temperatura media mínima del mes

más frío de 11 - 22 °C (Bauer y Francis, 1998; CATIE, 2003; CONAFOR, 2003; Vester y Navarro, 2007; Grogan y Schulze, 2012).

Proyección para el clima futuro (2030)

La combinación de mayores temperaturas y menores precipitaciones, posiblemente sean la causa de la desaparición del hábitat climático para caoba y tzalam en gran parte de la distribución contemporánea en la Península de Yucatán. La disminución drástica del hábitat climático propicio para *S. macrophylla* y *L. latisiliquum* coincide con otras proyecciones para biomas de México con diferentes modelos de circulación global y escenarios de emisiones de gases invernadero. Por ejemplo, Rehfeldt *et al.* (2012) proyecta para la Península de Yucatán climas propicios para biomas sin un análogo contemporáneo (en otras palabras, climas que no existen en la actualidad), debido a la interacción del incremento de las temperaturas y disminución de la precipitación debido al cambio climático. La predicción de climas no análogos en el futuro ha sido predicha también para el norte de Eurasia debido a la prolongación de la temporada de crecimiento (Reu *et al.*, 2013), y para diversos biomas de los Andes Tropicales (Tovar *et al.*, 2013), con pérdidas de más del 30% de la superficie actual.

S. macrophylla reduce su hábitat climático principalmente a la Reserva de la Biosfera Calakmul, lo que posiblemente es debido a la orografía, la región de con mayores elevaciones en la Península, al crear un clima más húmedo y menos cálido que el resto de la Península, compensará en alguna medida el cambio climático, haciendo de Calakmul una región propicia como refugio para esa especie en la década centrada en el año 2030. La topografía mayormente plana de la zona norte de la Península de Yucatán hace que el relieve altitudinal tenga poca influencia sobre los patrones climáticos de la mayor parte de esa región, en donde los vientos provenientes del Caribe producen un gradiente de precipitaciones de noroeste a sureste, factor que aparentemente es el decisivo para la distribución de la vegetación. En cambio, en la región de Calakmul, con altitudes promedio de 250-350 msnm (altitudes modestas pero muy superiores al promedio de la Península de Yucatán), el relieve crea una

sombra orográfica en las laderas y planicies occidentales, al interceptar los vientos húmedos dominantes provenientes del sureste (Martínez y Galindo, 2002). Esto es congruente con Orellana-Loza *et al.*, (2002), quien a partir gráficas ombrotérmicas de 48 estaciones meteorológicas, proyecta para el año 2020 una sequía relativa más pronunciada y visible, con los máximos promedio de precipitación en septiembre, además menciona que las mayores cantidades de lluvia estarán presentes en el sur de Campeche y Quintana Roo.

L. latisiliquum proyecta su hábitat climático al centro de la península, alejándose de las costas, suponemos que el principal factor que ocasionará el cambio en la distribución del hábitat climático de la especie es la modificación de los patrones contemporáneos de las brisas marinas. Estas influye en la precipitación y la temperatura, al desplazar las nubes hacia el suroeste, antes de agotar su humedad (Herrera, 2011); por esta razón en el centro-sur de la Península es menos caliente.

El cambio climático mencionando puede visualizarse comparando los valores de las variables determinantes para el desarrollo del Tzalam, como MTCM y DD5, en mapas del clima contemporáneo y el predicho para la década del 2030 (Figuras 2 y 3).

Manejo y conservación de germoplasma

Con base en los resultados obtenidos, se recomienda establecer plantaciones de conservación genética *in situ* en el hábitat climático predicho para el año 2030, en el centro de la Península de Yucatán (Figura 1b).

Dicho de otra manera, sería necesario coleccionar semilla en las poblaciones actuales, prioritariamente de las poblaciones naturales que quedarán fuera del hábitat climático propicio en el año 2030, producir planta en vivero, y plantar en el centro de la Península de Yucatán, a fin de realinear las poblaciones de Tzalam y Caoba con el clima que les es propicio, en las áreas de la Península que continuarán teniendo el clima adecuado en el futuro. Para próximos trabajos se sugiere realizar ensayos de procedencia, a fin de cuantificar el grado de diferenciación genética entre poblaciones, en caso de que exista, y considerar tal diferenciación para limitar el movimiento de germoplasma.

Para Tzalam, considerando que esta especie se distribuye en un amplio rango de valores climáticos, es razonable suponer que será relativamente tolerante a los efectos del cambio climático, en comparación a otras especies de distribución más restringida. Por ello, también sería importante realizar un manejo silvícola encaminado a promover la regeneración natural en las poblaciones actuales, con el fin de incrementar el número de plántulas reclutadas, en las que pudiera operar la selección natural en un proceso de adaptación al cambio climático.

Finalmente, también se recomienda la conservación de germoplasma *ex situ*, ya sea en cuartos fríos, crioconservación o *in vitro*; ello con la finalidad de complementar ambos métodos y asegurar la conservación de la diversidad genética del Tzalam y Caoba.

5. CONCLUSIONES GENERALES

El hábitat climático contemporáneo para *Lysiloma latisiliquum* (Tzalam) se estima en 12, 515,067 ha en la Península de Yucatán, mientras para *Swietenia macrophylla* (Caoba) en 10'681,065 ha en la Península de Yucatán, Belice, Guatemala y Honduras. La proyección para la década centrada en el año 2030 para Tzalam se prevé una pérdida de 43% de la distribución del hábitat climático contemporáneo, alejándose de las costas y concentrándose en el centro de la Península de Yucatán. Para caoba se estima una pérdida del 60% respecto al área total contemporánea, reduciendo su distribución a la Reserva de la Biosfera Calakmul y aparecen nuevas áreas propicias en el noreste de Honduras. Se propone recolectar semilla en la distribución actual de ambas especies, producir planta en vivero y reforestar en el centro de la Península (en donde continuará ocurriendo el clima propicio para la especie). Además se sugiere realizar conservación *ex situ* e *in vitro* de germoplasma, para asegurar la conservación de la diversidad genética, como medidas de mitigación ante los efectos del cambio climático.

6. LITERATURA CITADA

Bauer, G. P. y Francis, J. K. 1998. *Swietenia macrophylla* King. Honduras mahogany, caoba. U.S. Departamento de Agricultura, Servicio Forestal, Estación experimental Sureste Forestal. New Orleans. EUA.

CATIE. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. 2003. Árboles de Centro América. Meliaceae *Swietenia macrophylla*. Turrialba, Costa Rica.

CONAFOR. Comisión Nacional Forestal. 2003. SIRE-Paquete Tecnológico. *Swietenia microphylla* King.

Grogan, J. y Schulze, M. 2012. The impact of annual and seasonal rainfall patterns on growth and phenology of emergent tree species in southeastern Amazonia, Brazil. *Biotropica*, 44:331-340.

Herrera, J. C. (2011) Clima. *In*: Riqueza biológica de Quintana Roo un análisis para su conservación. C. Poza, N. Armijo y S. Calmé (eds). CONABIO. México. D.F. pp: 50-55.

Martínez, E. y Galindo, C. 2002. La vegetación de Calakmul, Campeche, México: Clasificación, descripción y distribución. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 71:7-32.

Orellana, R.; Espadas, C.; Conde, C. y Gay C. 2002. Atlas Escenarios de cambio climático en la Península de Yucatán. Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. Mérida, Yucatán, México.

Rehfeldt, G. E.; Crookston, N. L.; Sáenz-Romero, C y Campbell E. (2012) North American vegetation model for land use planning in a changing climate: A statistical solution to large classification problems. *Ecological Applications* 22:119-141.

Reu, B., Zaehle, S.; Bohn, K.; Pavlick, R.; Schmidlein, S.; Williams, J. W. y A. Kleidon. 2013. Future no-analogue vegetation produced by no-analogue

combinations of temperature and insolation. *Global Ecology and Biogeography*, 23: 156-167.

Tovar, C.; Arnillas, C. A.; Cuesta, F. y Buytaert W. (2013) Diverging Responses of Tropical Andean Biomes under Future Climate Conditions. *PLOS ONE* 8:1-12.

Vester, F.M y Navarro-Martínez, M.A. 2007. Fichas ecológicas. Árboles Maderables de Quintana Roo. Primera edición. Fondo Mixto de Fomento a la Investigación Científica y Tecnológica. Pp. 139. Quintana Roo, México