



MODIFICACIÓN DEL HÁBITAT PARA *Lysiloma latisiliquum* (L.) Benth. (TZALAM) POR EL CAMBIO CLIMÁTICO

MODIFICATION OF THE HABITAT FOR *Lysiloma latisiliquum* (L.) Benth. (TZALAM) FOR CLIMATE CHANGE

Miriam Garza-López^{1,5}, Juan M. Ortega-Rodríguez², Francisco J. Zamudio-Sánchez¹, José F. López-Toledo³, Francisco A. Domínguez-Alvarez¹⁺ y Cuauhtémoc Sáenz-Romero^{4*}

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). Av. San Juanito Itzicuaró s/n, Col. Nueva Esperanza. 58330, Morelia, Michoacán. México. ⁵Sylvatica, S.C.. Av. Nichupté No. 20. 7500, supermanzana 19, Cancún, Quintana Roo.

*Autor para correspondencia (csaenzromero@gmail.com)

RESUMEN

El modelaje del hábitat climático para la distribución potencial de especies es una herramienta útil para proyectar los impactos del cambio climático e implementar estrategias de manejo para atenuar sus efectos negativos. El objetivo del presente estudio fue determinar la distribución potencial del hábitat climático contemporáneo y futuro (década centrada en el año 2030) de Tzalam, *Lysiloma latisiliquum* (L.) Benth., árbol de bosque seco y caducifolio de la Península de Yucatán. Se obtuvieron registros geográficos para *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 concentraciones intermedias de gases de efecto invernadero (6.0 W m⁻²). Se modeló la distribución potencial con el algoritmo MaxEnt. Para el año 2030 se proyecta una pérdida de hábitat climático del 43 % en relación con el 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 en 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: Distribución potencial, migración asistida, Península de Yucatán.

SUMMARY

The modeling of climate habitat for the potential distribution of species is a useful tool to project the climate change impacts and to implement management strategies to mitigate its negative effects. The objective of this study was to determine the potential distribution of the contemporary and future (decade centered in the year 2030) climatic habitat for Tzalam, *Lysiloma latisiliquum* (L.) Benth., a tree of dry and deciduous forest of the Yucatan Peninsula. Geographical records for *L. latisiliquum* were obtained from the Mexican National Forest and Soil Inventory (INFS) and climatic grids for contemporary (average 1961-1990) and future (decade centered around 2030), with scenarios of intermediate greenhouse-effect gas concentration (6.0 W m⁻²). Potential distribution was modeled with the MaxEnt algorithm. By the year 2030, a loss of climatic habitat of 43 % is projected in relation to contemporary distribution, confining it mainly to the center of the Yucatan Peninsula. It is proposed to collect seed in the current distribution, mainly in near-shore populations, and to plant them at the center of the Peninsula, as

well as to preserve germplasm *ex situ*, in order to realign the populations to the future climate and ensure the conservation of the genetic diversity of Tzalam.

Index words: Potential distribution, assisted migration, Yucatan Peninsula.

INTRODUCCIÓN

El manejo forestal sustentable de especies tropicales maderables ha crecido en las últimas décadas (FAO, 2006). Después de las especies maderables de alto valor comercial, como la caoba (*Swietenia macrophylla* King) y el cedro (*Cedrela odorata* Cham. & Schtdl.), una de las principales especies en volúmenes aprovechados y con demanda creciente en la Península de Yucatán es el Tzalam (*Lysiloma latisiliquum* (L.) Benth.) (Forster *et al.*, 2002; López-Torres y Tamarit-Urias, 2005). Esta especie, comúnmente conocido como Tzalam, es un árbol de 15 a 20 m de altura, con copa redondeada y ramas ascendentes. Las hojas son compuestas bipinnadas, de 11 a 20 cm, con tres o seis pares de pinnas, haz y envés de color verde oscuro. Las inflorescencias son cabezuelas solitarias o agrupadas, axilares o terminales de 1.5 cm de diámetro. Los frutos son vainas dehiscentes, aplanadas, agudas, color café, de 9 a 15 cm de largo y de 2 a 4 cm de ancho. La especie se distribuye de manera natural en Cuba, Haití, Puerto Rico, República Dominicana, Bahamas, sur de Florida, sureste de México (Península de Yucatán, Chiapas y Tabasco) y norte de América Central, en los bosques secos próximos a las costas y bosques caducifolios o semicaducifolios, generalmente sobre suelos calizos (Ceccon *et al.*, 2002; Cordero *et al.*, 2003; Pennington y Sarukhán, 2005).

El manejo forestal sustentable, con objetivos de producción maderable, requiere conocimiento de todo el hábitat

para el mejor aprovechamiento de las especies prioritarias; por 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 mediante 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, 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 (Gómez-Mendoza y Arriaga, 2007; Gómez *et al.*, 2011; Ledig *et al.*, 2010; Monterroso-Rivas *et al.*, 2013; Sáenz-Romero *et al.*, 2010; 2012; Téllez-Valdés *et al.*, 2006).

Se considera como hábitat climático propicio el espacio geográfico ocupado por un clima que es favorable para el establecimiento, crecimiento y reproducción de poblaciones de una especie (Booth, 1990; Rehfeldt *et al.*, 2006). Este concepto parte del supuesto de que el clima es la principal fuerza que determina la distribución de especies de plantas (Brown y Gibson, 1983; Tuhkanen, 1980; Woodward, 1987). En este análisis no se consideran otros factores distintos al clima que evidentemente también inciden en la distribución real de la especie, como el suelo, la capacidad de dispersión de semillas e interacciones con otros organismos (como la competencia) (Negreros-Castillo y Martínez-Salazar, 2011; Sánchez *et al.*, 2009; Vester y Navarro, 2007).

Con base en lo anterior se planteó como objetivo determinar la distribución potencial del hábitat climático contemporáneo y futuro (década centrada en el año 2030) para *Lysiloma latisiliquum* (L.) Benth., en la Península de Yucatán, Chiapas y Tabasco, México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio comprende el sureste de México (Península de Yucatán, norte de Chiapas, y oriente de Tabasco) y norte de Guatemala y Belice; sin embargo, la mayoría de los sitios con presencia de Tzalam se encuentran en México en la Península de Yucatán (estados de Campeche, Yucatán y Quintana Roo). 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 relieve 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 msnm. Los suelos predominantes son leptosoles, suelos someros de escasa profundidad, escasa cantidad de tierra fina y gran cantidad de piedras o afloramientos de roca (Bautista, 2010; Tello, 2011). La mayor parte de la Península de Yucatán presenta un clima tropical con lluvias en verano (Aw) y seco estepario (Bs) en el extremo noroeste de la misma. La vegetación se rige principalmente por un gradiente de humedad que se incrementa de norte a sur, la cual forma un hábitat propicio para selva baja caducifolia, selva mediana subcaducifolia, selva mediana subperennifolia, selva baja espinosa y manglar, entre otros tipos de vegetación (Ek, 2011; Flores *et al.*, 2010).

Obtención de datos

Los registros de ubicación geográfica (latitud, longitud y altitud) de *Lysiloma latisiliquum* (L.) Benth. se obtuvieron de la base de datos del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFS) 2004-2009 (CONAFOR, 2009a; 2009b). Se incluyeron datos de la presencia de la especie para la Península de Yucatán, y para los otros dos estados cercanos, Chiapas y Tabasco. Las unidades de muestreo del INFS son conglomerados con 1600 m² de superficie, separados a 5 × 5 km para el ecosistema selvas (CONAFOR, 2009b). Cabe mencionar que el diseño de muestreo del INFS tiene una cobertura nacional de todos los tipos de vegetación natural, con determinación de los sitios a muestrear definidos de manera sistemática (CONAFOR, 2009b), lo cual genera un muestreo sumamente intensivo y bien distribuido, lo que evita sesgos tales como cercanía a caminos. Si bien existen algunos errores (aparentemente de captura), el inventario es sumamente confiable por lo masivo de sus datos y por originarse en un muestreo sistemático.

Variables climáticas

A partir de un modelo climático "spline" de clima contemporáneo (promedio del periodo 1961 a 1990) y clima futuro (promedio de la década centrada en el año 2030) disponibles en <http://charcoal.cnre.vt.edu/climate/> se descargaron las rejillas de 15 variables climáticas que representan las características anuales y estacionales de temperatura y precipitación para Norteamérica, a una resolución de 1 km² (Cuadro 1). Los modelos climáticos que dieron origen a los "splines", en lo que corresponde a México, se basaron en datos mensuales para el periodo 1961-1990 de aproximadamente 1700 estaciones con datos completos (llamadas estaciones estándar) y 1200 estaciones con datos faltantes (llamadas normalizadas); de éstas últimas, los datos faltantes (promedios mensuales de temperatura y precipitación) fueron estimados a partir de los datos de estaciones circundantes estándar mediante autocorrelación espacial (Sáenz-Romero *et al.*, 2010). El

ajuste de "splines" mediante el software ANUSPLIN v. 4.37 (Hutchinson, 2004) tuvo un cuadrado medio de la raíz del error (RTMSE por su acrónimo en inglés) que varió de 0.5 a 0.75 °C para variables de temperatura, y de 3 a 16 mm (3 a 10 % de las medias mensuales) para variables de precipitación (Sáenz-Romero *et al.*, 2010).

Posteriormente, se extrajo el área de interés, desde la Península de Yucatán hasta el noreste de Honduras. Se generaron cinco variables derivadas: índice anual de sequía (ADI), índice de sequía para la temporada de crecimiento (GSDI), diferencial de temperatura entre el mes más caliente y el más frío (TDIFF), cociente de la precipitación de verano y primavera (PRATIO) e interacción entre la precipitación de la temporada de crecimiento y TDIFF (GSPTD, Cuadro 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).

Las estimaciones del clima futuro se basan en el promedio de 18 modelos de circulación global (GCM por su acrónimo en inglés), con una trayectoria intermedia representativa de concentración de gases de efecto invernadero (llamada RCP por su acrónimo en inglés) de 6.0 W m⁻², que equivale a que la concentración de CO₂ alcanzará su máximo en la década del 2080. Al usar el promedio de los 18 modelos, conocido como ensamble, y un RCP intermedio, se intenta mostrar una proyección representativa del conjunto de los GCM y de los RCPs; un análisis de la variabilidad existente entre GCMs y entre RCPs excede por mucho las pretensiones de este trabajo. Detalles de los modelos climáticos se pueden consultar en Rehfeldt *et al.* (2014). Para el modelaje que dio origen a las rejillas de clima contemporáneo para México los detalles se pueden consultar en Sáenz-Romero *et al.* (2010).

En el presente estudio se considera como clima contemporáneo el promedio del periodo 1961-1990 como el intervalo de tiempo en el que ocurrió un clima similar al cual las poblaciones de especies forestales (inventariadas por el INFS) se adaptaron y crecieron; no se refiere al clima actual

Cuadro 1. Variables climáticas para clima contemporáneo (1961 a 1990) y futuro (década centrada en el año 2030) para cada sitio de presencia y para rejillas (1 km²) del área de estudio.

Abreviatura	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 anuales
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
MMINDDO	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 × TDIFF)/100
TDIFF	Diferencia de temperatura de entre el mes más caliente y el más frío (MTWM-MTCM)
PRATIO	GSP/MAP

Fuente: Forest Moscow (<http://charcoal.cnre.vt.edu/climate/>)

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 periodo 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).

Por otra parte, se eligió la década centrada en el año 2030 para favorecer la adaptación de las poblaciones forestales a los climas futuros, bajo los siguientes supuestos: 1) reubicar genotipos con anticipación para que crezcan en sitios propicios climáticamente como para alcanzar al menos la edad reproductiva, 2) 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, lo que podrían hacer inviable que se alcanzara la edad reproductiva (Castellanos-Acuña *et al.*, 2015; Sáenz-Romero *et al.*, 2012).

Modelado de clima contemporáneo

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

Se utilizaron 615 presencias y 20 variables climáticas (Cuadro 1). Se utilizó sólo el 10 % de los registros del INFS (6150 para todo México) para evitar sobreestimación del modelo. También se eliminaron sitios con ubicación evidentemente errónea, presumiblemente debido a errores de captura. El 10 % de los datos se obtuvo de manera aleatoria. La modelación se construyó con 75 % de los registros de ocurrencia. El umbral de convergencia fue 0.00001 con 500 iteraciones como límite máximo para cada corrida. El formato de salida analizado fue logístico, el cual indica un hábitat óptimo de 0 a 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®, para obtener el número de píxeles y transformarlos a hectáreas. Finalmente, se generaron los mapas de la distribución de la especie en clima contemporáneo y para 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) mediante un umbral esperado de error de 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, donde ambas están truncadas al área delimitada por el umbral de error. Cuando se realiza el análisis de ROC parcial, sólo 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 pueden ser 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 menor 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 iteraciones y 0.95 de tolerancia de error de omisión. Una vez generados los resultados se obtuvo la media, máximos, mínimos y la 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 se alimentó el modelo con las rejillas de variables climáticas para la década centrada en 2030, usando las mismas variables climáticas que las elegidas para el modelo seleccionado para clima contemporáneo.

Se proyectó con la opción "Do clamping" de MaxEnt, la 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).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Clima contemporáneo

La distribución potencial para *L. latisiliquum* en la Península de Yucatán modeló 12,515,067 ha aproximadamente con hábitat climático contemporáneo (promedio 1961-1990) en los estados de Quintana Roo, Yucatán,

Campeche y parte de Chiapas (Figura 1a); además, mediante la prueba de Jackknife implementada en MaxEnt se identificaron las variables de mayor contribución para la proyección del modelo, las cuales fueron grados día $> 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ anuales (DD5; 42.6 % de contribución a la explicación del modelo), temperatura media del mes más frío (MTCM; 8.8 %), precipitación de invierno (WINP; 8.5 %), índice de aridez y diferencia de temperatura entre el mes más caliente y el más frío (ADI y TDIFF; 8.6 %). Esto es congruente con el hecho de que se trata de una especie de zonas tropicales donde prácticamente no existe época de frío, con estación seca de cuatro a seis meses, temperatura media anual de 23 a 26 $^{\circ}\text{C}$, pluviometría de 1100 a 2000 mm, la especie no tolera encharcamientos ni heladas (Cordero *et al.*, 2003).

Validación del modelo

Mediante el análisis de la curva ROC parcial se obtuvieron valores superiores al umbral (≥ 1) para el clima contemporáneo, con valor de la curva ROC parcial máximo, medio y mínimo de 1.97, 1.92 y 1.33, respectivamente, y desviación estándar de 0.07, lo que indica que el modelo tuvo una buena predicción del hábitat climático óptimo para el desarrollo de la especie.

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

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 con respecto al contemporáneo en 43 % (Figura 1a). La distribución se reduce en las cercanías a las costas de la Península de Yucatán, confinándose al centro de la Península, disminuyendo pronunciadamente en la porción este del estado de Quintana Roo. Es de esperar que las poblaciones que actualmente ocupan las áreas donde desaparecerá el hábitat climático propicio sufrirán gradualmente de mayor estrés, particularmente en la época de sequía, probablemente disminuyendo su crecimiento actual evaluado por López-Torres y Tamarit-Urias (2005) y siendo más susceptibles al ataque de plagas y enfermedades (Alfaro *et al.*, 2014).

Una desaparición importante de hábitat climático para especies tropicales coincide con el modelaje realizado por Rehfeldt *et al.* (2012) para biomas de México, en el que se estima una expansión del hábitat climático propicio para el bosque seco deciduo de Yucatán (clasificación de biomas según Brown *et al.*, 1998), a partir 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 ocurriría a costa de una substancial reducción del clima propicio para el bosque tropical semi-perennifolio, que es en el que principalmente ocurre actualmente el Tzalam (Rehfeldt *et al.*, 2012). Las proyecciones de Rehfeldt *et al.* (2012) incluyen climas sin análogo contemporáneo en la Península de Yucatán. Estos últimos han sido proyectados también por otros autores; Reu *et al.* (2013) predijeron vegetación no-análoga al clima del norte

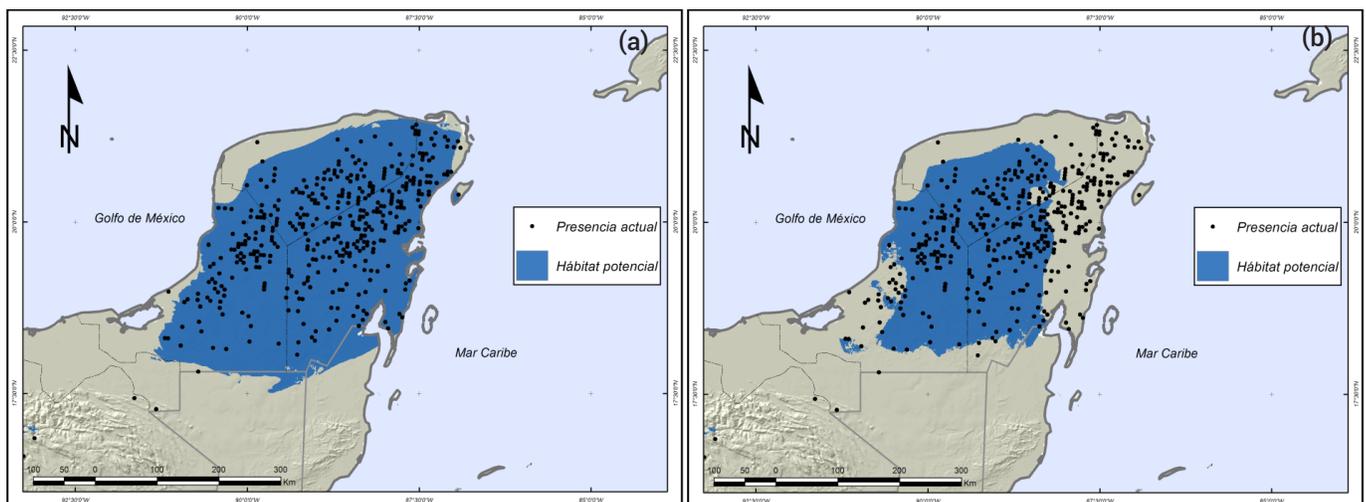


Figura 1. Mapa del hábitat climático (área en azul) para *Lysiloma latisiliquum* (L.) para (a) clima contemporáneo (1961 a 1990), y (b) futuro (década centrada en el año 2030). Símbolos indican registros de presencia según el Inventario Nacional Forestal y de Suelo (INFS) (CONAFOR, 2009a, 2009b).

de Eurasia, y sugirieron que las latitudes medias pueden ser más susceptibles a la formación de las asociaciones vegetales no análogas, debido a la prolongación de la estación de crecimiento, combinado con patrones estables de ciclones de insolación. Tovar *et al.* (2013) proyectaron pérdida de más del 30 % de superficie actual de diversos biomas de los Andes Tropicales.

En este caso, se supone 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, ya que éstas son más intensas y de mayor alcance cuanto más cálido es el clima (Fuentes-Yagüe, 2012); además, los vientos predominantes en la Península van en dirección norte-suroeste, e influyen en la precipitación y la temperatura al desplazar las nubes hacia el suroeste, antes de agotar su humedad (Herrera, 2011); por esta razón, el centro-sur de la Península es menos caliente, con un clima más continental. Esto podría explicar la proyección de la distribución de la especie en 2030, ya que el aumento de temperatura y menor precipitación serán más relevantes en las costas en comparación con el centro de la Península; en consecuencia, habrá una pérdida de las condiciones climáticas óptimas para el desarrollo de la especie en la periferia de la Península (Figura 1b). Esto es congruente con lo planteado por Orellana *et al.* (2012), quienes a partir de gráficas ombrotérmicas de 48 estaciones meteorológicas, proyectan para el año 2020 una sequía relativa más pronunciada y visible, mientras que las mayores cantidades de lluvia estarán presentes en el sur de Campeche y Quintana Roo. Cabe señalar que las proyecciones de precipitación contienen una incertidumbre importante, ya que es de esperar también huracanes con mayor fuerza, por las mayores temperaturas que ocurrirán en las masas de aire marinas.

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 una reducción de 60 % del hábitat climático contemporáneo a 2030, y se limita en parte a la Reserva de la Biosfera Calakmul (Garza-López *et al.*, 2016). La proyección para Tzalam tiene un comportamiento parecido; sin embargo, al ser esta última una especie adaptada a un rango más amplio de precipitación en comparación a la caoba, posiblemente se verá menos afectada.

El cambio climático mencionado 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); por ejemplo, la variable MTCM en clima contemporáneo muestra valores de 21.5 a 23.0 °C en gran parte de la Península, con excepción del norte

de Quintana Roo, norte-oeste y sur-oeste de Campeche, y extremos este y oeste del estado de Yucatán, donde es relativamente más cálido (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 oscuro).

La variable DD5 en clima contemporáneo presenta valores de entre 7000 y 8000 grados día (Figura 3a) en gran parte de la Península, y valores de 7000 a 7500 en el este de Campeche, norte de Yucatán y parte de la costa de Quintana Roo (Figura 3a, color azul claro); sin embargo, para 2030 los valores de 7500 a 8000 se expanden notablemente (Figura 3b, 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 elevados, de 8000 a 8400 grados día (Figura 3b, color rojo). Es importante hacer notar que en la actualidad no hay sitios con presencia de Tzalam con valores de DD5 arriba de 7900 grados día (comparar Figuras 1a y 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 áreas en las que desaparece el hábitat climático propicio para el Tzalam, con base en la proyección con MaxEnt (Figura 1b).

Sugerencias a considerar para un manejo adaptativo ante el cambio climático

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 suroeste de Quintana Roo y centro-este de Yucatán (Figura 1b). Dicho de otra manera, sería necesario recolectar 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 le es propicio, en las áreas de la Península que continuarán teniendo el clima adecuado en el futuro. Es necesario implementar tales medidas lo antes posible si se considera que el tiempo necesario para que un individuo alcance un diámetro aprovechable es de 21.5 años en promedio (López-Torres y Tamarit-Urías, 2005).

Para próximos trabajos se sugiere realizar ensayos de procedencia a fin de cuantificar el grado de diferenciación genética entre poblaciones, y considerar tal diferenciación para limitar el movimiento de germoplasma. Tales

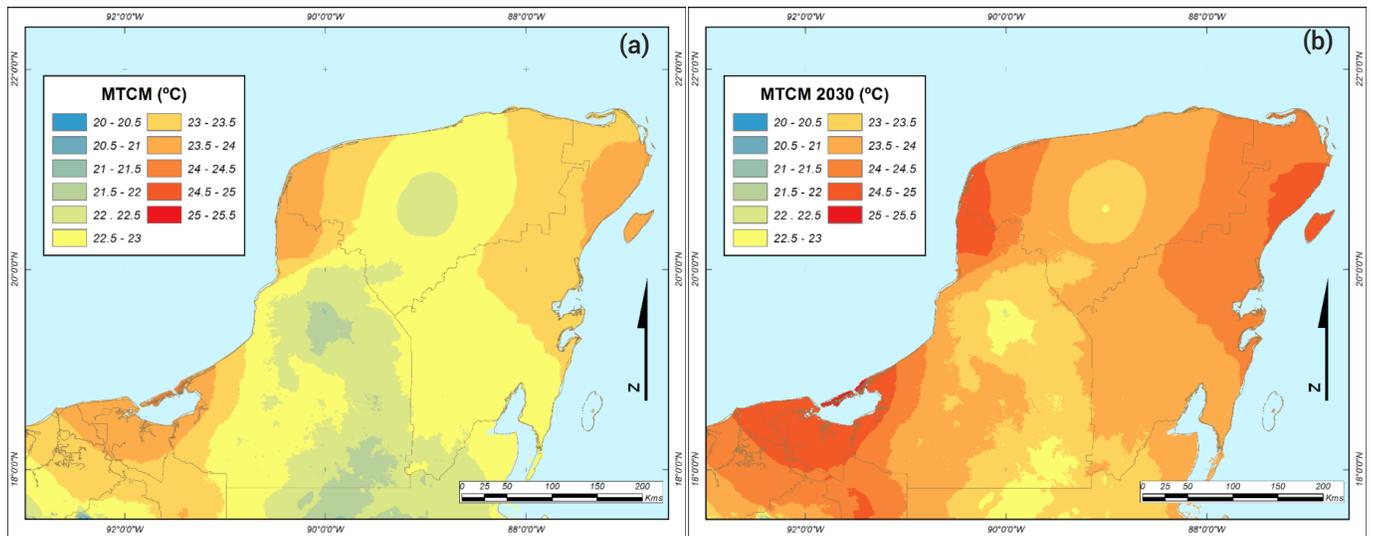


Figura 2. Temperaturas medias del mes más frío (MTCM) para clima contemporáneo (a) y futuro (b) para la Península de Yucatán.

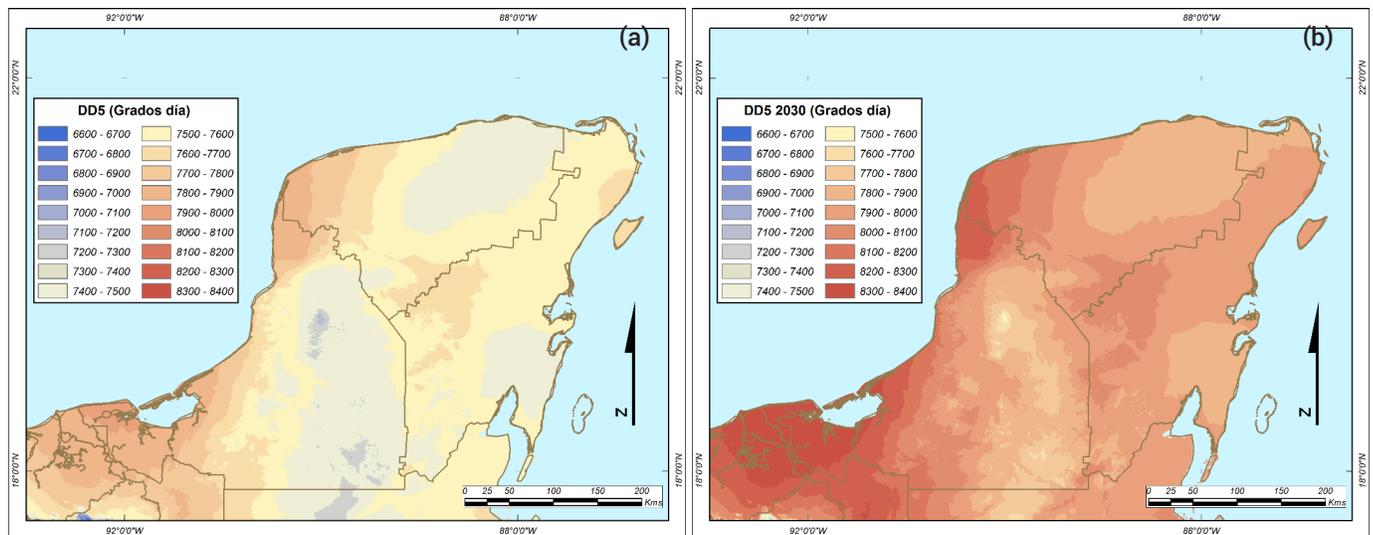


Figura 3. Grados día anuales > 5 °C (DD5) para clima contemporáneo (a) y futuro (b) para la Península de Yucatán.

ensayos deben incluir sitios en campo en el centro-sur de la Península, en áreas actualmente con poca presencia de la especie, pero que las proyecciones de este estudio indican que serán ocupadas por un hábitat climático propicio. Estos ensayos podrán generar resultados experimentales que indiquen la viabilidad de la migración asistida sugerida.

Al considerar 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 con 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 *in situ*, sería deseable incorporar genotipos derivados de un

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

Finalmente, la semilla de Tzalam es ortodoxa; es decir, tolera la deshidratación hasta 5 % en contenido de humedad (Cordero, 2003; Magnitskiy y Plaza, 2007); por tanto, se recomienda su conservación en cuartos fríos, crioconservación *in vitro*, con la finalidad de complementar ambos métodos y asegurar la conservación de la diversidad genética de esta especie.

CONCLUSIONES

El hábitat climático contemporáneo para *Lysiloma latisiliquum* se estimó en 12,515,067 ha en la Península de Yucatán. Las variables de mayor importancia en el modelaje del hábitat climático fueron grados días anuales > 5 °C, y la media de la temperatura del mes más frío. De acuerdo con la proyección para la década centrada en el año 2030, se prevé una pérdida de 43 % de la distribución del hábitat climático contemporáneo, lo que la alejaría de las costas y la concentraría en el centro de la Península de Yucatán.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología (CONACyT), por las becas otorgadas a MGL para sus estudios de maestría (509002), y de intercambio académico en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), y por una beca a CSR para estancia sabática en el extranjero (232838). A la Coordinación de la Investigación Científica de la UMSNH. Comentarios de tres revisores anónimos y un Editor asignado ayudaron a mejorar significativamente el manuscrito.

BIBLIOGRAFÍA

- Alfaro R. I., B. Fady, G. G. Vendramin, I. K. Dawson, R. A. Fleming, C. Sáenz-Romero, R. Lindig-Cisneros, T. Murdock, B. Vinceti, C. M. Navarro, T. Skråppa, G. Baldinelli, Y. A. El-Kassaby and J. Loo (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.
- Barve N. (2008) Tool for Partial-ROC ver. 1.0. Biodiversity Institute. Lawrence, KS.
- Bautista Z. F. (2010) El suelo. In: Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán. R. Durán G. y M. E. Méndez G. (eds.). CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA. Mérida, Yucatán, México. pp:14-16.
- Booth T. H. (1990) Mapping regions climatically suitable for particular tree species at the global scale. *Forest Ecology and Management* 36:47-60.
- Brown J. H. and A. C. Gibson (1983) Biogeography. The C.V. Mosby Company. St. Louis, MO, USA. 654 p.
- Brown D. E., F. Reichenbacher and S. E. Franson (1998) A Classification of North American Biotic Communities. University of Utah Press. Salt Lake City, Utah, USA. 141 p.
- Castellanos-Acuña D., R. Lindig-Cisneros and C. Sáenz-Romero (2015) Altitudinal assisted migration of Mexican pines as an adaptation to climate change. *Ecosphere* 6:1-16.
- Ceccon E., I. Olmsted, C. Vázquez-Yanes and J. Campo-Alves (2002) Vegetation and soil properties in two tropical dry forests of differing regeneration status in Yucatán. *Agrociencia* 36:621-631.
- CONAFOR, Comisión Nacional Forestal (2009a) Inventario Nacional Forestal y de Suelos de México 2004-2009. Una Herramienta que da Certeza a la Planeación, Evaluación y el Desarrollo Forestal de México. Comisión Nacional Forestal. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Zapopan, Jalisco. 22 p.
- CONAFOR, Comisión Nacional Forestal (2009b) Inventario Nacional Forestal y de Suelo 2004-2009. Manual y Procedimientos para el Muestreo de Campo. Comisión Nacional Forestal. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Zapopan, Jalisco. 87 p.
- Cordero, J., F. Mesén, M. Montero, J. Stewart, D. Boshier, J. Chamberlain, T. Pennington, M. Hands, G. Hughes y G. Detlefsen (2003) Descripción de especies de árboles de América Central. Leguminosae Mimosoideae *Lysiloma latisiliquum* (L.) Benth. In: Árboles de Centroamérica un Manual para Extensionistas. J. Cordero y D. H. Boshier (eds.). Oxford Forestry Institute y Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica. pp:685-688.
- Ek D. A. (2011) Vegetación. In: Riqueza Biológica de Quintana Roo. Un Análisis para su Conservación. C. Pozo, N. Armijo C. y S. Calmé (eds.). Tomo I. El Colegio de la Frontera Sur (Ecosur), Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio), Gobierno del Estado de Quintana Roo y Programa de Pequeñas Donaciones (PPD). México. D.F. pp:62-77.
- Elith J., S. J. Phillips, T. Hastie, M. Dudík, Y. E. Chee and C. J. Yates (2011) A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions* 17:43-57.
- FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2006) Tendencias y Perspectivas del Sector Forestal en América Latina y el Caribe. Estudio FAO: Montes 148. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma, Italia. 178 p.
- Flores G. J. S., R. Durán G. y J. J. Ortiz D. (2010) Comunidades vegetales terrestres. In: Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán. R. Durán G. y M. E. Méndez G. (eds.). CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA. Mérida, 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. Editorial Ducere. México, D.F. 158 p.
- Fuentes-Yagüe J. L. (2012) Iniciación a la Meteorología y Climatología. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 171 p.
- Garza-López M., J. M. Ortega-Rodríguez, F. J. Zamudio-Sánchez, J. F. López-Toledo, F. A. Domínguez-Álvarez y C. Sáenz-Romero (2016) Calakmul como refugio de *Swietenia macrophylla* King ante el cambio climático. *Botanical Sciences* 94:43-50.
- Gómez D. J. D., A. I. Monterroso R., J. A. Tinoco R., M. L. Toledo M., C. Conde A. and C. Gay G. (2011) Assessing current and potential patterns of 16 forest species driven by climate change scenarios in México. *Atmósfera* 24:31-52.
- Gómez-Mendoza L. and L. Arriaga (2007) Modeling the effect of climate change on the distribution of oak and pine species of Mexico. *Conservation Biology* 21:1545-1555.
- Herrera J. C. (2011) Clima. In: Riqueza Biológica de Quintana Roo. Un Análisis para su Conservación. C. Pozo, N. Armijo C. y S. Calmé (eds.). Tomo I. El Colegio de la Frontera Sur (Ecosur), Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio), Gobierno del Estado de Quintana Roo y Programa de Pequeñas Donaciones (PPD). México. D.F. pp:50-56.
- Hutchinson M. F. (2004) ANUSPLIN Version 4.37 User Guide. Centre for Resource and Environmental Studies, The Australian National University. Canberra, Australia. 54 p.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2015) Características Edafológicas, Fisiográficas, Climáticas e Hidrológicas de México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, Ags. 31 p.
- Ledig F. T., G. E. Rehfeldt, C. Sáenz-Romero and C. Flores-López (2010) Projections of suitable habitat for rare species under global warming scenarios. *American Journal of Botany* 97:970-987.
- López-Torres J. L. y J. C. Tamarit-Urias (2005) Crecimiento e incremento en diámetro de *Lysiloma latisiliquum* (L.) Benth. en bosques

- secundarios en Escárcega, Campeche, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 11:117-123.
- Magnitskiy S. V. y G. A. Plaza (2007) Fisiología de semillas recalcitrantes de árboles tropicales. *Agronomía Colombiana* 25:96-103.
- Monterroso-Rivas A. I., J. D. Gómez-Díaz y J. A. 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.
- Negreros-Castillo P. e I. Martínez-Salazar (2011) Crecimiento y regeneración avanzada de *Lysiloma latisiliquum* (L.) Benth. en una selva de Quintana Roo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 2:15-28.
- 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.
- Pennington T. D. y J. Sarukhán (2005) Árboles Tropicales de México. Manual para la Identificación de las Principales Especies. Fondo de Cultura Económica. México, D.F. 523 p.
- Peterson A. T., M. Papeş and J. Soberón (2008) Rethinking receiver operating characteristic analysis applications in ecological niche modelling. *Ecological Modelling* 213:63-72.
- Phillips S. J., R. P. Anderson and R. E. Schapire (2006) Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* 190:231-259.
- Rehfeldt G. E., N. L. Crookston, M. V. Warwell and J. S. Evans (2006) Empirical analyses of plant-climate relationship for the Western United States. *International Journal of Plant Sciences* 167:1123-1150.
- Rehfeldt G. E., N. L. Crookston, C. Sáenz-Romero and E. M. Campbell (2012) North American vegetation model for land-use planning in a changing climate: a solution to large classification problems. *Ecological Applications* 22:119-141.
- Rehfeldt G. E., B. C. Jaquish, J. López-Upton, C. Sáenz-Romero, J. B. St Clair, L. P. Leites and 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.
- Reu B., S. Zaehle, K. Bohn, R. Pavlick, S. Schmidlein, J. W. Williams and A. Kleidon (2013) Future no-analogue vegetation produced by no analogue combinations of temperature and insolation. *Global Ecology and Biogeography* 23:156-167.
- Sáenz-Romero C., G. E. Rehfeldt, N. L. Crookston, P. Duval, R. St-Amant, J. Beaulieu and B. A. Richardson (2010) Spline models of contemporary, 2030, 2060 and 2090 climates for Mexico and their use in understanding climate-change impacts on the vegetation. *Climatic Change* 102:595-623.
- Sáenz-Romero C., G. E. Rehfeldt, P. Duval and R. A. Lindig-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., G. E. Rehfeldt, J. M. Ortega-Rodríguez, M. C. Marín-Togo and X. Madrigal-Sánchez (2015) *Pinus leiophylla* suitable habitat for 1961-1990 and future climate. *Botanical Sciences* 93:709-718.
- Sánchez J. A., B. Muñoz y L. Montejo (2009) Rasgos de semillas de árboles en un bosque siempreverde tropical de la Sierra del Rosario, Cuba. *Pastos y Forrajes* 32:141-164.
- Téllez-Valdés O., P. Dávila-Aranda and 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 T. H. A. (2011) Suelos. In: Riqueza Biológica de Quintana Roo. Un Análisis para su Conservación. C. Pozo, N. Armijo C. y S. Calmé (eds.). Tomo I. El Colegio de la Frontera Sur (Ecosur), Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio), Gobierno del Estado de Quintana Roo y Programa de Pequeñas Donaciones (PPD). México. D.F. pp:57-61.
- Tovar C., C. A. Arnillas, F. Cuesta and W. Buytaert (2013) Diverging responses of tropical Andean biomes under future climate conditions. *PLoS ONE* 8(5):e63634.
- Tuhkanen S. (1980) Climatic parameters and indices in plant geography. *Acta Phytogeographica Suecica* 67:1-105.
- Vester H. F. M. y A. Navarro M. (2007) Árboles Maderables de Quintana Roo. ECOSUR, COQCYT, Gobierno del Estado de Quintana Roo. Chetumal, Quintana Roo, México. 139 p.
- Woodward F. I. (1987) Climate and Plant Distribution. Cambridge University Press. London. 177 p.

