

CARACTERIZACIÓN EDAFOLÓGICA DONDE CRECEN *Pinus strobus* var. *chiapensis* y *Quercus macdougalii*, ESPECIES CON ALTO INTERÉS DE CONSERVACIÓN¹

[EDAPHOLOGICAL CHARACTERIZATION WHERE *Pinus strobus* var. *chiapensis* and *Quercus macdougalii* GROWS, SPECIES WITH HIGH CONSERVATION INTEREST]

Adan Nava-Nava¹, Nayely Pérez-Cruz¹, Erickson Basave-Villalobos², Ramón Trucíos-Caciano³, Pablo Antúnez^{4§}

¹Universidad de la Sierra Juárez, Avenida Universidad S/N, Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México, 68725. ²Campo Experimental Valle del Guadiana, CIRNOC, INIFAP. Carretera federal Durango-El Mezquital Km. 36.5, Durango, México. C. P. 34170. ³CENID-RASPA. Km. 6.5, Margen derecho Canal Sacramento, Gómez Palacio, Durango, México, 35140. ⁴División de Estudios de Posgrado, Universidad de la Sierra Juárez, Avenida Universidad S/N, Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México, 68725. [§]Autor para correspondencia: (p.antunez4@unsij.edu.mx)

RESUMEN

Las propiedades físicas y químicas de los suelos son factores importantes que determinan la distribución y abundancia de las especies arbóreas. En este estudio se determinaron los intervalos óptimos de propiedades físicas y químicas de suelos en los que hay presencia de *Pinus strobus* var. *chiapensis* y *Quercus macdougalii*, especies en categoría de riesgo. El estudio se realizó en la Sierra Norte de Oaxaca, en sitios de los predios de Ixtlán de Juárez, Santiago Comaltepec y San Pedro Yólox. Las propiedades analizadas fueron el pH, conductividad eléctrica, carbono orgánico, textura, materia orgánica, y cationes como calcio, potasio, magnesio y sodio. Se utilizó la curva de densidad de Kernel, con un intervalo de confianza de 95 %, para delimitar el intervalo de presencia máxima de cada especie para las propiedades del suelo analizadas. Los intervalos óptimos para ambas especies coincidieron en varias propiedades, cuyos valores fueron: pH 4.1-4.6, conductividad eléctrica 0.03-0.06 dS m⁻¹, carbono orgánico 10-12 kg m⁻², textura franco arenosa, contenido de materia orgánica 4.3-4.8%. Definir los intervalos óptimos reportados en este estudio contribuye en la caracterización edafológica de los sitios donde crecen *Pinus strobus* var. *chiapensis* y *Quercus macdougalii* mismos que podrían servir al implementar estrategias de manejo y conservación de las especies.

Palabras claves: Kernel, rango óptimo, modelo suavizados, grado de incertidumbre.

ABSTRACT

The physical and chemical properties of forest soils are important factors that determine both the distribution and abundance of tree species. In this study, several physical and chemical properties of the soils were analyzed to determine the optimal intervals for the presence of *Pinus strobus* var. *chiapensis* and *Quercus macdougalii*, species under risk category. This study took place in the

¹ Recibido: 01-julio-2020
Aceptado: 10-diciembre-2020

Sierra Norte of Oaxaca, involving areas of Ixtlán de Juárez, Santiago Comaltepec, and San Pedro Yólox. The properties analyzed were pH, electrical conductivity, organic carbon, texture, organic matter, and cations such as calcium, potassium, magnesium, and sodium. The Kernel density curve with a 95 % confidence interval was used to delimit the range of maximum presence of each species for the soil properties examined. The optimal interval for both species were similar in several properties, whose values were: pH 4.1-4.6, electrical conductivity 0.03-0.06 dS m⁻¹, organic carbon 10-12 kg m⁻², loamy sand texture, organic matter content 4.3-4.8%. Defining the optimal intervals on the soil characteristics where *Pinus strobus* var. *chiapensis* and *Quercus macdougalii* grow contribute to the edaphological characterization of the sites to implement better management and conservation strategies for the species.

Index words: Kernel, optimal range, smoothed model, degree of uncertainty.

INTRODUCCIÓN

El estado de Oaxaca presenta la mayor diversidad vegetal de México al poseer un total de 251 familias de plantas vasculares, 1824 géneros, 8431 especies y 8600 taxones, lo que constituye el 40% de la flora vascular de México (García-Mendoza, 2004). Las angiospermas constituyen el mayor porcentaje con 217 familias, 1700 géneros y 7725 especies, mientras que se registran seis familias de gimnospermas, 12 géneros y 52 especies que representa el 32.5 % del total de la flora vascular registrada en el país (García-Mendoza, 2004).

En el estado convergen continentes florísticos característicos de la Sierra Madre del Sur, la Sierra Madre de Chiapas y el Eje Volcánico Transversal, lo que incrementa el número de especies principalmente de los géneros *Quercus* y *Pinus*, por encima de otros géneros. En la Sierra Norte de Oaxaca, se presenta la mayor distribución de especies de dichos géneros (Valencia y Nixon, 2004).

Esta diversidad está relacionada con la fisiografía de las cadenas montañosas, sustratos de la región y de la composición de los tipos de suelo (Centeno-García, 2004). El suelo es de los recursos más importantes debido a sus propiedades físicas, químicas y biológicas, lo que genera variadas condiciones para una diversidad alta de organismos (Reyes y Valery, 2007). Las propiedades físicas y químicas del suelo juegan un papel importante en la distribución y abundancia de las especies arbóreas, además son consideradas como indicadores de la salud del suelo (Rucks *et al.*, 2004; Julca-Otiniano *et al.*, 2006; Sainz-Rozas *et al.*, 2011).

Para entender y estudiar los espacios en el cual crecen y prosperan las especies, existen herramientas que ayudan a conocer la distribución de estas al predecir el hábitat óptimo para el desarrollo de poblaciones de una especie en una localidad (Ferrier y Guisan, 2006). La estimación se realiza a partir de observaciones de campo y una serie de variables que actúan como condicionantes (Benito de Pando y Peñas de Giles, 2007).

En este sentido, las funciones de densidad de probabilidad (*fdp*); por ejemplo, la función de Weibull ha sido utilizada en muchas áreas para modelar conjuntos de datos complejos, debido a su flexibilidad para representar varias formas en la curva de densidad, esta se caracteriza por sus parámetros de forma, escala y localización (Rigby y Stasinopoulos, 2005; Martínez-Antúnez *et al.*, 2015).

Por otro lado, la función de densidad de Kernel propuesta por primera vez por Rosenblatt (1956), es una función no paramétrica cuya ventaja sobre la Weibull, radica en que posee mayor flexibilidad definida por una densidad simétrica y un parámetro positivo, que determina el tamaño del entorno de cada punto de estimación denominado ancho de banda o parámetro de suavizado, dado que define la suavidad de la estimación resultante (Parra-Murciego, 2011). Esta última *fdp* ha sido empleada ampliamente en las áreas de interés social y económico (Jiménez, 1991; Brufman *et al.*, 2005), y muy poco en el campo de la ecología o las ciencias forestales.

Tomando en cuenta lo anterior, el objetivo del presente estudio fue caracterizar las propiedades físicas y químicas del suelo y determinar los intervalos óptimos en los cuales ocurre la presencia de *Pinus strobus* var. *chiapensis* Martínez y *Quercus macdougalii* Martínez, en la Sierra Norte de Oaxaca, especies de alto valor de conservación en la región.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se realizó al norte del estado Oaxaca, abarcando diferentes áreas de los municipios de Ixtlán de Juárez (17°32'-17°44' LN y 96°16'-96°36' LO), Santiago Comaltepec (17°17'-17°41' LN y 96°07'-96°32' LO) y San Pedro Yólox (17°35' LN y 96°33' LO) (Figura 1).

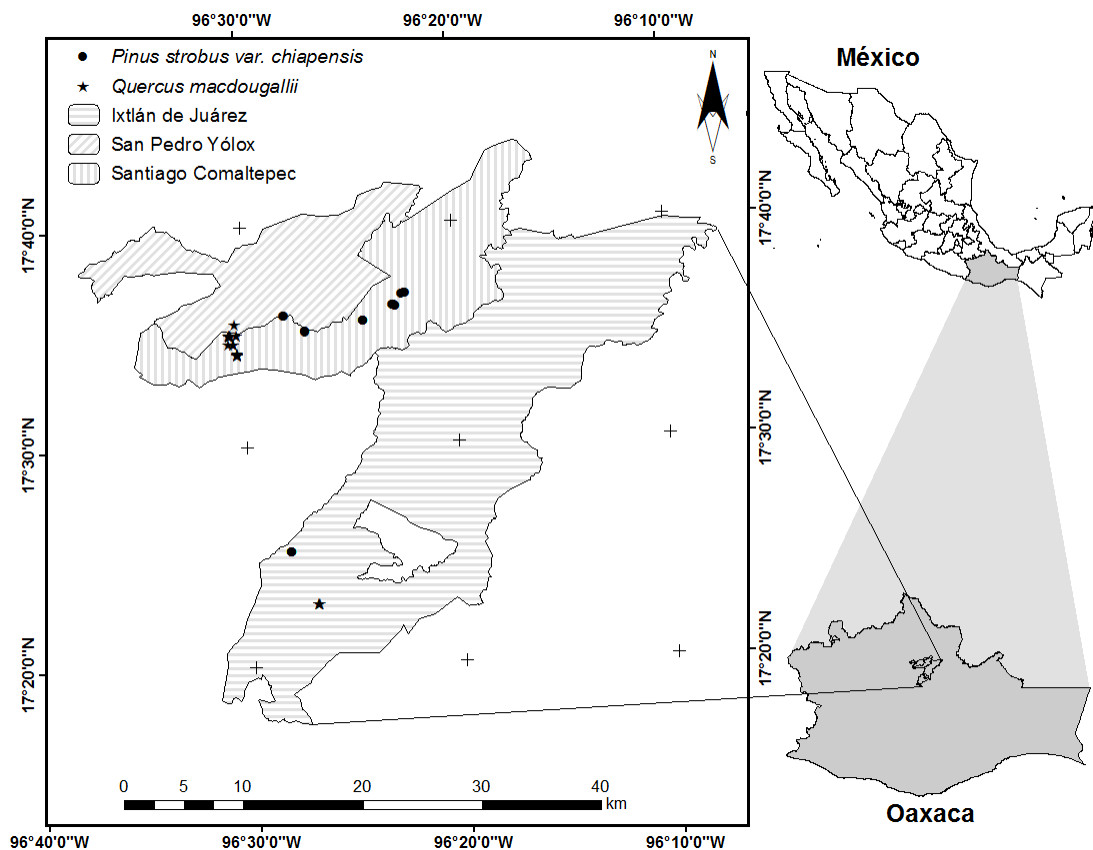


Figura 1. Distribución geográfica de los sitios de muestreo en el área de estudio.

Las dos especies que se estudiaron tienen una distribución limitada en la región: Por un lado, *Quercus macdougalii*, es una especie endémica con una distribución restringida en la Sierra Norte de Oaxaca, aparece en la lista roja de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza en la categoría de vulnerable (VU) (UICN, 2019). Recientemente, existen registros de presencia en los municipios de San Pedro Yólox, San Juan Quiotepec y Santiago Comaltepec (UNIBIO, 2019).

Por otro lado, *Pinus strobus* var. *chiapensis*, especie nativa de México y América Central; se distribuye en México en los estados de Chiapas, Guerrero, Puebla, Oaxaca y Veracruz (Eguiluz-Piedra, 1988). Constituye uno de los recursos forestales con importancia ecológica, así como económica por la calidad alta de su madera (López-Gijón, 2007). La especie está enlistada en la NOM-059-SEMARNAT-2010 (NOM-059, 2010) en la categoría de protección especial; no obstante, es catalogada como una especie en peligro de extinción (EN) por la UICN (2019).

Muestreo y obtención de datos

Para determinar el pH, la conductividad eléctrica, carbono orgánico, y la textura del suelo, se colectaron muestras de suelo en la base de los árboles seleccionando 30 individuos de cada especie, para lo cual se usó un muestreo sistemático aleatorio para abarcar las distintas condiciones locales del hábitat de las especies como cercanía de arroyos, orientación geográfica, pendiente del terreno y variación de la cubierta vegetal.

En la base de cada individuo seleccionado, se tomó una muestra compuesta (cuatro submuestras) de 800 a 1000 g, a una profundidad de 30-60 cm, hasta localizar una capa de suelo sin indicios visibles de materia orgánica. Posteriormente se etiquetaron para luego trasladarlas al laboratorio del Instituto de Estudios Ambientales de la Universidad de la Sierra Juárez, donde se hicieron los análisis del pH, conductividad y cantidad de carbono orgánico descritos en la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000 (NOM-021, 2002). La textura del suelo se determinó con los procedimientos sugeridos por la Unión Internacional de Ciencias del Suelo (IUSS) y la Organización para la Agricultura y la Alimentación de las Naciones Unidas (FAO) (Base Referencial Mundial del Recurso Suelo, 2007).

De manera adicional, se calcularon cinco propiedades del suelo para cada sitio de muestreo, a partir de un mapa de suelos obtenido por Cruz-Cárdenas *et al.* (2014), siguiendo los procedimientos descritos por los mismos autores. Las propiedades calculadas con este último procedimiento fueron: contenido de materia orgánica (MO) y cuatro cationes solubles: calcio (Ca), potasio (K), magnesio (Mg) y sodio (Na).

Determinación de intervalos de presencia máxima

Para determinar los valores de las variables edafológicas donde habita cada especie en mayor proporción, se utilizó la función de Kernel que es una forma no paramétrica de estimar la función de densidad de probabilidad de una variable aleatoria (Parzen, 1962; Terrell, y Scott, 1992) en virtud de que las especies estudiadas en el área de estudio, no mostraron una distribución normal ni uniforme ante la variación unitaria de las variables edafológicas, sino distribuciones discontinuas con fluctuantes fuertes, dificultando el uso de alguna función paramétrica teórica. Entre las ventajas de esta función incluye la alta flexibilidad que lo caracteriza, comparada con las funciones paramétricas; además de identificar la asimetría y la multimodalidad de los datos analizados (Parzen, 1962; Worton, 1989). Esta función, ha sido adaptada exitosamente en estudios

relacionados con la caracterización del hábitat de algunas especies de plantas (e.g. Broennimann *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2018)

Para cada una de las variables y especies, las curvas de densidad de probabilidad se construyeron utilizando el modelo de Kernel. Después, se determinó el rango de presencia máxima para cada especie en función de cada variable del suelo, para lo cual, cada función se dividió en cuatro bloques (cuartiles), siendo el límite inferior del rango máximo el cuantil 0.25 y el límite superior el cuantil 0.75. El análisis se hizo en el programa estadístico R (R Development Core Team, 2012).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La función de densidad de Kernel proyectó apropiadamente el óptimo de cada especie, al mostrar los límites entre los cuales ocurre la presencia máxima de las mismas. El valor óptimo, así como el límite superior e inferior del intervalo óptimo, se muestran en el Cuadro 1 y en los gráficos de las Figuras 2, 3 y 4.

Cuadro 1. Intervalos óptimos de la tasa de abundancia por variable para cada especie.

	Variables							
	pH	CE (dS m ⁻¹)	Ca (cmol L ⁻¹)	OC (kg m ⁻²)	K (cmol L ⁻¹)	Mg (cmol L ⁻¹)	Na (cmol L ⁻¹)	MO (%)
<i>Quercus macdougalii</i>								
LI	3.6	0.02	0.50	11	0.060	0.31	0.028	4.23
Óptimo	4.1-4.5	0.04-0.06	0.54-0.55	11.1	0.060-0.062	0.31-0.32	0.028-0.029	4.30-4.37
LS	4.8	0.08	0.58	11.2	0.063	0.32	0.029	4.38
<i>Pinus strobus</i> var. <i>chiapensis</i>								
LI	3.5	0.02	0.45	10	0.045	0.25	0.221	3.9
Óptimo	4.2-4.6	0.03-0.04	0.52-0.66	10.70-12	0.053-0.066	0.27-0.30	0.222-0.227	4.3-4.8
LS	4.9	0.05	0.7	12.5	0.071	0.32	0.228	4.9

LI= límite inferior; LS= límite superior; CE= conductividad eléctrica; dS m⁻¹= decisiemens por metro, Ca= calcio; cmol L⁻¹= centimoles por litro; OC= carbono orgánico; kg m⁻²= kilogramo por metro cuadrado; K= potasio, Mg: magnesio, Na= sodio; MO= materia orgánica.

El intervalo óptimo del pH del suelo para las dos especies varió entre 4.1 y 4.6, siendo menor en *Quercus macdougalii* (Figura 2a, Cuadro 1), mientras que los intervalos de conductividad eléctrica oscilaron en 0.03 y 0.06 dS/m (Figura 2b, Cuadro 1).

Los valores de pH reportados en estudios previos para *Pinus strobus* var. *chiapensis* difieren con los resultados obtenidos en este estudio; por ejemplo, Álvarez (1996) reporta valores de 5.0, Chávez (2000) reporta valores entre 5.5 a 6.5, Rodríguez-Acosta y Arteaga-Martínez (2005) valores de 4.5 a 5.5 y López-Gijón (2007) reporta valores de 5.75 a 7.4, en tanto que los resultados de este estudio mostraron valores de pH entre 4.2 y 4.6 (Cuadro 1), aunque en general los valores refieren a suelos ácidos.

Por otro lado, en la Sierra Norte de Oaxaca no se encontraron estudios relacionados con el pH del suelo para *Quercus macdougalii*; sin embargo, de acuerdo con los resultados obtenidos esta especie tuvo un rango en pH de 3.6 a 4.8 con un intervalo óptimo de 4.1 a 4.5 (Cuadro 1), lo que indica que esta especie podría prosperar en suelos más ácidos comparado con *Pinus strobus* var. *chiapensis*.

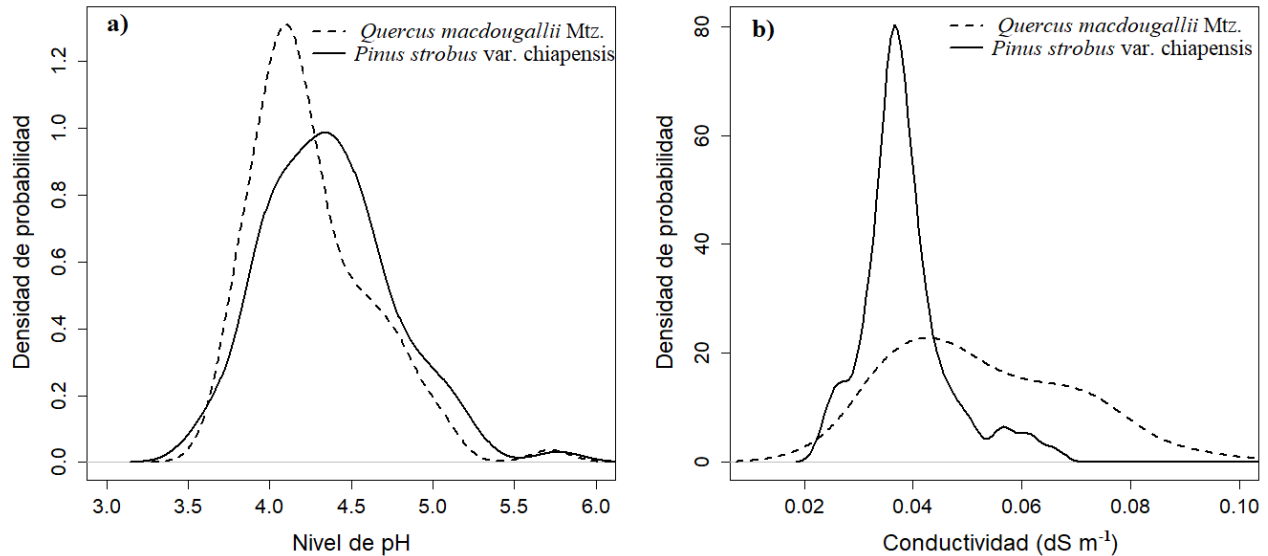


Figura 2. Rangos óptimos obtenidos con la función de densidad de Kernel para las dos especies, en función del (a) pH y (b) conductividad eléctrica.

La textura de los suelos muestreados fue de franco-arcillo-arenosa a franco-arenosa, pero predominó una textura franco-arenosa en el hábitat de las especies en estudio. *Quercus macdougalii* tuvo un pico secundario en menor escala en la curva de densidad, donde la textura del suelo es arcillo-arenosa; así mismo, *Pinus strobus* var. *chiapensis* también mostró un vértice secundario en suelos con textura franca (Figura 3). De acuerdo con los resultados, las dos especies estudiadas se distribuyen en suelos con textura franco-arenosa que podría estar relacionada con las condiciones topográficas las cuales cambian en escasos kilómetros en el área de estudio (Antúñez *et al.*, 2017b).

Los suelos muestreados tuvieron concentraciones por encima del 3 % de MO, sin superar el límite de 5 % sugerido por Molina (2007) que corresponde a un suelo rico en MO. El intervalo de presencia óptimo de MO para *Quercus macdougalii* varió de 4.30 a 4.37 %, mientras que para *Pinus strobus* var. *chiapensis* presentó valores más altos de 4.3-4.8 % (Figura 3a, Cuadro 1).

El porcentaje de MO y textura son importantes debido a que la MO aumenta la estabilidad y fortalece el tamaño de los agregados del suelo (Martínez *et al.*, 2008), así como ambas propiedades juegan un papel esencial para las reacciones físicas y químicas del suelo (Muñoz *et al.*, 2006), además la textura es una variable importante para el suministro de agua y aire (Martínez *et al.*, 2008). Los resultados del estudio sugieren que los suelos preferidos por ambas especies tienen de mediana a alta aireación con agregados relativamente estables por la alta concentración de limo y arena, esto contribuye a la mayor disponibilidad de agua y favorece el sistema radicular de las especies.

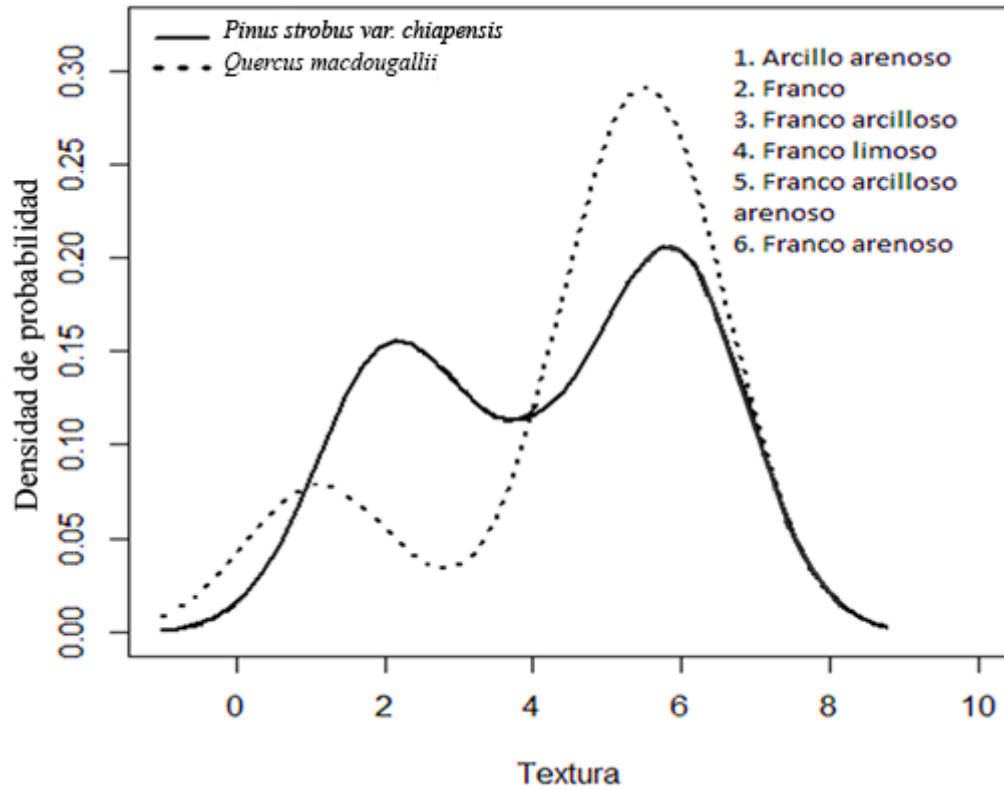


Figura 3. Textura del suelo en sitios con presencia de *Pinus strobus* var. *chiapensis* y *Quercus macdougalii*.

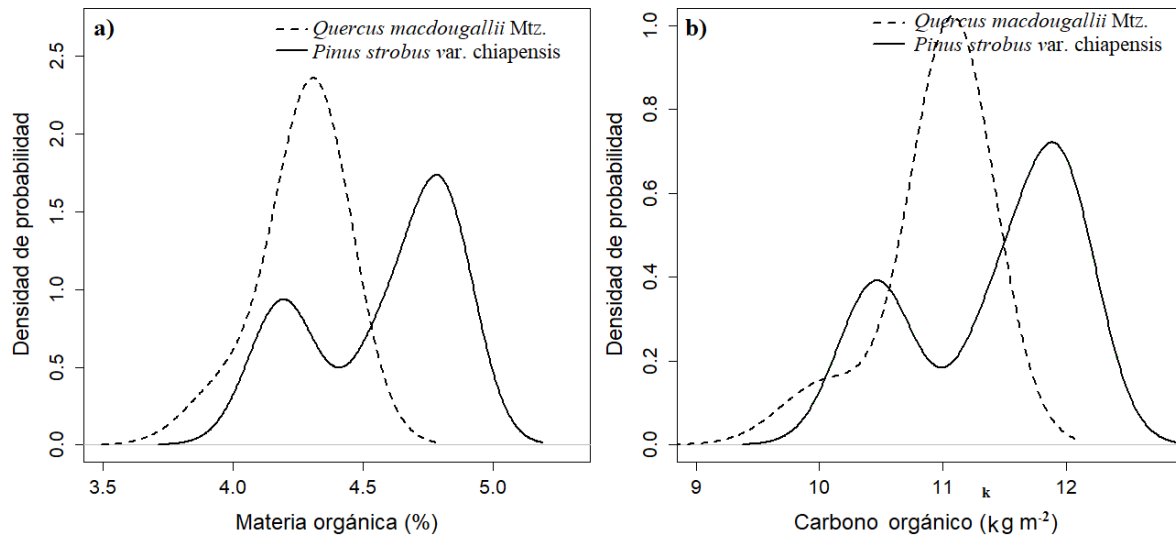


Figura 4. Rango óptimo de a) materia orgánica en el suelo y b) carbono orgánico para *Pinus strobus* var. *chiapensis* y *Quercus macdougalii*.

Por otro lado, los valores de carbono orgánico para las dos especies variaron de 9.6 a 11.1 kg m⁻² (Cuadro 1). El óptimo de distribución para *Quercus macdougalii* fue de 11.1 kg m⁻², mientras que *Pinus strobus* var. *chiapensis* presentó mayor variabilidad al abarcar un intervalo de 10.70 a 12 kg m⁻² (Cuadro 1, Figura 3b). Esta variable juega un papel esencial para las reacciones físicas, químicas y biológicas del suelo (Bentley, 1985; Muñoz *et al.*, 2006), además las concentraciones de carbono orgánico sugieren acumulaciones altas de MO en el suelo (Martínez *et al.*, 2008). No obstante, existe poca información sobre la contribución de esta variable en las especies estudiadas.

De igual forma, la presencia de las especies está relacionada con la movilidad que tiene los cationes solubles en el suelo (Garrido-Valero, 1993). Los valores de Ca, K, Na y Mg se encontraron en concentraciones muy bajas (Cuadro 1), de acuerdo con lo establecido por Molina y Meléndez (2002). Lo anterior coincide con lo reportado por Molina (2007), donde los suelos ácidos suelen presentar deficiencias de estos macronutrientes (Rojas-Garcidueñas, 1993). Por otro lado, un exceso de Ca intercambiable puede afectar la asimilación del Mg y de K, la relación de K/Mg debe estar comprendida entre 0.2 y 0.3 cmol L⁻¹, y si esta relación se excede existirá una deficiencia de K, lo mismo ocurre con el exceso de Na (Molina y Meléndez, 2002).

La determinación de la presencia máxima en las especies estudiadas, constituyen una importante base para analizar su capacidad de prosperar en entornos diferentes. También puede ser útil para hacer una mejor planificación y toma de decisiones en las localidades donde crecen dichas especies (Sáenz-Romero *et al.*, 2010; Martínez-Antúnez *et al.*, 2013; Silva-Flores *et al.*, 2014; Cruz-Paz, 2016; Antúnez *et al.*, 2017a).

Al respecto, el conocimiento de los requerimientos del hábitat para *Quercus macdougalii* y *Pinus strobus* var. *chiapensis* es clave en el área de estudio, al cohabitar con especies de fauna endémicas de la región como el roedor *Habromys chinanteco* (Robertson y Musser, 1976; Briones-Salas *et al.*, 2012) y flora como la hierba *Maianthemum comaltepecense* (Espejo *et al.*, 1996); esta información es necesaria para la conservación de las especies estudiadas.

CONCLUSIONES

La función de densidad de Kernel es una herramienta útil para determinar los intervalos óptimos de las propiedades físicas y químicas del suelo en los cuales ocurre la presencia de cada especie. Las dos especies en el área estudiada parecen preferir suelos ácidos con altas concentraciones de iones de hidrógeno. Los resultados también sugieren que ambas especies tienen un traslape significativo de “*nicho edáfico*”; por ejemplo, en el pH del suelo, materia orgánica, carbono orgánico y en las concentraciones de cationes (Ca, K, Mg y Na). Los resultados aquí reportados, podrían ser útiles al diseñar programas de conservación o implementar programas de propagación artificial o para realizar una migración asistida de estas especies en el futuro.

LITERATURA CITADA

- Álvarez F., A. D. 1996. *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen: Nuevo registro para Oaxaca, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 21: 131-137.
- Antúnez, P., C. Wehenkel, C. A. López-Sánchez y J. C. Hernández-Díaz. 2017a. The role of climatic variables for estimating probability of abundance of tree species. *Polish Journal of Ecology* 65: 324-338.
- Antúnez, P., J. C. Hernández-Díaz, C. Wehenkel y R. Clark-Tapia. 2017b. Generalized models: An application to identify environmental variables that significantly affect the abundance of three tree species. *Forests* 8: 59.

- Base Referencial Mundial Del Recurso Suelo. 2007. IUSS grupo de Trabajo WRB. Primera actualización. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO, Roma. 117 p.
- Benito de Pando, B. y J. Peñas de Giles. 2007. Aplicación de modelos de distribución de especies a la conservación de la biodiversidad en el sureste de la Península Ibérica. *GeoFocus* 7: 100-119.
- Bentley, O. G. 1985. Soil erosion and crop productivity: A call for action. *In*: Follett, R. F. y B. A. Stewart. (Eds.). Soil erosion and crop productivity. American Society of Agronomy. Madison, WI: pp. 1-7.
- Briones-Salas, M., A. Hernández-Allende, M. M. Coronel y G. G. Pérez. 2012. New records of the endemic Chinanteco deermouse *Habromys chinanteco* (Rodentia: Cricetidae) in the Sierra Madre de Oaxaca, Mexico. *The Southwestern Naturalist* 57: 221-222.
- Broennimann, O., M. C. Fitzpatrick, P. B. Pearman, B. Petitpierre, L. Pellissier, N. G. Yoccoz, W. Thuiller, M. J. Fortin, C. Randin, N. E. Zimmermann, C. H. Graham y A. Guisan. 2012. Measuring ecological niche overlap from occurrence and spatial environmental data. *Global Ecology and Biogeography* 21: 481-497.
- Brufman, J. Z., H. L. Urbisaia y L. A. Trajtenberg. 2005. Distribución del ingreso según género: un enfoque no paramétrico. *Cuadernos del CIMBAGE* 8: 129-168.
- Centeno-García, E., 2004. Configuración geológica del estado. *In*: García-Mendoza, A. J., M. J. Ordoñez y M. Briones-Salas (Eds.). Biodiversidad de Oaxaca. México D. F., México: Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza and World Wildlife. pp. 29-42.
- Chávez, M. 2000. Edad de transición de la madera juvenil a la madera madura de *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen de Tanetze de Zaragoza, Oaxaca. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Chapingo.
- Cruz-Cárdenas, G., L. López-Mata, C. A. Ortiz-Solorio, J. L. Villaseñor, E. Ortiz, J. T. Silva y F. Estrada-Godoy. 2014. Interpolation of Mexican soil properties at a scale of 1: 1,000,000. *Geoderma* 213: 29-35.
- Cruz-Paz, L. O. 2016. Factores climáticos y fisiográficos que afectan la abundancia de cuatro especies arbóreas en la comunidad de Santiago Comaltepec, Oaxaca. Tesis de Licenciatura. Universidad de la Sierra Juárez.
- Eguiluz-Piedra, T. 1988. Distribución natural de los pinos en México. Nota Técnica. Centro de Genética Forestal, A. C. pp. 1-6.
- Espejo, A., A. R. López-Ferrari y R. J. Ceja. 1996. *Maianthemum comaltepecense* (Convallariaceae), una nueva especie del estado de Oaxaca, México. *Acta Botánica Mexicana* 36: 21-28.
- Ferrier, S., y A. Guisan. 2006. Spatial modelling of biodiversity at the community level. *Journal of Applied Ecology* 43: 393-404.
- García-Mendoza, A. 2004. Integración del conocimiento florístico del Estado. *In*: García Mendoza, A. J., M. J. Ordoñez y M. Briones-Salas (Eds.). Biodiversidad de Oaxaca. México D. F., México: Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza and World Wildlife. pp. 305-325.
- Garrido-Valero, M. S. 1993. Interpretación de análisis del suelo. Hojas Divulgadoras N° 5. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación. Madrid, España. 40 p.
- Jiménez, A. M. 1991. Modelización cartográfica de densidades mediante estimadores Kernel. *Treballs de la Societat Catalana de Geografia* 6: 155-170.
- Julca-Otiniano, A., L. Meneses-Florián, R. Blas-Sevillano y S. Bello-Amez. 2006. La materia orgánica, importancia y experiencia de su uso en la agricultura. *Idesia (Arica)* 24: 49-61.

- López-Gijón, G. 2007. Estructura y distribución espacial de un bosque de *Pinus chiapensis* en la sierra sur de Oaxaca. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México, México.
- Martínez, E., J. P. Fuentes y E. Acevedo. 2008. Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal* 8: 68-96.
- Martínez-Antúnez, P., C. Wehenkel, J. C. Hernández-Díaz y J. J. Corral-Rivas. 2015. Use of the Weibull function to model maximum probability of abundance of tree species in northwest México. *Annals of Forest Science* 72: 243-251.
- Martínez-Antúnez, P., C. Wehenkel, J. C. Hernández-Díaz, M. González-Elizondo, J. J. Corral-Rivas y A. Pinedo-Álvarez. 2013. Effect of climate and physiography on the density of tree and shrub species in Northwest México. *Polish Journal of Ecology* 61: 283-295.
- Molina, E. 2007. Análisis de suelos y su interpretación. Centro de Investigaciones Agronómicas, UCR, Costa Rica. 8 p.
- Molina, E. y G. Meléndez. 2002. Tabla de interpretación de análisis de suelos. Centro de Investigaciones Agronómicas. Universidad de Costa Rica. Mimeo.
- Muñoz, J. D., L. J. Martínez y R. Giraldo. 2006. Variabilidad espacial de propiedades edáficas y su relación con el rendimiento en un cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.). *Agronomía Colombiana* 24: 355-366.
- NOM-021, Norma Oficial Mexicana. 2002. NOM-021-RECNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. México, D. F. Diario Oficial de la Federación. 85 p.
- NOM-059, Norma Oficial Mexicana. 2010. NOM-059-SEMARNAT-2010 Protección ambiental-especies nativas de México de flora y fauna silvestres-categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo. Diario Oficial de la Federación. Segunda sección. Jueves 30 de diciembre de 2010. México. 78 p.
- Parra-Murciego, J. M. 2011. Estimación de un modelo aditivo no paramétrico. Tesis de Maestría. Universidad de Granada. 65 p.
- Parzen, E. 1962. On estimation of a probability density function and mode. *The Annals of Mathematical Statistics* 33: 1065-1076.
- R Development Core Team. 2012. R: A language and environment for statistical computing R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Reyes, I. y A. Valery. 2007. Efecto de la fertilidad del suelo sobre la microbiota y la promoción del crecimiento del maíz (*Zea mays* L.) con *Azotobacter* spp. *Bioagro* 19: 117-126.
- Rigby, R. A. y D. M. Stasinopoulos. 2005. Generalized additive models for location, scale and shape. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)* 54: 507-554.
- Robertson, P. B. y G. G. Musser. 1976. A new species of *Peromyscus* (Rodentia: Cricetidae), and a new specimen of *P. Simultaneus* from Southern México, with comments on their ecology. *Occasional Papers of the Museum of Natural History, University of Kansas* 47: 1-8.
- Rodríguez-Acosta, M. y B. Arteaga-Martínez. 2005. Índice de sitio para *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen, en los estados de Veracruz y Puebla, México. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 11: 39-44.
- Rojas-Garcidueñas, M. 1993. Fisiología vegetal aplicada. Cuarta Edición Editorial Interamericana. McGraw Hill. México. 94 p.
- Rosenblatt, M. 1956. Remarks on some nonparametric estimates of a density function. *The Annals of Mathematical Statistics* 27: 832-837.

- Rucks, L., F. García, A. Kaplán, J. Ponce de León y M. Hill. 2004. Propiedades físicas del suelo. Universidad de la República: Facultad de agronomía. Departamento de suelos y aguas. Montevideo, Uruguay. 68 p.
- Sáenz-Romero, C., G. E. Rehfeldt, N. L. Crookston, P. Duval, R. St-Amant, J. Beaulieu y B. A. Richardson. 2010. Spline models of contemporary, 2030, 2060 and 2090 climates for México and their use in understanding climate-change impacts on the vegetation. *Climatic Change* 102: 595-623.
- Sainz-Rozas, H. R., H. E. Echeverría y H. P. Angelini. 2011. Niveles de carbono orgánico y pH en suelos agrícolas de las regiones pampeana y extrapampeana Argentina. *Ciencia del Suelo* 29: 29-37.
- Silva-Flores, R., G. Pérez-Verdín y C. Wehenkel. 2014. Patterns of tree species diversity in relation to climatic factors on the Sierra Madre Occidental, México. *PloS One* 9: e105034.
- Terrell, G. R., y D. W. Scott. 1992. Variable kernel density estimation. *The Annals of Statistics* 20: 1236-1265.
- UICN (Unión Internacional Para la conservación de la Naturaleza). 2019. La lista roja de las especies amenazadas. Versión 2019. (Consultado el 8 de diciembre 2019). Disponible en: <https://www.iucnredlist.org/>
- UNIBIO. 2019. Unidad de Informática para la Biodiversidad. Instituto de Biología. Universidad Nacional Autónoma de México. (Consultado el 8 de diciembre de 2019). Disponible en: <http://www.unibio.unam.mx/>
- Valencia, A. S. y K. C. Nixon. 2004. Encinos. In: García-Mendoza, A. J., M. J. Ordoñez y M. Briones-Salas (Eds.). Biodiversidad de Oaxaca. México D. F., México: Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza and World Wildlife. pp. 219-225.
- Worton, B. J. 1989. Kernel methods for estimating the utilization distribution in home-range studies. *Ecology* 70: 164-168.
- Zhang, G., A. X. Zhu, S. K. Windels y C. Z. Qin. 2018. Modelling species habitat suitability from presence-only data using kernel density estimation. *Ecological Indicators* 93: 387-396.