



ISSN 1405-0471

Maderay Bosques

Vol. 22, Núm. 2 ■ Verano 2016 ■ Xalapa, Ver.

Germinación y emergencia de
encinos amenazados



INECOL
INSTITUTO DE ECOLOGÍA, A.C.

Madera y Bosques

vol. 22 núm. 2 Verano 2016



comité editorial

- Dr. Óscar Aguirre Calderón**
Universidad Autónoma de Nuevo León, México
- Dr. Miguel Cerón Cardeña**
Universidad Autónoma de Yucatán, México
- M.C. Mario Fuentes Salinas**
Universidad Autónoma de Chapingo, México
- Dr. Rubén F. González Laredo**
Instituto Tecnológico de Durango, México
- Dr. Raymond P. Guries.**
University of Wisconsin, EUA
- Dr. Lázaro R. Sánchez Velázquez**
Universidad Veracruzana, México
- Dr. Amador Honorato Salazar**
*Instituto Nacional de Investigaciones Forestales,
Agrícolas y Pecuarias, México*
- Dr. Ezequiel Montes Ruelas**
Universidad de Guadalajara, México
- Dr. José de Jesús Návar Cháidez**
Instituto Politécnico Nacional, Durango, México
- Dra. Carmen de la Paz Pérez Olvera**
Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, México.
- Dr. Hugo Ramírez Maldonado**
Universidad Autónoma de Chapingo, México
- Dra. María de los Ángeles Rechy de von Roth**
Universidad Autónoma de Nuevo León, México
- Dr. Víctor L. Barradas Miranda**
Instituto de Ecología, UNAM, México

Raymundo Dávalos Sotelo
Editor

Dr. Patrick J. Pellicane
Dr. Martín A. Mendoza Briseño
Dr. Ariel Lugo
M.C. Freddy Rojas Rodríguez
Dr. Alejandro Velázquez Martínez

Reyna Paula Zárate Morales
Producción editorial

consejo editorial

Damián Piña Bedolla
Maquetación

Gina Gallo
Diseño de portada

Madera y Bosques, Año 22, núm. 2, agosto 2016, es una publicación cuatrimestral editada por el Instituto de Ecología, A.C. Carretera Antigua a Coatepec núm. 351. Col. El Haya, C.P. 91070, Tel. (228) 8421800, ext. 6106, www.inecol.mx, mabosque@inecol.mx. Editor responsable: Dr. Raymundo Dávalos Sotelo. Reserva de Derecho al Uso Exclusivo núm. 04-2012-102312120900-102, ISSN 1405-0471, otorgado por el Instituto Nacional del Derecho de Autor, Licitud de Título núm. 12906 y Licitud de Contenido núm. 10479, ambos otorgados por la Comisión Calificadora de Publicaciones y Revistas Ilustradas de la Secretaría de Gobernación. Impresa por Fís. Arturo Sánchez y Gándara, Cuapinol 52, Colonia Pedregal de Santo Domingo, Delegación Coyoacán, C.P. 04369, México, D.F., este número se terminó de imprimir el 30 de agosto de 2016 con un tiraje de 100 ejemplares.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.

Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización del editor.

La suscripción anual para 2016 es de \$800.00+\$400 para gastos de envío al interior de la República y \$90.00 USD al extranjero (no incluye gastos de envío). Precio por ejemplares sueltos \$300.00 y \$30.00 USD, respectivamente. Incluye costos de envío por correo aéreo. Suscripciones en Departamento de Adquisiciones del Instituto de Ecología, A.C. Carretera Antigua a Coatepec 351, El Haya, Xalapa 91070, Ver. Tel.: (228) 842 1800 ext 5125. c.e. miguel.castillo@inecol.mx. Donaciones e intercambios, en el Instituto de Ecología, A.C., al c.e.: biblio@inecol.mx.

C contenido

artículos científicos

5

Editorial

Raymundo Dávalos Sotelo

15

Condición de copa, indicador de salud en árboles urbanos del Bosque San Juan de Aragón, Ciudad de México

Luz de Lourdes Saavedra-Romero, Dionicio Alvarado-Rosales, Patricia Hernández-de la Rosa, Tomás Martínez-Trinidad, Gustavo Mora-Aguilera y Jaime Villa-Castillo

29

Comparación de la diversidad estructural de una selva alta perennifolia y una mediana subperennifolia en Tabasco, México

José Luis Martínez-Sánchez

41

Áreas prioritarias para restauración ecológica y sitios de referencia en la región Chignahuapan-Zacatlán

María Luisa González Ovando, F. Ofelia Plascencia-Escalante y Tomás Martínez-Trinidad

53

Efecto geográfico de la cubierta del suelo y el mes calendario, en la meteorología superficial e insolación de bosques de coníferas en México

Víctor M. Rodríguez-Moreno, J. Ariel Ruíz-Corral, Gabriela Ramírez-Ojeda y Ramiro Pérez-Miranda

67

Tamaño, color de nuez y sombra afectan la germinación de *Quercus deserticola*

Dante Arturo Rodríguez-Trejo y Marín Pompa-García

77

Germination and seedling emergence of four endangered oak species

Yureli García-De La Cruz, Fabiola López-Barrera y José María Ramos-Prado

89

Caracterización del crecimiento de plantaciones jóvenes de teca (*Tectona grandis* Linn f.) y estimación de curvas de índice de sitio en el área septentrional de la República de Guatemala

Manuel Sabino Mollinedo García, Miguel Ángel Herrera Machuca y Fernando Muñoz Sáez

105

Vulnerabilidad climática y situación socioambiental: percepciones en una región semiárida del noreste de México

Thania Gabriela López-García y Mario G. Manzano

119

Étude des altérations de la couleur du bois de Chêne lors du séchage sous vide discontinu

Sadoth Sandoval Torres, Wahbi Jomaa, Françoise Marc y Jean-Rodolphe Puiggali

131

Composición química de las hojas y ramas de *Cedrela odorata* L. de dos plantaciones forestales como fuente de materia prima lignocelulósica

Martha Rosales-Castro, J. Amador Honorato-Salazar, Ariana Berenice Santos-García, Ma. Elena Pérez-López, Gertrudis Colotl-Hernández y Vicente Sánchez-Monsalvo

147

Fe de erratas

Portada:
Bellotas de *Quercus insignis*

Foto de: Yureli García-De la Cruz
Universidad Veracruzana



C Contents

scientific papers

9

Editorial

Raymundo Dávalos Sotelo

15

Crown condition, a health indicator in urban trees of the San Juan de Aragon Park, Mexico City

Luz de Lourdes Saavedra-Romero, Dionicio Alvarado-Rosales, Patricia Hernández-de la Rosa, Tomás Martínez-Trinidad, Gustavo Mora-Aguilera and Jaime Villa-Castillo

29

Comparison of the structural diversity between a humid and subhumid tropical forest in Tabasco, Mexico

José Luis Martínez-Sánchez

41

Priority areas for ecological restoration and reference sites in Chignahuapan-Zacatlan region

María Luisa González Ovando, F. Ofelia Plascencia Escalante and Tomás Martínez-Trinidad

53

Geographic, land cover and calendar month effect in on surface meteorology and insolation in coniferous forests in Mexico

Víctor M. Rodríguez-Moreno, J. Ariel Ruíz-Corral, Gabriela Ramírez-Ojeda and Ramiro Pérez-Miranda

67

Nut size and color and shade affect germination of *Quercus deserticola*

Dante Arturo Rodríguez-Trejo and Marín Pompa-García

77

Germinación y emergencia de plántulas de cuatro especies de encino amenazadas

Yureli García-De La Cruz, Fabiola López-Barrera and José María Ramos-Prado

89

Growth and productivity characterization of young teak (*Tectona grandis* Linn f.) plantations and estimation of site index curves in the septentrional area of the Republic of Guatemala

Manuel Sabino Mollinedo García, Miguel Ángel Herrera Machuca and Fernando Muñoz Sáez

105

Climate vulnerability and socio-environmental situation: perceptions in a semiarid region of northeastern Mexico

Thania Gabriela López-García and Mario G. Manzano

119

Study of color alterations in European oak wood during vacuum drying

Sadoth Sandoval-Torres, Wahbi Jomaa, Françoise Marc and Jean-Rodolphe Puiggali

131

Chemical composition of leaves and branches of *Cedrela odorata* L. from two forest plantations as a source of lignocellulosic feedstock

Martha Rosales-Castro, J. Amador Honorato-Salazar, Ariana Berenice Santos-García, Ma. Elena Pérez-López, Gertrudis Colotl-Hernández and Vicente Sánchez-Monsalvo

147

Erratum

Cover:
Nuts of *Quercus insignis*

Potho by: Yureli García-De la Cruz
Universidad Veracruzana



e ditorial

Como todo en la vida moderna del Siglo XXI, la edición y publicación de revistas científicas ha experimentado cambios significativos en los últimos años como producto de la revolución tecnológica que estamos viviendo. El cambio más drástico tiene que ver con el formato de las publicaciones. Hasta no hace mucho, la versión impresa de una revista era el estándar y modelo al que se dirigían todos los esfuerzos editoriales. En la segunda década del siglo actual, este paradigma se ha transformado sustancialmente y seguramente para siempre, en favor de la publicación digital o electrónica. La motivación de esta conversión es alcanzar a una audiencia muchísimas veces mayor a la actual aprovechando los canales de comunicación contemporáneos de la red de datos internet y, eventualmente, ahorrar en costos de impresión, almacenamiento y envío de los ejemplares impresos; además de reducir los tiempos para que el lector tenga acceso a la información publicada. Lograr la versión digital de las revistas es actualmente la meta y objetivo de los cuerpos editoriales. Para ello, las políticas y procedimientos de gestión editorial han tenido también que sufrir transformaciones profundas. El proceso tradicional, que para finales de la segunda mitad del Siglo XX todavía se manejaba por correo impreso fue modificándose gradualmente para beneficiarse de medios de comunicación más expeditos y casi inmediatos como el correo electrónico. Hasta hace muy poco, esta forma de comunicarse entre autores, editores, revisores, impresores, formadores y todos los integrantes del proceso de edición era la forma preferida de comunicación por su inmediatez y bajo costo. El único inconveniente era cuando no se tenía al alcance una computadora conectada al internet o bien, había fallas en el sistema que limitaban las comunicaciones temporalmente. Sin embargo, el proceso mismo de edición todavía no se manejaba con *software* que permitiera una gestión integral que abarcara las comunicaciones entre los interesados, las revisiones por pares, la elaboración de las modificaciones por parte de los autores y la integración de los archivos para edición final.

En los primeros años de este siglo empezaron a tomar gran impulso los sistemas de gestión editorial electrónicos y fueron gradualmente adoptados por las empresas editoriales tanto comerciales como académicas. Hoy por hoy son casi universalmente reconocidos como el medio más eficaz para la gestión rutinaria de artículos sometidos para su posible publicación. Uno de los sistemas que más éxito han tenido, sobre todo en Latinoamérica, es el desarrollado por investigadores y especialistas en edición y en informática integrados al proyecto *Public Knowledge Project (PKP)* promovido por las Universidades canadienses de la Columbia Británica (*UBC*) y Simon Fraser (*SFU*) en la región de Vancouver, Columbia Británica, Canadá (<https://pkp.sfu.ca/>) con la colaboración de otras universidades. En palabras de sus creadores, *PKP* es una iniciativa para desarrollar software libre (sin costo), de acceso abierto para mejorar la calidad y el alcance de las publicaciones académicas. El sistema desarrollado por este proyecto es el llamado *Open Journal System (OJS)*. Los antecedentes del *OJS* se pueden trazar a la Iniciativa Budapest de Acceso Abierto 2002 la cual nació atendiendo a la necesidad expresada por un importante sector del mundo académico de lanzar una nueva generación de revistas científicas comprometidas con el acceso abierto, y para ayudar a las revistas existentes que elijan hacer la transición al acceso abierto. Por ser de libre acceso y pugnar porque la información científica misma también lo sea, este sistema ha sido recibido con gran entusiasmo en América Latina y otras regiones del mundo. Por supuesto que *OJS* no es el único sistema de gestión editorial disponible pero sí es de los más populares, probablemente el más empleado en el mundo. Según las cifras de *PKP*, para el tercer trimestre de 2012 el uso de *OJS* superaba las 14000 revistas. Para 2016, con toda seguridad, esta cifra se ha incrementado considerablemente.

Aparejado con el uso del sistema *OJS*, existen una serie de programas informáticos para procesar los manuscritos para su edición en formato digital. Estos programas son conocidos con sus siglas de los acrónimos en inglés como *PDF*, *HTML*, *XML*, etc., una verdadera sopa de letras. El más antiguo y conocido de todos es el formato *PDF*. El formato de documento portátil (*PDF*) se utiliza para presentar e intercambiar documentos de forma confiable, independiente del software, el hardware o el sistema operativo. Fue inventado por la empresa Adobe; *PDF* es un estándar abierto y oficial reconocido por la Organización Internacional para la Estandarización (*ISO*). *HTML* es la sigla en inglés de *HyperText Markup Language* (lenguaje de marcas de hipertexto) y hace referencia a un lenguaje de marcado para la elaboración de archivos electrónicos como páginas web o documentos para la formación de manuscritos para revistas digitales. El más moderno y poderoso de todos estos programas es el *XML*, siglas en inglés de *eXtensible Markup Language* ("lenguaje de marcas extensible"), lenguaje de marcas desarrollado por el *World Wide Web Consortium (W3C)* utilizado para almacenar datos en forma legible. Proviene del lenguaje *SGML* y permite definir la gramática de lenguajes específicos para estructurar documentos grandes. A diferencia de otros lenguajes, *XML* da soporte a bases de datos, siendo útil cuando varias aplicaciones deben comunicarse entre sí o integrar información.

Para poder manejar todos estos lenguajes, programas informáticos y plataformas tecnológicas, los cuerpos editoriales de las revistas han tenido que actualizarse para no rezagarse con respecto a las revistas científicas comerciales que cuentan con *staffs* profesionales y muy competentes. En México, han sido vitales las directrices del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (*CONACYT*) para impulsar la profesionalización de dichos cuerpos editoriales. El *CONACYT* ha proporcionado el apoyo financiero para esta conversión y ha convenido con la Universidad Nacional Autónoma de México para que a través de la Dirección General de Cómputo y de Tecnologías de Información y Comunicación (*DGTIC*) coordine los esfuerzos de los equipos editoriales de las revistas científicas que forman parte del anterior Índice de Revistas Mexicanas de Investigación Científica y Tecnológica (*IRMICYT*) y del nuevo sistema de clasificación de revistas que impulsan. Este ambicioso proyecto pretende que las revistas mexicanas de investigación se mantengan en la vanguardia tecnológica para que los resultados de las investigaciones que publican lleguen a un mayor número de lectores en todo el mundo y tengan un mayor impacto editorial.

A partir de agosto de 2016, la revista *Madera y Bosques* adoptó de manera formal el sistema de gestión editorial *OJS* (<http://myb.ojs.incol.mx/>) poniéndose a la par de las revistas mexicanas de vanguardia en el ámbito de la edición de revistas científicas. Este esfuerzo ha estado lleno de retos tecnológicos y ha implicado una conversión radical del sistema anteriormente en vigor. El proceso de conversión a formato digital no ha estado exento de contratiempos pero en términos generales, se han tenido avances significativos y al parecer, vamos en la ruta correcta.

El lanzamiento de la nueva plataforma de gestión editorial basada en el sistema *OJS* coincide en el tiempo con la edición del número 2 del volumen 22 de la revista correspondiente a la edición de verano de 2016. Este número incluye diez artículos en tres idiomas diferentes: español, inglés y francés, lo cual habla de la gran demanda y difusión que ha logrado la revista en los últimos años. Los artículos tienen una temática variada y rica en nuevos desarrollos y avances científicos.

El primer artículo, de Saavedra-Romero *et al.*, plantea que la condición de copa es un indicador de salud en árboles urbanos del Bosque San Juan de Aragón, Ciudad de México. El Bosque San Juan

de Aragón, es una de las pocas áreas verdes al noreste de la Ciudad de México y la condición actual de su arbolado en materia de salud no se conoce con precisión. En el estudio aquí publicado se implementó y adaptó el protocolo del indicador condición de copa en parcelas circulares establecidas aleatoriamente en el bosque mencionado. De las seis variables evaluadas para condición de copa solamente una alcanzó los estándares establecidos de salud arbórea encontrados en otros estudios, lo cual indica que los árboles de ese parque urbano no gozan de buena salud. El segundo trabajo, de Martínez-Sánchez hace una comparación de la diversidad estructural de una selva alta perennifolia y una mediana sub-perennifolia en Tabasco, México. El autor señala que los índices de diversidad estructural constituyen estimadores más precisos que los índices de diversidad clásicos ya que incorporan el diámetro y altura de los árboles. Mediante el uso de ocho índices estructurales basados en el área basal de la comunidad por clases de diámetro y altura de los árboles, se comparó la diversidad estructural de las dos selvas. Se concluye que los índices de diversidad estructural reflejan tanto la diversidad de especies como la complejidad estructural de la comunidad, siendo más diversa la SAP que la SMS. Se sugiere el uso de estos índices para las comunidades arboladas.

El tercer manuscrito, de González Ovando *et al.*, define cuáles son las áreas prioritarias para restauración ecológica y sitios de referencia en la región Chignahuapan-Zacatlán, Puebla, México. En este trabajo se utilizó la Evaluación Multicriterio para identificar las áreas prioritarias que necesitan ser restauradas en dicha región así como determinar mediante teledetección los sitios de referencia de las zonas identificadas para su restauración. Se utilizó el Proceso Analítico Jerarquizado en un entorno de sistemas de información geográfica para definir prioridades de atención. Se generaron mapas tanto de las zonas que necesitan atención prioritaria en cuestión de restauración ecológica como de los sitios que servirán como referencia para dicho trabajo; esto favorece una planeación eficaz de las áreas a restaurar. El cuarto artículo, de Rodríguez-Moreno *et al.*, estudia el efecto geográfico, de la cubierta del suelo y el mes calendario en la meteorología superficial e insolación de bosques de coníferas en México. Para evidenciar como influyen estas variables en la expresión de trece indicadores indirectos de meteorología superficial y de insolación, se aplicó la técnica de reescalamiento de datos basado en latitud para calcular el ángulo cenital en pares coordenados, en bosques de coníferas de México. El análisis estadístico arrojó diferencias significativas para cobertura del suelo, sitio de muestreo y mes calendario. En la expresión de los índices, se observó un aparente efecto latitudinal de cercanía a la línea de costa.

El quinto artículo, de Rodríguez-Trejo y Pompa García, señala que el tamaño, color de nuez y sombra afectan la germinación de *Quercus deserticola*. El objetivo del trabajo fue estudiar la influencia de tamaño y color de la nuez, así como de la sombra, en la capacidad y energía germinativas de esta especie. Se halló un efecto significativo de tamaño y color de la semilla, así como de la sombra en la capacidad germinativa. La mayor capacidad germinativa se logró con semilla de nuez grande, café oscuro y con sombra. La energía germinativa fue influida por el color y por la interacción tamaño-color. La mayor energía germinativa se alcanzó con semilla de nuez grande y café oscura. En el sexto texto, García-De La Cruz *et al.*, estudian la germinación y emergencia de encinos amenazados del bosque de niebla, *Quercus germana*, *Q. insignis*, *Q. sartorii* y *Q. xalapensis*, evaluándolas bajo diferentes condiciones lumínicas (sol vs. sombra) en un fragmento de bosque secundario (SFF) y un invernadero (GRE). Para

cada una de las especies, la variabilidad del peso de la semilla fue relacionada con la germinación y emergencia. Se concluye que el peso de la bellota no influyó en la germinación y emergencia de las especies. Se discuten las implicaciones de este estudio, así como recomendaciones sobre técnicas de propagación para la producción de encinos para restaurar bosques en áreas perturbadas.

En el séptimo manuscrito Mollinedo García *et al.*, hacen la caracterización del crecimiento de plantaciones jóvenes de teca (*Tectona grandis* Linn f.) y la estimación de curvas de índice de sitio en el área septentrional de la República de Guatemala. Para caracterizar estas plantaciones se analizaron datos de más de 240 parcelas permanentes de monitoreo encontrándose que la mayoría de los sitios presentan crecimientos medios. Las curvas de índice de sitio basadas en un modelo de crecimiento modificado permitieron identificar y definir una clasificación de los terrenos en función de su capacidad productiva en sitio y así evidenciar el crecimiento y desarrollo de la teca en Guatemala. El octavo trabajo, de López García y Manzano, analiza la vulnerabilidad climática y la situación socio ambiental en una región semiárida del noreste de México. La historia de desarrollo de la región fue construida con base en entrevistas y encuestas. El problema de mayor impacto en la región es la sequía y la pérdida de recursos hídricos cuya única fuente de abastecimiento es el agua del acuífero. Se discute la importancia de las fuentes directas de información y la interacción con actores locales en la construcción de diagnósticos, alineación de apoyos y agendas de desarrollo rural.

El noveno artículo es un estudio tecnológico de Sandoval Torres *et al.*, referente a las alteraciones de color en madera de encino europeo durante el secado a vacío. Un análisis de los mecanismos de decoloración de madera de encino europeo durante un proceso de secado a vacío por contacto permitió identificar los principales mecanismos de la alteración del color. Estos mecanismos son la degradación de las hemicelulosas, la oxidación de taninos y la pérdida de compuestos orgánicos volátiles. En este trabajo se muestra la relación entre la temperatura de secado, los valores de potencial antioxidante y las intensidades de los picos C=O de los espectros FTIR. Un aumento de la saturación del color y la luminosidad pueden estar relacionados con la degradación térmica de los extractivos. Finalmente, el último trabajo por Rosales-Castro *et al.*, trata de la composición química de las hojas y ramas de *Cedrela odorata* L. de dos plantaciones forestales como fuente de materia prima lignocelulósica en El Palmar, Veracruz y San Felipe Bacalar, Quintana Roo, así como la concentración de fenoles totales, flavonoides y su capacidad de captación de radicales libres, enfocadas hacia valorar su potencial como fuente lignocelulósica para obtención de biocombustibles y/o hacia la aplicación en áreas biomédicas. Se encontraron diferencias en las concentraciones lignocelulósicas entre las muestras colectadas en las dos plantaciones, sobresaliendo las colectadas en Bacalar, Q.R. Los resultados obtenidos indican que las hojas, la madera de ramas y aserrín son viables para obtención de carbohidratos, mientras que la madera puede ser una fuente de obtención fenoles y flavonoides con posibles aplicaciones terapéuticas. Estos artículos representan un cúmulo de nueva información de varias especies forestales de México y de otros países que seguramente contribuirán en gran medida a incrementar el conocimiento que sobre ellas se tiene en la actualidad. Serán un excelente marco para inaugurar una nueva era en los procesos de gestión editorial de *Madera y Bosques*.

Raymundo Dávalos Sotelo

Editor

e ditorial

Like everything in the modern life of the 21st century, the edition and publication of scientific journals has experienced significant changes in recent years as a result of the technological revolution that we are having. The more drastic change has that do with the format of the publications. Until not long ago, the printed version of a journal was the standard and model to which all publishing efforts were directed. In the second decade of the current century, this paradigm has been transformed substantially and surely forever, in favor of electronic or digital publishing. The motivation for this conversion is to reach an audience many times greater than the current one, taking advantage of contemporary communication channels of the World Wide Web data network – internet - and eventually, save on printing and storage costs. To generate the digital version of the journals is currently the goal and objective of publishing teams. To this end, policies and editorial management procedures have also had to undergo deep transformations. The traditional process, which by the end of the second half of the 20th century still was handled by traditional hard copies and regular mail, started to change gradually to benefit from more expeditious and almost immediate media as the email. Until very recently, this form of contact between authors, editors, reviewers, printers, trainers and all the members of the editing process was the preferred form of communication for its immediacy and low cost. The only downside was when you were not able to reach a computer connected to the internet or flaws in the system that limited communication temporarily. However, the editing process itself was not yet handled with software that would allow a comprehensive management that would cover communications between authors, peer reviewers and editors, along with the elaboration of the modifications by the authors and the integration of files for final editing.

In the first years of this century, new systems of electronic publishing and management began to take great impulse and were gradually adopted by the publishing companies both commercial and academic. Today they are almost universally recognized as the more effective means for routine management of articles submitted for possible publication. One of the systems that has been more successful, especially in Latin America, has been developed by researchers and specialists in editing and computer sciences integrated into the Public Knowledge Project (PKP) promoted by Canadian universities such as the University of British Columbia (UBC) and Simon Fraser (SFU) in the region of Vancouver, British Columbia, Canada (<https://pkp.sfu.ca/>), with the collaboration of other universities. In words of their creators, PKP is an initiative to develop free (without cost) open source software, to improve the quality and the scope of scholarly publishing. The system developed by this project is the so-called Open Journal System (OJS). OJS can be traced back to the *Budapest Open Access Initiative, 2002* which was launched on the argument that “Scholars need the means to launch a new generation of journals committed to open access, and to help existing journals that elect to make the transition to open access...”

For being open access and because it strives for scientific information itself to be also open access, this system has been received with great enthusiasm in Latin America and other regions of the world. It is clear that OJS not is the only system of publishing management available but it is of the most popular, probably the more employed in the world. According to the figures of PKP, for the third quarter of 2012 the use of OJS exceeded 14000 magazines. By 2016, surely, this figure must have increased considerably.

Coupled with the use of OJS, there are a series of computer software to process the manuscripts for its edition in digital format. These programs are known with their acronyms in English such as PDF,

HTML, XML, etc., a real soup of letters. The oldest and better known of all of them is the PDF format. The portable document format (PDF) is used to present and exchange documents in a reliable way, independent of the software, the hardware or the operating system. It was invented by the Adobe Company; PDF is an open standard officially recognized by the International Organization for Standardization (ISO). HTML is the acronym of HyperText Markup Language (language of hypertext markup) and makes reference to a markup language for the elaboration of electronic files such as web pages or documents for the formation of manuscripts for digital journals. The most modern and powerful of all of these programs is the XML, acronym for eXtensible Markup Language ("markup language extensible"), a markup language developed by the World Wide Web Consortium (W3C) used to store data in machine-readable form. It comes from the language SGML and allows you to define the grammar of languages specific to the structure of large documents. Unlike other languages, XML supports data bases, being useful when multiple applications must communicate among themselves or integrate information.

In order to handle all these languages, computer programs and technological platforms, the publishing teams of the journals have had the necessity of updating its capabilities so they do not lag far behind the commercial scientific journals that have very professional and competent staffs. In Mexico, the guidelines of the National Council of Science and Technology (CONACYT) have been vital to promote the professionalization of such publishing teams. CONACYT has provided financial support for this conversion and has agreed with the National Autonomous University of Mexico so that through the Office of Computer and Information Technologies and Communications (DGTIC) it coordinates the efforts of the editorial teams of scientific journals that are part of the former index of Mexican journals of scientific and technological research (IRMICyT) and also are part of the new system of classification of journals that it is putting forward. This ambitious project aims for the Mexican journals of research keep to in the technological vanguard so the results of the research that they publish arrive to a greater number of readers in all of the world and have a greater publishing impact.

Starting from August 2016, the journal *Madera y Bosques* adopted formally the system of management publishing OJS (<http://myb.ojs.incol.mx/index.php/myb>) putting itself on a par with the Mexican journals that are in the forefront of the field of the edition of scientific journals. This effort has been full of technological challenges and has involved a radical conversion of the system previously in place. The process of conversion to the digital format has not been free of setbacks, but in general terms, it has had significant advances and apparently, it is going in the correct route. The launch of the new editorial management platform based on the OJS system coincides with the release of issue 2 of volume 22 of the journal, summer issue of 2016. This number includes ten articles in three different languages: Spanish, English and French, which speaks of the high demand and dissemination that has managed the journal in recent years. The articles have varied themes and they are rich in new developments and scientific advances.

The first manuscript by Saavedra-Romero *et al.*, deals with the tree crown condition, as a health indicator in urban trees of the San Juan de Aragon Park, Mexico City. Green urban areas provide several benefits to the society and the environment. The San Juan de Aragon Park, located northeast of Mexico City, is one of the few in that urban area and their trees' health is unknown. In this survey, the crown condition indicator protocol was adapted and applied in 28 circular plots established randomly in the

mentioned park. Normal diameter, total height, species identity, crown condition and tree density of all trees into the plots were evaluated. Six crown variables were measured. Only live crown ratio reached the established standards reported in other studies. The second article by Martínez-Sánchez is a study on the structural diversity for a humid and sub-humid tropical forest in Tabasco, México. The structural diversity of a tropical humid forest (THF) and a tropical sub-humid forest (TSF) in Tabasco, Mexico, was compared by means of eight structural indexes which estimate community basal area sorted by DBH and tree height classes. It was concluded that the structural indices evaluate species diversity as well as the community structural diversity in a more complete way having the THF higher structural diversity than TSF: The authors suggest their use in other tree vegetation studies.

The third manuscript by González Ovando *et al.*, analyzes the priority areas for ecological restoration and reference sites in Chignahuapan-Zacatlan region. The main goal of this paper was the use of Multi-Criteria Evaluation to identify priority areas for ecological as well as to determine reference sites by restoration by remote sensing. The Analytic Hierarchy Process through an GIS environment was used to identify priorities for attention. The results indicate that about 80% of the area was classified with a level of priority for restoration. In spite of this, only 0.8% was classified as maximum priority. With the recognition of these areas in maps, there is a better view of the areas that are more vulnerable and prone to degradation. The fourth paper by Rodríguez-Moreno *et al.*, studies the geographic land cover and calendar month effect on surface meteorology and insolation of coniferous forests in Mexico. To demonstrate how they influence such variables, in the expression of thirteen indirect indicators of superficial meteorology and of sun radiation, the technique of re-scaling of information based on latitude to calculate the zenith angle in coordinated pairs was applied in forests of coniferous of Mexico. The statistical analysis showed significant differences for soil cover, sampling site and month calendar. In the expression of the indexes, an apparent effect was observed latitudinal of closeness to the line of coast which seems to suggest his influence in the evaluated indexes.

The fifth manuscript by Rodríguez-Trejo and Pompa García describes how nut size, nut color and shade affect germination of *Quercus deserticola*. The aim of this work was to investigate the effect of nut size and color, as well as shade, on the germination of *Quercus deserticola*. The experimental factors were nut size (small and large), color (light brown and dark brown), and 40% shade (with and without shade). An analysis of variance with a mixed procedure, and a Tukey mean comparison were conducted, for the variables germinative capacity and germinative energy, and a logistic model to estimate the probability of germination was obtained. There was a significant effect of seed size, color of seed, and of shade on germinative capacity. The highest germinative capacity (100%) was for large seed, dark brown color and with shade. The germinative energy was affected by seed color and by the interaction seed size*color. The highest germinative energy was for large and dark brown color seed, with 11.5 days. In the sixth text, García-De La Cruz *et al.*, study the germination and seedling emergence of four endangered oak species: *Quercus germana*, *Q. insignis*, *Q. sartorii* and *Q. xalapensis* observed under different light conditions (sun vs. shade) in a secondary forest fragment (SFF) and a greenhouse (GRE). Seed weight variability was also evaluated for each species and its relationship to germination and emergence explored. In the SFF, germination and emergence only differed among species; *Q. xalapensis* germination was the lowest and *Q. sartorii* emergence was the highest, com-

pared to the rest of the species. Acorn weight did not influence germination and emergence in any species. The implications of this study are discussed, along with recommended propagation techniques for growing oaks to forest restoration in disturbed areas.

In the seventh manuscript Mollinedo García *et al.*, compare growing and productivity characterization of young teak (*Tectona grandis* Linn f.) plantations and make an estimation of site index curves in the northern area of the Republic of Guatemala. To characterize the evolution in terms of growth and development 248 data from permanent monitoring plots have been analyzed in total. The site index curves based on a modified growth model allowed to identify and reaffirm a classification of land based on its productive capacity on site and make evident how it has been the evolution of the growth and development of teak in Guatemala. The eight paper by López García and Manzano analyzes climate vulnerability and socio-environmental situation and present the perceptions in a semiarid region of northeastern Mexico. Interactions of climate and natural resources with environmental and social deterioration are analyzed in this study. The history of social development of the region was constructed through face-to-face interviews. The perceptions of farmers towards the vulnerability to climate change, the use of water and the possibility to adapt were also analyzed. The mayor problems arising from the analysis are perceptions of impacts of drought and depleting of aquifer resources. The importance of direct sources of information and interaction with local stakeholders in gathering perceptions, undertaking diagnostics, and building rural development agendas is discussed.

The ninth article is a technological study by Sandoval Torres *et al.*, who make a study of colour alterations in Oakwood during vacuum drying. An analysis of the mechanisms of discoloration in Oakwood during plain vacuum drying allowed us to identify three mechanisms of discoloration. These mechanisms are the degradation of hemicelluloses, the oxidation of tannins and release of volatile organic components. They found interesting relationships between the temperature, the antioxidant potential and C=O intensities in the infrared spectra. The increase in saturation and brightness (lightness) can be related to the thermal degradation of extractibles (mainly ellagitannins). Finally, the tenth manuscript by Rosales-Castro *et al.*, deals with the chemical composition of leaves and branches of *Cedrela odorata* L. from two forest plantations as a source of lignocellulosic raw materials in El Palmar, Veracruz and San Felipe Bacalar, Quintana Roo, as well as the total phenol and flavonoids concentration, and their capacity to capture free radicals, focused in the evaluation of its potential as lignocellulosic source for biofuels and/or towards its application in biomedical areas. Differences were found in the lignocellulosic concentrations among the samples collected at the two plantations, excelling those collected at Bacalar, QR. The obtained results indicate that the leaves, wood from branches and sawdust are viable for obtaining carbohydrates, while wood can be a source of phenols and flavonoids with possible therapeutic applications. These papers represent a wealth of new information from various forest species from México and other countries and they certainly will contribute in a great way to increase the knowledge that currently exists about them. They will be an excellent frame to inaugurate a new era in the editorial processes of *Madera y Bosques*.

Raymundo Dávalos Sotelo

Editor

ARTÍCULOS CIENTÍFICOS





Condición de copa, **indicador de salud** en árboles urbanos del Bosque San Juan de Aragón, Ciudad de México

Crown condition, a health indicator in urban trees of the San Juan de Aragon Park, Mexico City

Luz de Lourdes Saavedra-Romero^{1*}, Dionicio Alvarado-Rosales¹, Patricia Hernández-de la Rosa², Tomás Martínez-Trinidad², Gustavo Mora-Aguilera¹ y Jaime Villa-Castillo³

¹ Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Postgrado en Fitosanidad-Fitopatología. Montecillo, Texcoco, Estado de México. dionicio@colpos.mx; morag@colpos.mx

² Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Postgrado en Ciencias Forestales. pathr@colpos.mx; tomtz@colpos.mx

³ Comisión Nacional Forestal. Sede Guadalajara. Zapopan, Jal. México. jvilla@conafor.gob.mx

* Autor de correspondencia. saavedra.luz@colpos.mx

RESUMEN:

Las áreas verdes urbanas aportan diversos servicios a la sociedad y al ambiente. El Bosque San Juan de Aragón, es una de las pocas áreas verdes al noreste de la Ciudad de México y la condición actual de su arbolado en materia de salud no se conoce con precisión. En el presente estudio se implementó y adaptó el protocolo del indicador condición de copa en 28 parcelas circulares de 0.1 ha, establecidas aleatoriamente en el bosque mencionado. A todos los árboles dentro de cada parcela, se les midió el diámetro normal (DN) y altura total (At), se determinó su clasificación taxonómica, condición de copa y densidad de plantación. Para condición de copa, seis variables fueron medidas: proporción de copa viva (Pcv), densidad de copa (Dnc), transparencia de copa (Trc), muerte regresiva (Mrg), posición de copa (Pco) y exposición a la luz (Exl). Las primeras cuatro se midieron en clases de 5% y las dos restantes a través de una escala ordinal. Se evaluaron 760 árboles, agrupados en 10 familias, 11 géneros y 12 especies. Los valores promedio para las variables de copa fueron, 56.37% Pcv, 44.38% Dnc, 4.04% Mrg y 38.4% Trc. Solo la Pcv alcanzó los estándares establecidos de salud arbórea encontrados en otros estudios, mientras que las Dnc fueron bajas y los valores de TrC y Mrg altos.

PALABRAS CLAVE: arbolado urbano, muerte regresiva, proporción de copa, transparencia.

ABSTRACT:

Green urban areas provide several benefits to society and to the environment. San Juan de Aragon Park, located in the northeast of Mexico City, is one of the few green areas in that urban zone but the health of its trees is not known. In this survey, the crown condition indicator protocol was adapted and applied in 28 circular plots (0.1 ha) established randomly in this park. Normal diameter, total height, species identity, crown condition and tree density were evaluated for all of the trees within these plots. Six crown variables were measured: live crown ratio (Lcr), crown density (Cdn), crown transparency (Ctr), crown dieback (Cdie), crown position (Cpo) and light exposure (Lex). The first four variables were measured in 5% classes, and the latter two by using an ordinal scale. A total of 760 trees, grouped into 10 families, 11 genera and 12 species, were evaluated. The average values for the crown variables were 56.37% for Lcr, 44.38% for Cdn, 4.04% for Cdie and 38.4% for Ctr. Only Lcr reached the standards established in other studies, while Cdn was lower and Ctr and Cdie were both higher.

KEY WORDS: green urban areas, crown dieback, live crown ratio, crown transparency.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, más de la mitad de la población mundial vive en ciudades y esta tendencia irá en aumento en los próximos años (Lorenz, 2005). Para el 2025, la velocidad de urbanización alcanzará los seis billones de personas

(Awal, Ohta, Matsumoto, Toba, Daikoku, Hattori, Hiyama y Park, 2010), lo que ha contribuido a incrementar la necesidad y valor del bosque urbano (Peckham, Duinker y Ordóñez, 2013; Nowak y Walton, 2005), pues en muchos casos la frecuencia de áreas verdes dentro del

ecosistema urbano disminuye con nuestro estilo de vida (Torrens, 2008). En México, por ejemplo, las áreas verdes han desaparecido a una tasa anual de 3.7% de acuerdo con Benítez, Chacalo y Barois (1987) y Ezcurra (1996).

En el entorno de una ciudad, el arbolado constituye un recurso invaluable para la sociedad; la belleza escénica y los servicios ambientales que los árboles confieren a los espacios públicos y privados son diversos y, para Johnston (2010), estos beneficios son mayores a los que aporta cualquier otra especie vegetal. Desde el punto de vista ambiental, los árboles impactan en diversos procesos. Altos índices de área foliar tienen mayor influencia en la modificación de ambientes locales (Nowak, 1994), reduciendo el efecto “isla de calor” y regulando la temperatura (Chow y Roth, 2006); además, mejoran la calidad del aire al interceptar contaminantes gaseosos y particulados en sus hojas (Escobedo y Chacalo, 2008; Finlayson y Pitts, 1986). En lo social, el componente arbóreo incrementa el valor patrimonial, disminuye la fatiga mental, la agresión humana y contribuye a mejorar la salud física y psicológica de la población (Escobedo *et al.*, 2008; Nowak, Crane y Stevens, 2006; Todorova, Asakawa y Aikoh, 2004).

A diferencia de árboles que crecen en áreas naturales, el árbol urbano se desarrolla en un entorno más cambiante (Escobedo y Chacalo, 2008; Chacalo, Grabinsky, Vázquez y Aldama, 2005). En general, el árbol urbano presenta un bajo promedio de vida que en muchos casos no excede 25 años (Galvin, 1999), lo anterior, como resultado de la interacción de diversos factores (Bechtold y Randolph, 2009), entre los que destacan: edad, genética de la especie, compactación del suelo (Scharenbroch, Lloyd y Johnson, 2005; Craul, 1999), superficies impermeables (pavimentos y concreto) (Celestian y Martin, 2005), altas temperaturas (Alvarado-Rosales, Saavedra-Romero, Fenn, Hernández-Tejeda y Cibrán-Tovar, 2007) y contaminación atmosférica (Alvarado-Rosales y Saavedra-Romero, 2007; Konijnendijk, Nilsson, Randrup y Schipperijn, 2005), restringido espacio vital y, por supuesto, falta de buenas prácticas de manejo. El impacto negativo de estos agentes promueve la presencia de árbo-

les enfermos, también reduce su salud y estética (Cibrán-Tovar, Alvarado-Rosales y García-Díaz, 2007), afectando además su arquitectura y estructura, tornando al árbol en elemento de riesgo para los usuarios de las áreas verdes (Angwin, Cluck, Zambino, Oblinger, y Woodruff, 2012).

Aunque la Zona Metropolitana de la Ciudad de México cuenta con numerosas áreas verdes (alamedas, bosques, jardines, parques ecológicos y otras áreas vegetadas), estas no son suficientes debido a la sobrepoblación (Jáuregui-Ostos y Heres-Pulido, 2008), además de que su conservación y manejo no han sido los más apropiados (Escobedo y Chacalo, 2008). Con excepción de algunos casos, la mayoría se encuentran en un estado avanzado de deterioro (Alvarado-Rosales y Saavedra-Romero, 2005); pero no se tienen datos precisos de su condición de vigor y salud actual, por lo que es preciso realizar monitoreos exhaustivos para detectar cambios eventuales o permanentes en el recurso bosque urbano. Esta actividad proveerá información útil para la toma de decisiones en el ámbito político, social y biológico con fines de manejo sustentable (Baker, 1993; McPherson, 1993).

Generalmente, los primeros síntomas de deterioro del árbol se expresan en la apariencia de sus copas (Shomaker *et al.*, 2007); los árboles con altas proporciones de copa viva, diámetros grandes, altas densidades de copa, baja muerte regresiva y transparencia, tienen altas tasas de crecimiento y mayores probabilidades de sobrevivencia (Awal *et al.*, 2010). Las copas densamente foliadas están asociadas con árboles vigorosos, mientras que las pequeñas y de follaje disperso podrían encontrarse en un estado de declinamiento (Shomaker *et al.*, 2007); por lo tanto, a través de su evaluación se podrá determinar su estado de salud actual.

Para evaluar la salud de árboles individuales o del bosque se emplean un conjunto de mediciones, las cuales incluyen: mortalidad arbórea, daños al arbolado, residuos maderables caídos, diversidad arbórea, propiedades físicas y químicas del suelo y condición de copa. El programa de salud forestal en Estados Unidos, es el único inventario nacional que evalúa la condición de copa (Metzger y Oren,



2001). El protocolo asociado a este indicador se ha descrito en diversas guías de campo (USDA, 2009; Shomaker *et al.*, 2007), sin embargo, requiere ser aplicado bajo diferentes condiciones con el fin de ajustarlo.

En 2008, el Bosque de San Juan de Aragón (BSJA) fue declarado área de valor ambiental por el gobierno capitalino y, junto con el Bosque de Chapultepec, conforman 6.5% de las áreas verdes más importantes de la Ciudad de México. A pesar de esta declaratoria, el bosque está sujeto a una fuerte presión por la afluencia anual de más de 3 millones de visitantes, así como a un deficiente manejo, principalmente por la falta de presupuesto gubernamental (ALDF, 2011).

OBJETIVO

Con el propósito de ser referente y de contribuir al desarrollo de nuevas alternativas para evaluar la salud de árboles urbanos, el presente estudio tuvo por objetivo adaptar y aplicar la metodología del indicador condición de copa para determinar el estado actual de salud del arbolado del Bosque San Juan de Aragón, Ciudad de México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se realizó en el Bosque San Juan de Aragón, localizado al noreste de la Ciudad de México ($19^{\circ}27'32''$ N y $99^{\circ}04'17''$ W), en la Delegación Gustavo A. Madero a una altitud promedio de 2240 m. El bosque posee una superficie total de 164 ha de las cuales 114 son áreas verdes. En el área verde total, se seleccionaron al azar 10 secciones identificadas por los caracteres B, C, E, F, G, H, J, K, L y M (Fig. 1); en cada una se aplicó una intensidad de muestreo de 2.5% (Schreuder, Ernst y Ramírez-Maldonado, 2004), quedando establecidas entre 1 y 6 parcelas de muestreo circulares de 0.1 ha (1000 m^2) ($r = 17.84\text{ m}$) por sección (28 parcelas totales). Cada parcela se geoposicionó y todos los árboles dentro de los límites de las mismas se numeraron en dirección de las manecillas del reloj, iniciando por el norte. El marcaje se realizó con etiquetas laminadas de 3.5 cm x 5 cm.



FIGURA 1. Puntos de muestreo en el Bosque de San Juan de Aragón, Ciudad de México (Imagen de Google Earth, 2014).

Protocolo de medición

En campo se midieron variables absolutas (Schomaker *et al.*, 2007) en forma visual por una cuadrilla de dos personas, ubicadas a una distancia proporcional a la altura del árbol de interés (Bechtold y Randolph, 2009; Zarnoch, Bechtold y Solte, 2004). Las seis variables para determinar la condición de copa fueron:

Proporción de copa viva (Pcv), definida como la relación entre el largo de copa y la altura total del árbol (Schomaker *et al.*, 2007; Westfall, Bechtold y Randolph, 2009).

Densidad de copa (Dnc), es un índice de biomasa de copa y representa la cantidad de todos los componentes de la copa incluyendo follaje, ramas y estructuras reproductivas (Randolph, 2006; Bechtold, Randolph y Zarnoch, 2008).

Transparencia de copa (Trc), estima cuán denso es el follaje sobre las ramas. Mide la cantidad de luz que penetra través de la copa viva (Metzger y Oren, 2001). Trc y Dnc fueron evaluados con la tarjeta densidad-transparencia propuesta por Shomaker *et al.*, (2007).

Muerte regresiva (Mrg), es una medida de la extensión de ramillas defoliadas en la periferia de la copa superior y progresa hacia abajo (Bechtold y Randolph, 2009). Esta variable indica pérdida de vigor o de crecimiento potencial (Metzger y Oren, 2001).

Posición de copa (Pco), entendida como la posición vertical de cada individuo dentro de cada parcela (Zarnoch *et al.*, 2004), se registró con valores de 1 a 3 para árboles dominantes, codominantes y suprimidos, respectivamente.

Exposición a la luz (Exl), mide la cantidad de luz del sol que recibe el árbol y se calificó con valores de 0 a 5 dependiendo del número de caras del árbol que la recibían (Bechtold, 2003; Zarnoch *et al.*, 2004).

Las primeras cuatro variables se evaluaron en incrementos de 5% y se registraron en códigos de dos dígitos (00, 05, 10...99). Cada código representa el límite superior de la clase, por ejemplo 1% a 5% fue registrado como código 05 (Randolph, Rose, Oswald y Brown, 2013). El levantamiento de la información se realizó durante la estación de crecimiento junio-agosto del 2013.

Análisis de datos

Se creó una base de datos en Excel y se analizó estadísticamente con el programa SAS® (Statistical Analysis System) Versión 9.4. Para determinar la distribución de los datos se realizaron pruebas de normalidad Shapiro-Wilk cuando $n \leq 2000$ con $\alpha = 0.05$. La normalidad se comprobó para los valores brutos en porcentaje, así como para su conversión a través de la función arcoseno; finalmente se tomó la decisión de trabajar los datos en porcentaje empleando un análisis paramétrico. Además, se realizó una comparación de medias con la prueba DSH (diferencia significativa honesta de Tukey) y un $\alpha = 0.05$.

RESULTADOS

Se evaluaron 760 árboles y se determinó una mortalidad de 0.78%. La población evaluada representó a 10 familias, 11 géneros y 12 especies. *Casuarinaceae*, *Proteaceae* y *Cupressaceae* fueron las familias con mayor frecuencia con 23.60%, 17.50% y 17.24%, respectivamente. El diámetro normal (DN) y la altura (At) se distribuyeron en tres categorías. Los DN dominantes incluyeron árboles de 1 cm a 22.7 cm, lo que representó 74% del total (Fig. 2A); para At, las categorías de 4 m a 14.8 m fueron comunes (90.05%) (Fig. 2B). La densidad de árboles por parcela

osciló entre 12 y 57 individuos, resultando en una densidad de plantación de 120 a 570 árboles por hectárea. El DN y At mostraron diferencias significativas ($p < 0.0001$ y $\alpha = 0.05$) entre especies, con los valores más bajos para *C. sempervirens* y los mayores para *E. camaldulensis* (Tabla 1).

TABLA 1. Valores promedio de variables dasométricas para 753 árboles evaluados por especie, en el Bosque de San Juan de Aragón, Cd. de México.

Especie	N*	DN (cm)	At (m)
<i>Eucalyptus camaldulensis</i> Dnhh.	91	31.15 ^a	15.66 ^a
<i>Tamarix gallica</i> L. (H)	23	28.58 ^a	11.38 ^{abc}
<i>Schinus molle</i> Linn.	73	26.62 ^{ab}	8.78 ^{babc}
<i>Casuarina equisetifolia</i> Forst.	178	26.11 ^{ab}	13.28 ^{ab}
<i>Ligustrum lucidum</i> Ait.	6	12.76 ^{ab}	7.27 ^{bc}
<i>Acacia retinodes</i> Schlecht.	57	12.63 ^{ab}	5.98 ^{bc}
<i>Cupressus lusitanica</i> Klotsch.	103	10.90 ^{ab}	6.62 ^{bc}
<i>Fraxinus uhdei</i> (Wenz.) Lingelsh.	61	10.38 ^{ab}	5.87 ^{bc}
<i>Grevillea robusta</i> Cunn.	130	9.21 ^{ab}	7.49 ^{bc}
<i>Cupressus sempervirens</i> L.	29	6.43 ^b	4.15 ^c

*N: número de árboles; DN: diámetro normal; At: altura total. ^{abc} Letras iguales no son significativamente distintas ($p < 0.001$)

Análisis general

El análisis de las variables de copa se realizó para todos los árboles vivos (753 árboles) y por separado para las distintas especies de angiospermas y gimnospermas. En el primer caso, se presentan histogramas de frecuencia y frecuencia acumulada, los cuales muestran que la Pcv osciló entre 5% y 95% (Fig. 3A), la Dnc de 5% a 90% (Fig. 3B), mientras que la Trc y la Mrg (Fig. 3CD) presentaron un rango similar de 0% a 90%. En lo que respecta a la posición de copa, 47.34% de los árboles exhibieron una posición suprimida y 36.07% codominante; en menor número se encontraron árboles dominantes (16.58%) (Fig. 3E). Árboles con menor exposición a la luz (0 y 1) representaron 44.03%, lo que coincide con la posición suprimida

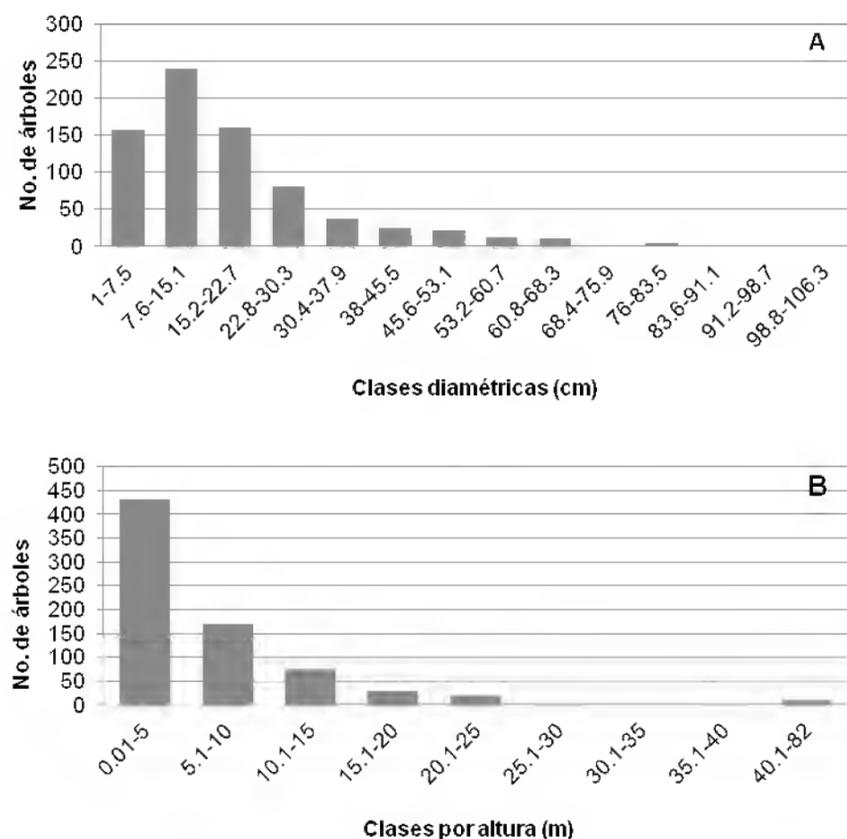


FIGURA 2. Distribución de categorías diamétricas (A) y altura (B) en los 753 árboles evaluados en el Bosque de San Juan de Aragón, Cd. de México.

que ocupaban. Mientras que los árboles con exposición 4 y 5 son un reflejo de árboles dominantes con 24.66% (Fig. 3F).

A pesar de que las Pcv, Dnc y Trc se distribuyen en un intervalo amplio (Tabla 2), la mayoría de las observaciones se distribuyeron en una pequeña porción (Figs. 3ABC). Este comportamiento se confirmó a través de los rangos intercuartiles (25 y 75), utilizados como una medida de la dispersión y cuya amplitud para las tres variables fue de

20%. La amplitud en el caso de la Mrg fue menor (5%). Finalmente, los histogramas de frecuencia indicaron que fue bajo el número de árboles con altas proporciones de copa viva y densidad, así como altas transparencias de copa (Randolph, 2006).

Por especie

Los valores promedio entre coníferas fueron significativamente diferentes. La mayor Pcv y Dnc fue para *Cupressus sempervirens*, mientras que la Trc fue más alta en *C. lusitánica*. La muerte regresiva no mostró diferencias entre las dos especies de cedro (Tabla 3).

En angiospermas, la Pcv más alta fue para *Grevillea robusta* con 60.19% y menor para *Fraxinus uhdei* y *Ligustrum lucidum* con 48.61% y 32.50%, respectivamente (Fig. 4A). La Dnc fue significativamente más alta en *Acacia retinodes* con 47.19% y menor en *Tamarix gallica* con 35% (Fig. 4B). La Trc más baja fue para *Acacia* y *Ligustrum*, las cuales fueron significativamente diferentes al resto de las especies (Fig. 4C). El promedio más alto de muerte regresiva fue para *L. lucidum* con 17.50% y la más baja para *Acacia*, *Fraxinus* y *Grevillea*. En general, la condición de copa respecto a densidad, transparencia y muerte regresiva tiende a ser mejor en coníferas (Tabla 3) que en angiospermas (Fig. 4).

Por sección

Para resaltar diferencias espaciales, se realizó una comparación entre secciones (Tabla 4). Con excepción de Dnc,

TABLA 2. Estadísticos descriptivos de las variables absolutas de copa para los 753 árboles evaluados en el Bosque de San Juan de Aragón, Cd. de México.

Variable*	N	Media	Asimetría	Curtosis	Min	Percentiles					Max
						10	25	50	75	90	
Pcv	754	56.37	-0.27	0.04	5	35	45	60	65	75	95.00
Dnc	754	44.38	0.40	0.73	5	30	35	45	55	65	90.00
Trc	754	33.84	0.32	-0.02	0	15	25	35	45	55	90.00
Mrg	754	4.04	4.12	21.76	0	0	0	0	5	15	90.00

*Pcv: proporción de copa viva; Dnc: densidad de copa; Trc: transparencia de copa; Mreg: muerte regresiva; N: número de árboles.

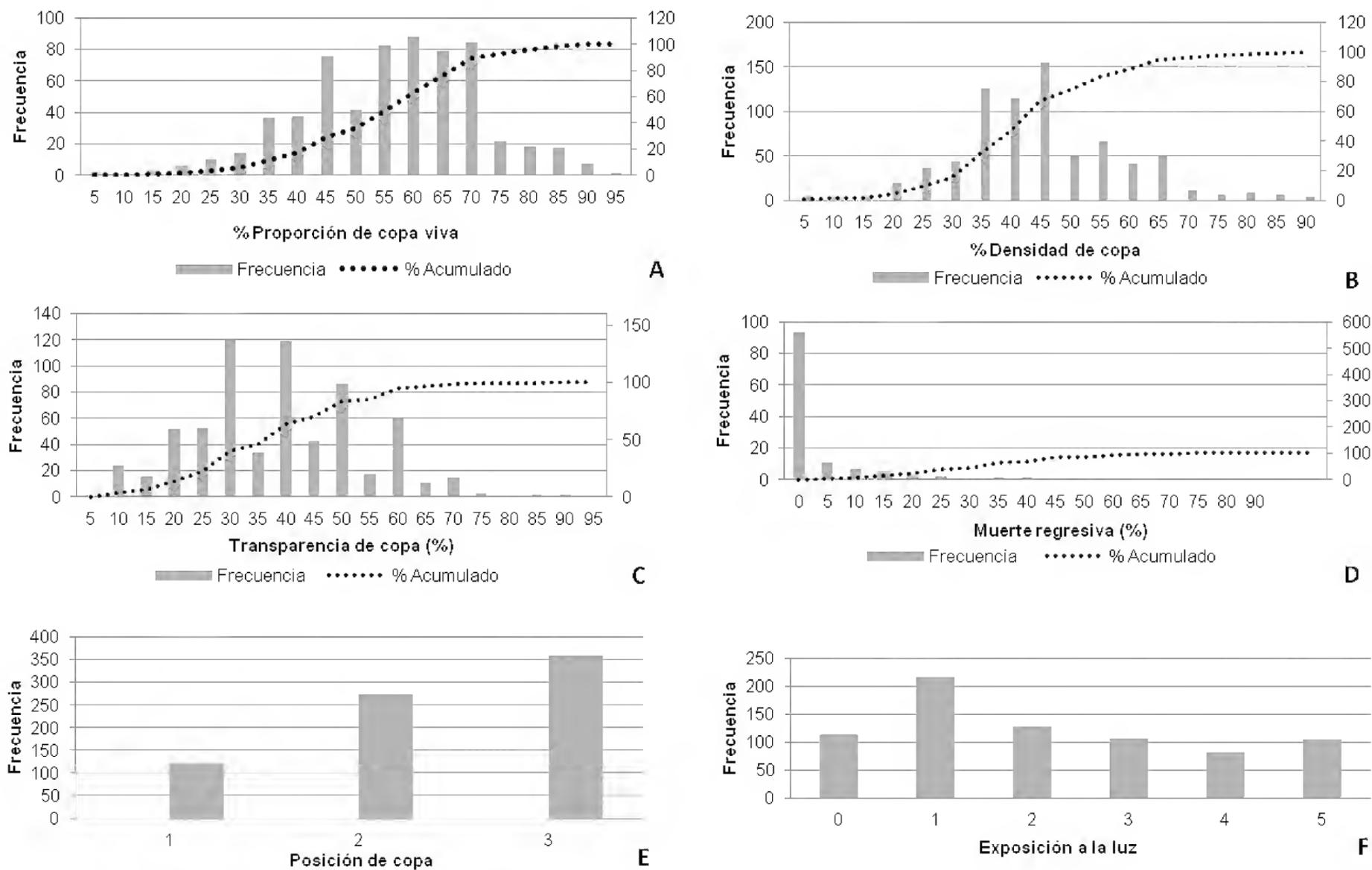


FIGURA 3. Histogramas de frecuencia y frecuencia acumulada para las variables absolutas de copa en los árboles evaluados en el Bosque San Juan de Aragón, Cd. de México.

A. Proporción de copa viva. B. Densidad de copa. C. Transparencia de copa. D. Muerte regresiva. E. Posición de copa y F. Exposición a la luz.

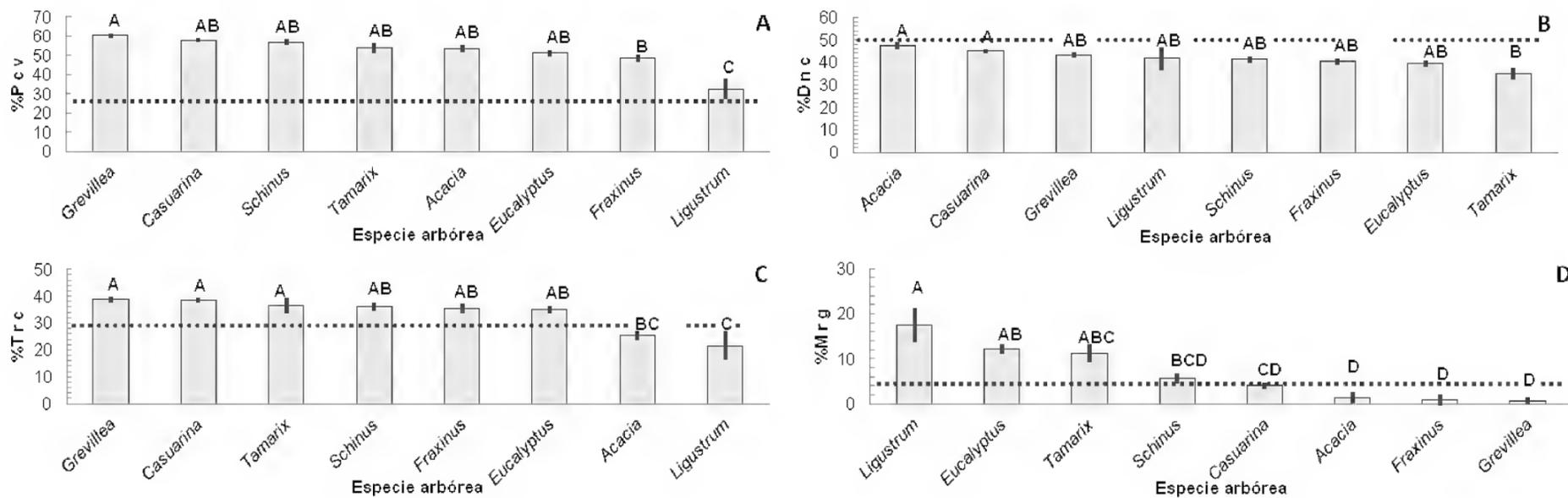


FIGURA 4. Comparación de variables de copa por especie y error estándar asociado en angiospermas.

A. Proporción de copa viva. B. Densidad de copa. C. Transparencia de copa y D. Muerte regresiva (Letras distintas representan diferencias significativas con $p < 0.0001$) (Línea horizontal punteada indica promedios estándar obtenidos en otros estudios).



TABLA 3. Comparación de variables de copa para las dos especies de coníferas presentes en el Bosque San Juan de Aragón, Cd. de México.

Especie	Pcv*	Dnc*	Trc	Mrg
<i>Cupressus sempervirens</i>	68.62a	66.55a	12.24a	1.21a
<i>Cupressus lusitanica</i>	58.01b	48.45b	26.65b	2.04a

*Letras similares no son significativamente diferentes. Pcv ($p=0.0026$); Dnc y Trc ($p<0.0001$). *Pcv: proporción de copa viva; Dnc: densidad de copa; Trc: transparencia de copa; Mrg: muerte regresiva.

las variables restantes fueron significativamente diferentes ($p>0.0001$). La mayor Pcv se presentó en las secciones E-C y la menor en B. Para Dnc, las 10 secciones tuvieron un promedio menor a 50%. En seis secciones, la Trc fue mayor a 30%, con un intervalo de 32.42% a 41.84% y en el caso de Mrg las secciones J y C presentaron porcentajes mayores a 5%.

La Poc influye el valor promedio de Trc y Mrg (Fig. 5). Diferencias significativas ($p < 0.001$) indican un incremento en la Trc, siendo mayor en árboles dominantes y codominantes con valores que oscilaron entre 34.30% a

TABLA 4. Comparación de variables de copa por sección en el Bosque San Juan de Aragón, Cd. de México.

Sección	Pcv (%)	Dnc (%)	Trc (%)	Mrg (%)
C	65.07a	43.63a	34.79abc	7.05ab
E	62.48ab	47.78a	27.73cd	3.35ab
G	59.7abc	47.5a	24.57d	4.09ab
H	56.78abcd	46.36a	32.46bcd	3.39ab
K	55.05abcd	46.32a	41.84a	0.68b
L	53.94bcd	39.23a	27.79cd	3.94ab
F	53.7bcd	42.39a	33.91abc	3.59ab
M	53.08bcd	39.23a	27.31cd	4.62ab
J	52.09cd	41.27a	39.55ab	8.66a
B	50.13d	41.89a	39.20ab	4.12ab

Medias con letras iguales no son significativamente diferentes ($p>0.0001$).

35.37%, en tanto que para los suprimidos, fue más bajo, 31.90%. Por su parte, los árboles dominantes presentaron mayor muerte descendente con 10.53% y, para codominantes y suprimidos, de 2.14% a 3.65%.

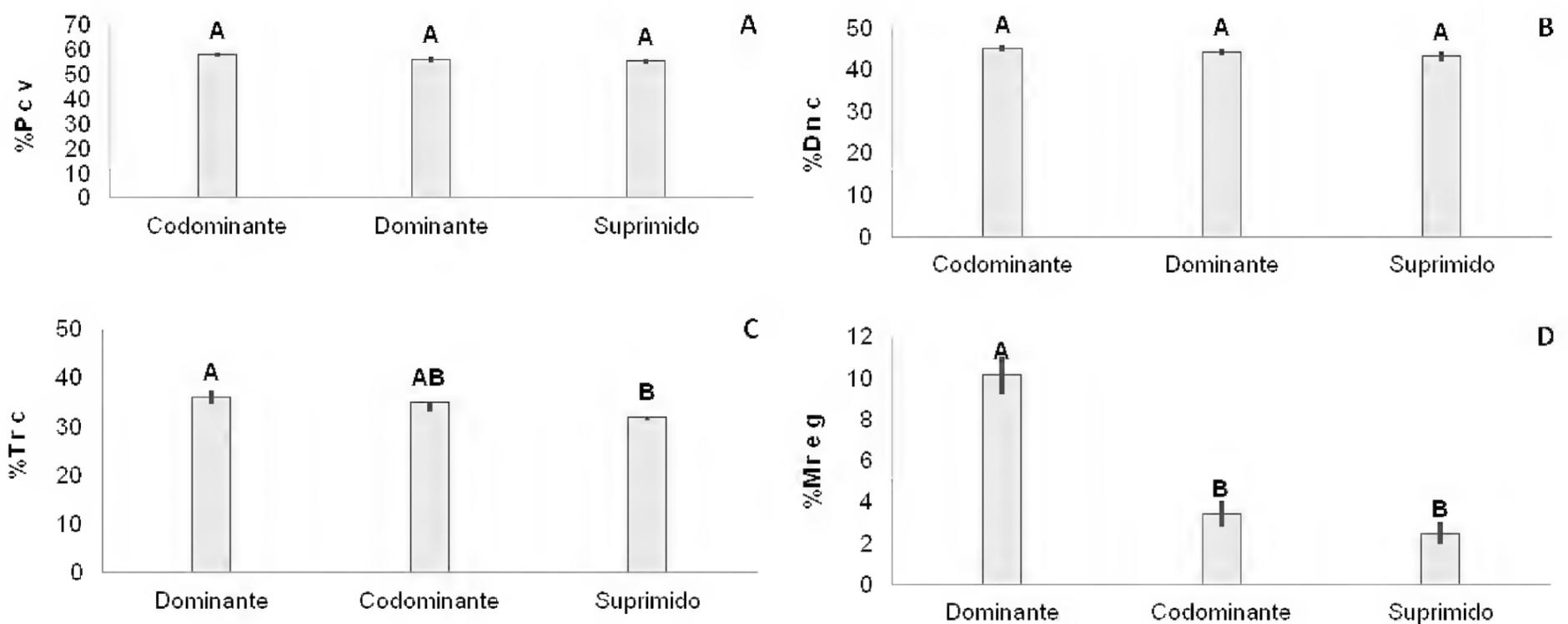


FIGURA 5. Valores promedio de variables de copa y error estándar con base en la posición de copa de los árboles evaluados en el Bosque San Juan de Aragón, Cd. de México.

A. Proporción de copa. B. Densidad de copa. C. Transparencia de copa y D. Muerte regresiva (Barras con letras distintas indican diferencias significativas, $p < 0.001$; $\alpha = 0.05$).

La exposición a la luz (Exl) tuvo influencia únicamente sobre las medidas de abundancia foliar, es decir, la densidad y la transparencia (Fig. 6). En el caso de Dnc, los árboles con menor exposición a la luz (0 y 1 caras), presentaron también las menores densidades de copa, con un intervalo de 39.06% a 41.21%. Las exposiciones 2 a 5 fueron significativamente mayores oscilando entre 45.14% a 48.06%. En lo que se refiere a Trc, los árboles con una Exl de 1, mostraron copas más ralas, 35.64%, que las de Exl = 4, con 29.81%.

DISCUSIÓN

El monitoreo extensivo e intensivo del indicador condición de copa en escenarios forestales y urbanos de Estados Unidos de América ha permitido generar estándares de salud arbórea a nivel de especie y de sitio. En términos generales, se considera como saludables a los árboles poseedores de las siguientes características: (a) Proporción de copa viva > 30%; (b) Densidad de copa > 50%; (c) Transparencia < 30% y (d) Muerte regresiva < 5% (Randolph, 2013, 2004; Bechtold *et al.*, 2008; Metzger y Oren, 2001).

Con base en los estándares citados, la comunidad arbórea, sus grupos (coníferas y angiospermas) y especies evaluadas en el BSJA, presentaron Pcv_s superiores a 30%

(Tabla 3; Fig. 4A: línea de corte eje “Y”). Por sí sola, la proporción de copa viva no fue apta para expresar ni abundancia de follaje ni su arreglo espacial dentro de la copa, por lo que, para obtener un panorama completo sobre el estado de salud de los árboles, se analizaron de forma general y por especie, la Dnc, Trc y Mreg.

La especie *Cupressus sempervirens* fue la única en superar el estándar de Dnc establecido, es decir, > 50% (Tabla 3), el resto de las especies, una conífera y ocho latifoliadas presentaron densidades de copa menores (Fig. 4B, línea de corte eje “Y”). A pesar de que la Dnc puede variar entre especies, edades, genotipos y periodo de evaluación (Zaragoza-Hernández, Cetina-Alcalá, López-López, Chacalo-Hilú, de la Isla y González-Rosas, 2014; Cumming, Galvin, Rabaglia, Cumming y Twardus, 2001), se ha comprobado que árboles con copas densas crecen con mayor celeridad en diámetro que los árboles que poseen copas dispersas, por ello, dicha variable junto con la transparencia son componentes clave que se han empleado en diferentes sistemas de evaluación de salud arbórea (Dobbertin, 2005; Belanger y Anderson, 1992). Los estudios de Steinman (2000), indican que tanto coníferas como angiospermas con densidades menores a 30% tienen mayores posibilidades de morir en el lapso de un año. La identificación oportuna de individuos con tales caracterís-

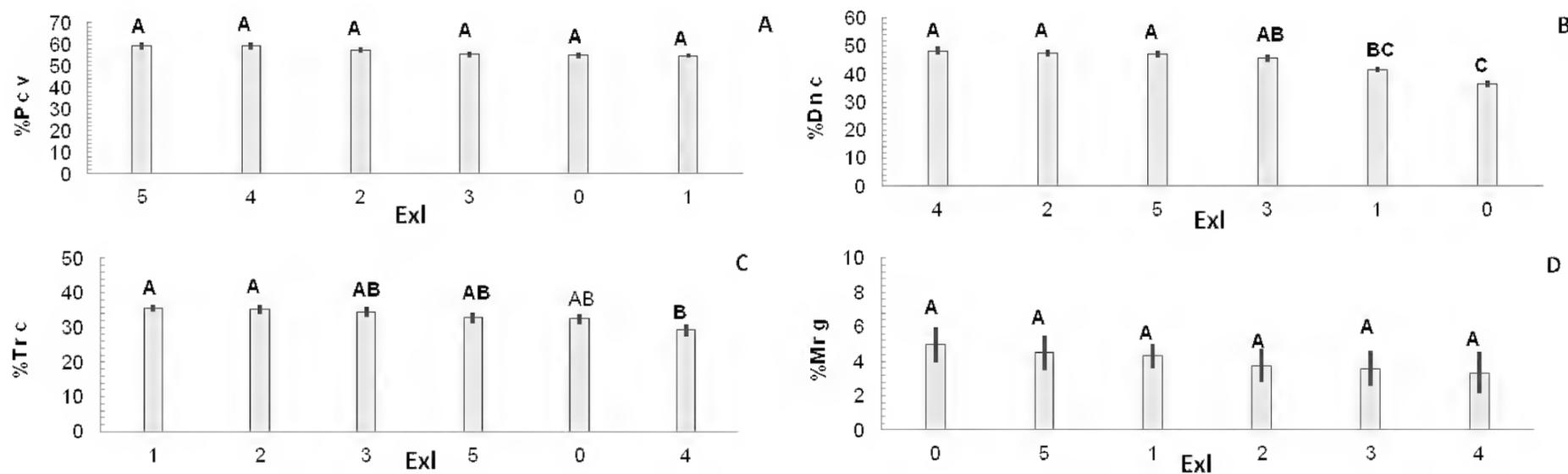


Figura 6: Valores promedio de variables de copa y error estándar con base en la exposición de la copa a la luz para los árboles evaluados en el Bosque San Juan de Aragón, Cd. de México.

A. Proporción de copa. B. Densidad de copa. C. Transparencia de copa y D. Muerte regresiva (Barras con letras distintas indican diferencias significativas, $p > 0.0001$; $\alpha = 0.05$).



ticas dentro del bosque urbano, permitiría implementar actividades de manejo dirigidas a mejorar las condiciones de crecimiento de los árboles afectados, o en su defecto, establecer programas de saneamiento destinados a reducir el riesgo sobre los usuarios del recurso bosque.

Con excepción de *Acacia* y *Ligustrum*, las especies restantes tienen valores altos de transparencia de copa, que superan 30% establecido inicialmente (Fig. 4C), lo que indica que estos árboles están creciendo en condiciones de moderado a severo estrés (Metzger y Oren, 2001; Millers, Durham, Anderson, Burkman, Radnor y Hoffard, 1992). De acuerdo con Winn, Araman y Sang-Monk, (2011), un incremento en Trc de un año a otro puede ser indicativo de un árbol fuertemente estresado, lo que va en detrimento de su crecimiento potencial, sobrevivencia e incluso de su potencial reproductivo. Diferentes causas pueden incrementar la transparencia de copa, pero los más comunes incluyen insectos defoliadores, enfermedades, contaminación atmosférica, compactación de suelo, disminución de tamaño foliar y pérdida de ramas (Shoemaker *et al.*, 2007).

Los árboles con mayor muerte regresiva mostraron copas pobres, follaje disperso y abundancia de ramillas muertas en copa superior. *Tamarix*, *Eucalyptus* y *Ligustrum* fueron las especies con Mrg superiores a 5%, calificándose como no saludables (Metzger y Oren, 2001) (Fig. 4D). La presencia de factores externos entre ellos extensos periodos de sequía, suelos inundados y patógenos de raíz son posiblemente responsables de muerte prematura de ramas (Brooks, Miller y Burkman, 1991; Nadolny, 1995) y en el BSJA, al menos los dos primeros factores fueron frecuentes.

El estudio de Zaragoza-Hernández *et al.*, (2014) en tres alamedas de la Ciudad de México, concluyen que las especies más destacadas por su salud de copa fueron *Cupressus sempervirens*, *Ligustrum lucidum*, *Populus alba* y *Fraxinus uhdei*. La Dnc de *C. sempervirens* fue de 62.19%, ligeramente más baja a la estimada para el BSJA. Por su parte, la Mrg de 3.75% y Trc de 29.33% fueron considerablemente mayores. Si bien, los valores promedio de estas especies son distintos a los del presente estudio, es

posible que las condiciones climáticas (distintas unidades ambientales respecto a precipitación, temperatura, niveles de contaminación, etc.) y de sitio (relieve, tipo de suelo) (Gobierno del Distrito Federal, 2001), estén influyendo en los resultados obtenidos.

Se sabe que la estructura de un árbol, está determinada por el tamaño, forma y la fisiología de su copa (Ford, 1985). Las copas colectan, producen y compiten por recursos, especialmente con árboles vecinos, pero quizás la competencia por espacio de crecimiento y radiación son las más importantes, ya que determinan el adecuado crecimiento y buen desarrollo de un árbol. Para Rouvinen y Kuuluvainen (1997), el incremento en biomasa está determinado por la cantidad y calidad de luz interceptada por las copas de los árboles. En el presente estudio, se observó que los árboles con mayor número de caras expuestas a la luz (2 a 5), presentaron también mayores densidades de copa (Fig. 6B), a diferencia de los menos expuestos (0 caras) y que se ubicaron en la categoría de árbol suprimido.

Por su parte, los árboles dominantes y codominantes presentaron mayores valores de transparencia y muerte regresiva (Fig. 5). Se presume que, al ser árboles de una madurez mayor, su tiempo de exposición a distintos factores de estrés ha menguado considerablemente su salud, comparado con los árboles suprimidos. En adición, cuando una copa crece, una proporción creciente de su volumen está ocupado por un núcleo que soporta ramas sin follaje. Esta estructura contribuye muy poco con fotosintatos, sin embargo sí los utiliza para la producción de madera y para la respiración (Ford, 1985). La elevada demanda de fotosintatos para soportar las copas de árboles dominantes y suprimidos podría explicar también su mayor transparencia y muerte regresiva debido a una demanda no satisfecha.

La copa es el principal componente de la productividad primaria. Sus dimensiones, formas y distribución de su biomasa (ramas y follaje) pueden reflejar el estado general de salud del árbol (Cumming, Nowak, Twardus, Hoehn, Mielke y Rideout, 2007; Zarnoch *et al.*, 2004). Copas simétricas y densamente foliadas están asociadas a

un alto potencial fotosintético (Randolph, 2004, 2013; Awal *et al.*, 2010), mientras que las copas pequeñas y dispersas apuntan a condiciones desfavorables de crecimiento (pobres condiciones de sitio, enfermedades, competencia, estrés hídrico, compactación de suelo, estrés crónico, etc.) (Zarnoch *et al.*, 2004) y son típicas de árboles en declinación (Nadolny, 1995). La apariencia y condición respecto a la cantidad y distribución del follaje proporcionan una idea clara de la historia de vida de cada individuo y del ambiente donde se está desarrollando.

CONCLUSIONES

El indicador condición de copa y sus variables absolutas aportaron información confiable sobre el estado de salud actual del arbolado del Bosque San Juan de Aragón, Ciudad de México, específicamente, para la estación de crecimiento julio-agosto 2013. La densidad de las copas y sus transparencias permitieron obtener un panorama general sobre los porcentajes de biomasa presente en las copas de los árboles evaluados; mientras que a través de la muerte regresiva se identificaron árboles con declinamiento prematuro. En general, el estado de salud de los árboles de este bosque urbano se calificó de buena a pobre debido a las altas proporciones de copa viva, bajas densidades de copa y altas transparencias de copa. Se requiere de investigación adicional para identificar los diferentes agentes de estrés que afectan a las especies con una pobre condición de copa.

El indicador condición de copa, ha sido ampliamente usado con el propósito de identificar cambios y tendencias en el recurso bosque urbano. En México, es posible implementar y extender el uso de esta metodología para determinar la salud actual de sus áreas verdes arboladas.

REFERENCIAS

- ALDF (2011). *Rescatar bosque de Aragón debe ser prioridad*. ALDF-Asamblea legislativa del Distrito Federal. Recuperado de <http://aldf.gob.mx/comsoc-rescatar-bosque-aragon-debe-ser-prioridad-8503.html>.
- Alvarado-Rosales, D., Saavedra-Romero, L. de L., Fenn, M., Hernández-Tejeda, T. y Cibrián-Tovar, D. (2007). Agentes abióticos, causantes de estrés y muerte/Abiotic factors that causes stress and death. En T. D. Cibrián, R. D. Alvarado y S.E. García D. (Eds.), *Enfermedades forestales en México/Forest diseases in Mexico* (pp. 11-41). Chapingo, México: Universidad Autónoma Chapingo.
- Alvarado-Rosales, D. y Saavedra-Romero, L. de L. (2007). Declinación del oyamel/Fir decline. En T.D. Cibrián, R.D. Alvarado y S.E. García D. (Eds.), *Enfermedades forestales en México/Forest diseases in Mexico*. Universidad Autónoma Chapingo; CONAFOR-SEMARNAT, México; Forest Service USDA, EUA; NRCAN Forest Service, Canadá y Comisión Forestal de América del Norte, COFAN, FAO. Chapingo, México. p. 444-447.
- Alvarado-Rosales, D. y Saavedra-Romero, L. L. (2005). El género *Cladocolea* (Loranthaceae) en México: muérdago verdadero o injerto. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 11 (1), 5-9.
- Angwin, P. A., Cluck, D. R., Zambino, P. J., Oblinger, B. W. y Woodruff, W. C. (2012). *Hazard tree guidelines for Forest Service facilities and roads in the Pacific Southwest Region*. (Report RO-12-01). Forest Health Protection. 40 p.
- Awal, M. A., Ohta, T., Matsumoto, K., Toba, T., Daikoku, K., Hattori, S., Hiyama, T. y Park, H. (2010). Comparing the carbon sequestration capacity of temperate deciduous forests between urban and rural landscapes in central Japan. *Urban Forestry and Greening*, 9, 261-270.
- Baker, F. A. (1993). Monitoring the urban forest: case studies and evaluations. *Environmental Monitoring and Assessment*, 26, 153-163.
- Bechtold, W. A. (2003). Crown position and light exposure –an alternative to field-assigned crown class. *Northern Journal of Applied Forestry*, 20 (4), 154-160.
- Bechtold, W. A., Randolph, K. C. y Zarnoch, S. J. (2008). The power of FIA phase 3 Crown-indicator. En W. Williams, M. Gretchen y R. Czuplewski (Comps.), *Forest Inventory and Analysis (FIA) Symposium; October 1-23, 2008* (pp. 1-21). Park City, UT. Proc. RMRS-P-56CD. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
- Bechtold, W. A. y Randolph, K. C. (2009). *The crown-condition indicator*. Forest Health Indicators US/Mexico Workshop. Guadalajara, México. April 26-May 01.



- Belanger, R. P. y Anderson, R. L. (1992). *A guide for visually assessing crown densities of Loblolly and Shortleaf pines*. (Res-Note SE-352). Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture Forest Service. Southern Forest Experimental Station. 4 p.
- Benítez, G., Chacalo, A. y Barois, I. (1987). Evaluación comparativa de la pérdida de la cubierta vegetal y cambios en el uso del suelo en el sur de la Ciudad de México. En E. Rapoport E. e I. López-Moreno (Eds.), *Aportes a la ecología urbana de la Ciudad de México*. México: Limusa.
- Brooks, R. T., Miller, W. M. y Burkman, W. (1991). *Forest Health Monitoring, New England*. (NE-INF-94-91) USDA Forest Service, Northeastern Area. 9 p.
- Celestian, S. B. y Martin, C. A. (2005). Effects of parking lot location on size and physiology of four southwestern U.S. landscape trees. *Journal of Arboriculture*, 31 (4), 191-197.
- Cibrián-Tovar, D., Alvarado-Rosales, D. y García-Díaz, S. (Eds.). (2007). *Enfermedades forestales en México/Forest diseases in Mexico*. Chapingo, México: Universidad Autónoma Chapingo. 587 p.
- Chacalo, A., Grabinsky, J., Vázquez, H. J. y Aldama, A. (2005). Threats to urban green areas –case study: Mexico City. En C. C. Konijnendijk, J. Schipperijn y K. Nilsson (Eds.), *Urban forests and trees. Proceedings No. 2*. (pp. 177-188). Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities.
- Chow, W. T. L. y Roth, M. (2006). Temporal dynamics of the urban heat island of Singapore. *International Journal of Climatology*, 26, 2243-2260.
- Craul, P. J. (1999). *Urban soils. Applications and practices*. EUA: John Wiley & Sons, Inc.
- Cumming, B. A., Galvin, M. F., Rabaglia, R. J., Cumming, J. R. y Twardus, D. B. (2001). Forest health monitoring protocol applied to roadside trees in Maryland. *Journal of Arboriculture*, 27 (3), 126-138.
- Cumming, B. A., Nowak, D. J., Twardus, D. B., Hoehn, R., Mielke, M. y Rideout, R. (2007). *Urban forest of Wisconsin: Pilot Monitoring Project 2002*. (NA-FR-05-07) USDA Forest Service, Northeastern Area. National Forest Health Monitoring Program.
- Dobbertin, M. (2005). Tree growth as indicator of tree vitality and of tree reaction to environmental stress: a review. *European Journal of Forest Research*, 124, 319-333.
- Escobedo, F. y Chacalo, A. (2008). Estimación preliminar de la descontaminación atmosférica por el arbolado urbano de la Ciudad de México. *Interciencia*, 33 (1), 29-33.
- Escobedo, F. J., Wagner, J., Nowak, D. J., de la Maza C. L., Rodríguez, M. y Crane, E. D. (2008). Analyzing the cost-effectiveness of Santiago Chile's policy of using urban forests to improve air quality. *Journal of Environmental Management*, 86, 148-157.
- Ezcurra, E. (1996). *De las chinampas a la megalópolis. El medio ambiente en la Cuenca de México*. México: FCE.
- Finlayson, P. B. J. y Pitts, J. N. (1986). *Atmospheric chemistry: fundamental and experimental techniques*. E. U. A.: John Wiley & Sons.
- Ford, E. D. (1985). Branching, crown structure and the control of timber production. En M. G. R. Cannel y J. E. Jackson (Eds.), *Attributes of trees as crop plants* (228-252). Monks Wood, UK.: Institute of Terrestrial Ecology.
- Galvin, M. F. (1999). A methodology for assessing and managing biodiversity in street tree population: a case study. *Journal of Arboriculture*, 25 (3), 124-128.
- Gobierno del Distrito Federal. (2001). *Manual técnico para el establecimiento y manejo integral de las áreas verdes urbanas del Distrito Federal. Tomo II*. México: Secretaría de Medio Ambiente.
- Jáuregui-Ostos, E. y Heres-Pulido, M. E. (2008). El clima/bioclima de un parque periurbano de la Ciudad de México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 67, 102-112.
- Johnston, M. (2010). Trees in towns II and the contribution of arboriculture. *Journal of Urban Forestry*, 33 (1), 27-41.
- Konijnendijk, C. C., Nilsson, K., Randrup, T. B. y Schipperijn, J. (Eds.). (2005). *Urban forest and trees*. Países Bajos: Springer.
- Lorenz, K. y Kandeler, E. (2005). Biochemical characterization of urban soil profiles from Stuttgart, Germany. *Soil Biology & Biochemistry*, 37, 1373-1385.
- McPherson, E. G. (1993). Monitoring urban forest health. *Environmental Monitoring and Assessment*, 26, 165-174.

- Metzger, J. M. y Oren, R. (2001). The effect of crown dimensions on transparency and the assessment of tree health. *Ecological Application*, 11 (6), 1634-1640.
- Millers, I., Durham, N. H., Anderson, R., Burkman, W., Radnor, P. A. y Hoffard, W. (1992). *Crown condition rating guide*. USDA Forest Service. Northeastern Area and Southern Region.
- Nadolny, C. (1995). Causes of tree decline /dieback in NSW. En A. Kater (Ed.), *Redressing rural tree decline in NSW: proceedings of the 'After Dieback' conference presented by Greening Australia, Orange Civic Centre* (pp. 11-18). Orange, NSW: Greening Australia.
- Nowak, D. J., Crane, D. E., y Stevens, J. C. (2006). Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban Forestry and Urban Greening*, 4, 115-123.
- Nowak, D. J. y Walton, J. T (2005). Projected urban growth (2000-2005) and its estimated impact on the US forest resource. *Journal of Forestry*, 103, 383-389.
- Nowak, D. J. (1994). Urban forest structure: the state of Chicago's urban forest. En E. G. McPherson, D. J. Nowak y R. Rowan (Eds.), *Chicago's urban forest ecosystem: results of the Chicago urban forest climate Project*. (General Technical Report NE-186). Radnor, PA: USDA Forest Service. Northeast Forest Experiment Station. 201 p.
- Peckham, S., Duinker, P. N. y Ordóñez, C. (2013). Urban forest values in Canada: views of citizens in Calgary and Halifax. *Urban Forestry and Urban Greening*, 12, 154-162.
- Randolph, K. C. (2004). An evaluation of change in tree crown characteristics to assess forest health in two Indiana State Parks. *Northern Journal of Applied Forestry*, 21 (1), 50-55.
- Randolph, K. C. (2006). *Descriptive statistics of tree crown condition in the Southern United States and impacts on data analysis and interpretation*. (Gen. Tech. Rep. SRS-94). Asheville, NC: US Department of Agriculture Forest Service, Southern Research Station.
- Randolph, K. C. (2013). Development history and bibliography of the U.S. Forest Service crown-condition indicator for forest health monitoring. *Environmental Monitoring Assessment*, 185, 4977-4993.
- Randolph, K. C., Rose, A. K., Oswalt, C. M. y Brown, M. J. (2013). Status of black walnut (*Juglans nigra* L.) in the eastern United States of the discovery of thousand cankers disease. *Southern Appalachian Botanical Society*, 78 (1), 2-14.
- Rouvinen, S. y Kuuluvainen, T. (1997). Structure and asymmetry of tree crowns in relation to local competition in a natural mature Scots pine forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 27, 890-902.
- Scharenbroch, B. C., Lloyd, J. E. y Johnson, J. L. (2005). Distinguishing urban environments with physical, chemical and biological soil properties. *Pedobiologia*, 49, 283-296.
- Schomaker, M. E., Zarnoch, S. J., Bechtold, W. A., Latelle, D. J., Burkman, W. G. y Cox, S. M. (2007). *Crown-condition classification: A guide to data collection and analysis*. (General Technical Report SRS-102) USDA Forest Service.
- Schreuder, H. T., Ernst, R. y Ramírez-Maldonado, H. (2004). *Statistical techniques for sampling and monitoring natural resources*. (General Technical Report RMRS-GTR-126). USDA Forest Service.
- Steinman, J. (2000). Tracking the health of trees over time on forest health monitoring plots. En M. Hansen y T. Burk (Eds.), Proc. of the IUFRO Conference integrated tools for natural resources inventories in the 21st century (Gen. Tech. Rep. NC-212) (pp. 224-339). USDA For. Serv.
- Todorova, A., Asakawa, S. y Aikoh, T. (2004). Preference for and attitudes towards streets flowers and trees in Sapporo, Japan. *Landscape and Urban Planning*, 69, 403-416.
- Torrens, P. M. (2008). A toolkit for measuring sprawl. *Applied Spatial Analysis*, 1, 5-36.
- USDA (2009). *Forest inventory and analysis national core field guide (Phase 2 and 3), version 4.0*. Recuperado de <http://fia.fs.fed.us/library/field-guides-methods-proc/>.
- Westfall, J. A., Bechtold, A. W. y Randolph, K. C. (2009). Tree crown indicator. En J. A. Westfall (Ed.), *FIA National Assessment of data quality for forest health indicators* (3-15). (Gen. Tech. Rep. NRS-53). Newtown Square, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Research Service.
- Winn, M., Araman, P. A. y Sang-Mook, L. (2011). *Urban Crowns: an assessment and monitoring tool for urban*



trees. (Gen. Tech. Rep. SRS-135). Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station.

Zaragoza-Hernández, A., Cetina-Alcalá, V. M., López-López, M. A., Chacalo-Hilú, A., de la Isla, M. L. y González-Rosas, H. (2014). General health condition in forest species in three parks in Mexico, City: Crown condition. *Research Journal Environmental Sciences*, 8 (1), 1-16.

Zarnoch, S. J., Bechtold, W. A. y Solte, K. W. (2004). Using crown condition variables as indicators of forest health. *Canadian Journal of Forest Research*, 34, 1057-1070.

Manuscrito recibido el 31 de octubre de 2014

Revisado el 25 de enero de 2016

Aceptado el 14 de marzo de 2016

Este documento se debe citar como:

Saavedra-Romero, L. L., Alvarado-Rosales, D., Hernández de la Rosa, P., Martínez-Trinidad, T., Mora-Aguilera, G. y Villa-Castillo, J. (2016). Condición de copa, indicador de salud en árboles urbanos del Bosque San Juan de Aragón, Ciudad de México. *Madera y Bosques*, 22 (2), 15-27.



Comparación de la **diversidad estructural** de una selva alta perennifolia y una mediana subperennifolia en Tabasco, México

Comparison of the structural diversity between a humid and subhumid tropical forest in Tabasco, Mexico

José Luis Martínez-Sánchez¹

¹ División Académica de Ciencias Biológicas. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Tabasco, México.
jose.martinez@ujat.mx

RESUMEN

Debido a que el tamaño de los árboles puede influir significativamente en la estructura de una comunidad y consecuentemente en su diversidad, los índices de diversidad estructural constituyen estimadores más precisos que los índices de diversidad clásicos ya que incorporan el diámetro y altura de los árboles. Mediante el uso de ocho índices estructurales, considerando el área basal de la comunidad por clases de diámetro y altura de los árboles, se comparó la diversidad estructural de una selva alta perennifolia y una mediana subperennifolia en Tabasco, México. Para los árboles con diámetro a la altura del pecho mayor a 10 cm, se determinó especie, diámetro a la altura del pecho y altura total, y los índices se compararon estadísticamente entre las dos comunidades. La selva mediana subperennifolia presentó 27 especies, 211 árboles y 129 palmas por hectárea, diámetro promedio a la altura del pecho de 28.0 cm y 9 individuos > 20 m de altura. La selva alta perennifolia tuvo 66 especies y 591 árboles por hectárea, diámetro promedio a la altura del pecho de 21.2 cm y 36 árboles > 20 m de altura. Los índices de diversidad estructural de la selva alta perennifolia (2.76 – 6.737) fueron significativamente ($p < 0.01$) mayores que los de la mediana subperennifolia (2.345 – 4.978). Los índices (Gini) de la selva alta perennifolia (0.61 y 0.494) indicaron que los árboles son más variables en su tamaño (diámetro y altura) que los de la mediana subperennifolia (0.583 y 0.419). Se concluye que los índices de diversidad estructural reflejan tanto la diversidad de especies como la complejidad estructural de la comunidad, siendo más diversa la selva alta perennifolia que la mediana subperennifolia. Se sugiere su uso para las comunidades arboladas.

PALABRAS CLAVE: área basal, comunidad, Índices de diversidad, Shannon-Weiner, *t*-Hutchenson, vegetación.

ABSTRACT

Due to the fact that tree size can significantly influence community structure, and thus diversity, structural diversity indices which incorporate DBH and total tree height can be more accurate estimators than the classic diversity indices. The structural diversity of a tropical humid forest (THF) and a tropical sub-humid forest (TSF), in Tabasco, Mexico, was compared using eight structural indexes that estimate community basal area sorted by DBH and tree height classes. The species, DBH and total tree height of trees > 10 cm DBH were determined. The structural indices were statistically compared between the two communities. The TSF presented 27 species, 211 trees and 129 palms ha^{-1} , a mean DBH of 28.0 cm and 9 trees > 20 m height. The THF presented 66 species and 591 trees ha^{-1} , a mean DBH of 21.2 cm and 36 trees > 20 m height. The structural indices of the THF (2.76 – 6.737) were significantly higher than those of the TSF (2.345 – 4.978). The Gini indices of the THF (0.61 and 0.494) indicated that trees were more heterogeneous in size (diameter and height) than those of the TSF (0.583 and 0.419). The structural indices therefore evaluate species diversity and community structural diversity in a more complete way, with the THF presenting higher structural diversity than TSF, which suggests the value of their use within tree vegetation studies.

KEYWORDS: basal area, community, Indices, Shannon-Weiner, *t*-Huthchenson, vegetation.

INTRODUCCIÓN

La medición de la diversidad biológica de una comunidad vegetal es fundamental para conocer su funcionamiento, manejo y conservación. La diversidad biológica se entiende como la variedad y abundancia de especies en un área determinada de estudio, la cual se puede medir en cuanto a su riqueza de especies y homogeneidad en su distribución a través de los múltiples índices desarrollados (Magurran, 2004).

La caracterización de los atributos estructurales de las comunidades arbóreas, así como de la mayoría de las comunidades vegetales, se han realizado mediante el uso de los índices de diversidad clásicos tales como Shannon-Wiener (1949), Simpson (1949), Margalef (1958) y Menhinick (1964), entre otros, los cuales están basados en la riqueza de especies, su abundancia y distribución (Magurran, 2004). De esta manera, la selva alta perennifolia (SAP) (*sensu* Miranda y Hernández-X., 1963) se ha caracterizado por ser una comunidad arbórea más diversa que la selva mediana subperennifolia (SMS) como lo refieren múltiples estudios (Cascante y Estrada, 2001; Godínez-Ibarra y López-Mata, 2002; Basáñez, Alanís y Badillo, 2008; Maldonado-Sánchez y Maldonado-Mares, 2010; Sánchez-Pérez, Castillo-Acosta y Cámara-Cabrales, 2011; Martínez-Sánchez y Cámara, 2012; Dzib-Castillo, Chantásig-Vaca y González-Valdivia, 2014). Así también, los mismos estudios muestran que la SAP generalmente presenta mayores densidades y tamaño de árboles que la SMS, sin embargo, los valores de estos atributos varían dentro de ciertos intervalos para ambas comunidades, haciendo la comparación en algunos casos fácil, pero en otros no.

Sin embargo, alrededor del año 2000 surgió el concepto de diversidad estructural de las comunidades arbóreas, el cual considera al tamaño de los árboles como otro atributo estructural de la comunidad. La diversidad estructural de una comunidad arbórea es la combinación de la diversidad de especies y el tamaño en diámetro y altura de los árboles, con la finalidad de ser un mejor indicador de la diversidad de los ecosistemas forestales (Staudhammer y LeMay, 2001; Pommerening, 2002; Bohl y Lanz, 2005; McElhinny, Gibbons, Brack y Bauhus, 2005).

Debido a la variación en el tamaño de los árboles, los índices de diversidad clásicos son limitados en la estimación de una diversidad más completa (Lähde, Laiho, Norokorpi y Saksa, 1999). Dos comunidades arbóreas o plantaciones (una juvenil y una madura, por ejemplo) con el mismo número de especies y abundancia de árboles por especie tendrán diferente diversidad estructural al considerarse la dimensión de los árboles.

La aportación de los índices estructurales es la de incorporar las dimensiones de los árboles a los índices de diversidad clásicos. Diversos autores han propuesto índices estructurales basados principalmente en la diversidad de especies y tamaño de los árboles (von Gadow, 1999; Lahde *et al.*, 1999; Staudhammer y LeMay, 2001; Kant, 2002; Bohl y Lanz, 2005; LeMay y Staudhammer, 2005; Másisi, Nelwamondo y Marwala, 2008; McRoberts *et al.*, 2008; Lei, Wang y Peng, 2009; Wang, Lei, Ma, Kneeshaw y Peng, 2011), mientras otros han propuesto una combinación de índices (Pommerening, 2002; del Rio, Montes, Cañellas y Montero, 2003). El índice de diversidad de Shannon-Wiener (H_s) comúnmente utilizado, se determina considerando el área basal de todos los árboles de las especies de la comunidad en conjunto. En contraste, los índices estructurales consideran el área basal del arbolado por clases diamétricas (H_d) y de altura (H_h) de las especies de la comunidad, y más aún, por clases diamétricas y de altura de cada especie (H_{sd} y H_{sp} respectivamente) donde el valor máximo ocurre cuando el área basal esta uniformemente distribuida en todas las especies o clases de tamaño de árboles (Lei *et al.*, 2009).

La importancia de la estructura de una comunidad arbolada radica en que es un elemento importante de la biodiversidad (MacArthur y MacArthur, 1961; Willson, 1974; Ambuel y Temple, 1983), funcionalidad (Buongiorno, Dahir, Lu y Lin, 1994; Önal, 1997), manejo (Pretzsch, 1997; Lei *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2011), productividad (Long y Shaw, 2010) y ecología de las especies animales (Goreaud y Péliissier, 1999). La vida silvestre y diversidad animal (incluyendo aves e insectos) de un área se encuentra asociada a la presencia de un gran número de especies vegetales y tamaños de árboles (Whittaker, 1972;



Buongiorno *et al.*, 1994; Recher, Majer, Ganesh, 1996; Kimmins, 1997; McCleary y Mowat, 2002). La diversidad de fisonomía de las comunidades arbóreas está relacionada a la complejidad estructural (Oliver y Larson, 1996). Finalmente, en las comunidades arbóreas en particular, la estructura del arbolado mantiene una estrecha relación con los factores abióticos básicos como radiación lumínica, humedad y temperatura (Hubbell *et al.*, 1999) y flujos biogeoquímicos (Wang *et al.*, 2011).

Si bien, los índices clásicos han sido útiles para estimar la diversidad de especies de una comunidad arbórea, integrar la estructura del arbolado puede proporcionar una estimación más completa de la comunidad. Por lo anterior, en el presente trabajo se pretende comparar la estructura de dos selvas (una alta y una mediana, *sensu* Miranda y Hernández-X., 1963) de una forma más completa mediante el uso de índices de diversidad estructural.

OBJETIVOS

El objetivo del presente trabajo fue comparar la diversidad estructural de una selva alta perennifolia y una selva mediana subperennifolia, esperando encontrar una mayor diversidad estructural de la primera que de la segunda, debido a una mayor riqueza de especies, tamaño y abundancia del arbolado.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo se desarrolló en una selva mediana subperennifolia (SMS) y una selva alta perennifolia (SAP) ubicadas en el estado de Tabasco, México (Fig. 1, Tabla 1). Ambos tipos de selva son importantes por su diversidad y productividad tanto para la conservación de especies como para la provisión de servicios ambientales. Los cuadros para el muestreo se ubicaron en áreas de vegetación madura a una distancia mínima entre sí de 300 m en la SMS, y de 100 m en la SAP. Cada cuadro se dividió en 9 (SMS) y 25 (SAP) subcuadros contiguos de 10 m x 10 m donde se midió el diámetro y la altura total de cada árbol mayor de 10 cm de DAP.

Debido a que el número y tamaño de unidades de muestreo, así como el área total de estudio en cada selva

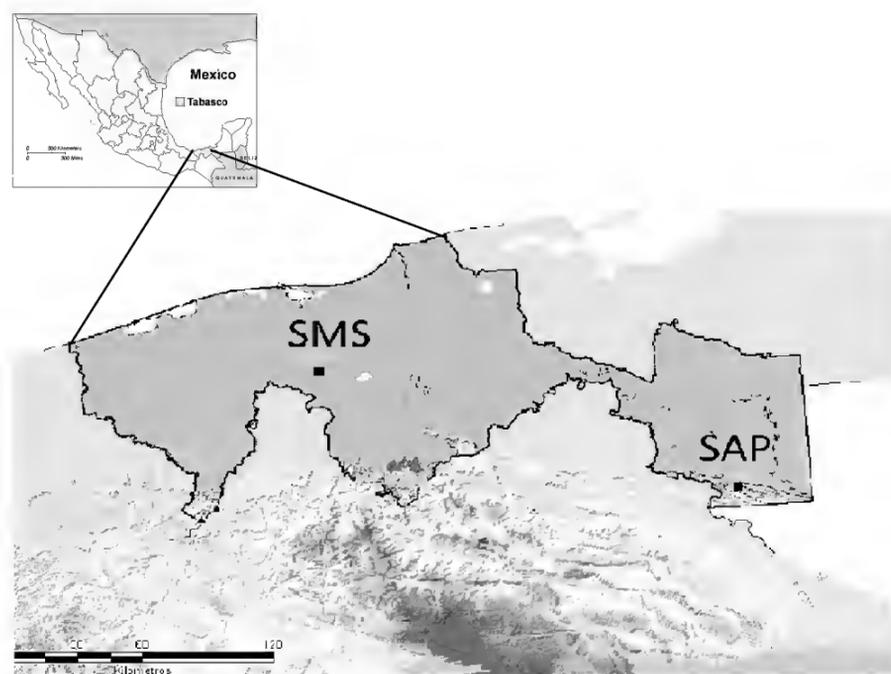


FIGURA 1. Ubicación de las áreas de estudio de la selva mediana subperennifolia (SMS) y la selva alta perennifolia (SAP) en el estado de Tabasco, México.

fueron diferentes, se usó el programa de EstimateS para Windows Ver. 9 (Colwell, 2013) para despejar cualquier duda sobre la efectividad del esfuerzo de muestreo realizado para la caracterización de la riqueza de especies de cada comunidad. Para ello, y con el fin de reducir al máximo la dependencia entre unidades de muestreo y con esto la posible autocorrelación espacial de los individuos y especies, se usaron los subcuadros evitando que fueran contiguos. Debido a esto, la estimación de la riqueza de especies se hizo a partir de 15 subcuadros para la SMS (las cuatro esquinas del cuadro y el subcuadro del centro) y 52 subcuadros para la SAP (las cuatro esquinas del cuadro). Se calcularon los estimadores de riqueza Chao 1 y Cole debido a que se encuentran diseñados para datos de abundancia de individuos como en este caso (Villarreal *et al.*, 2004). Para las dos comunidades arboladas, el muestreo realizado fue suficiente, ya que en ambos casos se observa la tendencia horizontal de la curva de acumulación de especies (Fig. 2). Para el caso de la SAP se presentó una subestimación de siete especies que representa 11.5% del estimado por Chao 1, mientras que para la SMS hubo una subestimación de dos especies que representa 14% del estimado por Chao 1. Sin embargo, debido a que el área

TABLA 1. Caracterización de las áreas de estudio de selva mediana subperennifolia (SMS) y selva alta perennifolia en el estado de Tabasco, México.

	SMS	SAP
Ubicación	10 km hacia el este de Villahermosa, Tab.	Municipio de Tenosique, Tab.
Coordenadas geográficas	17° 59' – 18° 00' LN, 92° 47' – 92° 49' LO	17° 19' LN, 91° 21' LO
Temp. media anual (°C)	26.9	26.0
Prec. media anual (mm)	2,160	3,300
Extensión del área de estudio (ha)	30	400 aprox.
Edad aprox. de la vegetación	40 años después del abandono de pastizales para la ganadería	80 años después de roza, tumba y quema
Estado sucesional	Maduro	Maduro con acahuales de 10 a 20 años
Unidades de muestreo (m)	3 cuadros de 50 x 50	13 cuadros de 30 x 30
Área total de muestreo	0.75 ha	1.17 ha

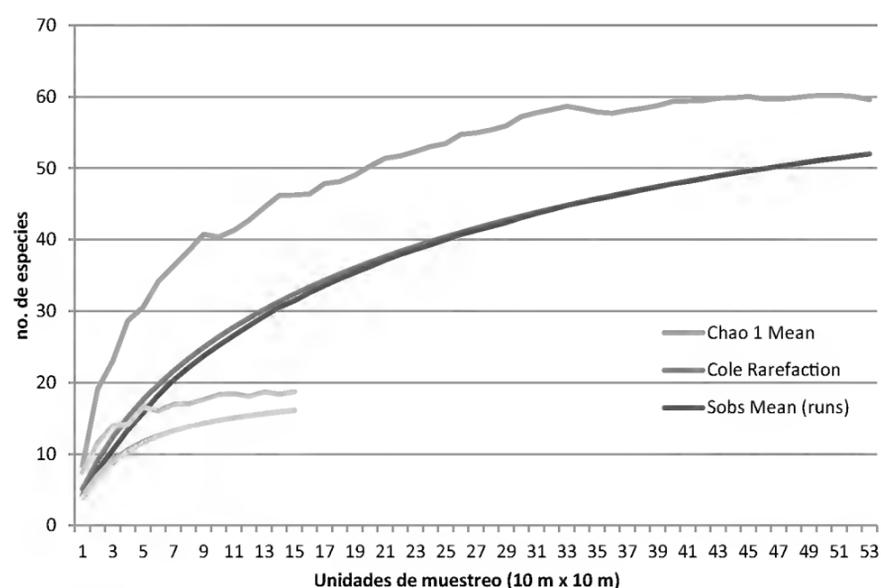


FIGURA 2. Riqueza de especies observada (S_{obs}) y estimada mediante los estimadores Chao1 y Cole, para la selva mediana subperennifolia (SMS) y la selva alta perennifolia (SAP).

real muestreada fue mayor que la analizada mediante este software, es muy probable que esta subestimación en los dos casos se haya reducido.

Se obtuvo el índice de valor de importancia para cada especie con la fórmula: $(IVI) = \text{densidad relativa} + \text{frecuencia relativa} + \text{dominancia relativa}$ de cada especie (Krebs, 1986), donde densidad relativa = % de individuos para

cada especie/total de individuos de la comunidad, frecuencia relativa = % de ocurrencia de cada especie en las unidades de muestreo/la suma de las frecuencias relativas de todas las especies de la comunidad, y dominancia relativa = % del área basal para cada especie/total del área basal de la comunidad.

Para medir la diversidad estructural vertical y horizontal de la comunidad se utilizaron únicamente las variables DAP, altura total del árbol y especie (Staudhammer y LeMay, 2001), ya que según Magurran (2004) los índices de diversidad basados en el área basal de la comunidad como Shannon-Wiener (1949) resultan más precisos que muchos otros. Con estas variables se calcularon seis índices de diversidad estructural basados en el índice Shannon-Wiener (1949) y dos coeficientes Gini como otra medida de diversidad estructural (Anexo 1): Índice de diversidad de especies (H_s , Magurran, 2004), índice de diversidad del tamaño de los árboles (H_d , Buongiorno *et al.*, 1994), índice de diversidad de la altura de los árboles (H_h , Staudhammer y LeMay, 2001), índice integrado de la diversidad de especies y diámetro de los árboles (H_{sd} , Buongiorno *et al.*, 1994), índice del perfil de las especies (H_{sp} , Pretzsch, 1996), índice promedio de la diversidad estructural (H_{sdh} , Staudhammer y LeMay, 2001), el coeficiente Gini para el diáme-



tro (Gcd, Lexerød y Eid, 2006) y el coeficiente Gini para la altura (Gch, Lexerød y Eid, 2006). Los índices Hd, Hh, Hsd y Hsp requieren que la altura y diámetro de los árboles sean agrupadas en clases discretas (Lei *et al.*, 2009). Para la elaboración de las clases del diámetro y altura de los árboles se utilizó la fórmula de Sturges (1926): $K = 1 + 3.333 \cdot \log(n)$; donde K = número de clases, y n = número de árboles. Para la SMS resultaron ocho clases diamétricas y nueve clases de altura, mientras que para la SAP resultaron diez clases diamétricas y diez de altura.

Debido a que los índices Hd, Hh, Hsd, Hsp y Hsdh se encuentran basados en el índice Shannon-Wiener (Hs), presentan cierta correlación con este índice. Hd y Hh tienen una baja correlación ($r = 0.426-0.527$, $P < 0.001$), representando, consecuentemente, diferentes estimaciones de la diversidad estructural de la comunidad (Lei *et al.*, 2009). Hsd, Hsp y Hsdh presentan una correlación mayor ($r = 0.814-0.871$, $P < 0.001$), por lo que se deben considerar con cierta reserva. Los coeficientes Gini (Gcd y Gch) particularmente son una medida de heterogeneidad entre 0 y 1, donde el 0 significa que todos los árboles son iguales en su diámetro o altura, y el 1 que todos son diferentes en diámetro o altura, y según Lexerød y Eid (2006) se recomiendan debido a la sensibilidad e incertidumbre que posee el índice de Shannon-Wiener a los cambios de las amplitud de las clases de diámetros y alturas de los árboles.

Los índices de diversidad Hs, Hd, Hh, Hsd y Hsp se compararon estadísticamente entre las dos comunidades arbóreas mediante la prueba de *t* de Hutchenson (Magurran 1988) (Anexo 2). Para el índice Hs la prueba se aplicó sin ninguna variación. Sin embargo, debido a que en los índices Hd, Hh, Hsd y Hsp la agrupación del área basal no es por especies como en el caso de Hs, sino por categorías diamétricas y de altura, el valor del número de especies (S) para el cálculo de la varianza del índice H' ($\text{Var}H'$) de la prueba de *t* (ver Anexo 2) se sustituyó por el número de categorías de DAP y de altura que resultaron en cada índice. De esta manera para el caso de Hd el valor de S correspondió al número de clases de diámetros, para Hh correspondió al número de clases de altura, para Hsd correspondió al número de clases de diámetro para cada

especie, y para Hsp al número de clases de altura para cada especie. El índice Hsdh y los índices Gini no se compararon estadísticamente debido a que carecen de la abundancia relativa de las especies (P_i) que requiere la prueba. Finalmente se realizaron histogramas de distribución de frecuencias de árboles por clases diamétricas y de altura.

RESULTADOS

La SAP presentó una mayor riqueza de especies y densidad de individuos que la SMS. Así también el árbol más alto alcanzó una altura mayor en la SAP que en la SMS, sin embargo, el árbol más grueso se presentó en la SMS (Tabla 2). La SMS presentó más especies con valores de IVI altos (33.7 al 58.7), mientras que en la SAP las especies presentaron un valor de IVI por debajo de 31.5 siendo muchas las especies con valores de IVI bajos (< 7.0) (Tabla 3).

La distribución de árboles por clases diamétricas para los dos tipos de selvas presentó una distribución típica en forma de J invertida con una baja proporción de arbolado de diámetro grueso y una alta proporción de árboles de diámetros pequeños (Fig. 3). Por el contrario, la distribución por clases de altura presentó una distribución donde la mayoría de los árboles se ubicó en la tercera clase de altura (11.6 m - 16.2 m) para la selva mediana subperennifolia y en la segunda (6.8 m - 11.5 m) para la selva alta perennifolia (Fig. 4).

TABLA 2. Principales características dasométricas de la selva mediana subperennifolia (SMS) y selva alta perennifolia (SAP).

	SMS	SAP
Riqueza de especies ha^{-1}	27	66
Densidad de individuos ha^{-1}	340	591
Árbol más alto (m)	29.5	35.0
Árbol más bajo (m)	4.0	2.0
Altura promedio (m)	13.0	11.7
Árbol más grueso (cm DAP)	137.0	111.0
Árbol más delgado (cm DAP)	10.0	10.0
DAP promedio (cm)	27.8	21.2

TABLA 3. Índice de valor de importancia (IVI) de las especies dominantes de la selva mediana subperennifolia (SMS) y selva alta perennifolia (SAP).

	SMS		SAP
Especies arbóreas y palmas	IVI	Especies arbóreas	IVI
<i>Brosimum alicastrum</i> Sw	58.7	<i>Trichospermum mexicanum</i> (DC.) Baill.	31.5
<i>Sabal mexicana</i> Mart,	56.6	<i>Psuedobombax ellipticum</i> (Kunth) Dugand	11.5
<i>Attalea butyracea</i> (Mutis ex L.F.)	42.4	<i>Brosimum alicastrum</i> Sw	7.5
<i>Cynometra retusa</i>	37.0	<i>Spondias mombin</i> L.	7.0
<i>Pouteria reticulata</i> (Engl). Eyma	34.8		
<i>Dialium guianense</i> (Aubl.) Sandw.	33.7		

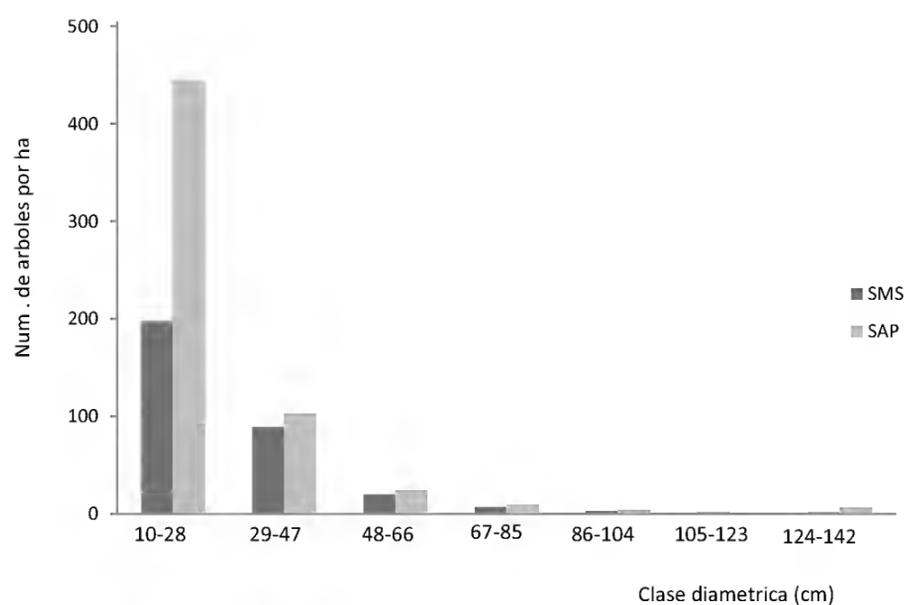


FIGURA 3. Distribución de árboles por clases diamétricas para la selva mediana subperennifolia (SMS) y la selva alta perennifolia (SAP).

La diversidad de especies a partir de su área basal (Hs) fue mayor en la SAP que en la SMS ($P = 0.0001$, t de Hutchenson = 24.3, $gl = 2,973.7$) (Tabla 4). Considerando la estructura a partir de los diámetros y alturas de los árboles, la diversidad de especies también fue mayor en la SAP (Hd, $P = 0.001$, t de Hutchenson = 4.82, $gl = 45.14$; Hh, $P = 0.001$, t de Hutchenson = 5.187, $gl = 273.1$). Considerando los diámetros dentro de cada especie (Hsd), la diversidad también fue mayor en la SAP ($P = 0.0001$, t de Hutchenson = 17.25, $gl = 578.3$), y considerando la altura también dentro de cada especie

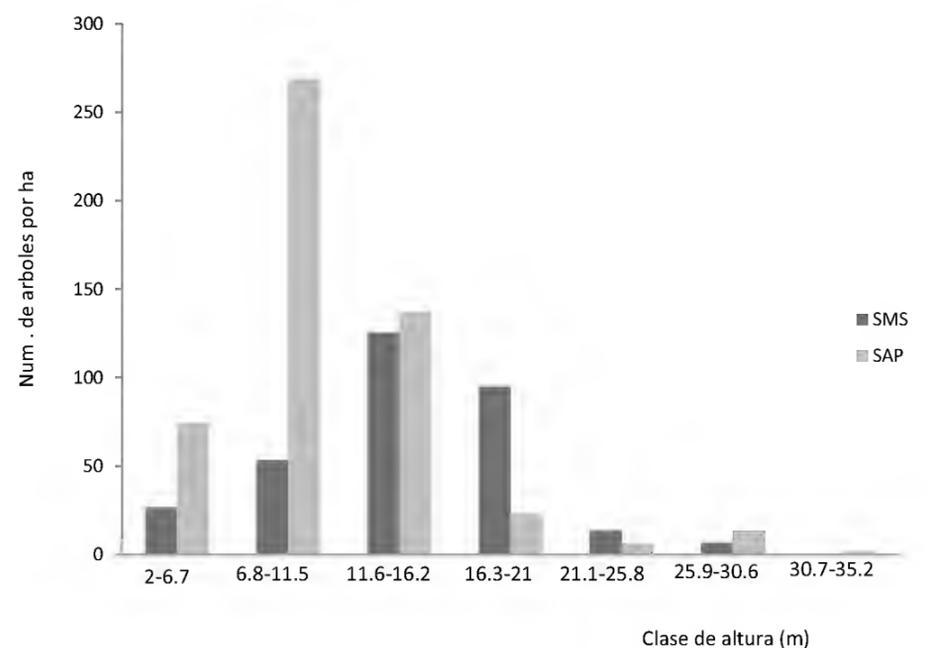


FIGURA 4. Distribución de árboles por clases de altura para la selva mediana subperennifolia (SMS) y la selva alta perennifolia (SAP).

(Hsp), la diversidad fue aún mayor en la SAP (6.6 vs. 3.75, $P = 0.0001$, t de Hutchenson = 27.17, $gl = 646.9$). La diversidad estructural en promedio (Hsdh) fue también mayor en la SAP, aunque esta no fue evaluada estadísticamente debido a que constituye un promedio aritmético de tres índices (Anexo 1) y no existen varianzas que permitan calcular la prueba de t de Hutchinson (Anexo 2). La heterogeneidad de los árboles de la selva también fue mayor en la SAP que en la SMS, considerando su tamaño tanto por DAP como por su altura (Gcd y Gch) (Tabla 4).



TABLA 4. Índices de diversidad estructural para una selva mediana subperennifolia (SMS) y una selva alta perennifolia (SAP) en Tabasco, México.

Índices de diversidad estructural	SMS	SAP	P
Índice de diversidad de especies arbóreas (Hs)	2.895	5.173	0.0001
Índice de diversidad del tamaño de los árboles (Hd)	2.697	3.031	0.001
Índice de diversidad de la altura de los árboles (Hh)	2.345	2.76	0.001
Índice integrado de la diversidad de las especies arbóreas y el tamaño de los árboles (Hsd)	4.978	6.737	0.0001
Índice del perfil de las especies (Hsp)	3.75	6.6	0.0001
Índice promedio de la diversidad estructural (Hsdh = Hs+Hd+Hh/3)	2.646	3.655	
Coefficiente Gini para el DAP (Gcd)	0.583	0.61	
Coefficiente Gini para la altura (Gch)	0.419	0.494	

Valor de P calculado mediante la prueba *t* de Hutchenson (Magurran, 1988). Hs está calculado con el área basal para todos los individuos en conjunto, mientras que los demás índices están calculados con el área basal para individuos por clase de DAP y altura (ver Anexo).

DISCUSIÓN

En cuanto a la hipótesis planteada, claramente la SAP tuvo mayor número de especies e individuos que la SMS, sin embargo, en cuanto a la altura y diámetro de los árboles la comparación no es tan sencilla (Tabla 2). Con base en los datos dasométricos, no es fácil caracterizarlas estructuralmente como selva alta y selva mediana, ya que en la selva mediana el árbol más bajo y la altura promedio de todos los árboles tienen valores mayores que en la selva alta. Así también, la figura 4 tampoco indica una mayor altura de la selva alta, ya que la mayor abundancia de árboles en la SMS se presentó en la clase de 11.6 m a 16.2 m, la cual fue más alta que la clase de 6.8 m a 11.5 m de la SAP. Lo mismo sucede para el DAP donde el árbol más grueso y el DAP promedio son mayores en la SMS que en la SAP, pero con base en el análisis de frecuencia de árboles por clases diamétricas, la SAP tiene más árboles delgados (Fig. 3).

Lo anterior constituye un problema cuando se consideran estas variables o atributos estructurales de las comunidades en forma aislada. Por el contrario, los índices estructurales incluyen estos atributos en el índice de diversidad haciendo una estimación más completa. De esta manera, la SAP resultó estructuralmente más diversa que la SMS al tener valores mayores en cuatro índices (Hd, Hh, Hsd y Hsp) (Tabla 4). Al tratar de resumir la diversidad

estructural de las dos comunidades arbóreas mediante el índice integrado de la diversidad de las especies arbóreas (Hsd) y el índice promedio (Hsdh), estos fueron mayores para la SAP. La selva alta presentó más clases diamétricas y de altura que la selva mediana (ver método), lo cual se refleja en esta mayor diversidad estructural a través de los índices. El índice del perfil de las especies (Hsp) constituye una estimación más completa del perfil vertical de la comunidad que las descripciones a partir de los resultados dasométricos aislados de altura de los árboles o distribución del arbolado por clases de altura. Lo mismo sucede para el índice Hd con respecto a las mediciones aisladas del DAP. Otra ventaja de los índices estructurales es que permiten la comparación estadística a diferencia de las estimaciones dasométricas individuales donde para realizar una comparación estadística se requieren al menos tres comunidades arbóreas del mismo tipo. El índice promedio de la diversidad estructural (Hsdh), por su parte, intenta englobar los diámetros, alturas y especies de la comunidad, mientras que el coeficiente Gini (Gcd, Gch) constituye una medida de la heterogeneidad del área basal de la comunidad en relación con los diámetros y alturas de los árboles, y cuantifica la desviación de la igualdad perfecta de cero (Lei *et al.*, 2009). En este sentido, la SAP fue más heterogénea que la SMS en cuanto al tamaño de los árboles al ser mayores los valores de Hsdh y

del coeficiente Gini. Esto indica que la SAP presenta más árboles de diferentes tamaños tanto en diámetro como en altura que la SMS, haciéndola estructuralmente más diversa que una comunidad con menos árboles o tamaños similares como podría ser el caso de una plantación. Sin embargo, en relación con el crecimiento del arbolado, los índices estructurales Hd y Hh resultaron mejores predictores que los índices de Gini (Lei *et al.*, 2009).

En relación con la mayor diversidad estructural de la SAP habría que considerar que la SMS es un área protegida donde la estructura y el dosel arbolado han tomado su curso natural, mientras que en la SAP no se puede descartar la extracción maderable selectiva a lo largo del tiempo, lo cual pudo haber influido en la mayor heterogeneidad estructural de la vegetación. En este sentido, obviamente lo ideal sería comparar áreas de estudio similares con relación al uso de suelo, sin embargo en la actualidad aun las áreas protegidas sufren de algún grado de perturbación humana.

La diversidad estructural de una comunidad tiene como ventajas que puede estar mejor relacionada con la diversidad biológica de la fauna y entomofauna, que los índices clásicos de diversidad de especies de la vegetación. Lo anterior es evidente al considerar la altura de los árboles, variable que resulta altamente importante para los hábitos de las aves, insectos y reptiles. Los diferentes tamaños de los árboles proveen una variedad de hábitats para diversas especies de flora y fauna (Lei *et al.*, 2009). Según MacArthur y MacArthur (1961); Buongiorno *et al.* (1994) y Franklin *et al.* (2002) la biodiversidad de las comunidades arbóreas se puede mantener con el manejo de su diversidad estructural, de tal forma que este concepto se ha incorporado a las prácticas del manejo forestal actual (Kant, 2002). Así también, se ha encontrado una relación positiva entre la diversidad estructural y los almacenes de carbono en un bosque de coníferas en Norteamérica (Wang *et al.*, 2011). La diversidad estructural de una comunidad es importante para su diversidad biológica y afecta a otros componentes como los valores ecológicos, económicos y sociales del ecosistema (Lexerød y Eid, 2006), por ejemplo, al influir el tamaño y número de árboles de la comunidad

en la captura de carbono, creación de mantos acuíferos, producción maderable y ecoturismo; por mencionar los principales.

Comparando la diversidad estructural de las selvas húmedas (Tabla 4) con los bosques templados de Norteamérica donde originalmente se aplicaron estos índices, se puede ver que los valores máximos de las selvas (6.737) son mucho más altos que los máximos documentados por Lei *et al.* (2009): 2.347, y Wang *et al.* (2011): 2.355, lo que refleja una mayor diversidad estructural de las selvas tropicales.

Los índices de diversidad estructural describen en forma más completa la diversidad de las comunidades arbóreas, lo que permite establecer una mejor relación con el hábitat de la comunidad que los índices de diversidad clásicos. Ciertamente su procedimiento de análisis es un poco más laborioso que el de los índices clásicos de diversidad, pero permiten tener resultados de mayor utilidad.

CONCLUSIONES

Los índices de diversidad estructural fueron efectivos para comparar la estructura de dos selvas tropicales siendo más diversa la selva alta perennifolia que la selva mediana subperennifolia. Por lo anterior, se recomienda el uso de estos índices con la intención de realizar una medición más completa de estas comunidades arbóreas estructuralmente complejas, así como para poder establecer comparaciones más precisas de diversidad de especies entre diferentes comunidades arbóreas en el trópico.

RECONOCIMIENTOS

Se agradece a los revisores anónimos por sus valiosos comentarios al manuscrito.

REFERENCIAS

- Ambuel, B. y Temple, S. A. (1983). Area-dependent changes in the bird communities and vegetation of southern Wisconsin forests. *Ecology*, 64 (5), 1057-1068.
- Basáñez, A. J, Alanís, J. L. y Badillo, E. (2008). Composición florística y estructura arbórea de la selva mediana subperennifolia del ejido "El Remolino", Papantla, Veracruz. *Avances en investigación agropecuaria*, 12 (2), 3-21.



- Böhl, J. y Lanz, A. (2005). *The concept of structural diversity*. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research. Recuperado de http://www.fs.fed.us/pnw/pubs/pnw_gtr688/papers/Inv%20&%20Mon/session3/boehl.pdf.
- Buongiorno, J., Dahir, S., Lu, H. C. y Lin, C. R. (1994). Tree size diversity and economic returns in uneven-aged forest stands. *Forest Science*, 40 (1), 83-103.
- Cascante M., A. y Estrada C., A. (2001). Composición florística y estructura de un bosque húmedo premontano en el Valle Central de Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 49 (1), 213-225.
- Colwell, R. K. (2013). *EstimateS: Statistical estimation of species richness and shared species from samples*. Ver. 9. User's Guide and application. Recuperado de <http://purl.oclc.org/estimates>
- Del Río, M., Montes, F., Cañellas, I. y Montero, G. (2003). Revisión: Índices de diversidad estructural en masas forestales. *Investigaciones Agrarias: Sistemas de Recursos Forestales*, 12 (1), 159-176.
- Dzib-Castillo, B., Chanatásig-Vaca, C. y González-Valdivia, N. A. (2014). Estructura y composición en dos comunidades arbóreas de la selva baja caducifolia y mediana subcaducifolia en Campeche, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85, 167-178.
- Franklin, J. F., Spies, T. A., Van pelt, R., Carey, A. B., Thornburgh, D. A., Berg, D. B., Lindenmayer, D. B., Harmon, M. E., Keeton, W. S., Shaw, D. S., Bible, K. y Chen, J. (2002). Disturbances and structural development of natural forest ecosystems with silvicultural implications, using Douglas-fir forests as an example. *Forest Ecology and Management*, 155 (1-3), 399-423.
- Von Gadow, K. (1999). Waldstruktur und Diversität. *Allg. Forst- und Jagdzeitung*, 170, 117-122.
- Godínez-Ibarra, O. y López-Mata, L. (2002). Estructura, composición, riqueza y diversidad de árboles en tres muestras de selva mediana subperennifolia. *Anales del Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Serie Botánica*, 73 (2), 283-314.
- Goreaud, F. y Pélissier, R. (1999). On explicit formulas for edge effect correction for Ripley's K-function. *Journal of Vegetation Science*, 10 (3), 432-433.
- Hubbell, S. P., Foster, R. B., O'Brien, S. T., Harms, K. E., Condit, R., Wechsler, B., Wright, S. J., y Loo de Lao, S. (1999). Light-gap disturbances, recruitment limitation, and tree diversity in a Neotropical Forest. *Science*, 283 (5401), 554-557.
- Kant, S. (2002). The marginal cost of structural diversity of mixed uneven-aged hard maple forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 32 (4), 616-628.
- Kimmins, J. P. (1997). Biodiversity and its relationship to ecosystem health & integrity. *Forest Chronicle*, 73 (2), 229-232.
- Krebs, C. J. (1986). *Ecología. Estudio de la distribución y abundancia* (2ª ed.). España: Pirámide.
- Lähde, E., Laiho, O., Norokorpi, Y. y Saksa, T. (1999). Stand structure as the basis of diversity index. *Forest Ecology and Management*, 115 (2-3), 213-220.
- Lei, X., Wang, W. y Peng, C. 2009. Relationships between stand growth and structural diversity in spruce-dominated forests in New Brunswick, Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 39 (10), 1835-1847.
- LeMay, V. y Staudhammer, C. (2005). *Indices of stand structural diversity: mixing discrete, continuous, and spatial variables*. Recuperado de http://www.fs.fed.us/pnw/pubs/pnw_gtr688/papers/Stats%20&%20Mod/session3/lemay.pdf.
- Lexerød, N. y Eid, T. (2006). An evaluation of different diameter diversity indices based on criteria related to forest management planning. *Forest Ecology and Management*, 222 (1), 17-28.
- Long, J. N. y Shaw, J. D. (2010). The influence of compositional and structural diversity on forest productivity. *Forestry*, 83 (2), 121-128.
- MacArthur, R. H. y MacArthur, J. W. (1961). On bird species diversity. *Ecology*, 42 (3), 594-598.
- Magurran, A. E. (1988). *Ecological Diversity and its Measurement*. Nueva Jersey: Princeton University Press. 192 p.
- Magurran, A. E. (2004). *Measuring biological diversity*. Oxford, UK: Blackwell Publishing. 256 p.
- Maldonado-Sánchez, E. A. y Maldonado-Mares, F. (2010). Estructura y diversidad arbórea de una selva alta perennifolia en Tacotalpa, Tabasco, México. *Universidad y Ciencia*, 26 (3), 235-245.

- Margalef, D. R. (1958). Information theory in ecology. *General Systematics*, 3, 36-71.
- Martínez-Sánchez, J. L. y Cámara, L. (2012). Is there a relationship between floristic diversity and carbon stocks in tropical vegetation in Mexico?. *African Journal of Agricultural Research*, 7 (17), 2584-2591.
- Másisi, L, Nelwamondo, V. y Marwala, T. (2008). The use of entropy to measure structural diversity. *IEEE 6th International Conference on Computational Cybernetics 2008* (pp. 41-45). Recuperado de <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0810/0810.3525.pdf>
- McCleary, K. y Mowat, G. (2002). Using forest structural diversity to inventory habitat diversity of forest-dwelling wildlife in the West Kootenay region of British Columbia. *British Columbia Journal of Ecosystems and Management*, 2 (2), 1-13.
- McRoberts, R. E., Winter, S., Chirici, G., Hauk., E., Pelz, D. R., Moser, W. K. y Hatfield, M. A. (2008). Large-scale spatial patterns of forest structural diversity. *Canadian Journal of Forest Research*, 38 (3), 429-438.
- McElhinny, C., Gibbons, P., Brack, C. y Bauhus, J. (2005). Forest and woodland stand structural complexity: Its definition and measurement. *Forest Ecology and Management*, 218 (1-3), 1-24.
- Menhinick, E. F. (1964). A Comparison of some Species-Individuals Diversity Indices Applied to Samples of Field Insects. *Ecology*, 45 (4), 859-861.
- Miranda, F. y Hernández X., E. (1963). Los tipos de vegetación de México y su clasificación. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 28, 29-179.
- Oliver, C. D. y Larson, B. C. (1996). *Forest Stand Dynamics*. Nueva York: John Wiley and Sons, Inc.
- Önal, H. (1997). Trade-off between structural diversity and economic objectives in forest management. *American Journal of Agriculture Economy*, 79 (3), 1001-1012.
- Pommerening, A. (2002). Approaches to quantifying forest structure. *Forestry*, 75 (3), 305-324.
- Pretzsch, H. (1996). Strukturvielfalt als Ergebnis waldbaulichen Handelns. Allg. *Forst- u. J.-Zeitung*, 167 (11), 213-221.
- Pretzsch, H. (1997). Analysis of modeling of spatial stand structures: Methodological considerations based on mixed beech – larch stands in Lower Saxony. *Forest Ecology and Management*, 97 (3), 237-253.
- Recher, H. F., Majer, J. D. y Ganesh, S. (1996). Eucalypts, arthropods and birds: on the relation between foliar nutrients and species richness. *Forest Ecology and Management*, 85 (1-3), 177-195.
- Sánchez-Pérez, B. R., Castillo-Acosta, O. y Cámara-Cabrales, L. (2011). Regeneración natural de la selva alta perennifolia en el parque estatal Agua Blanca, Macuspana, Tabasco, México. *Polibotánica*, 32, 63-88.
- Simpson, E. H. (1949). Measurement of diversity. *Nature*, 163 (4148), 688.
- Shannon-Wiener, C. E. (1949). The mathematical theory of communication. En C. E. Shannon-Wiener y W. Weaver (Eds.), *The Mathematical Theory of Communication*. E. U. A.:University of Illinois Press, Urbana.
- Staudhammer, C. L. y LeMay, V. M. (2001). Introduction and evaluation of possible indices of stand structural diversity. *Canadian Journal of Forest Research*, 31 (7), 1105-1115.
- Sturges, H. (1926). The choice of a class-interval. *Journal of American Statistical Association*, 21 (153), 65-66.
- Villareal, H., Álvarez, M., Córdoba, S., Escobar, F., Fagua, G., Gast, F., Mendoza, H., Ospina, M. y Umaña, A. M. (2004). *Manual de métodos para el desarrollo de inventarios de biodiversidad*. Bogotá: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos. Alexander von Humboldt.
- Wang, W., Lei, X., Ma, Z., Kneeshaw, D. D. y Peng, C. (2011). Positive relationship between aboveground carbon stocks and structural diversity in spruce-dominated forest stands in New Brunswick, Canada. *Forest Science*, 57 (6), 506-515.
- Willson, M. F. (1974). Avian community organization and habitat structure. *Ecology*, 55 (5), 1017-1029.
- Whittaker, R. H. (1972). Evolution and measurement of species diversity. *Taxon*, 21 (2/3), 213-251.

Manuscrito recibido el 22 de octubre de 2014.

Aceptado el 27 de mayo de 2016.

Este documento se debe citar como:

Martínez-Sánchez, J. L. (2016). Comparación de la diversidad estructural de una selva alta perennifolia y una mediana subperennifolia en Tabasco, México. *Madera y Bosques*, 22 (2), 29-40.



ANEXO 1. Fórmulas de los índices de diversidad estructural usadas en este estudio (*sensu* Lei *et al.*, 2009).

Índice	Ecuación	Descripción	Interpretación (Estimación de la diversidad de especies):
Índice de diversidad de las especies de árboles	$H_s = - \sum_{i=1}^m p_i \times \log p_i$, donde p_i es la proporción del área basal para la especie i y m es el número de especies	Índice de Shannon-Wiener para las especies (Magurran, 2004)	En total
Índice de diversidad del tamaño (diámetro) de los árboles	$H_d = - \sum_{i=1}^d p_i \times \log p_i$, donde p_i es la proporción del área basal para la clase diamétrica i y d es el número de clases diamétricas	Índice de Shannon-Wiener por clases diamétricas (Buongiorno <i>et al.</i> 1994)	Por clases diamétricas
Índice de diversidad de la altura de los árboles	$H_h = - \sum_{i=1}^h p_i \times \log p_i$, donde p_i es la proporción del área basal para la clase de altura i y h es el número de clases de altura	Índice de Shannon-Wiener por clases de altura (Staudhammer and LeMay, 2001)	Por clases de altura
Índice de diversidad integrado de las especies y el tamaño de los árboles	$H_{sd} = - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^d p_{ij} \times \log p_{ij}$, donde p_{ij} es la proporción del área basal en la clase diamétrica j de la especie i , m es el número de especies, y d es el número de clases diamétricas	Índice de Shannon-Wiener integrado para las especies y diámetros (Buongiorno <i>et al.</i> 1994)	Por especies y clases diamétricas
Índice del perfil de las especies	$H_{sp} = - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^3 p_{ij} \times \log p_{ij}$, donde p_{ij} es la proporción del área basal para la especie i en la clase de altura j , m es el número de especies, clase 1, 100%-81% de la altura del árbol más alto (h_{max}); clase 2, 80%-51% de h_{max} , clase 3, 50%-0% de h_{max}	Cálculo del índice de Shannon-Wiener para la proporción de las especies de árboles en diferentes estratos arbóreos: indica la diversidad integrada de las especies y la altura (Pretzsch, 1996)	Por especies y clases de altura
Índice promedio de la diversidad estructural	$H_{sdh} = (H_s + H_d + H_h)/3$	Valor medio de los índices de las especies de árboles, tamaño y altura (Staudhammer and LeMay, 2001)	Promedio de la diversidad de especies del total, por clases diamétricas y de altura
Coficiente Gini para el DAP	$GCd = \frac{\sum_{i=1}^n (2j-n-1)AB_j}{\sum_{i=1}^n AB_j(n-1)}$ donde AB_j es el área basal del árbol con rango j , j es el rango del árbol en orden ascendente desde 1 hasta n por DAP, y n es el número de árboles	Medida de la desviación de la igualdad perfecta (Lexerød and Eid, 2006)	Heterogeneidad del área basal de los árboles en relación al DAP

ANEXO 1. Fórmulas de los índices de diversidad estructural usadas en este estudio (*sensu* Lei *et al.*, 2009). (Continuación...)

Índice	Ecuación	Descripción	Interpretación (Estimación de la diversidad de especies):
Coefficiente Gini para la altura	$GCh = \frac{\sum_{j=1}^n (2j-n-1)AB_j}{\sum_{j=1}^n AB_j(n-1)}$ <p>donde AB_j es el área basal del árbol con rango j, j es el rango del árbol en orden ascendente desde 1 hasta n por DAP, y n es el número de árboles</p>	Medida de la desviación de la igualdad perfecta (Lexerød and Eid, 2006)	Heterogeneidad del área basal de los árboles en relación a su altura

ANEXO 2. Prueba de t de Hutchenson (Magurran, 1988):

$$t = \frac{H^1 - H^2}{(\text{Var}H^1 + \text{Var}H^2)^{1/2}}$$

Grados de libertad:

$$gl = \frac{(\text{Var}H^1 + \text{Var}H^2)^2}{\frac{(\text{Var}H^1)^2}{N1} + \frac{(\text{Var}H^2)^2}{N2}}$$

Varianza del índice H^1 :

$$\text{Var}H^1 = \frac{\sum p_i (\ln p_i)^2 - (\sum p_i \ln p_i)^2}{N} - \frac{S - 1}{2N^2}$$

Donde:

- H_i : índice de Shannon del área i ,
- $\text{Var}H_i$: varianza del índice de Shannon del área i ,
- N_i : número total de individuos en i -ésima área.
- S : total de especies del área i ,
- p_i : proporción de la especie i en el área i , y
- N : número total de individuos.



Áreas prioritarias para restauración ecológica y sitios de referencia en la región Chignahuapan-Zacatlán

Priority areas for ecological restoration and reference sites in Chignahuapan-Zacatlan region

María Luisa González Ovando¹, F. Ofelia Plascencia Escalante*¹ y Tomás Martínez-Trinidad¹

¹ Colegio de Postgraduados, campus Montecillo. Postgrado en Ciencias Forestales.

* Autor de correspondencia: fplascen@colpos.mx

RESUMEN

La degradación de los recursos naturales genera la necesidad de recuperarlos mediante estrategias de restauración ecológica, para lo cual, es necesario identificar de manera sencilla las zonas a restaurar y priorizar las actividades a realizar. El objetivo de este trabajo fue utilizar la evaluación multicriterio para identificar las áreas prioritarias que necesitan ser restauradas en la región Chignahuapan-Zacatlán, Puebla; así como determinar mediante teledetección los sitios de referencia para las zonas identificadas para su restauración. Se utilizó el Proceso Analítico Jerarquizado en un entorno de sistemas de información geográfica para definir prioridades de atención. Para esto, se consideraron 12 criterios ambientales y se incorporó el conocimiento de 21 expertos en restauración ecológica a través de matrices de comparación pareada. Los sitios de referencia se determinaron mediante la clasificación supervisada de imágenes de satélite y la exclusión de las áreas con algún tipo de perturbación. Los resultados indican que cerca de 80% de la superficie se clasificó con algún nivel de prioridad a restauración. A pesar de esto, solamente 0.8% se clasificó con prioridad máxima a restaurar. Por otro lado, la superficie con potencial para servir de referencia es de 4753 ha. Además, se generaron mapas de las zonas que necesitan atención prioritaria en restauración ecológica y de los sitios de referencia; lo anterior favorece una planificación eficaz de las áreas a restaurar.

PALABRAS CLAVE: áreas prioritarias, evaluación multicriterio, proceso analítico jerarquizado (PAJ), sitio de referencia, restauración ecológica.

ABSTRACT

Degradation of natural resources has generated the need for ecological restoration. It is therefore necessary to identify in a simple manner the areas to be restored and prioritize the activities. The main aim of this study was to use Multi-Criteria Evaluation to identify priority areas for ecological restoration in the Chignahuapan-Zacatlan region of Puebla, Mexico, and to use remote sensing to determine reference sites for restoration. An Analytic Hierarchy Process through a GIS environment was used to identify priorities for attention. Mapping Information of 12 environmental criteria was used, together with the knowledge of 21 experts in restoration, which was incorporated through pairwise comparison matrices. The reference sites were determined by the supervised classification of satellite images and the exclusion of areas that presented some form of disturbance. The results indicate that about 80% of the area was classified with a level of priority for restoration. However, only 0.8% was classified as maximum priority. On the other hand, the area with potential to serve as a reference within the study area is approximately 4753 hectares. With recognition of these areas to be restored and reference sites in the maps, the efficiency and planning for restoration will be improved.

KEYWORDS: priority areas, multicriteria evaluation, analytical hierarchy process (AHP), reference site, ecological restoration.

INTRODUCCIÓN

La importancia de la restauración ecológica se deriva de la existencia generalizada de distintas formas de degradación de los recursos naturales y las condiciones ambientales, que se manifiesta en la pérdida de vegetación y suelo, aguas contaminadas; contaminación atmosférica; pérdida de recursos genéticos; destrucción de partes vitales de hábitat; cambios climáticos, geológicos y evolutivos (Gálvez, 2002). La restauración ecológica intenta dirigir el sistema por una ruta de estadios sucesivos que recupere la composición de especies y las interrelaciones que tenía la comunidad original en un tiempo relativamente corto (Martínez-Romero, 1996). El proceso de restauración ecológica se puede dividir en niveles o etapas según el estado del área que se va a intervenir, el objetivo y el resultado final del proyecto (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2003).

Una de las primeras acciones a realizar en un proyecto de restauración ecológica es identificar el ecosistema que servirá de referencia para guiar el proceso de restauración, por ejemplo, un ecosistema menos alterado lo más similar posible al ecosistema original del sitio a restaurar, en donde puedan encontrarse los rasgos funcionales y estructurales que se quieren reconstruir (MAVDT, 2003; Society for Ecological Restoration, 2004). El modelo de referencia también puede consistir en descripciones de estos ecosistemas o de las expresiones ecológicas sobresalientes que se desean al restaurar un ecosistema (Clewell y Aronson, 2007).

Un ecosistema de referencia puede servir de modelo para la planificación de un proyecto de restauración ecológica y posteriormente, servir en la evaluación de ese proyecto, pues se espera que con el tiempo el ecosistema restaurado emule los atributos de la referencia, y se desarrollen las metas y estrategias del proyecto de acuerdo con esas expectativas (SER, 2004). Además, la elección de la referencia depende del estado sucesional del área tratada, por lo que es indispensable que el referente se encuentre bajo condiciones ambientales similares como la altitud, pendiente, u orientación (MAVDT, 2003). Por lo tanto, el contenido y la calidad de la referencia puede variar

ampliamente entre los proyectos, dependiendo de la disponibilidad de información y sitios en los que se puede desarrollar (Clewell y Aronson, 2007).

¿Dónde actuar primero? es la pregunta clave sobre la restauración y conservación de la naturaleza a causa de la limitación de los recursos financieros. Por tanto, la restauración debería centrarse en áreas con mayor riesgo de degradación y que produzcan los mayores beneficios ambientales. Desafortunadamente, el establecimiento de prioridades ha recibido poca atención en el contexto específico de la restauración ecológica (Geneletti, Orsi, Lanni y Newton, 2011); por lo que usualmente no se cuenta con estrategias para priorizar los esfuerzos de restauración. Muchos de estos trabajos se ubican en pocos sitios específicos por la escasez de recursos económicos disponibles; de manera que, es importante llevar a cabo la identificación de sitios prioritarios en los que la restauración favorezca los mayores beneficios ambientales (Echeverría *et al.*, 2010).

La elección de los sitios destinados a restauración ecológica, es una decisión que debe tomarse en conjunto con los criterios y preferencias de los propietarios y con la opinión de expertos. Esta debe justificarse en una priorización técnica, basada en las necesidades de la comunidad y en criterios de estrategias globales de conservación o en las políticas de gestión de autoridades públicas (MAVDT, 2003; Geneletti *et al.*, 2011). La naturaleza del problema de tipo espacial hace necesario el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para manejar de manera sencilla los datos georeferenciados (Geneletti *et al.*, 2011). Los SIG integrados con técnicas de evaluación multicriterio pueden asistir, o bien constituirse en una importante herramienta para procesos de planificación y priorización. Esta combinación de técnicas es uno de los métodos utilizados para la determinación de áreas prioritarias, siendo una herramienta de apoyo para la descripción, evaluación, ordenación, jerarquización y selección de alternativas o cursos de acción (Gómez y Barredo, 2005; Olivas, Valdez, Aldrete, González y Vera, 2007).

En la Sierra Norte de Puebla, en particular en algunas partes de los municipios de Chignahuapan y Zacatlán, los recursos naturales han sido degradados; por ejemplo, se



ha estimado que hay 7779 ha con problemas de degradación en Chignahuapan y 15 072 ha en el municipio de Zacatlán (Avalos y Baca, 2007). Debido a esto, los objetivos del presente estudio son identificar las áreas con necesidad de ser restauradas y asignarles un nivel de prioridad de atención en los municipios de Chignahuapan y Zacatlán usando una técnica de análisis multicriterio; así como, la identificación de las áreas de referencia mediante teledetección que servirán en futuros trabajos de restauración caracterizados como prioritarios.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del área de estudio

El estudio se realizó en los municipios de Chignahuapan y Zacatlán localizados en el occidente de la Sierra Norte de Puebla (Fig. 1) con una superficie de 124 956 ha (Centro Nacional de Desarrollo Municipal, 1999). Predominan seis tipos de clima, todos catalogados como templados y fríos con humedad clasificada de media y mayor. La zona forma parte del Eje Neovolcánico, con una altitud de

2400 m hasta los 2800 m, en cadenas de cerros bien definidos en el sur y al oriente de la vertiente. Las principales actividades económicas en la zona de estudio son la agricultura y la silvicultura, donde el bosque de coníferas ocupa aproximadamente 43% de la superficie total (Avalos y Baca, 2007).

Base de datos cartográfica

Se recopiló la información cartográfica de la zona de estudio publicada por el INEGI y Conabio escala 1:250 000, la cual se homogeneizó a la proyección Universal de Mercator (UTM) zona 14 y Datum WGS84 (1984), para realizar el modelado cartográfico. También se utilizó un modelo de elevación digital a 30 m (Chávez, 2014) y dos imágenes de satélite Landsat 5 TM del año 2011.

Proceso Analítico Jerarquizado (PAJ)

La identificación de áreas prioritarias con necesidad de restauración, se realizó mediante la técnica de evaluación multicriterio denominada Proceso Analítico Jerarquizado desarrollado (PAJ) por Saaty (Gómez y Barredo, 2005).

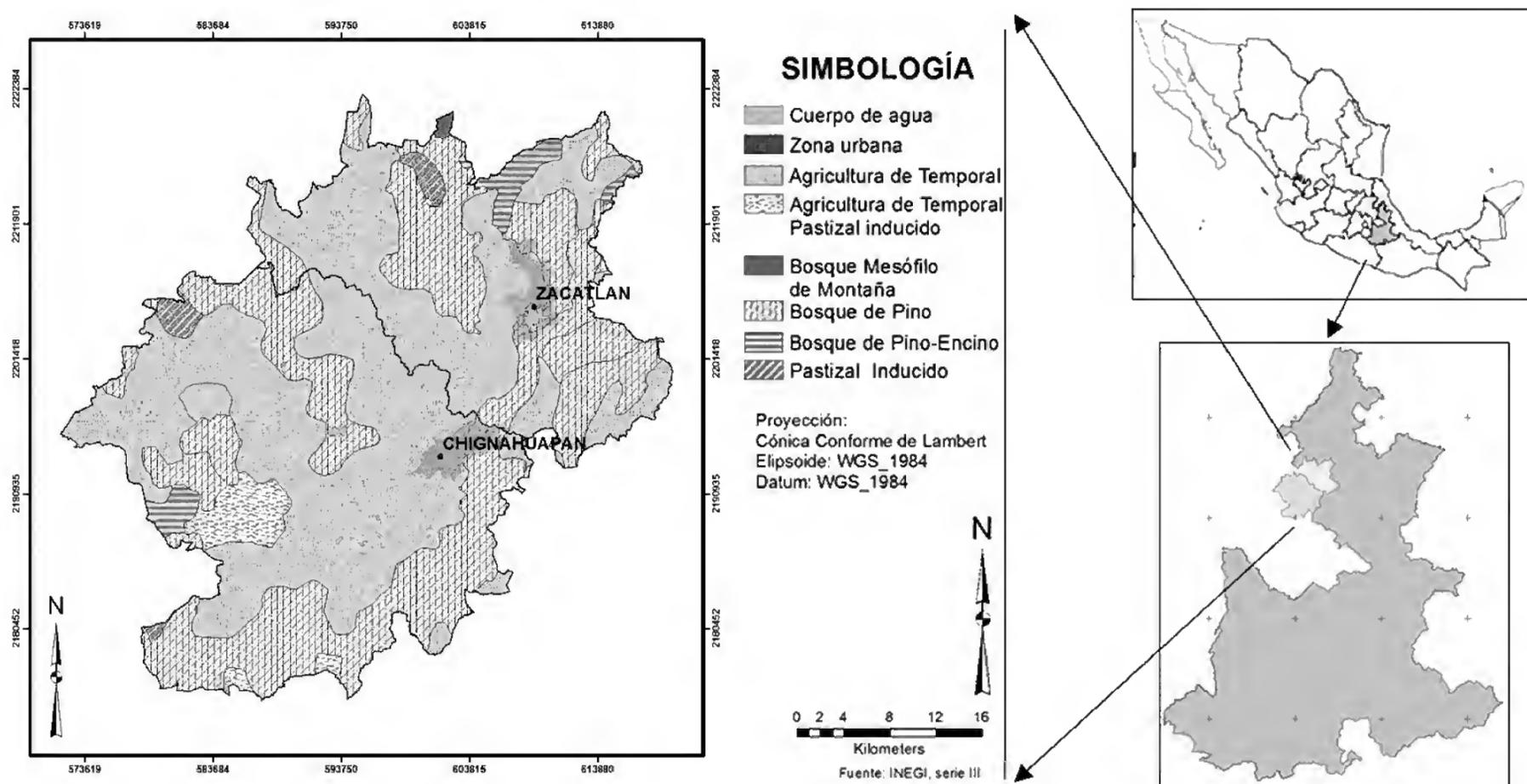


FIGURA 1. Ubicación del área de estudio y su uso del suelo.

Este método conduce a los tomadores de decisiones a analizar una decisión en partes, iniciando por definir el objetivo principal (jerarquía 1), los criterios (jerarquía 2), los subcriterios (jerarquía 3) y finalizando por las alternativas (jerarquía n), lo que corresponde al primer paso del proceso. Mediante el proceso PAJ se consideraron criterios basados en factores que causan algún tipo de degradación en los ecosistemas los cuáles fueron consensuados por 21 expertos en el tema de restauración mediante una encuesta. Los criterios seleccionados fueron: clima (precipitación), suelo (textura, profundidad, nivel de erosión, permeabilidad y humedad del suelo), topografía (pendiente), cobertura vegetal (uso del suelo, presencia de vegetación secundaria y vegetación densa) y perturbación (cercanía a caminos y localidades) (Fig. 2).

Una vez jerarquizado el problema se utilizan técnicas de comparación pareada dentro de cada jerarquía, con la finalidad de hacer juicios simples a través de la jerarquía utilizando la escala fundamental (Tabla 1), y de esta manera llegar a las prioridades globales de dichas alternativas. En un problema de decisión de tipo espacial, las alternativas son representadas en una base de datos SIG, donde cada capa, o mapa, contiene los valores de los atributos

asignados a las alternativas y cada alternativa se relaciona con los atributos del nivel superior (Malczewski, 1999).

Estandarización de criterios

Los mapas de criterios poseen diferentes escalas de medida; el PAJ requiere que los valores de estos sean transformados a unidades comparables para poder correr el modelado cartográfico (Malczewski, 1999). Este procedimiento se realizó estableciendo la prioridad relativa de cada uno de los rangos que comprendía cada criterio, se definieron cinco niveles de prioridad (S1, S2, S3, N1 y N2), donde S1 representa la máxima prioridad y N2 la prioridad nula (Tabla 2). Después de determinada la importancia relativa, se crearon matrices de comparación pareada y mediante el valor máximo (se divide cada valor por el máximo valor), se obtuvieron los valores estandarizados de los subcriterios (Tabla 3).

Obtención de los pesos (W)

La importancia relativa (W) de los subcriterios, se obtuvo mediante la opinión de 21 expertos en el tema de restauración ecológica de México, España, Paraguay y Vene-

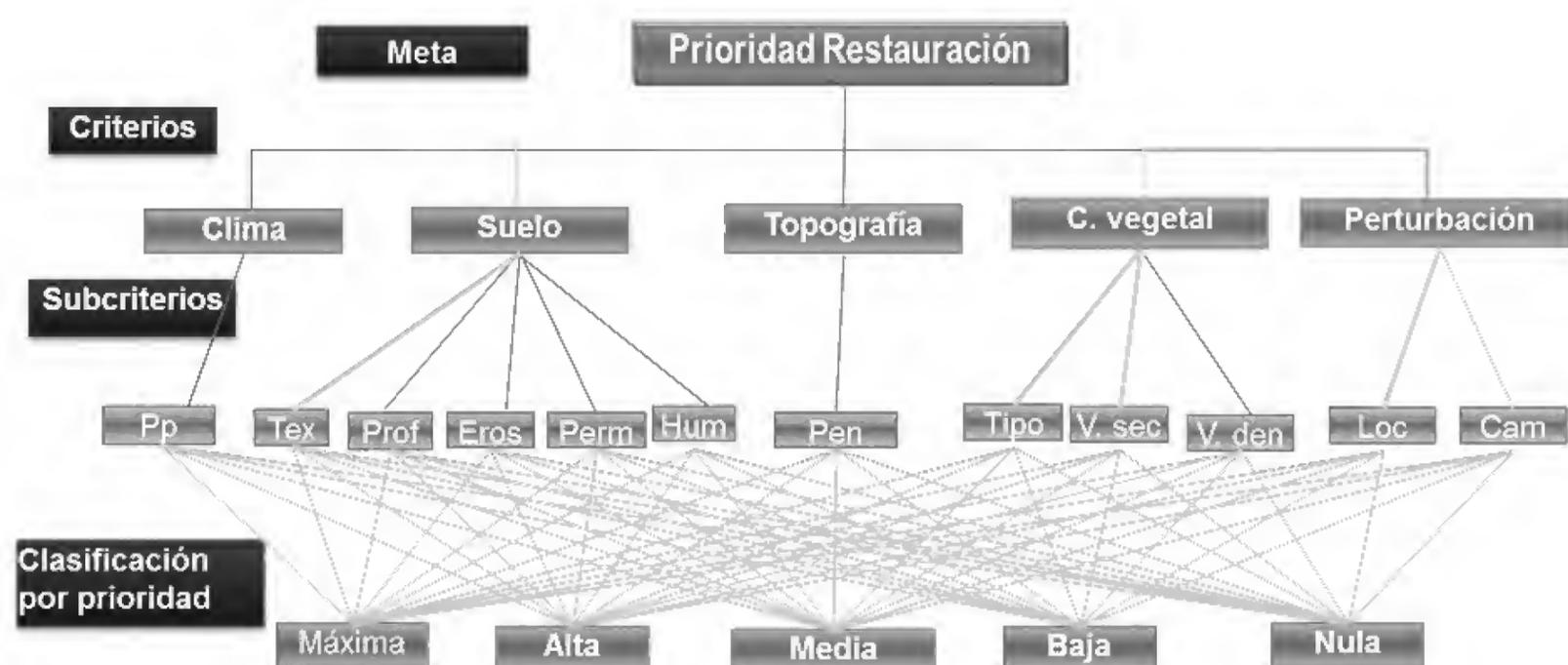


FIGURA 2. Organización jerárquica de los criterios considerados para obtener las áreas prioritarias a restaurar.

Pp: precipitación; Tex: textura; Prof: Profundidad; Eros: erosión; Perm: Permeabilidad; Hum: Humedad; Pen: pendiente; C.vegetal: cobertura vegetal; V.Sec: Vegetación secundaria; V.den: Vegetación densa; Loc: localidades; Cam: caminos.



TABLA 1. Escala fundamental del Proceso de Análisis Jerárquico (PAJ).

Intensidad de importancia	Definición	Explicación
1	Igual importancia	Las dos actividades contribuyen de igual manera al objetivo
3	Importancia moderada	La experiencia y el juicio moderadamente a favor de una actividad sobre la otra
5	Importancia fuerte	La experiencia y el juicio fuertemente a favor de una actividad sobre la otra
7	Importancia muy fuerte o importancia demostrada	Una actividad es fuertemente favorecida sobre la otra
9	Extrema importancia	La evidencia favorece una actividad sobre la otra, es del orden de afirmación más alto posible
2,4,6,8	Valores intermedios entre los valores de escala	Cuando es necesario un término medio
Recíproco distinto a cero	Si se asigna a_{ij} al comparar la actividad i con la j , entonces se asigna $a_{ji}=1/a_{ij}$ al comparar la j con la i	Supuesto razonable

zuela. Los pesos de las matrices construidas por cada experto, así como su consistencia, se calcularon con el módulo Weight del programa IDRISI Selva. Para determinar la importancia relativa (W) de cada criterio se promediaron los resultados de las matrices que resultaron consistentes. La consistencia es el grado de coherencia lógica entre las comparaciones pareadas (Fondo Mexicano para Conservación de la Naturaleza, 2009) y se calculó para asegurar que las respuestas de las matrices fuera lo más objetiva posible, valores de consistencia menores o igual a 0.10 son considerados aceptables (Gómez y Barredo, 2005).

Generación del mapa de áreas prioritarias para restauración ecológica

Se diseñó un modelo cartográfico para crear el mapa de áreas prioritarias para restauración ecológica (Fig. 3), el cual se implementó en el programa IDRISI Selva mediante el módulo Macro Modeler. En el modelo se incluyen restricciones al objetivo como las zonas urbanas, carreteras pavimentadas, caminos de terracería, cuerpos y corrientes de agua. Se crearon mapas booleanos con cada una de las restricciones, en donde a las áreas consideradas restric-

nes se les asignó el valor de 0 y a las áreas consideradas dentro del análisis se les asignó el valor 1. Del mapa de áreas prioritarias para restauración ecológica, se eligieron 98 puntos al azar, se consideraron 20 puntos por prioridad de atención para realizar la verificación en campo (Chuvioco, 2008).

Identificación de los sitios de referencia potenciales

La identificación de los sitios de referencia potenciales en la zona de estudio se realizó mediante una clasificación supervisada de dos imágenes de satélite multispectrales Landsat 5 TM (path y row 25-46 y 26-46), tomadas en el mes de abril del año 2011, a las cuáles se les realizaron correcciones radiométricas, atmosféricas y topográficas, con apoyo del programa IDRISI Selva.

Los sitios de entrenamiento se determinaron a través de salidas de campo, por lo que se georreferenciaron 145 puntos de las cuatro clases determinadas (bosque, zonas de uso agropecuario, áreas desprovistas de vegetación [incluye las áreas urbanas] y cuerpos de agua) (Gil, García, Ponvert-Delisle, Sánchez y Vega, 2003). Con los sitios de entrenamiento se generaron las firmas

TABLA 2. Clasificación de valores para estandarizar los subcriterios para determinar la prioridad de restauración.

Precipitación (mm)		Humedad*		Textura	
Rango	Valor	Rango	Valor	Tipo	Valor
600 - 800	S1	2	S1	Fina	S1
800 - 1200	NI	8	S3	Gruesa	S2
1200 - 1500	S3	10 a 12	NI	Media	S3
1500 - 2000	S3	*Número de meses que permanece con humedad el suelo			
2000 - 2500	S2				
2500 - 4000	S2				
Profundidad (m)		Permeabilidad		Erosión	
Rango	Valor	Tipo	Valor	Tipo	Valor
0 - 1	S1	Media a alta	S3	Severa	S1
> 1	NI	Baja a alta	S2	Media	S2
		Baja a media	S1	Leve	S3
		Baja	S1	Nula	N2
		Alta	NI		
Pendiente (°)		Uso del suelo		Erosión	
Rango	Valor	Tipo	Valor	Tipo	Valor
0 a 10	NI	Agrícola	S1	Severa	S1
10 a 20	S3	Bosque	NI	Media	S2
20 a 30	S2	Matorral	S2	Leve	S3
> 30	S1	Pastizal	S1	Nula	N2
		Sin vegetación	S1		
Pendiente (°)		Uso del suelo		Erosión	
Rango	Valor	Tipo	Valor	Tipo	Valor
0 a 10	NI	Agrícola	S1	Severa	S1
10 a 20	S3	Bosque	NI	Media	S2
20 a 30	S2	Matorral	S2	Leve	S3
> 30	S1	Pastizal	S1	Nula	N2
		Sin vegetación	S1		
Vegetación densa		Vegetación secundaria		Localidades	
Tipo	Valor	Tipo	Valor	Tipo	Valor
Presente	NI	Presente	S2	50-200	S1
Ausente	S1	Ausente	S1	200-600	S2
				600-1000	S3
				>1000	NI
Caminos					
Tipo	Valor				
50-200	S1				
200-600	S2				
600-1000	S3				
>1000	NI				



TABLA 3. Matriz de comparación pareada para estandarizar el subcriterio precipitación.

Precipitación	S1	S2	S3	N1	N2
S1	1				
S2	1/2	1			
S3	1/5	1/3	1		
N1	1/7	1/6	1/4	1	
N2	1/9	1/7	1/3	1/2	1

S1= Máxima prioridad; S2= Alta prioridad; S3= Media prioridad; N1= Baja prioridad y N2= Nula prioridad

espectrales con el módulo Makesig del programa IDRISI. La clasificación se ejecutó con el método Fisher (Discriminación lineal) en el programa IDRISI Selva, después se eliminaron los píxeles aislados y se generalizó la ima-

gen clasificada aplicando un filtro de modo (Eastman, 2012).

La validez de la clasificación se realizó mediante una “matriz de confusión”, de la cual se obtuvo la fiabilidad global de la imagen clasificada y el índice Kappa (Chuvieco, 2008). La verificación en campo, se llevó a cabo bajo un diseño aleatorio simple con 110 puntos de muestreo, aproximadamente 27 por clase temática. Con la clase temática determinada como bosque, se realizó un mapa booleano y se eliminaron las áreas con algún tipo de perturbación, como las áreas bajo algún tipo de aprovechamiento y zonas donde hay trabajos de conservación y restauración de suelos. La información se obtuvo de la Comisión Nacional Forestal (2010, 2011 y 2012), quedando presumiblemente las áreas con vegetación con menor perturbación mediante álgebra de mapas.

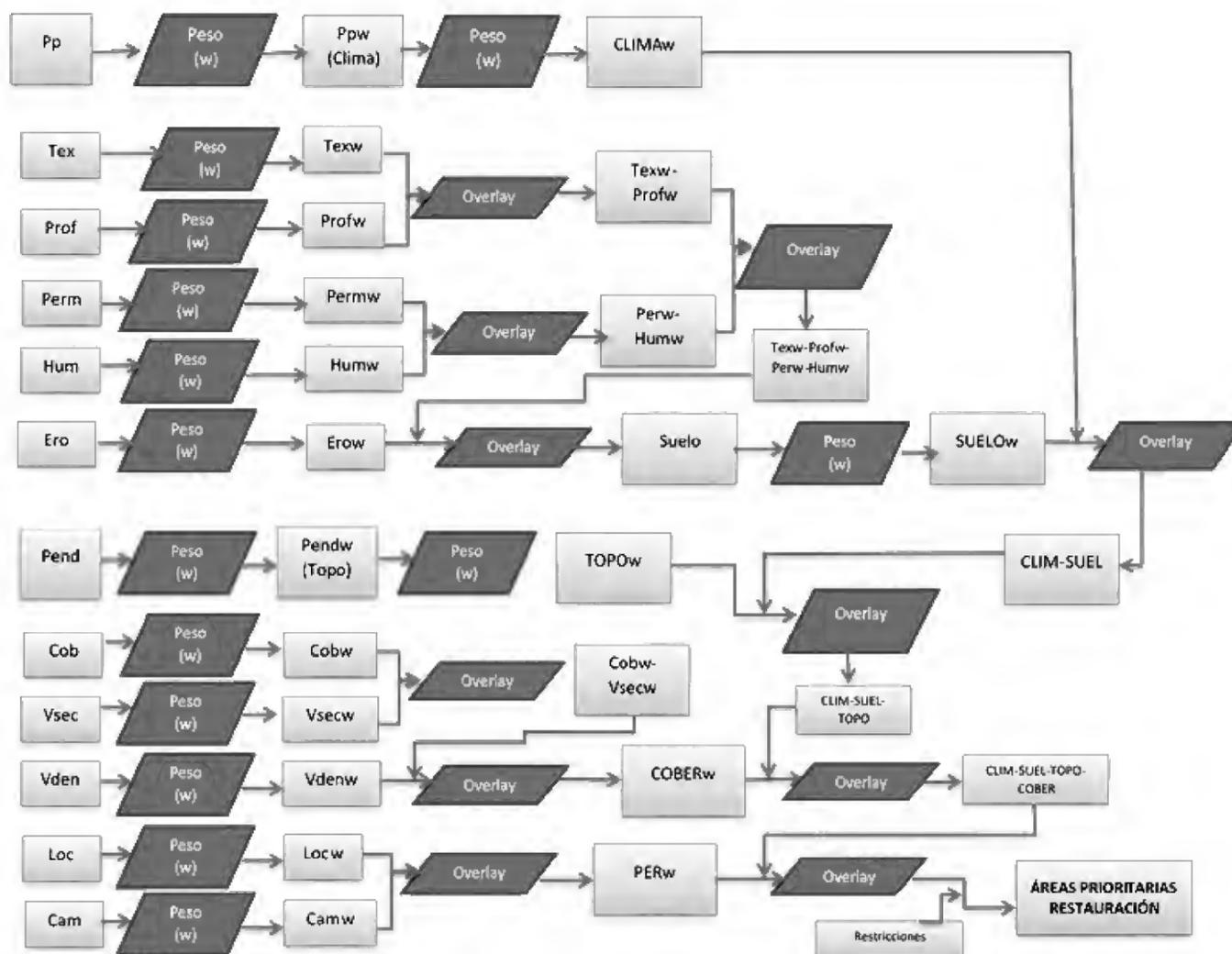


FIGURA 3. Modelo cartográfico para generar el mapa de áreas prioritarias para restauración ecológica. Pp: precipitación; Tex: textura; Prof: Profundidad; Eros: erosión; Perm: Permeabilidad; Ero: erosión; Hum: Humedad; Pen: pendiente; Cob: cobertura vegetal; VSec: Vegetación secundaria; Vden: Vegetación densa; Loc: localidades; Cam: caminos; Topo: topografía; Cober: cobertura.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una fase crucial del PAJ es la asignación de pesos a los subcriterios, de las 21 encuestas aplicadas a expertos, únicamente 14 criterios resultaron consistentes. La opinión de los expertos fue variable, existiendo diferencias de hasta 0.73 entre valores máximos y mínimos (escala es de 0 a 1), por tanto, se utilizaron los promedios de los vectores calculados de las matrices consistentes. De tal manera que fue factible aplicar la técnica apropiadamente con los pesos asignados a cada criterio y subcriterio (Tabla 4).

La prioridad de restauración dominante es la prioridad baja (56%) y se encuentra principalmente en las áreas boscosas destinadas a la silvicultura (Fig. 4). En segundo lugar, las áreas sin prioridad que ocupan 21% de la superficie (Tabla 5) con presencia de vegetación boscosa densa. En ambas categorías se concentran aproximadamente tres cuartas partes de la superficie de la región Chignahuapan-Zacatlán.

La prioridad de restauración media concentró 14% de área de estudio caracterizándose por ser áreas destinadas a la agricultura y ganadería y en algunos casos con problemas de erosión. Mientras que la prioridad alta y máxima agrupó únicamente 4% de la superficie principal-

mente en la parte noreste y central en áreas que en algún momento fueron usadas para actividades agropecuarias. A pesar de ser un área de menor proporción, debido a las características de pendiente alta o descubiertas de vegetación, requieren atención en el corto plazo para evitar un proceso de deterioro mayor. La ventaja de usar la evaluación multicriterio es que proporciona una herramienta de manejo para la determinación de sitios prioritarios con diferentes fines de manera fácil y precisa (Echeverría *et al.*, 2010; Bojórquez-Tapia *et al.*, 2004; Cipollini, Maruyama y Zimmerman, 2005).

Cabe señalar que en la verificación de campo se obtuvo 75% de certeza. Los resultados obtenidos se consideran aceptables, sin embargo, podrían obtenerse mejores resultados si se anexaran más criterios al estudio y se manejara una escala más grande, para lo cual se tendría que generar la cartografía de la zona de estudio. Otro punto, que podría mejorar los resultados sería incluir la opinión de personas que habitan en la zona de estudio, ya que ellas conocen mejor las condiciones biofísicas del área y su comportamiento a lo largo del tiempo.

Al identificar los sitios de referencia, la clasificación supervisada indicó 46% para la categoría de bosque, 42%

TABLA 4. Pesos de criterios y subcriterios, definidos por los expertos.

Criterios					
Criterio	Peso (W)	Criterio	Peso (W)		
Clima	0.0856	Cobertura Vegetal	0.3254		
Suelo	0.2843	Perturbación	0.3060		
Topografía	0.3048				
Subcriterios					
Suelo	Peso (W)	Cobertura vegetal	Peso (W)	Perturbación	Peso (W)
Textura	0.1409	Uso del Suelo	0.5674	Localidades	0.4452
Profundidad	0.1478	Vegetación secundaria	0.1388	Caminos	0.5548
Permeabilidad	0.1268	Vegetación densa	0.2938		
Erosión	0.4296				
Humedad	0.1550				

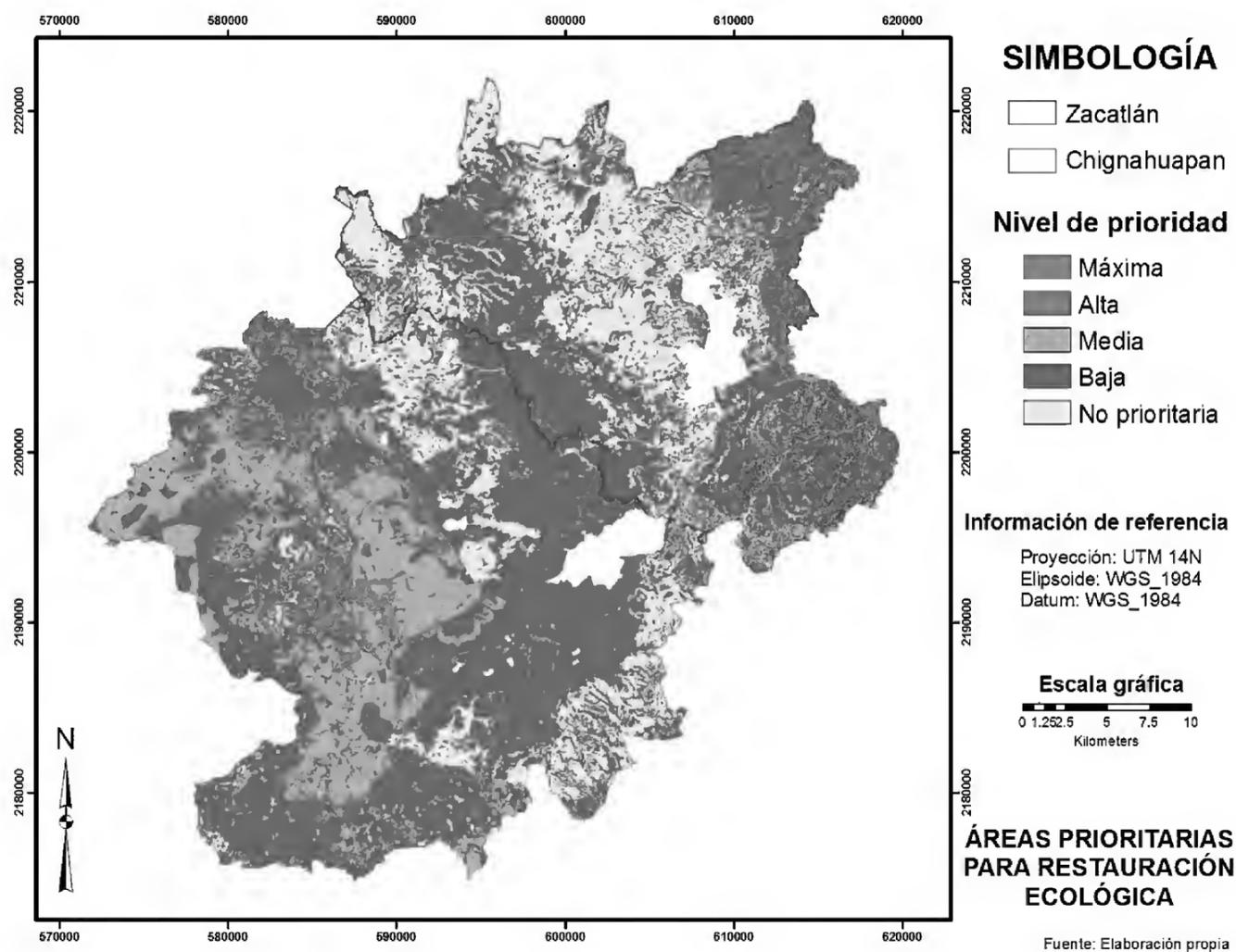


FIGURA 4. Distribución de las áreas con necesidad de ser restauradas clasificadas por orden de prioridad en Chignahuapan y Zacatlán.

TABLA 5. Superficie ocupada por prioridad de restauración en los municipios de Chignahuapan y Zacatlán, Puebla.

Prioridad	Chignahuapan ¹		Zacatlán ²		Total ³	
	Superficie (ha)	Superficie (%)	Superficie (ha)	Superficie (%)	Superficie (ha)	Superficie (%)
Máxima	271.6	0.36	707.0	1.44	978.6	0.78
Alta	1894.0	2.49	2344.5	4.79	4238.5	3.39
Media	15899.4	20.91	1518.7	3.10	17.418.1	13.94
Baja	44332.0	58.31	26596.9	54.35	70928.8	56.76
No prioridad	10878.8	14.31	15293.3	31.25	26172.2	20.95
Total	73275.83		46462.44		119738.27	

1. Superficie total de Chignahuapan, 76 023 ha
 2. Superficie total de Zacatlán, 48 933 ha
 3. Superficie total del área de estudio de 124 956 ha

para las áreas con uso agrícola y pecuario, y 11.5% para las áreas sin vegetación aparente y áreas con uso urbano. La exactitud global del proceso de clasificación es de 79%, de acuerdo con lo obtenido en la matriz de confusión (Tabla 6), considerándose aceptable para imágenes Landsat (Chuvieco, 2008); así mismo se obtuvo un valor de

0.67 de Índice Kappa, que de acuerdo con Landis y Koch (1977), es considerado como bueno. En el caso particular de la categoría Bosque —objetivo de la investigación— se tienen valores altos en la confiabilidad (> 84%); lo cual indica que la cobertura de bosque se ha clasificado de manera correcta y el error se disminuye en gran medida.

TABLA 6. Matriz de confusión resultante de la clasificación supervisada.

		Datos de referencia (terreno)					Total	Exactitud Usuario	Error Comisión
		1	2	3	4				
Datos de Clasificación	Clases*								
	1	43	0	1	7	51	84.3	16	
	2	0	4	0	0	4	100	0	
	3	0	0	8	8	16	50	50	
	4	2	0	5	31	38	81.6	18	
Total		45	4	14	46	109			
Exactitud productor		95.6	100	57.1	67.4				
Error Omisión		4	0.00	43	33				

Exactitud global = 79; Índice Kappa = 0.67

Fuente: Elaboración propia

* Los números del 1 al 4 hacen referencia a las categorías de clasificación: 1. Bosque; 2. Cuerpo de agua; 3. Áreas sin vegetación aparente y 4. Áreas de uso agropecuario.

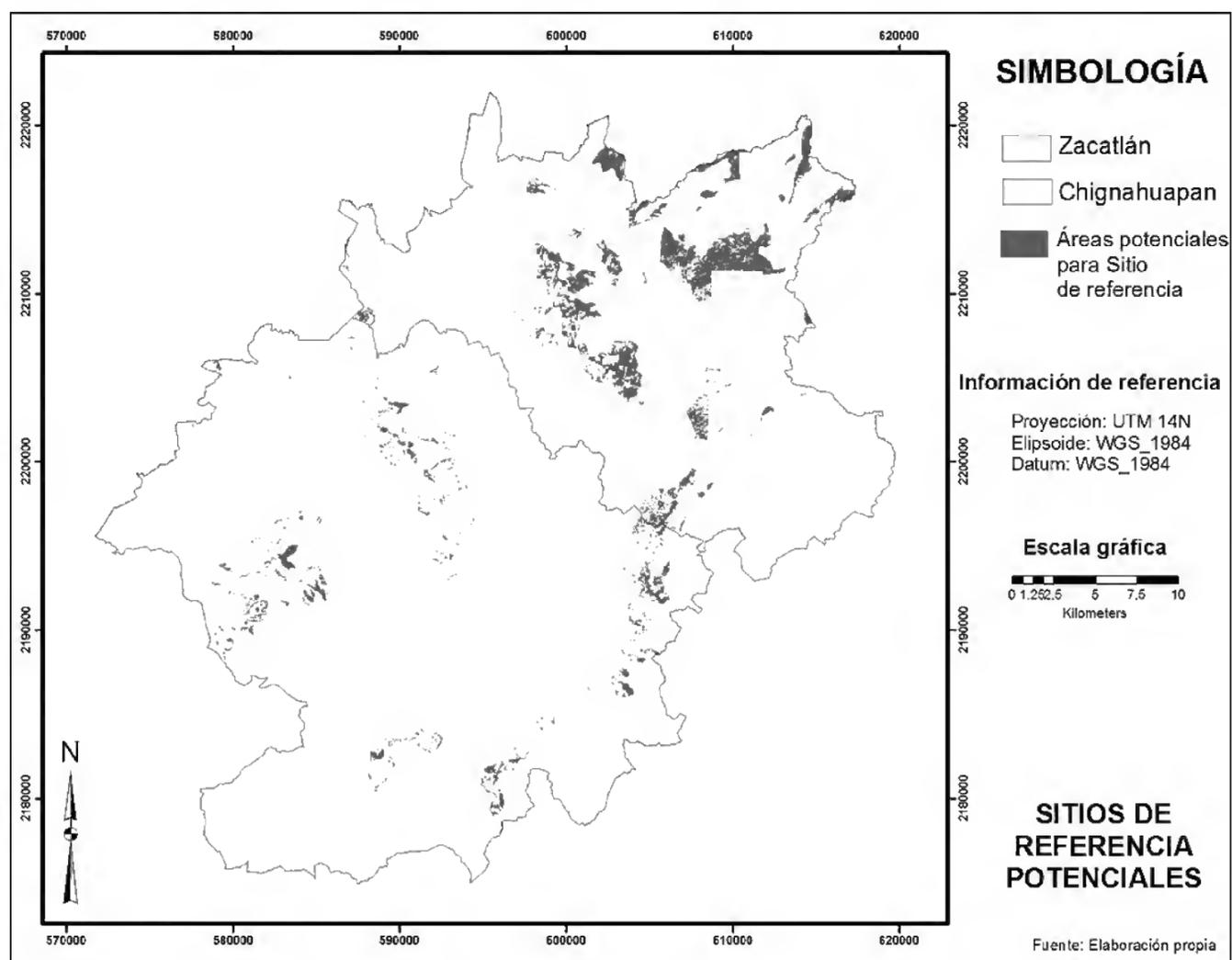


FIGURA 5. Distribución de las áreas con potencial para ser usadas como sitios de referencia en la región Chignahuapan-Zacatlán.

Una vez eliminadas las áreas con algún tipo de perturbación, las zonas con potencial para fungir como sitios de referencia se estimaron en aproximadamente 4753 ha (Fig. 5), de las cuáles 3637 ha corresponden al municipio

de Zacatlán y 1115 ha al municipio de Chignahuapan. Al sobreponer el mapa de sitios de referencia con el mapa de áreas prioritarias para restauración ecológica, se vuelve de mayor importancia ya que facilita la ubicación de las posi-



bles áreas que servirán como bosques o sitios de referencia más cercanas al sitio de restauración (Moore, Covington y Fulé, 1999).

CONCLUSIONES

La mayor parte de la región Chignahuapan-Zacatlán (79%) se calificó con alguna prioridad de restauración y solamente 21% se consideró como de nula prioridad. En la región, solo una pequeña porción del total (4%) correspondió a prioridades alta y máxima y aunque es poca la superficie, esta debe atenderse de manera prioritaria para evitar un mayor deterioro en el corto o mediano plazo. Por otro lado, en la región se detectó 8% de la superficie boscosa con potencial para fungir como sitios de referencia para la restauración. Dada la capacidad que tiene para combinar múltiples criterios de decisión, incorporar los juicios y opiniones de las diferentes partes interesadas, así como tratar información espacial, el Proceso Analítico Jerarquizado se adecuó en la identificación de áreas potenciales prioritarias para restauración ecológica y para la priorización de actividades.

RECONOCIMIENTOS

Este estudio fue financiado por la LPI1 “Manejo Sustentable de Recursos Naturales” dentro del proyecto Restauración Ecológica de Áreas Prioritarias en la región de Chignahuapan-Zacatlán, Puebla, del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillos. Agradecemos el apoyo del Ing. Manuel Morales Martínez, presidente de la Asociación Regional de Silvicultores de Chignahuapan-Zacatlán, por el apoyo brindado en el desarrollo del estudio.

REFERENCIAS

Avalos, F. S. y Baca C., J. C. (2007). Diagnóstico socioeconómico y de manejo forestal. Unidad de Manejo Forestal-Zacatlán. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SMRN)-Asociación Regional de Silvicultores Chignahuapan-Zacatlán, A. C. 280 p.

Gómez D., M. y Barredo C., J. I. (2005). *Sistemas de Información geográfica y evaluación multicriterio, en la ordenación del territorio (2a ed.)*. Madrid, España: RA-MA.

Bojórquez-Tapia, L. A., de la Cueva, H., Díaz, S., Melgarejo, D., Alcantar, G., Solares, M. J., Grobet, G. y Cruz-Bello, G. (2004). Environmental conflicts and nature reserves: redesigning Sierra San Pedro Mártir National Park, México. *Biological Conservation*, 117 (2), 111-126.

Centro Nacional de Desarrollo Municipal. 1999. *Enciclopedia de los Municipios de México: Los Municipios de Puebla*. Gobierno del Estado de Puebla. Recuperado de <http://www.e-local.gob.mx/work/templates/enciclo/puebla/Mpios/21053a.htm>.

Chávez G., H. (2014). *Áreas prioritarias mediante escenarios de deforestación y servicios ambientales en la Sierra Norte de Puebla*. Tesis de maestría no publicada, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México.

Chuvieco, S. E. (2008). *Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio (3a ed.)*. Barcelona, España: Ariel.

Cipollini, K., Maruyama, A. L. y Zimmerman, C. L. (2005). Planning for restoration: a decision analysis approach to prioritization. *Restoration Ecology*, 13 (3), 460-470.

Clewell, A. F. y Aronson, J. (2007). *Ecological restoration principles, values, and structure of an emerging profession*. Washington, D.C.: Society for Ecological Restoration International.

Eastman, R. J. (2012). *IDRISI Selva. Guía para SIG y procesamiento de imágenes. (Manual versión 17)*. Argentina: Clark University.

Echeverría, C., Schiappacasse, I., Urrutia, R., Cárcamo, M., Becerra, P., Smith, C. y Holmgren, M. (2010). *Restauración de ecosistemas degradados para la conservación de la biodiversidad y el desarrollo rural en la zona semiárida de Chile central*. Valdivia, Chile: Proyectos Reforlan-RUE 33.

Fondo Mexicano para Conservación de la Naturaleza. (2009). *Análisis, priorización de alternativas y plan estratégico para mejorar la competitividad del manejo del agua, conservación de la biodiversidad y los recursos forestales de los bosques templados en México (Informe final)*. México: United States Agency for International Development.

Gálvez, J. (2002). *La restauración ecológica: conceptos y aplicaciones*. Guatemala, Guatemala: Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente.

- Geneletti, D., Orsi, F., Lanni, E. y Newton, A. C. (2011). Identificación de áreas prioritarias para la restauración de bosques secos. En A. C. Newton y N. Tejedor (Eds.), *Principios y práctica de la restauración del paisaje forestal: Estudios de caso en las zonas secas de América Latina* (290-327). Gland, Suiza y Madrid, España: UICN.
- Gil, J. L., García, E. B., Ponvert-Delisle, D. R., Sánchez, R. y Vega, M. B. (2003). Enfoques para la clasificación digital de imágenes mono y multiespectrales y su implementación en el software cubano TN Estudio V2.0. *Revista de Teledetección*, 20, 35-52.
- Landis, J. R. y Koch, G. G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33 (1), 159-174.
- Malczewski, J. (1999). *GIS and Multicriteria decision analysis*. Ontario, Canadá: John Wiley. Inc.
- Martínez-Romero, E. 1996. La restauración ecológica. *Ciencias*, 43, 56-61.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2003). *Restauración de ecosistemas a partir del manejo de la vegetación. Guía metodológica*. Bogotá D. C., Colombia.
- Moore, M. M., Covington, W. W. y Fulé, P. Z. (1999). Reference conditions and ecological restoration: a southwestern Ponderosa pine perspective. *Ecological Applications*, 9 (4), 1266-1277.
- Olivas G., U. E., Valdez L., J. R., Aldrete, A., González G., M. J. y Vera C., G. (2007). Áreas con aptitud para establecer plantaciones de maguey cenizo: definición mediante análisis multicriterio y SIG. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 30 (4), 411-419.
- Society for Ecological Restoration. (2004). *Principios de SER International sobre la restauración ecológica*. Tucson, Arizona.

Manuscrito recibido el 25 de marzo de 2014.

Aceptado el 6 de junio de 2016.

Este documento se debe citar como:

González O., M. L., Plascencia-Escalante, F. O. y Martínez-Trinidad, T. (2016). Áreas prioritarias para restauración ecológica y sitios de referencia en la región Chignahuapan-Zacatlán. *Madera y Bosques*, 22 (2), 41-52.



Efecto geográfico de la cubierta del suelo y el mes calendario, en la meteorología superficial e insolación de bosques de coníferas en México

Geographic, land cover and calendar month effect in on surface meteorology and insolation in coniferous forests in Mexico

Víctor M. Rodríguez-Moreno^{1*}, J. Ariel Ruíz-Corral², Gabriela Ramírez-Ojeda² y Ramiro Pérez-Miranda³

¹ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (Inifap). Campo Experimental "Pabellón". Pabellón de Arteaga, Ags., México.

² Inifap. Campo Experimental "Centro Altos de Jalisco". Tepatitlán de Morelos, Jal., México.

* Autor de correspondencia.

rodriguez.victor@inifap.gob.mx

³ Inifap. Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Conservación y Mejoramiento de Ecosistemas Forestales (Cenid-Comef). México, D.F.

RESUMEN

Para evidenciar cómo influyen la localización geográfica del sitio de muestreo, la cubierta del suelo y el mes calendario en la expresión de trece indicadores indirectos de meteorología superficial y de insolación, se aplicó la técnica de re-escalamiento de datos basado en latitud para calcular el ángulo cenital en pares coordinados, en bosques de coníferas de México. Esta serie histórica de datos cubre un periodo de 22 años de registros diarios. Se definieron diez sitios de muestreo en cinco localidades geográficas con dos coberturas absolutas del suelo (bosque natural y deforestado) con frontera espacial común; esta condición de vecindad compartida fue obligada para el estudio. El análisis estadístico arrojó diferencias significativas ($p < 0.05$), para cobertura del suelo, sitio de muestreo y mes calendario. En la expresión de los índices, se observó un aparente efecto latitudinal de cercanía a la línea de costa lo cual parece sugerir su influencia en los índices evaluados. Los resultados obtenidos sugieren la ampliación de la base de datos para incluir datos directos de meteorología (velocidad y dirección del viento) e insolación, necesarios para caracterizar la respuesta de la cubierta del suelo para invarianza espectral según las variaciones en el flujo radiante, para las razones de reflectancia, absorbancia y transmitancia.

PALABRAS CLAVE: coníferas, insolación, invarianza espectral, meteorología superficial, re-escalamiento.

ABSTRACT

In order to demonstrate the influence of geographic location of a sampling site, land cover and calendar month on the expression of thirteen indirect indicators of surface meteorology and solar radiation, the technique of information re-scaling was applied based on latitude in order to calculate the zenith angle in coordinated pairs, in coniferous forests in Mexico. This historical series of information covers a period of 22 years of daily records. Ten sampling sites were defined in five geographical localities with two absolute land covers (natural forest and deforested) with a common spatial border; this neighboring condition was mandatory for the study. Statistical analysis revealed significant differences ($p < 0.05$), for land cover, sampling site and calendar month. In the expression of the indices, an apparent latitudinal effect was observed of proximity to the coastline, which seems to suggest its influence on the evaluated indexes. The results suggest the extension of the database to include direct information pertaining to meteorology (wind speed and direction) and solar radiation. These data are necessary in order to characterize the response of the land cover for spectral invariance according to variations in the radiant flow, for the ratio of reflectance, absorbance and transmittance.

KEYWORDS: coniferous, solar radiation, spectral invariance, surface meteorology, re-scaling.

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2014), entre los grandes grupos de vegetación, los bosques de coníferas y encino en México repre-

sentan uno de los recursos forestales más importantes del país, y que ocupan alrededor de 16% de la superficie del territorio nacional. A los bosques de coníferas los caracteriza una amplia diversidad florística y ecológica,

y se les encuentra en zonas templadas, húmedas y subhúmedas constituidas por gimnospermas de hojas perennes. En México se les encuentra desde a nivel del mar y hasta el límite de la vegetación arbórea (3000 m snm). La FAO (*Food and Agriculture Organization*, 2012) de las Naciones Unidas menciona que los bosques han cumplido una función destacada en la historia de la humanidad, y milenio tras milenio el crecimiento demográfico y el desarrollo han venido acompañados en todo el mundo por la deforestación constante. La interacción entre los seres humanos y los bosques ha variado en función de los cambios socioeconómicos. Una de las enseñanzas de la historia es que los vínculos entre el uso de los bosques (incluida la deforestación) y el desarrollo económico y social, y entre la destrucción de los bosques (con el consiguiente daño ambiental irreversible) y el deterioro económico son estrechos.

El estudio de los ecosistemas forestales y su tasa de deforestación son de importancia, entre otras razones, por su efecto en las contribuciones de gases de efecto invernadero, por el impacto por la pérdida de biodiversidad (Tucker y Townshend, 2000), y por los fundamentales servicios ecosistémicos que proveen (entre ellos el de regulación climática) (Nodvin, 2008). Según Gibbs, Brown, Niles y Foley (2007) los ecosistemas de bosques secuestran y almacenan más carbono que cualquier otro ecosistema terrestre y son un factor natural de mitigación al cambio climático; pero cuando son aclarados o degradados, sobreexplotados o incendiados, se convierten en aportantes del gas de efecto invernadero, dióxido de carbono (CO₂) (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2012). Un efecto colateral adverso es que a escala local, la tasa de erosión eólica e hídrica aumenta al no tener el suelo una cobertura vegetal que lo mantenga cohesionado y los ríos y arroyos son afectados por un incremento en el aporte de sedimentos arrastrados aguas abajo a consecuencia del aumento en la velocidad del escurrimiento superficial.

La simulación y análisis de los procesos de intercambio atmósfera-superficie terrestre son de importancia y cubren una gama de interacciones entre los ecosistemas en

la Tierra. Según Gubler, Fiddes, Keller y Gruber (2011) la mayor dificultad en el modelado de datos radica en la complejidad de las formas del terreno y en dos situaciones más: (i) la alta resolución requerida para capturar la fuerte variación lateral causada por la topografía, y en consecuencia (ii) la carencia de datos meteorológicos en el sitio a escalar.

El método de re-escalamiento es de utilidad para obtener información climática de alta resolución a partir de modelos climáticos globales de resolución gruesa. En esta técnica se aumenta el número de píxeles hacia un par coordenado dado que representan la localización de un sitio de interés. Las bases de datos climáticas son una colección de registros de elementos relacionados con una ubicación geográfica única en función del tiempo. Los paquetes de datos se almacenan en intervalos de tiempo que incluyen minuto, hora, día y mes de un año calendario y años. El conjunto de datos se ajusta a un diseño conceptual y estructural, de tal forma que permite ejecutar consultas relacionales; en este diseño las celdas solo pueden contener un solo valor. Con un periodo de registro de veintidós años (1983-2005), la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) mantiene disponible y en línea, una base de datos de cobertura global de registros diarios de dieciséis variables de meteorología superficial y energía solar (*SSE-Surface meteorology and Solar Energy*). Chang y Madjarov (2012) la mencionan como en extremo valiosa por su continuidad en el espacio y en el tiempo y por proveer varias fuentes cualitativas de valor debido a que: a) cubren una amplia selección de variables meteorológicas y solares concentradas en un solo diseño estructurado; b) provienen de aplicar una metodología de cálculo consistente que asegura su precisión; y c) se distribuye en un formato adecuado y accesible para su acceso en línea.

Los datos meteorológicos obtenidos por método indirecto, bien a través de sensores a bordo de plataformas satelitarias o por dispositivos móviles, son la fuente principal para el estudio del clima y de los procesos climáticos en el planeta. Aplin (2004) menciona que los datos adquiridos por percepción remota se han convertido en el meca-



nismo clave para generar datos ecológicos, pero que su uso tiene limitaciones como el detalle espacial de los datos. En este sentido, se puede mencionar que las limitaciones se circunscriben a su resolución espacial y temporal. Este tipo de datos son de utilidad para apoyar estudios de afectaciones de los ecosistemas continentales y para alimentar modelos para obtener escenarios del comportamiento del clima en el mediano y largo plazo. Estos estudios, a escala regional, son derivados de observaciones satelitales con la suficiente precisión para hacerlos confiables, especialmente en regiones donde las mediciones directas son poco comunes o prácticamente inexistentes. De acuerdo con Lovejoy, Schertzer, Tessier y Gaonach (2001) los espacios geofísico y geográfico son caracterizados por un amplio rango de escalamientos sistemáticos que implican una fuerte dependencia sistemática de la resolución espacial cuando provienen de percepción remota.

OBJETIVOS

Aplicar la técnica de re-escalamiento por latitud a siete indicadores indirectos de meteorología superficial, y seis

de insolación en sitios de muestreo de bosques de coníferas en México, para evidenciar su variación temporal por: localización geográfica, la condición de cobertura del suelo y el mes calendario.

Evaluar entre los sitios de muestreo el efecto por latitud de cercanía a la línea de costa para evidenciar su dinamismo espacial.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio se localiza en las regiones centro y pacífico de México (Fig. 1). Los sitios de muestreo se ubicaron en los límites administrativos de cinco entidades federativas: Coahuila, Jalisco, Durango, Michoacán y Tlaxcala. De cada sitio se obtuvieron datos de las especies dominantes en los bosques naturales de coníferas y del grupo funcional presente; para los sitios deforestados, se registraron los datos de especies presentes y del tipo de suelo. En la tabla 1 se presenta la descripción de los sitios de muestreo.

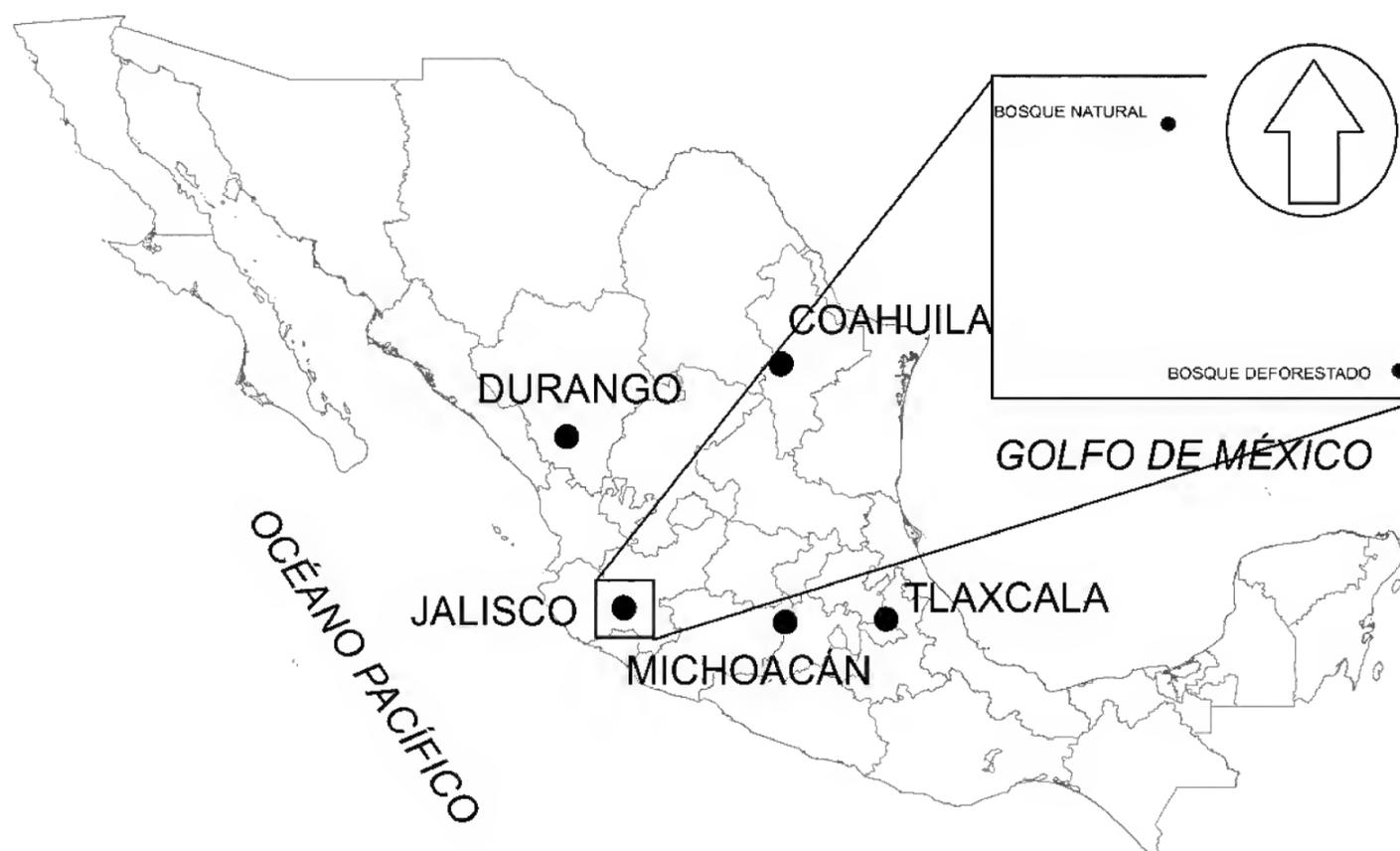


FIGURA 1. Distribución geográfica de los sitios de muestreo. Cada sitio comparte frontera espacial común entre la condición “bosque natural” y “deforestado”.

TABLA 1. Descripción de los sitios de muestreo según su condición para cobertura del suelo y vegetación dominante.

Entidad	Cond	Elevación (msnm)	Pendiente	Descripción
Coahuila	BN	2969	55 / N	La vegetación dominante es el oyamel (<i>Abies vejarii</i> Martinez), con una cobertura superior a 70%. Es un árbol de copa cónica de hasta 35 m de altura. Altura promedio de los árboles, 20 m; los estratos inferiores están cubiertos por arbustos y herbáceas.
	DEF	2877	30 / N	Es una zona abierta con una sucesión de pastos y arbustos.
Jalisco	BN	2185	16 / SW	Es un bosque de pino (<i>Pinus michoacana</i> Martinez) con una cobertura superior a 90%. Altura promedio de los árboles, 22 m; en los estratos inferiores se encuentran principalmente arbustos y pastos.
	DEF	2074	03 / SW	La cobertura del suelo está dominada por pastizal natural y vegetación secundaria. Es un área despejada de árboles y se usa para pastoreo.
Michoacán	BN	3030	37 / N	Es un bosque de oyamel (<i>Abies religiosa</i> (Kunth Schltdl. et Cham.), con una cobertura superior a 80%. En los estratos inferiores se encuentran arbustos y herbáceas.
	DEF	2947	24 / S	Es una zona abierta.
Tlaxcala	BN	2793	14 / NW	El tipo de vegetación dominante es bosque de coníferas (<i>Pinus patula</i> Schl. et Cham), con una cobertura superior a 90%. Altura promedio de los árboles, 29 m; en los estratos inferiores se encuentran arbustos y pastos principalmente.
	DEF	2761	5 / zenit	La cubierta del suelo es un pasto de cobertura media, amacollado y de poca altura. Es un área despejada de árboles y que se usa principalmente para pastoreo.
Durango	BN	2581	zenit	Es una asociación de bosque de coníferas y encino (<i>Pinus leiophylla</i> Schl. & Cham., <i>P. durangensis</i> Ehren, <i>P. engelmanni</i> Carr.), con una cobertura superior a 60%. Los árboles tienen una altura promedio de 18 m y 20 m. No existe el estrato arbustivo y el herbáceo se compone de pastos, principalmente.
	DEF	2,590	zenit	Es una zona abierta, donde se aplicó la <i>matarrasa</i> *.

* *Matarrasa*, de acuerdo con la NOM-060-ECOL-1994 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2003), es la remoción total del arbolado de un área del bosque, para propiciar las condiciones de establecimiento de la regeneración de una nueva masa arbolada, en forma natural.

BN= Bosque natural; DEF= Deforestado; las unidades de la pendiente son en porcentaje y el indicador subsecuente corresponde a la orientación.

Descripción de la base de datos NASA SSE

La base de datos NASA SSE tiene un espaciamiento en el terreno de 1.25° de longitud x 1° de latitud. Por interpolación bilineal se producen regiones de 1° x 1°. La frecuencia de registro es diaria y abarcan el periodo del 1 de julio de 1983 al 30 de junio de 2005. En su contexto general, el formato de datos es *.txt* y de acuerdo con Grunewals, Kaiser, Guruz y Zellner (2012) en el proyecto HESMOS se dan las especificaciones de las interfaces de acceso a los mate-

riales y a las bases de datos del clima, así como de sus productos derivados. La NASA SSE registra los datos de dieciséis indicadores indirectos de meteorología superficial e insolación; sin embargo, para el presente trabajo, se seleccionaron seis para insolación y siete para meteorología superficial (Tabla 2).

Los datos en la NASA SSE se toman directamente o son calculados con base en los parámetros de los modelos de asimilación global GMAO (*Global Model and Assimilation*



TABLA 2. Indicadores indirectos de meteorología superficial e insolación incluidos en el estudio.

Índice	Unidades	Descripción
SWV_DWN	kWh/m ² / día	Insolación incidente promedio en una superficie horizontal de la tierra. Se refiere a la radiación total o global.
CLR_SKY	kWh/m ² / día	Insolación promedio en días despejados (< 10%)
CLR_DIF	kWh/m ² / día	Monto de energía electromagnética (radiación solar) incidente sobre la superficie de la Tierra en condición de cielo despejado con la radiación directa del sol bloqueada por una sombra o un disco de rastreo en la superficie terrestre.
CLR_DNF	kWh/m ² / día	Monto de energía electromagnética (radiación solar) en la superficie de la Tierra en condición de cielo despejado sobre una superficie plana perpendicular a los rayos del sol sin interferencias que bloqueen su trayectoria.
LWV_DWN	kWh/m ² / día	Promedio del flujo radiante descendente de onda larga
TOA_DWN	kWh/m ² / día	Monto de energía electromagnética incidente en la parte alta de la atmósfera
PS	kPa	Presión atmosférica promedio
T10M	°C	Temperatura promedio del aire a 10 m
T10MN	°C	Temperatura mínima del aire a 10 m
T10MX	°C	Temperatura máxima del aire a 10 m
Q10M	%	Humedad relativa promedio del aire a 10 m
RH10M	%	Humedad relativa, la relación entre la presión parcial de vapor de agua y la presión parcial de saturación a 10 m.
DFP10M	°C	Temperatura en la cual el aire a 10 m está saturado con vapor de agua

Office) y el GEOS-4 (*Goddard Earth Observing System*). La humedad relativa se calcula con base en la presión, temperatura y humedad específica. Las temperaturas de DFP10M se calculan con base en la humedad relativa y la temperatura del aire. En la estimación de la radiación solar, se aplica el modelo de transferencia radiativa propuesto por Pinker y Laszlo (1992). El método involucra el uso de un modelo acoplado a los valores de columna de vapor de agua del GEOS-4 y el monto de la columna de ozono; incorpora además datos de tres radiancias en el visible: la radiancia instantánea en cielo despejado, la radiancia instantánea en cielo nublado y la radiancia compuesta en cielo despejado. Las radiancias estimadas entonces son convertidas a reflectancia de onda corta (Pinker y Laszlo, 1992).

Como parámetro cualitativo, la NASA somete a los datos diarios a un cotejo con los datos medidos directamente en el terreno por 27 estaciones base distribuidas en el planeta. Estas estaciones se encuentran en un intervalo de elevación desde 0 m hasta 1600 m snm; esta comparación la realiza en condiciones de cielo despejado. La decisión de aplicar los parámetros de cielo despejado se basa en la recomendación de Otkin, Anderson, Mecikalski y Diack (2005) quienes mencionan que si se usan datos diarios, éstos provienen de comparar las imágenes instantáneas del espectro visible, calibradas para reflectancia en la parte alta de la atmósfera, con un mapa de referencia de cielo despejado para albedo superficial. Las estaciones de la red registran datos de: a) presión superficial en el

terreno, b) presión y velocidad de viento oceánico, c) velocidad del viento a nivel del mar, d) datos de radiosondas (altura, temperatura, velocidad del viento y humedad), e) datos adicionales obtenidos por globos y aeroplanos, y f) datos estimados por satélite (perfiles de altura y humedad, agua total precipitable, vector de movimiento en nubes y vientos).

En octubre de 2013, los administradores de la base de datos NASA SSE, documentaron las diferencias entre la radiación global estimada por los sensores satelitarios y la registrada por la red de estaciones en tierra. El resultado arrojó un sesgo de $-0.1745 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$; el sesgo es la diferencia entre la media de la radiación solar estimada por el satélite y las estaciones en tierra.

Se puede mencionar que el uso de los datos de clima a una escala apropiada, está limitado por las diferencias entre la escala del modelo que les da origen y la escala (local o regional) de la entidad en que se aplican; esto es, una cuenca, una subcuenca, o un enmallado de una cuenca. Entre los modelos de re-escalamiento más aplicados para solucionar este problema, están aquellos que se pueden describir particularmente en términos de su habilidad para reproducir la temperatura superficial y la precipitación (Houghton *et al.*, 2001; Leung *et al.*, 2003). Los más ampliamente citados utilizan el modelado dinámico por anidamiento de un modelo climático regional con un modelo de circulación general (Giorgi y Mearns, 1991; Leung, Mearns, Giorgi y Wilby, 1999; Cocke y LaRow, 2000; Kim, Miller, Farrara y Hong, 2000; Yarnal *et al.*, 2000) y a funciones de transferencia estadística o empíricas que relacionan el clima local con el modelo de circulación general (Wilby y Wigley, 1997; Wilby *et al.*, 1998). De acuerdo con Whitlock (1996), las diferencias regionales en insolación superficial conllevan errores de sesgo de hasta 35%. En consideración a la inexistencia de datos de campo que permitan aplicar un esquema de ajuste, se optó por aplicar un modelo basado en la latitud; el resultante es un índice calculado ($\text{índice}_{\text{calc}}$) basado en el valor del ángulo cenital calculado para el par de datos coordinados del sitio de muestreo. El procedimiento seguido está descrito por Brunner (1997) adap-

tado del propuesto por Wauben en 1995, del programa JNO2 del KNMI (*Royal Netherlands Meteorological Institute*). Este procedimiento podría considerarse como de los más sencillos de utilizar debido a que no es necesaria la incorporación de datos de campo.

Para el análisis estadístico de los datos, y en consideración a que se incluyen tres variables categóricas, una binaria para la cobertura del sitio (“BN” y/o “DEF”), otra con cinco elementos que se refieren a la localización geográfica de los sitios de muestreo (“Coahuila”, “Jalisco”, “Michoacán”, “Tlaxcala” y “Durango”) y la última para el “mes calendario”, que se refiere a los meses del año (enero a diciembre), se seleccionó la técnica de análisis de varianza multivariado (MANOVA) y la prueba *post-hoc* Bonferroni para la comparación de grupos homogéneos. De acuerdo con Carey (1998), se utilizó MANOVA en vez del ANOVA tradicional u otras técnicas de análisis de regresión, debido a que permite incorporar variables independientes y dependientes en el mismo modelo de análisis. En vez de usar el valor de F como valor de significancia, se usó la prueba de Wilk’s lambda (λ); se utiliza este símbolo griego para diferenciarlo del λ que mayormente se utiliza para representar un eigenvalor. La cantidad $(1-\lambda)$ se interpreta como la proporción de varianza explicada por el efecto del modelo; Wilk’s lambda (λ) va de 0 a 1 y mientras su valor esté más cercano a cero, mayor será su efecto de contribución al modelo de análisis.

Las pruebas *post-hoc* de comparaciones entre grupos pueden ser la de Bonferroni o la de Tamhane dependiendo de si la prueba de varianzas homogéneas es rechazada. La prueba de Bonferroni es aceptada en el supuesto de varianzas homogéneas y la de Tamhane en el supuesto de que no lo son (Kritsonis, 2013). Para probar la homogeneidad de varianzas entre los grupos se aplicó la prueba de F_{max} -Hartley.

RESULTADOS

En la tabla 3 se presentan las estadísticas básicas de los índices evaluados según la condición de cobertura.



TABLA 3. Estadísticas básicas de los índices evaluados según la condición de cobertura; los encabezados de columna cubren dos subcolumnas de datos, a la izquierda, es “BN” y a la derecha “DEF”

Índice	Prom		Min		Max		Perc 10		Perc 90		Desv std	
SWV_DWN	5.52	5.53	0.16	0.16	9.03	9.14	3.84	3.82	7.27	7.32	1.36	1.38
CLR_SKY	6.49	6.50	3.27	3.22	9.03	9.15	5.01	4.94	7.84	7.93	1.07	1.12
CLR_DIF	1.12	1.12	0.46	0.45	1.65	1.68	0.79	0.78	1.44	1.46	0.25	0.26
CLR_DNF	8.74	8.53	4.95	4.76	12.26	12.03	7.40	7.21	10.10	9.90	1.04	1.03
LWV_DWN	8.16	8.17	5.33	5.24	10.22	10.35	6.99	6.91	9.21	9.30	0.83	0.89
TOA_DWN	9.38	9.39	6.23	6.12	11.28	11.47	7.21	7.09	10.97	11.14	1.52	1.61
PS	86.31	86.32	81.63	80.38	91.51	92.66	82.29	81.48	89.80	90.62	3.29	3.43
T10M	18.76	18.79	-6.78	-6.67	32.54	33.03	13.71	13.55	23.16	29	3.89	4.02
T10MN	14.12	14.16	-13.04	-12.82	25.15	25.53	8.58	8.49	19.04	19.25	4.08	4.18
T10MX	24.26	24.04	-1.89	-1.92	39.52	39.74	18.88	18.55	29.42	29.33	4.37	4.44
Q10M	0.01	0.01	0.00	0.00	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00
RH10M	62.41	59.77	-9.60	4.37	284.37	96.26	32.54	31.30	85.91	82.38	20.31	19.33
DFP10M	9.90	9.94	-24.53	-24.41	20.67	21.00	1.55	1.54	17.47	17.64	6.12	6.17

Las diferencias promedio entre los índices_{calc} según la cobertura, resultaron menores en la condición “BN” comparado con la “DEF”, excepto para los índices CLR_DNF, T10MX y RH10M donde se observaron incrementos (+0.21, +0.22 y +2.64, respectivamente). No obstante el contraste absoluto entre coberturas, no se observaron diferencias entre los índices CLR_DIF y Q10M.

Análisis de correlación

En el análisis de correlación de la serie histórica se utilizó un diseño matricial que incluyó los índices, el sitio de muestreo, la condición de cobertura y el mes calendario (Fig. 2).

Según el análisis de correlación matricial, se observó significancia ($p < 0.05$), entre los índices_{calc} y las variables categóricas “sitio de muestreo” y “mes calendario”; no significancia ($p > 0.05$) resultó para “cobertura del suelo”. La relación más fuerte fue inversa entre el índice PS (Presión Atmosférica Promedio) y la variable categórica “sitio de muestreo” ($r = -0.81$).

El modelo general del análisis de varianza, incluyó como variable dependiente el valor del índice_{calc} en toda la serie de datos y como variables independientes, las categóricas “sitio de muestreo”, “cobertura del suelo” y “mes calendario”. Los resultados arrojaron diferencias significativas ($p < 0.05$) para las tres variables independientes. Entre éstas, la mayor variación se observó para la variable “mes calendario”, seguida por “sitio de muestreo” y por

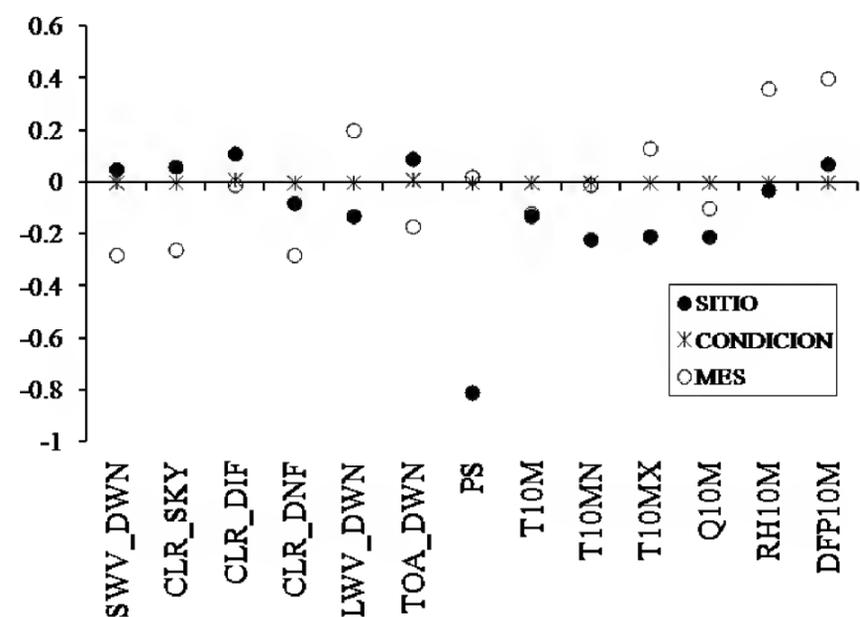


FIGURA 2. Análisis de correlación entre los índices de meteorología superficial e insolación, para sitio de muestreo, condición de cobertura del suelo y mes calendario (N=80,360).

“cobertura del suelo” (Wilk’s = 0.0067, F (154, 7003E2) = 3522.6, $p < 0.05$, Wilk’s = 0.1150, F (56, 3125E2) = 12008, $p < 0.05$, y Wilk’s = 0.999, F (14, 80330) = 4.5915, $p < 0.05$, respectivamente).

Estos resultados apoyan la evidencia del importante papel que, en la expresión de los índices, juega la ubicación geográfica de los sitios de muestreo, el mes calendario y la cubierta del suelo; sin embargo, y no obstante la significancia observada, no son concluyentes respecto al papel de la cobertura del suelo en modificar el clima local. Los parámetros climáticos que mayormente evidencian un cambio en el clima local, como temperatura, humedad relativa y oscilación térmica, (OT) están medidos a una altura de 10 m, y, los impactos más significativos para el Hombre y la agricultura se miden de 2 m para abajo. Una variable clave en determinar las condiciones climáticas a diferentes alturas en el perfil climático es la velocidad del viento y ésta cambia de manera muy significativa con la altura sobre el suelo a la cual se registra. Tiene un efecto de turbulencia y uniformiza las condiciones climáticas, lo cual es más evidente a mayor separación de la superficie, por lo que podría esperarse que las variaciones al clima local producto de la deforestación pudieran ser más eficazmente detectadas a mayor proximidad de la superficie. Por lo anterior, es necesario que para futuros trabajos se cuente con registros de datos climáticos a nivel de terreno. Vourlitis *et al.* (2004) mencionan que los cambios en la cubierta del suelo conllevan implicaciones importantes en la tasa neta de intercambio de CO₂, alteran dramáticamente el microclima en el bosque (Uhl y Kauffman, 1990; Wright *et al.*, 1992), la hidrología (Hodnett, Pimentel da Silva, da Rocha y Cruz-Senna, 1995) y tienen el potencial de alterar la tasa de evapotranspiración, los ciclos biogeoquímicos (Cerri, Higuchi y Melillo, 1995), de influir en la conformación de grupos funcionales y en general sobre los procesos pedogénicos. Por otro lado, el efecto geográfico representado por la localización de los sitios de muestreo parece evidenciar la variación espacial entre los sitios de muestreo, lo cual se esperaba al conocer las diferencias entre los factores geomorfológicos (elevación, pendiente y exposición) y los grupos funcionales presentes, principalmente para la condición “BN”. Con respecto al “mes calendario”, los resultados se pueden atribuir, en esencia, a las variaciones en el flujo radiante inter e intraestacio-

nes del año, las cuales se deben a los cambios en la posición del eje de la Tierra con respecto al plano de órbita del sol (ángulo cenital) que hace que algunas regiones reciban una mayor cantidad de luz solar debido a la duración del día y con distinta intensidad. De acuerdo con Pidwirny (2006) la intensidad de la radiación solar está en función del ángulo de incidencia, el ángulo al cual el flujo radiante golpea la superficie terrestre. Para los sitios de muestreo, el flujo radiante es más intenso durante la temporada de verano (junio, julio y agosto) y disminuye en el invierno (diciembre, enero y febrero). Estos resultados sugieren estratificar la base de datos por temporada (primavera, verano, otoño e invierno) y proponer un modelo de análisis que incorpore esta nueva variable, planteando nuevas preguntas de investigación. La prueba de varianzas homogéneas F_{\max} -Hartley arrojó que las varianzas de las series de datos son desiguales. Sin embargo, los valores, para las variables independientes (“sitio de muestreo”, “cobertura del suelo” y “mes calendario”) estuvieron muy cercanos a 1. De acuerdo con Graham (2016), si la F_{\max} está muy cercana a 1, se considera muy alta la probabilidad de que los datos tengan varianza homogénea. Sobre este criterio, se decidió utilizar la prueba de grupos homogéneos de Bonferroni ($\alpha= 0.05$); los resultados se muestran en la tabla 4.

El sitio Jalisco, el más cercano a la costa del Pacífico, registró los valores promedio más altos en siete de los trece indicadores indirectos; dos para insolación (LWV_DWN y TOA_DWN) y cinco para meteorología superficial (PS, T10M, T10MN, T10MX y DFP10M). Durango los registró en tres índices de insolación (SWV_DWN, CLR_SKY y CLR_DNF) y Tlaxcala en dos índices (CLR_DIF y RH10M). Los resultados para “sitio de muestreo”, donde se encontró significancia estadística mayormente para los índices de meteorología superficial, parecen sugerir una cierta influencia en su expresión por su cercanía con la costa del Pacífico. De acuerdo con Stuart, Matson y Mooney (2002) a escala de unos cuantos kilómetros, el diferencial de calentamiento entre las plataformas continental y oceánica, produce brisas continentales y marinas. Durante el día, el calentamiento continental causa que el



TABLA 4. Prueba de Bonferroni ($\alpha = 0.05$) para grupos homogéneos; las cifras destacadas en negritas o subrayadas son los valores extremos de los índices (máximo y mínimo, respectivamente).

Índice	SWV_DWN	CLR_SKY	CLR_DIF	CLR_DNF	LWV_DWN	TOA_DWN	PS	T10M	T10MN	T10MX	Q10M	RH10M	DFPIOM
Sitios de muestreo													
Coahuila	5.17	b 6.15	a 1.13	c 8.19	a 8.24	d 9.14	b 89.59	c 18.82	c 14.31	c 23.76	c 0.01	d 61.84	d 10.54
Tlaxcala	5.40	c 6.44	b 1.17	e 8.22	b 7.90	a 9.50	a 82.41	a 16.53	a 11.95	a 21.56	a 0.01	c 64.46	e 9.24
Jalisco	5.61	c 6.54	c 1.14	d 8.47	c 8.53	e 9.50	a 89.70	d 21.53	e 16.96	e 26.88	e 0.01	e 59.23	c 12.33
Michoacán	5.71	a 6.61	d 1.13	b 8.59	d 8.02	b 9.50	a 82.41	a 17.72	b 12.98	b 22.97	b 0.01	b 58.68	b 8.80
Durango	5.73	a 6.74	e 1.01	a 9.20	e 8.13	c 9.27	c 87.44	b 19.29	d 14.50	d 24.99	d 0.01	a 54.54	a 8.71
Cobertura del suelo													
BN	5.52	a 6.49	a 1.12	a 8.53	a 8.16	a 9.38	a 86.31	a 18.76	a 14.12	a 24.02	a 0.01	a 59.72	a 9.90
DEF	5.53	a 6.50	b 1.12	b 8.53	a 8.17	a 9.39	b 86.32	b 18.79	a 14.16	a 24.04	a 0.01	a 59.77	a 9.94
Mes calendario													
DIC	4.29	c 4.84	b 0.80	b 7.94	d 7.46	d 6.88	b 85.81	a 14.83	d 10.20	e 20.52	a 0.01	f 59.03	f 6.49
ENE	4.53	d 5.15	c 0.83	c 8.19	b 7.33	b 7.23	c 85.73	b 14.55	c 9.61	d 20.38	a 0.01	d 54.56	e 4.90
FEB	5.41	f 6.05	f 0.91	e 8.81	c 7.43	c 8.33	e 85.82	a 16.13	e 10.59	f 22.22	c 0.01	c 48.23	c 4.40
MAR	6.47	j 7.05	h 1.02	f 9.33	i 7.57	e 9.59	g 86.02	d 18.35	b 12.26	a 24.65	f 0.01	b 41.06	b 3.86
ABR	6.74	b 7.52	a 1.19	h 9.23	h 8.04	g 10.55	i 86.34	f 20.93	a 14.89	h 26.93	j 0.01	e 41.02	b 5.98
MAY	6.75	b 7.40	j 1.37	a 8.67	f 8.41	i 11.03	a 86.66	h 22.18	i 16.71	b 27.79	k 0.01	h 50.02	d 10.02
JUN	6.06	i 7.50	a 1.38	k 8.81	c 8.92	a 11.15	k 86.89	j 21.51	h 17.59	i 25.91	i 0.01	a 69.01	h 15.04
JUL	5.69	h 7.46	k 1.37	a 8.75	g 8.95	a 11.05	a 86.99	k 20.96	a 17.15	c 25.32	g 0.01	a 71.46	a 15.23
AGO	5.54	g 7.16	i 1.33	j 8.42	e 8.95	a 10.67	j 86.82	i 20.93	a 17.08	c 25.55	h 0.01	a 71.11	a 15.20
SEP	5.05	a 6.59	g 1.24	i 8.07	a 8.83	j 9.89	h 86.46	g 19.94	g 16.60	b 24.10	e 0.01	a 75.15	i 15.28
OCT	5.01	a 5.92	e 1.07	g 8.03	a 8.30	h 8.71	f 86.19	e 18.42	b 14.68	g 23.04	d 0.01	i 71.31	a 12.97
NOV	4.77	e 5.30	d 0.87	d 8.18	b 7.72	f 7.51	d 85.95	c 16.50	f 12.16	a 21.88	b 0.01	g 64.35	g 9.41

aire se eleve y se mezcle con el aire frío del océano. Este aire elevado aumenta la altura en la cual, a un valor de presión atmosférica dado, se desplaza de la plataforma continental hacia la oceánica. El resultante aumento en la masa de la atmósfera sobre el océano, aumenta la presión superficial, lo cual ocasiona que el aire superficial fluya del océano hacia el continente (Stuart *et al.*, 2002). Sin embargo, dado el origen de los datos re-escalados de este estudio, se considera que la información resultante es ape-

nas un esbozo y que necesariamente se requiere plantear nuevas preguntas de investigación que involucren una arquitectura espacial en el registro de datos para que apoyen las aseveraciones anteriores.

Para el sitio Durango, donde los valores máximos de los índices corresponden a índices de insolación, sugieren un papel preponderante de la pendiente del terreno y de la exposición cenital. De acuerdo con Stuart *et al.* (2002) las pendientes sur en dirección al Ecuador, reciben más radia-

ción que las pendientes opuestas y así se crean condiciones más calurosas y secas.

En los sitios de muestreo Jalisco y Michoacán no se observaron ninguno de los valores mínimos para los índices_{calc}; el sitio Jalisco es el más cercano a la línea de costa y el sitio Michoacán el segundo en cercanía. Los mínimos estimados se dieron para los sitios al interior de la plataforma continental, Tlaxcala, Coahuila y Durango (seis, cuatro y tres índices, respectivamente). Estos resultados parecen sustentar un ligero efecto de proximidad a la línea de costa y pueden atribuirse a que tienen condiciones meteorológicas más estables y menos extremas debido a las entradas de aire húmedo proveniente del océano. Adicionalmente, en el entendido de que el relieve topográfico es una fuerte influencia climática al desplazar el aire denso y frío, Jalisco es el sitio de muestreo con menor elevación para ambas condiciones de cobertura del suelo, mientras que Michoacán es el más alto. De acuerdo con Stuart *et al.* (2002), cuando el aire se enfría durante la noche, se vuelve más denso y tiende a desplazarse hacia la parte baja (vientos catabáticos), donde permanece estacionario y esto produce fuertes inversiones de temperatura (aire frío debajo de aire caliente), un perfil vertical de temperatura inverso; si se considera el patrón típico en la troposfera de decremento en la temperatura con un incremento en la cota de elevación.

En relación con la cobertura del suelo, todos los índices registraron sus máximos en la categoría “DEF” y los mínimos en “BN”; sin embargo, solo se observaron diferencias significativas ($p < 0.05$) para los índices: CLR_SKY, CLR_DIF, TOA_DWN y PS.

De acuerdo con Stuart *et al.* (2002) la vegetación influye en las condiciones del clima al incidir directamente sobre el balance de energía. En este sentido, la vegetación en sí y la condición de humedad del suelo modifican la razón del albedo (la fracción de la radiación de onda corta incidente reflejada desde una superficie), determinando la cantidad de energía solar absorbida por la superficie de contacto, la cual posteriormente se transmite a la atmósfera como radiación de onda larga y flujos turbulentos.

Los resultados del análisis por “mes calendario” esbozan la influencia que las estaciones del año tienen

sobre las condiciones de meteorología superficial y de insolación a escala global, regional y/o local. Durante los meses de diciembre, enero y febrero (temporada de invierno) se registraron los valores mínimos de todos los índices, excepto para Q10M (marzo), RH10M (abril) y DFP10M (marzo). En la temporada más calurosa del año (abril, mayo, junio, julio y agosto) se estimaron los valores promedio más altos para nueve de los trece índices. La mayor diferencia entre los indicadores de insolación se observó para CLR_DNF en marzo (primavera temprana); y en tres de siete indicadores meteorológicos, Q10M (agosto-verano tardío) y RH10M y DFP10M (septiembre-otoño temprano). Estos resultados parecen sugerir la fuerte relación de la humedad del aire, y la temporada del año con el monto de energía reflejada. Lo anterior se puede atribuir a la presencia ocasional de lluvias invernales tardías, a algunas lluvias en verano y al inicio del ciclo de lluvias en el otoño temprano. Adicionalmente, los resultados sobre el índice punto de rocío y de congelamiento (DFP10M), parecen apoyar la aseveración de que cuando la temperatura del aire es igual al punto de rocío, entonces la humedad relativa alcanza 100%. De acuerdo con Haby (2014) para que la humedad relativa alcance 100%, es necesario: 1) que el aire se enfríe hasta el punto de rocío; 2) que se incorpore humedad al aire hasta que se sature; y 3) que la masa de aire se eleve, se enfríe adiabáticamente y alcance el punto de rocío. Rosenberg (2014) menciona que si el aire se enfría hasta la temperatura de rocío empezará a condensarse; mientras más caliente el aire, mayor cantidad de vapor de agua puede contener.

Con respecto a la prueba de homogeneidad de grupos para “sitios de muestreo”, el menor número de clases (3) se observó para dos índices de insolación TOA_DWN y SWV_DWN; mientras que el máximo número (5) se observó para los índices: CLR_SKY, CLR_DIF, CLR_DNF, LWV_DWN, T10M, T10MN, T10MX, Q10M, y RH10M. En este sentido, el número mayor de grupos significa que todos los sitios de muestreo son completamente diferentes entre sí para el índice de referencia. Con relación a la cobertura del suelo, las diferencias significativas se observaron para los índices CLR_SKY, CLR_DIF,



TOA_DWN y PS; no significancia se observó para el resto de los índices.

Con respecto a “mes calendario”, el máximo número de grupos resultó en once, para los índices de insolación (CLR_SKY, CLR_DIF, y TOA_DWN) y para los índices de meteorología superficial presión atmosférica promedio (PS) y temperatura del aire máxima a 10 m (T10MX) (Tabla 4). Entre los meses agrupados, septiembre y octubre lo fueron para insolación incidente e insolación directa (SWV_DWN y CLR_DNF); junio, julio y agosto para el flujo radiante de onda larga (LWV_DWN); abril, junio y agosto para la temperatura del aire promedio a 10 m (T10M). Otro resultado importante a destacar es para temperatura del aire mínima a 10 m (T10MN), la cual se observó en tres periodos, marzo y noviembre y de julio a agosto. El período de junio a septiembre resultó homogéneo para humedad promedio del aire (Q10M); julio, agosto y octubre lo fue para humedad relativa (RH10M); y consecutivamente de junio a agosto para el índice DFP10M. Estos resultados, donde no se observa que un indicador sea preponderantemente influyente, corroboran la necesidad de estratificar “mes calendario” por temporada del año (primavera, verano, otoño e invierno), tal como se hizo referencia en párrafos anteriores.

DISCUSIÓN

En los espacios geofísico y geográfico, relacionar el efecto de la vegetación en la meteorología superficial y en la tasa de insolación que reciben, no es una tarea sencilla de realizar. La complejidad radica principalmente en que la biomasa (aérea y radicular), es decir, especies arbóreas y arbustivas, raíces, hojarasca fina o gruesa, costras biológicas, así como los procesos pedogénicos asociados, son factores que modifican la expresión de las variables del clima. En la mayoría de los ecosistemas de bosque, los estudios de estimación de biomasa se vuelven problemáticos debido a su compleja estructura funcional y a su abundancia en la composición de especies, lo cual resulta en una altamente variable tasa de almacenamiento y producción de biomasa (Dengsheng, 2006).

En un escalamiento de los procesos geofísicos y geográficos se reconoce su no-linearidad, y se espera que tenga algunas limitantes cuando su aplicación sea de amplio rango (Lovejoy, 2001). Entre los procesos más documentados se encuentran lluvia por radar, superficie de hielo, longitudes de onda en el visible y en el infrarrojo, microondas, reflectividad en la nube y en la plataforma continental, topografía, y campos aeromagnéticos (Lovejoy *et al.*, 2001). La resolución espacial de la base de datos NASA SSE es un impedimento para caracterizar el clima a escala local, lo cual incluye a los pares coordenados de los sitios de muestreo. El efecto conjunto y por separado de la cobertura del suelo, la ubicación geográfica de los sitios de muestreo y el mes calendario, permitió evidenciar su influencia en la expresión de los índices_{calc} de meteorología superficial y de insolación a escala local; sin embargo, permanece sin respuesta la interrogante con respecto a la aceptabilidad del método de re-escalamiento aplicado, pues los índices_{calc} acumulan un sesgo desde el método de cálculo aplicado que les dio origen hasta el agregado por la propia técnica de re-escalamiento. Debido a la carencia de datos directos en campo, la respuesta al cuestionamiento sobre qué tan representativos de los sitios de muestreo son los datos estimados para insolación y meteorología superficial aún está pendiente. De acuerdo con Lovejoy *et al.* (2001), la geometría fractal representa un gran avance cuando se compara con las opciones clásicas de escalamiento, pero sufre de dos limitantes. La primera es que, a diferencia de los conjuntos geométricos escalo-invariantes, los campos escalo-invariantes son generalmente multifractales (no monofractales) y, en consecuencia, requieren de un número infinito de exponentes para su caracterización. La segunda limitante es que, aun para los campos monofractales, las simulaciones y los análisis de invarianza a escala generalizada (escalamiento anisotrópico) demandan un fuerte esquema de simulaciones numéricas. De acuerdo con Schertzer y Lovejoy (1987), un sistema escalo-invariante involucra dos grupos matemáticos y sus correspondientes generadores: el primero es el operador de cambio de escala y el segundo las distribuciones de probabilidad en todas las escalas.

A este respecto, y tomando a consideración la significancia estadística observada, los resultados de este estudio delimitan las temáticas a abordar en futuras propuestas de investigación. En esencia, se debería considerar ampliar la base de datos para dar entrada al modelo de análisis, de variables como: índices de la vegetación obtenidos de imágenes de satélite, datos directos de velocidad y dirección del viento, de insolación, datos indirectos del dosel para invarianza espectral, evaluar nuevas técnicas de análisis de datos, pasando de par coordinado a áreas de respuesta homogénea.

Los datos fundamentales a obtener de la invarianza espectral serían las razones de reflectancia, transmitancia y de absorbancia en el dosel. La reflectancia es el proceso en el cual la energía incidente es reflejada. La transmitancia es el paso de la energía electromagnética a través de un medio. La absorción es la transformación de la energía radiante a otro tipo de energía, por lo general calor, por interacción con la materia. Estas razones son los componentes básicos de la ley de conservación de energía las cuales describen en términos de longitud de onda, la respuesta del dosel al estímulo de la energía incidente. Si la reflectancia en el terreno por debajo de la vegetación es cercana a cero, la porción de la radiación absorbida, transmitida o reflejada por el dosel es cercana a la unidad.

Las bases de datos de espectroscopía pueden explotarse si las variables independientes de la longitud de onda pudieran ser registradas, y así relacionarlas directamente con las características estructurales de la vegetación (Knyazikhin, Schull, Xu, Myneni y Samanta, 2011). De acuerdo con Copenhaver (2011), el registro directo de variables meteorológicas y de insolación, requiere combinarse con imágenes de alta resolución espacial para determinar el estatus de la vegetación y dar seguimiento al dinamismo de cambio de uso del suelo. Podemos mencionar que la respuesta de la vegetación al estímulo del flujo radiante depende por completo de las propiedades físicas y ópticas de la superficie de contacto, del ángulo de incidencia y del contenido de humedad. Congalton y Green (2009) enfatizan que registrar datos directamente en el terreno es con fines de verificación y análisis espacial de

imágenes remotamente adquiridas; sin embargo, refieren que no existen estándares aceptados universalmente para analizar la precisión de los productos derivados.

Las diferencias observadas entre los sitios cercanos a la línea de costa y los más alejados, aunque leves, abren un abanico de posibilidades para plantear nuevas preguntas de investigación que aborden temáticas sobre la composición de especies, si la estructura del bosque de coníferas está relacionada con el historial de eventos ígneos o bien a variables ambientales y/o geomorfológicas.

Otro aspecto importante es la fecha de registro de los datos en los sitios deforestados con respecto al conjunto de datos de la NASA. En la serie histórica de datos, podrían estarse considerando años en los que en el sitio actualmente deforestado aún se tenía vegetación original y años en los que ya se había deforestado. Esto desde luego es una posibilidad, aunque lo más seguro es que para toda la serie de datos ya los cinco sitios estaban deforestados.

CONCLUSIONES

El método de re-escalamiento de datos por latitud a puntos coordinados de índices de meteorología superficial e insolación, evidenciaron que en los bosques de coníferas de México el mes calendario, la posición geográfica de los sitios de muestreo, y la cobertura del suelo, son factores que influyen en su expresión. Asimismo, se documentó un ligero efecto latitudinal de cercanía a la línea de costa que merece más atención; sin embargo, la interrogante sobre si la cobertura del suelo (en específico la deforestada) influye en la expresión de los índices calculados y en representar su dinamismo en el espacio y tiempo, no pudo ser evaluada; esto por la ausencia de datos de velocidad y dirección del viento, medidos directamente en campo.

RECONOCIMIENTOS

Los autores manifiestan su agradecimiento al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) por el apoyo financiero a la presente investigación a través del proyecto “Efecto de la deforestación sobre el cambio climático local en bosques de coníferas”.



REFERENCIAS

- Aplin, P. (2004). *Remote sensing as a means of ecological investigation*. Recuperado de <http://www.isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm1/papers/60.pdf>
- Brunner, D. (1997). *Calculate the solar zenith angle (and optionally the omega angle)*. Recuperado de http://www.iac.ethz.ch/staff/dominik/idltools/atmos_phys/zenith.pro
- Carey, J. (1998). *Multivariate analysis of variance (MANOVA): I. Theory*. Recuperado de <http://ibgwww.colorado.edu/~carey/p7291dir/handouts/manova1.pdf>
- Cerri, C., Higuchi, N. y Melillo, J. (1995). *The ecological component of an integrated Amazon study (also known as LBA): the effects of forest conversion*. Washington, D.C.: National Aeronautics and Space Administration.
- Chang, J. y Madjarov, K. (2012). *Estimating the socioeconomic value of satellite-derived solar and meteorological data: A case study and discussion of tradeoffs*. Documento presentado en Boulder, CO Workshop on defining, measuring, and communicating the socio-economic benefits of geospatial information /GEOSS 2012, Boulder, CO, EUA.
- Cocke, S. y LaRow, T. E. (2000). Seasonal predictions using a regional spectral model embedded within a coupled Ocean-Atmosphere model. *Monthly Weather Review*, 128 (3), 689-708.
- Congalton, R. G. y Green, K. (2009). *Assessing the accuracy of remotely sensed data – Principles and practices* (2a ed.). Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Copenhaver, K. (2011). *Land use change data and ground truthing*. Documento presentado en el CRC Workshop. Universidad de Chicago.
- Dengsheng, L. (2006). The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation. *International Journal of Remote Sensing*, 27 (7), 1297-1328.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2012). *State of the world's forests 2012*. Roma, Italia: Autor.
- Gibbs, H. K., Brown, S., Niles, J. O. y Foley, J. A. (2007). Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: making REDD a reality. *Environmental Research Letters*, (2). doi:10.1088/1748-9326/2/4/045023
- Giorgi, F. y Mearns, L. O. (1991). Approaches to the simulation of regional climate change, a review. *Reviews in Geophysics*, 29 (2):191–216. doi:10.1029/90RG02636
- Graham, H. (2016). *Testing for homogeneity of variance with Hartley's Fmax test*. Recuperado de <http://users.sussex.ac.uk/~grahamh/RM1web/Testing%20for%20homogeneity%20of%20variance.pdf>
- Grunewals, J., Kaiser, J., Guruz, R. y Zellner, R. (2012). HESMOS Deliverable D5.1: *Specification of interfaces to material and climate databases*. Recuperado de http://hesmos.eu/downloads/20111130_hesmos_d51.pdf
- Gubler, S., Fiddes, J., Keller, M. y Gruber, S. (2011). Scale dependent measurement and analysis of ground surface temperature variability in alpine terrain. *The Cryosphere*, 5, 431-443. doi:10.5194/tc-5-431-2011
- Haby, J. 2014. *Frost point and dew point*. Recuperado de <http://www.theweatherprediction.com/habyhints/347/>
- Hodnett, M. G., Pimentel da Silva, L., da Rocha, H.R. y Cruz-Senna, R. (1995). Seasonal soil water storage changes beneath central Amazonian rainforest and pasture. *Journal of Hydrology*, 170 (1-4), 233-254. doi:10.1016/0022-1694(94)02672-X
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2014). *Bosque de coníferas y encinos*. Recuperado de <http://cuentame.inegi.org.mx/territorio/vegetacion/bc.aspx?tema=T>
- Houghton, J. T., Ding, Y., Griggs, D. J., Noguer, M., van der Linden, P. J., Dai, X., Maskell, K. y Johnson, C.A. (Eds.). (2001). *Climate Change 2001: The scientific basis*. Cambridge, Reino Unido: Panel Intergubernamental Sobre el Cambio Climático-Cambridge University Press.
- Kim, J., Miller, N. L., Farrara, J. D. y Hong, S. Y. (2000). A seasonal precipitation and stream flow hindcast and prediction study in the Western United States during the 1997/98 winter season using a dynamic downscaling system. *Journal of Hydrometeorology*, 311-329.
- Knyazikhin, Y., Schull, M. A., Xu, L., Myneni, R. B. y Samanta, A. (2011). Canopy spectral invariants. Part 1: A new concept in remote sensing of vegetation. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 112 (4), 727-735.
- Kritsonis, W. A. (2013). *Data analysis and research*. Recuperado de <http://www.docstoc.com/docs/880776/Statistics>

- Leung, L. R., Mearns, L. O., Giorgi, F. y Wilby, R. L. (2003). *Regional Climate Research. Needs and Opportunities. American Meteorological Society*, 84, 89-95. doi:10.1175/BAMS-84-1-89
- Leung, L. R., Hamlet, A. F., Lettenmaier, D. P. y Kumar, A. (1999). Simulations of the ENSO hydroclimate signals in the Pacific Northwest Columbia River basin. *American Meteorological Society*, 80, 2313-2329.
- Lovejoy, S., Schertzer, D., Tessier, Y. y Gaonach, H. (2001). Multifractals and resolution-independent remote sensing algorithms: the example of ocean color. *International Journal of Remote Sensing* 22 (7), 1191-1234.
- Nodvin, S. C. (2008). *Forest environmental services*. The International Union for conservation of nature. Recuperado de <http://www.eoearth.org/view/article/152818/>
- Otkin, J. A., Anderson, M. C., Mecikalski, J. R. y Diak, G. R. (2005). Validation of GOES-Based insolation estimates using data from the U.S. climate reference network. *Journal of Hydrometeorology* 6, 460-475.
- Pidwirny, M. (2006). *Earth-Sun relationships and insolation. Fundamentals of physical geography* (2a ed.). Recuperado de <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/6i.html>
- Pinker, R. T. y Laszlo, I. (1992). Modeling surface solar irradiance for satellite application on a global scale. *Journal of Applied Meteorology*, 31 (2), 194-211.
- Rosenberg, M. (2014). *Dew point. The dew point temperature represents full saturation of the air with water vapor*. Recuperado de <http://geography.about.com/od/physicalgeography/a/dewpoint.htm>
- Schertzer, D. y Lovejoy, S. (1987). Physical modeling and analysis of rain and clouds by anisotropic scaling of multiplicative processes. *Journal of Geophysical Research*, 92 (D8), 9693-9714.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2003). Norma Oficial Mexicana NOM-060-SEMARNAT-1994: Que establece las especificaciones para mitigar los efectos adversos ocasionados en los suelos y cuerpos de agua por el aprovechamiento forestal. México: Autor.
- Stuart, C. F., Matson, P.A. y Mooney, H. A. (2002). *Principles of terrestrial ecosystem Ecology*. Nueva York: Springer-Verlag.
- Tucker, C. J. y Townshend, J. R. G. (2000). Strategies for monitoring tropical deforestation using satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 21 (6 y 7), 1461-1471.
- Uhl, C. y Kauffman, J. B. (1990). Deforestation, fire susceptibility, and potential tree responses to fire in the eastern Amazon. *Ecology*, 71 (2), 437-449.
- Vourlitis, G. L., Priante-Filho, N., Hayashi, M. M. S., Nogueira, J. S., Raiter, F., Hoegel, W. y Campelo, J. H. (2004). Effects of meteorological variations on the CO₂ exchange of a Brazilian transitional tropical forest. *Ecological applications*, 14 (4), S89-S100. doi:10.1890/01-6005.
- Whitlock, C. H., Cahoon, D. R. y Konzelmann, T. (1996). Biomass Burning Effects on Shortwave Radiation in Africa. En J. S. Levine (Ed.), *Biomass Burning and Global Change* (pp. 485-491). Cambridge: MIT Press.
- Wilby, R. L. y Wigley, T. M. L. (1997). Downscaling general circulation model output: A review of methods and limitations. *Progress in Physical Geography*, 21 (4), 530-548.
- Wilby, R. L., Wigley, T. M. L., Conway, D., Jones, P. D., Hewitson, B. C. Main, J. y Wilks, D. S. (1998). Statistical downscaling of general circulation model output: A comparison of methods. *Water Resources Research*, 34 (11), 2995-3008.
- Wright, I. R., Gash, J. H., da Rocha, H. R., Shuttleworth, W. J., Nobre, C. A., Maitelli, G. T., Zamparoni, C. A. G. P. y Carvalho, P. R. A. (1992). Dry season micrometeorology of central Amazonian ranchland. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 118 (508), 1083-1099.
- Yarnal, B., Lakhtakia, M. N., Yu, Z., White, R. A., Pollard, D., Miller, D. A. y Lapenta, W. M. (2000). A linked meteorological and hydrological model system: The Susquehanna River Basin experiment (SRBEX). *Global and Planetary Change*, 25 (1-2), 149-161.

Manuscrito recibido el 18 de marzo de 2014.
Aceptado el 26 de abril de 2016.

Este documento se debe citar como:
Rodríguez-Moreno, V. M., Ruíz-Corral, J. A., Ramírez-Ojeda, G. y Pérez-Miranda, R. (2016). Efecto geográfico de la cubierta del suelo y el mes calendario, en la meteorología superficial e insolación de bosques de coníferas en México. *Madera y Bosques*, 22 (2), 53-66.



Tamaño, color de nuez y sombra afectan la germinación de *Quercus deserticola*

Nut size and color and shade affect germination of *Quercus deserticola*

Dante Arturo Rodríguez-Trejo^{1*} y Marín Pompa-García²

¹ Laboratorio de Semillas Forestales, División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, Edo. de México.

² Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Juárez del Estado de Durango. Durango, México. mpgarcia@ujed.mx.

* Autor de correspondencia. dantearturo@yahoo.com

RESUMEN

México es el país más rico en especies del género *Quercus* del planeta, con 157 de ellas. Los encinos tienen una gran importancia ecológica y potencial económico. No obstante, sus semillas y propagación han sido poco estudiadas. El objetivo del presente trabajo fue estudiar la influencia de tamaño y color de la nuez, así como de la sombra, en la capacidad y energía germinativas de *Quercus deserticola*. Para ello se instaló un experimento en cámara de ambiente controlado (25 °C/20 °C), con un fotoperiodo de 10 h luz. Los factores fueron tamaño de la nuez (chica y grande), color (café claro y café oscuro) y sombra (40%) (con y sin). El diseño experimental fue en bloques al azar, anidados dentro del factor sombra. Se condujo un análisis de varianza con un modelo mixto y una comparación de medias de Tukey, para las variables capacidad germinativa y energía germinativa, y se obtuvieron los parámetros de un modelo logístico para estimar la probabilidad de germinación. Se halló un efecto significativo de tamaño ($p = 0.0067$) y color ($p < 0.0001$) de la semilla, así como de la sombra ($p = 0.0078$) en la capacidad germinativa. La mayor capacidad germinativa, de 100%, se logró con semilla de nuez grande, café oscuro y con sombra. De acuerdo con el análisis de varianza, la energía germinativa (número de días para alcanzar 70% de la capacidad germinativa) fue influida por el color ($p < 0.0001$) y por la interacción tamaño*color ($p = 0.0351$). La mayor energía germinativa, con un valor de 11.5 días, se alcanzó con semilla de nuez grande y café oscura.

PALABRAS CLAVE: análisis de semillas, encinos, semillas forestales.

ABSTRACT

Mexico is the country with the highest number of *Quercus* species worldwide (157). The oaks have great ecological importance and economic potential. However, their seeds and nursery propagation have been scarcely studied. The aim of this study was to investigate the effect of nut size and color, as well as shade, on germination of *Quercus deserticola*. The experiment was installed in a controlled environment chamber (25 °C/20 °C, with a photoperiod of 10 h of light). The experimental factors were nut size (small and large), color (light brown and dark brown), and shade (with and without 40% shade). The experimental design was completely randomized blocks, with the blocks nested into the shade factor. An analysis of variance with a mixed procedure and a Tukey means comparison were conducted, with the variables germinative capacity and germinative energy and a logistic model was constructed to estimate the probability of germination. There was a significant effect of seed size ($p = 0.0067$), seed color ($p < 0.0001$) and shade ($p = 0.0078$) on germinative capacity. The highest germinative capacity (100%) was for large seeds of dark brown color and under shade. The germinative energy (number of days to reach 70% of the germinative capacity) was affected by seed color ($p < 0.0001$) and by the interaction seed size*color ($p = 0.0267$). The highest germinative energy (11.5 days) was for large and dark brown colored seed.

KEYWORDS: seed testing, oaks, forest seeds.

INTRODUCCIÓN

De todo el planeta, México es el país con la mayor riqueza de especies del género *Quercus*, con 157 de ellas (Zavala, 2001). Se trata de un género con gran relevancia ecológica, debido a su amplia extensión en las zonas montañosas del país, y también a que con frecuencia precede tanto

altitudinalmente como en la sucesión ecológica al género *Pinus*, con el que además forma frecuentes asociaciones (Rzedowski, 1978).

Quercus deserticola Trel. es una especie endémica de México, que se halla en doce estados, entre 2000 m y 3000 m snm, conformando principalmente bosques de encino y

asociándose con matorrales. Es un árbol de 2.5 m a 10 m de altura y diámetro normal de 12 cm a 70 cm; su corteza es café oscura, con surcos muy marcados; hojas oblongo-oblanco-lanceoladas a lanceoladas u ovaladas, con 3 cm a 16 cm de longitud 1.2 cm a 5.0 cm de anchura, el haz verde oscuro, algo brillante y rugoso, el envés claro con abundantes tomentos (Zavala, 2003; Arizaga, Martínez-Cruz, Salcedo-Cabrales y Bello-González, 2009). Esta especie es empleada para obtención de leña y carbón, fabricación de postes, horcones, cabos, arados, así como en el curtido de pieles y para la obtención de celulosa para papel (Arizaga *et al.*, 2009).

Existe variabilidad en el tamaño de la semilla de cualquier especie, si bien en algunas esto es más marcado que en otras. Las semillas grandes de diversos géneros, tienden a germinar más pronto y a desarrollar plántulas de mayor tamaño. También el color de la semilla puede variar en una misma especie, representando ventajas ante diferentes condiciones ambientales (Baskin y Baskin, 2001). Por ejemplo, las semillas de *Cecropia obtusifolia* Bertol. de color café claro tienen mayor capacidad germinativa a mayor temperatura que las semillas color café oscuro y estas últimas germinan mejor que las primeras a bajas temperaturas (Tenorio-Galindo, Rodríguez-Trejo y López-Ríos, 2008).

Las especies pioneras tienden a ser intolerantes a la sombra, mientras que las de etapas sucesionales más avanzadas normalmente son tolerantes a dicho factor. En el caso de la especie bajo estudio, se considera que es inicial o intermedia (Zavala, 2007), por lo cual podría ser intolerante o indiferente a la presencia o ausencia de sombra.

La vulnerabilidad de los ecosistemas ante las variaciones climáticas y efectos antropogénicos propician una oportunidad para mejorar el entendimiento de los mecanismos ecológicos que enfrentan las especies (Dawson, Jackson., House, Prentice y Mace 2011). Este conocimiento puede resultar fundamental en potenciar el uso y propagación de *Q. deserticola*. Esta especie ha recibido poca atención por parte de los investigadores, a pesar del gran potencial que tiene para ser utilizada en programas

de reforestación y restauración ecológica de bosques de encino y matorrales donde también se le encuentra.

OBJETIVOS E HIPÓTESIS

El objetivo del presente trabajo fue realizar el análisis de la semilla de *Q. deserticola* y probar el efecto del tamaño y color de la nuez, así como el de la sombra en la capacidad y energía germinativa de la semilla. La hipótesis es que la semilla grande, color café oscuro y bajo sombra, tendrá mejor: capacidad germinativa, probabilidad de germinación y energía germinativa.

MATERIALES Y MÉTODOS

En octubre de 2015 fueron recolectados 4 kg de nueces maduras de *Q. deserticola* de diez árboles con 20 cm a 40 cm de diámetro normal y 6 m a 10 m de altura, sanos y sin daños evidentes, cerca del poblado de San Nicolás Tlaminca, Municipio de Texcoco, Estado de México. Las coordenadas de la zona de recolección son: 19°29'47.97"N, 98°48'51.98"O; 19°29'48.81"N, 98°48' 57.87"O; 19°29'49.12"N, 98°48'52.60"O y 19°29'50. 11"N, 98°48'57.85"O. Aproximadamente la mitad del germoplasma fue obtenido de las copas de los árboles y la mayoría tenía un color café oscuro. La otra mitad fue recogida del suelo evitando la que ya mostraba signos de deterioro, pudrición o perforaciones por salida de larvas de coleópteros, el color de la mayor parte era café claro. De las nueces recolectadas, 1.5 kg se utilizaron como muestra de trabajo para el presente experimento.

Para la estimación del peso, se contaron y pesaron 100 nueces color café oscuro, pues tal color es el del fruto que recientemente ha madurado. El peso fue convertido a número de unidades por kilogramo y como el peso de 1000 semillas. Con el propósito de obtener el contenido de humedad, una submuestra de 72.9 g (34 nueces) fue puesta en horno de secado a 75 °C, hasta obtener el peso anhidro (peso constante). Esta variable se obtuvo tanto con base en peso anhidro (CH_o) como con base en peso verde (CH_v), de acuerdo con los modelos 1 y 2.

$$CH_o = (P_v - P_o) / P_o \quad (1)$$



$$CH_v = (P_v - P_o) / P_v \quad (2)$$

Donde: P_v es el peso en verde y P_o el peso anhidro (g)

Fue instalado un experimento en cámaras de ambiente controlado, con un régimen día/noche de 25 °C/20 °C y un fotoperiodo de 10 h, con luz fluorescente (radiación fotosintéticamente activa media = 134.7 $\mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$). Las siembras se hicieron en cajas de plástico de 3.5 L con tapa y como sustrato se utilizó tela de paño. El paño quedó sobre una retícula de plástico con soportes y un extremo de la tela se dejó en contacto con el fondo de la caja y el agua, por lo cual no fue necesario regar más que inicialmente las semillas, con 250 mL de una solución de agua destilada con el fungicida Captán (2 g L⁻¹).

La nuez fue clasificada en chica (≤ 1.70 cm de longitud de bellota) y grande (> 1.70 cm), así como por su color en café oscuro y café claro. Parte de las nueces fueron sembradas bajo una sombra de 40%, la cual se aplicó forrando las cajas correspondientes con tela de tul verde a doble capa. La semilla fue considerada germinada cuando la radícula igualó la longitud de la nuez. Las semillas sembradas en la condición sombreada siempre fueron mantenidas en tal condición, incluso el registro de su germinación se hizo en cuarto con luz tenue. El experimento duró 41 días: fue instalado el 30 de octubre y finalizado el 10 de diciembre de 2015. La germinación fue evaluada diariamente. También se evaluó la energía germinativa, como el número de días para alcanzar 70% de la capacidad germinativa.

El diseño experimental fue en bloques completamente al azar, con seis repeticiones y con los bloques anidados dentro del factor sombra, de acuerdo con el modelo 3. Cada repetición constó de 12 nueces y cada bloque de 48 de ellas.

$$y_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + \gamma_k(\zeta)_l + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + \alpha_i \gamma_k(\zeta)_l + (\beta\gamma)_{jk} + \beta_j \gamma_k(\zeta)_l + (\alpha\beta\gamma)_{ijk} + \alpha_i \beta_j \gamma_k(\zeta)_l + \varepsilon_{ijkl} \quad (3)$$

Donde: μ =media general, α_i = efecto del i-ésimo nivel del factor tamaño de la nuez, β_j = efecto del j-ésimo nivel del

factor color de la nuez, γ_k = efecto del k-ésimo nivel del factor sombra, $\gamma_k(\zeta)_l$ = efecto del l-ésimo bloque, anidado dentro del k-ésimo nivel del factor sombra, $(\alpha\beta)_{ij}$ = interacción entre el i-ésimo nivel del factor tamaño de nuez con el j-ésimo nivel del factor color de nuez, $(\alpha\gamma)_{ik}$ = interacción entre el i-ésimo nivel del factor tamaño de nuez y el k-ésimo nivel del factor sombra, $\alpha_i \gamma_k(\zeta)_l$ = interacción entre el i-ésimo nivel del factor tamaño de nuez y el l-ésimo bloque anidado dentro del k-ésimo nivel del factor sombra, $(\beta\gamma)_{jk}$ = interacción entre el j-ésimo nivel del factor color de la nuez y el k-ésimo nivel del factor sombra, $\beta_j \gamma_k(\zeta)_l$ = interacción entre j-ésimo nivel del factor tamaño de nuez y el l-ésimo bloque anidado dentro del k-ésimo nivel del factor sombra, $(\alpha\beta\gamma)_{ijk}$ = efecto de la interacción entre el i-ésimo nivel del factor tamaño de la nuez con el j-ésimo nivel del factor color de la nuez y el k-ésimo nivel de sombra, $\alpha_i \beta_j \gamma_k(\zeta)_l$ = efecto de la interacción entre el i-ésimo nivel del factor tamaño de la nuez, el j-ésimo nivel del factor color de la nuez y el l-ésimo bloque, anidado dentro del k-ésimo nivel del factor sombra, ε_{ijkl} = error experimental (0, σ^2). Los efectos de los factores tamaño y color de nuez, así como sombra, son fijos, los bloques y todas sus interacciones y anidaciones con efectos aleatorios.

Con el propósito de obtener la probabilidad de germinación de las semillas (P), se utilizó un modelo logístico (4).

$$P = 1 / (1 + e^{- (\alpha + \beta x_1 + \beta x_2 + \beta x_3)}) \quad (4)$$

Donde: e = base de los logaritmos naturales, α = ordenada al origen, β = parámetro asociado a la variable independiente X_1 (tamaño de la nuez, grande = 1, chica = 0), β_2 = constante asociada a la variable independiente X_2 (color de la nuez, café oscuro = 1, café claro = 0), y β_3 = constante asociada a la variable independiente X_3 (sombra, con sombra = 1, sin sombra = 0).

Para el análisis estadístico se utilizó el procedimiento mixto (Proc Mixed) de SAS para microcomputadoras, v. 9.0. Los grados de libertad se calcularon con el método Satterthwaite. También se llevó a cabo una prueba de

comparación de medias de Tukey, utilizando el procedimiento ANOVA de SAS. En los análisis anteriores, por ser binomial la variable germinación fue transformada con la función (5):

$$G_t = \arcsen(G)^{0.5} \quad (5)$$

Donde: G_t = germinación transformada, \arcsen = arco seno, G = germinación (en tanto por uno). Para facilitar la comprensión de los resultados de la comparación de medias, se utilizaron los valores de germinación final sin transformar.

En el caso del análisis de probabilidad de germinación, fue empleado el procedimiento logistic (Proc Logistic), también de SAS. A este modelo se le aplicó la prueba de bondad de ajuste de Hosmer-Lemeshow. Además se verificó que el intervalo de confianza no contuviera el valor 1 y que la concordancia fuera alta, mayor a 60%. Para el análisis mixto, la prueba de comparación de medias de Tukey y la significancia del modelo mixto y sus variables, fue considerada $p \leq 0.05$.

RESULTADOS

Descripción de la semilla

Las nueces mostraron una importante variación en tamaño, entre 1.36 cm y 2.30 cm de longitud, aunque Vázquez (1992) refiere nueces más pequeñas para esta especie, de hasta 0.8 cm. Las partes principales de nuez y semilla se muestran en la figura 1.

Pruebas físicas

Como en el laboratorio se trabajó con nueces limpias, la pureza fue de 100%. El peso de mil nueces fue igual a 2305.6 g; se tuvieron 434 nueces kg^{-1} . El contenido de humedad, base anhidra, fue de 105%, en tanto que con base en verde alcanzó 51.2%, lo que confirma que se trata de una semilla recalcitrante.

Germinación

Los factores tamaño de nuez ($p = 0.0067$), color de nuez (< 0.0001) y sombra ($p = 0.0078$) resultaron estadísticamente significativos para la capacidad germinativa. La prueba de comparación de medias mostró que las semillas grandes, color café oscuro y con sombra, germinaron mejor que sus contrapartes pequeñas, color café claro y

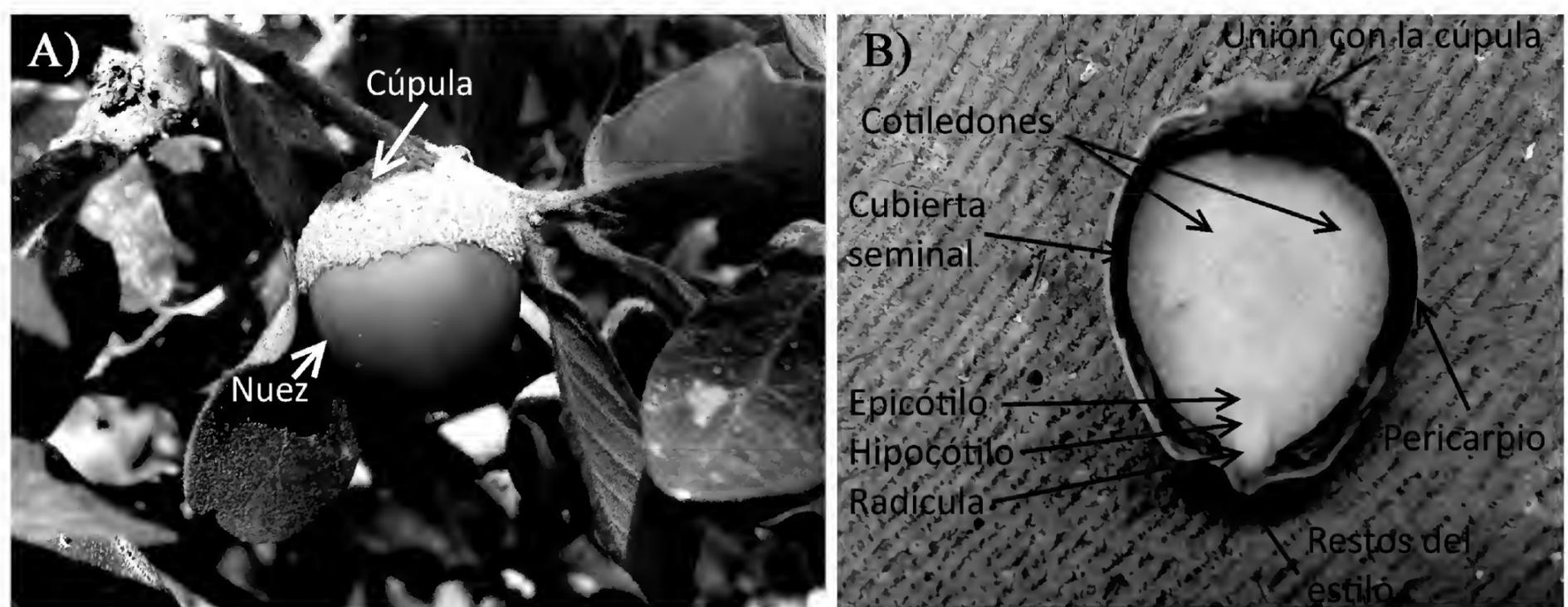


FIGURA 1. Principales partes de fruto y semilla de *Quercus deserticola*. A) Vista exterior de la nuez. B) Corte longitudinal de fruto y semilla.



sin sombra (Tabla 1). Las curvas de germinación acumulada se muestran en la figura 2.

También se hizo un análisis considerando las combinaciones de los diferentes niveles de los factores como tratamientos independientes y resultó significativo ($p < 0.0001$). El tratamiento nueces grandes, color café oscuro y con sombra, alcanzó 100% de capacidad germinativa;

TABLA 1. Resultados de la prueba de comparación de medias de Tukey, para capacidad germinativa, en relación con los tres factores bajo estudio.

Factor	Nivel	Capacidad germinativa (%)
Tamaño de nuez	Grande	77.5a
	Pequeña	70.6b
Color de nuez	Café oscuro	92.9a
	Café claro	55.2b
Sombra	Con	77.1a
	Sin	71.0b

Pares de niveles de factores con letra distinta tuvieron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre sí.

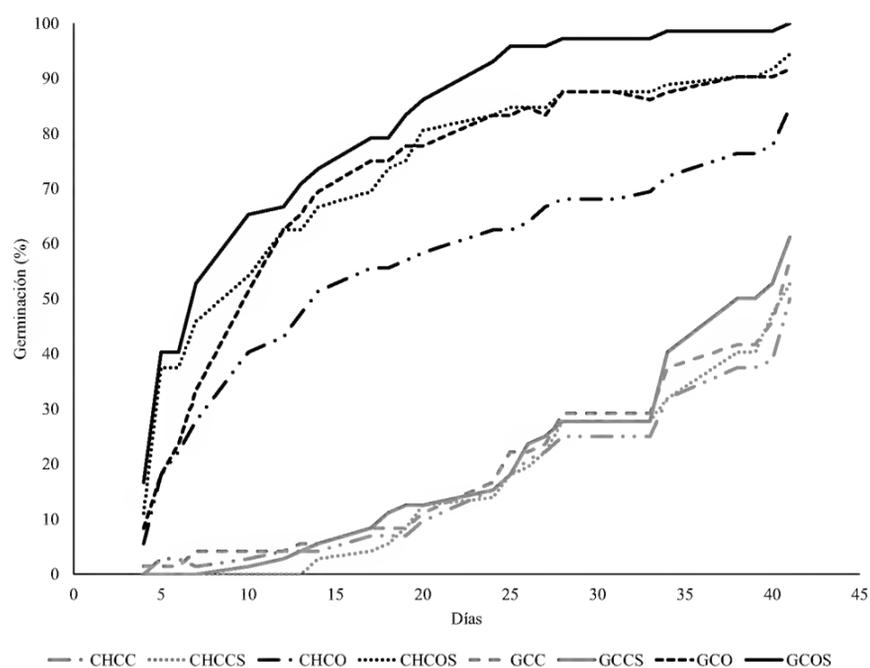


FIGURA 2. Curvas de germinación acumulada en *Quercus deserticola*, para los diferentes tratamientos. CH = nuez chica, G = nuez grande, CC = color café claro, CO = color café oscuro, S = con sombra.

en tanto que el tratamiento con semillas pequeñas, color café claro y sin sombra, solo tuvo 50% (Tabla 2).

Energía germinativa

La energía germinativa tuvo diferencias significativas en los factores color ($p < 0.0001$) y para la interacción tamaño*color ($p = 0.0267$). La prueba de comparación de medias de Tukey arrojó diferencias entre colores ($p < 0.05$), con promedios iguales a 14.5 días para la nuez café oscuro y 34.2 días para la nuez color café claro. Se halló la mayor energía germinativa en las nueces grandes y color café oscuro, con 11.5 días para alcanzar 70% de la capacidad germinativa. La interacción tamaño*color se muestra en la figura 3.

Probabilidad de germinación

En relación con la probabilidad de germinación, los factores individuales fueron significativos. No así la totalidad de las interacciones ($p > 0.05$), por lo cual fueron eliminadas del modelo, volviendo a realizar al análisis, cuyos resultados se muestran a continuación. La significancia de las variables se muestra en la tabla 3. La prueba de bondad de ajuste de Hosmer-Lemeshow arrojó una $p = 0.3309$, lo cual significa que el modelo está correctamente especificado.

TABLA 2. Comparación de medias para capacidad germinativa de *Q. deserticola*, considerando combinaciones de niveles de factores como tratamientos.

Tratamiento	Capacidad germinativa (%)
GCOS	100.0a
CHCOS	94.7ab
GCON	91.8ab
CHCON	85.0b
GCCS	61.0c
GCCN	57.0c
CHCCS	52.8c
CHCCN	50.0c

G = nuez grande, CH = nuez chica, CO = café oscuro, CC = café claro, S = con sombra, N = sin sombra.

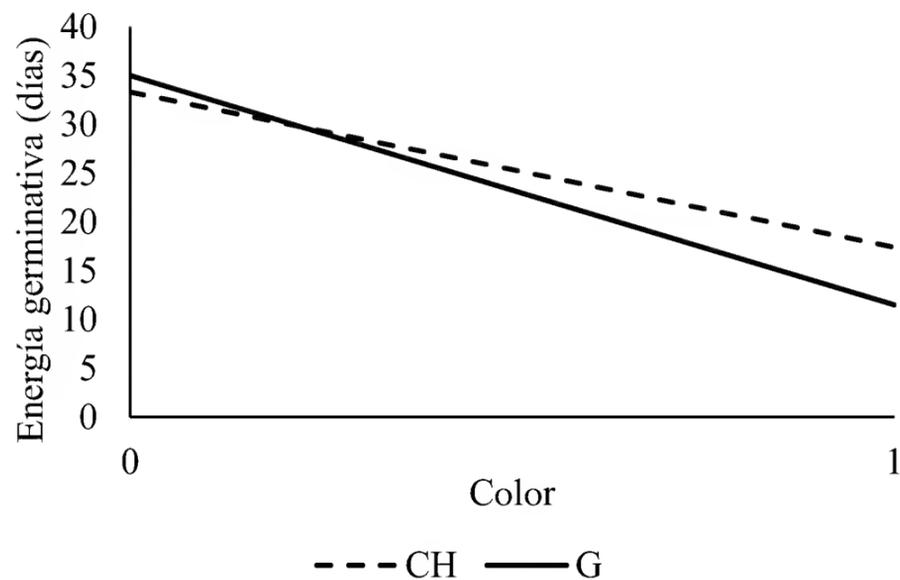


FIGURA 3. Interacción tamaño y color de la nuez para la energía germinativa de la semilla de *Q. deserticola*. Tamaño: CH = chica, G = grande. Color: 0 = café claro, 1 = café oscuro.

El modelo obtenido fue (6):

$$P = 1 / (1 + e^{-(1.3719 + 0.2326X_1 + 1.1582X_2 + 0.1886X_3)}) \quad (6)$$

De esta forma, la probabilidad de germinación para semillas grandes, café oscuras, con el nivel de sombra y condiciones planteadas para este experimento, alcanza 55.2%; en cambio para semillas pequeñas, color café oscuro y sin sombra, tal valor es 20.2% (Tabla 4).

DISCUSIÓN

El contenido de humedad letal de la semilla en muchos *Quercus* de Estados Unidos va de 15% a 20% en encinos rojos y negros, y de 25% a 30% en los blancos (Bonner, 2008). La semilla del encino estudiado, que es del subgénero de los blancos, tuvo un contenido de humedad mayor (51.2%), cifra dentro del intervalo de 40% a 50%, considerado como seguro por Bonner (2008) y con potencial para almacenar a 1 °C – 3 °C semillas de encinos blancos, por 0.5 a 3 años. Zavala (2004) señala que aunque el contenido de humedad de la semilla de *Q. deserticola* sea reducido a poco menos de 50%, germinará bien. Además, puntualiza que se puede almacenar en temperaturas de 3

TABLA 3. Significancia de intercepto y variables para el modelo logístico.

Variable	p	Intervalo de confianza al 95%
Intercepto	<0.0001	
Tamaño	0.0281	1.05 a 2.413
Color	<0.0001	6.615 a 16.675
Sombra	0.0746	0.963 a 2.208

TABLA 4. Probabilidad de germinación para semillas de *Q. deserticola*, en función del tamaño de semilla, su color y sombra.

Tamaño	Color	Sombra	p (%)
Grande	Café oscuro	Con	55.2
Grande	Café oscuro	Sin	50.5
Grande	Café claro	Con	27.9
Grande	Café claro	Sin	24.2
Pequeña	Café oscuro	Con	49.4
Pequeña	Café oscuro	Sin	44.6
Pequeña	Café claro	Con	23.4
Pequeña	Café claro	Sin	20.2

°C a 7 °C por más de seis meses, luego de los cuales su viabilidad será de por lo menos 50%.

La variación en tamaño de la semilla, dada por la relación de tamaño de la mayor semilla hallada entre el tamaño de la más pequeña encontrada, fue igual a 1.69, de modo que según Leishman, Wright, Moles y Westoby (2000) tal relación es menor a un orden de magnitud y variación intraespecífica típica. No obstante, Vázquez (1992) refiere semillas tan pequeñas como 0.8 cm de longitud, con lo cual a nivel de especie la relación mencionada alcanza 2.87, cifra que rebasa un orden de magnitud (valor = 2).

Dicha variabilidad de tamaño es común en el género, tanto entre especies como entre poblaciones y dentro de un mismo árbol. Por ejemplo, Márquez, Mendizábal-Hernández y Flores (2005) hallaron variabilidad significativa



en largo, ancho y peso de las semillas de *Q. oleoides* Schltdl. & Cham. del centro de Veracruz, tanto entre diferentes sitios como entre árboles.

La mayor germinación de semillas grandes de *Q. deserticola* corresponde con lo que Bonner (2008) documenta para varias semillas del género en Estados Unidos y con los resultados de Huerta y Rodríguez (2011) para *Quercus rugosa* de México central. Esto se debe a que las plántulas de semillas grandes son más capaces de emerger desde mayores profundidades que las de semillas pequeñas (Baskin y Baskin, 2001). Además, las semillas grandes de encinos producen un sistema radical más extenso y profundo que los de semillas más pequeñas, lo cual les permite obtener agua más eficientemente en ambientes con limitaciones de humedad (Zavala y García, 1996). De forma similar al presente trabajo, las semillas pesadas de *Quercus dealbata* L. y *Q. griffithii* Hk. f. & Th., de un bosque tropical seco de la India, germinan más rápido que las ligeras, si bien no necesariamente las semillas más pesadas eran las más grandes (Tripathi y Khan, 1990).

Respecto a que las semillas de nueces color café oscuro germinaron mejor que las de color café claro, la variación en color hallada en la especie estudiada se relaciona con el nivel de madurez. Al madurar, las nueces pasan del color verde al café oscuro y después lo van perdiendo, se van haciendo más pálidas. La especie estudiada comienza la producción de bellotas en octubre y la recolección se hizo a fines de ese mes, por lo cual se estima que la edad de las nueces color café claro que estaban en el piso forestal, no excedía de tres a cuatro semanas. El nivel de palidez puede estar relacionado con la pérdida de viabilidad en estas semillas recalcitrantes, la cual es del orden de seis meses.

Debido a que la semilla de *Q. deserticola* bajo sombra germinó más que la expuesta, se evidencia una ligera fotoinhibición. De acuerdo con Pons (2000), en algunas especies cuya semilla yace en la superficie del suelo se evita la germinación en sitios expuestos, donde las condiciones no son adecuadas para el establecimiento, en particular por limitaciones de humedad, aunque esta relación entre luz y humedad no está esclarecida del todo. De la misma

forma, Zavala (2001) señala que los encinos crecen en zonas con sequías estivales y las plántulas se establecen a la sombra de ellos o de plantas del sotobosque, por lo cual las plántulas de encinos compiten con las plantas que lo componen. El producir pocas semillas grandes les ha conferido ventaja adaptativa sobre las especies que producen semilla pequeña. Por otra parte, las especies con semilla pequeña tienen mayor mortalidad en condiciones de sombra (Lesishman *et al.*, 2000).

Q. deserticola se halla normalmente en terrenos rocosos de colinas secas o semisecas, rocosas. La especie es común en bosques de encino y de oyamel, en áreas abiertas o perturbadas (Zavala, 2007). En esas localidades, la sombra de la misma copa del árbol madre puede generar un microclima favorable, que prevenga la deshidratación, favoreciendo la germinación de la semilla.

Hay evidencia de que la germinación de especies de *Quercus* con semilla grande se ve favorecida por la sombra, mientras que en las especies con semilla pequeña favorece la exposición a la radiación solar directa (Zavala y García, 1996). Esta tendencia se halló en San Luis Potosí, al comparar *Q. coccolobifolia* Trel., que tiene semilla pequeña (0.8 cm a 1.0 cm) y que se regenera más a plena luz con *Q. affinis* Scheidw., el cual tiene semilla más grande (0.9 cm a 1.3 cm) y cuya regeneración se da mejor bajo sombra (Castillo, Flores, Aguirre y Yeaton, 2008). Sin embargo, a nivel intraespecífico en la población aquí estudiada de *Q. deserticola* no se observó esa tendencia para la capacidad germinativa.

A una procedencia de *Q. deserticola* de la Mixteca Alta, Oaxaca, se le registró germinación de 53% a 18 °C y con un fotoperiodo de 12 h (Martínez-Pérez, Orozco-Segovia y Martorell, 2006). Comparativamente los resultados del presente trabajo fueron superiores bajo las condiciones del mejor tratamiento: 25 °C/20 °C, fotoperiodo de 10 h y semillas grandes, color café oscuro y bajo sombra. Incluso los tratamientos con menor germinación prácticamente igualaron los de la referencia señalada.

La interacción entre tamaño de la semilla y su color, incide en la energía germinativa de la especie bajo estudio y, de acuerdo con Huerta y Rodríguez (2011), el pri-

mer factor, en interacción con la temperatura, influye en la de *Q. rugosa*. En ambos estudios la semilla grande tuvo mayor energía germinativa, es decir, requirió de menos tiempo para alcanzar 70% de la capacidad germinativa. De manera similar a la capacidad germinativa, después de la maduración, conforme la nuez pierde intensidad en su color, la energía germinativa también se reduce, es decir, requiere más días para alcanzar 70% de la capacidad germinativa y esto es más evidente en las semillas pequeñas.

CONCLUSIONES

Como en otras especies de encinos, las semillas de mayor tamaño de *Q. deserticola* exhibieron una capacidad germinativa superior. Las nueces color café claro son una etapa de madurez posterior a las de color café oscuro, y tuvieron semillas con una menor germinación. Por ello, es mejor utilizar nueces oscuras en los viveros forestales. Si bien este encino es considerado de etapas sucesionales iniciales, mostró una ligera fotoinhibición a la germinación, ya que una sombra ligera (de 40%) promovió la germinación. Las semillas grandes, de nueces oscuras y bajo sombra ligera alcanzaron la máxima capacidad germinativa (100%), mientras que las semillas pequeñas, de nueces color café claro y sin sombra, solamente alcanzaron la mitad de dicha germinación. También con las nueces grandes, color café oscuro y bajo sombra ligera se tuvo la mayor probabilidad de germinación, en tanto que la mejor energía germinativa se logró con nueces grandes, color café oscuro.

REFERENCIAS

- Arizaga, S., Martínez-Cruz, J., Salcedo-Cabrales, M. y Bello-González, M. A. (2009). *Manual de la biodiversidad de encinos michoacanos*. México: Semarnat, INE.
- Baskin, C. C. y Baskin, J. M. (2001). *Seeds. Ecology, biogeography, and evolution of dormancy and germination*. EUA: Academic Press.
- Bonner, F. T. (2008). *Quercus*. L. Oak. En F.T. Bonner y R. P. Karrfalt (Eds.), *The Woody Plant Seed Manual*. *Agriculture Handbook 727*(pp. 928-938). Washington D.C.: USDA Forest Service.
- Castillo, L. P., Flores C., J. A., Aguirre R., J. R. y Yeaton H., R. I. (2008). Dinámica sucesional del encinar de sierra de Álvarez, S. L. P. *Madera y Bosques*, 14 (1), 21-35.
- Dawson, T. P., Jackson, S. T., House, J. I., Prentice, I. C. y Mace, G. M. (2011). Beyond predictions: biodiversity conservation in a changing climate. *Science*, 332, 53-58.
- Huerta P., R. y Rodríguez-Trejo, D. A. (2011). Tamaño de semilla y temperatura: sus efectos en la germinación de *Quercus rugosa* Née. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 17 (2), 179-187.
- Leishman, R. L., Wright, I. J., Moles, A. T. y Westoby, M. (2000). The evolutionary ecology of seed size. En M. D. Fenner (Ed.) *Seeds. The ecology of regeneration in plant communities* (2nd ed.) (pp. 31-57). United Kingdom: Cabi Pub.
- Márquez, R. J., Mendizábal-Hernández, L. C. y Flores R., C. I. (2005). Variación en semillas de *Quercus oleoides* Schl. et Cham. de tres poblaciones del centro de Veracruz. *Foresta Veracruzana*, 7 (1), 31-36.
- Martínez-Pérez, G., Orozco-Segovia, A. y Martorell, C. (2006). Efectividad de algunos tratamientos pre-germinativos para ocho especies leñosas de la Mixteca Alta oaxaqueña con características relevantes para la restauración. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 79, 9-20.
- Pons, T. L. (2000). Seed responses to light. En M. D. Fenner (Ed.) *Seeds. The ecology of regeneration in plant communities* (2nd ed.) (pp. 237-260). United Kingdom: Cabi Pub.
- Rzedowski, J. (1978). *Vegetación de México*. México: Limusa.
- Tenorio-Galindo, G., Rodríguez-Trejo, D. A. y López-Ríos, G. (2008). Efecto del tamaño y color de la semilla en la germinación de *Cecropia obtusifolia* Bertol (Cecropiaceae). *Agrociencia*, 42 (5), 585-593.
- Tripathi, R. S. y Khan, M. L. (1990). Effects of seed weight and microsite characteristics on germination and seedling fitness in two species of *Quercus* in a subtropical west hill forest. *Oikos*, 57, 289-296.
- Vázquez V., M. L. (1992). El género *Quercus* (Fagaceae) en el estado de Puebla, México. Tesis de licenciatura no publicada. Escuela Nacional de Estudios Profesionales Zaragoza, UNAM. México, D. F.



Zavala Ch., F. y García M., E. (1996). *Frutos y semillas de encinos*. Chapingo, Edo. de Méx.: Universidad Autónoma Chapingo.

Zavala Ch., F. (2001). *Introducción a la ecología de la regeneración natural de encinos*. Chapingo, Edo. de Méx.: Universidad Autónoma Chapingo.

Zavala Ch., F. (2003). *Identificación de encinos de México*. Chapingo, Edo. de Méx.: Universidad Autónoma Chapingo.

Zavala Ch., F. (2004). Desección de bellotas y su relación con la viabilidad y germinación en nueve especies de encinos mexicanos. *Ciencia ergo sum*, 11 (2), 177-185.

Zavala Ch., F. (2007). *Guía de los encinos de la Sierra de Tepotzotlán, México*. Chapingo, Edo. de Méx.: Universidad Autónoma Chapingo.

Manuscrito recibido el 12 de febrero de 2016.

Aceptado el 4 de julio de 2016.

Este documento se debe citar como:

Rodríguez-Trejo, D. A. y Pompa-García, M. (2016). Tamaño, color de nuez y sombra afectan la germinación de *Quercus deserticola*. *Madera y Bosques*, 22 (2), 67-75.



Germination and seedling emergence of four endangered oak species

Germinación y emergencia de plántulas de cuatro especies de encino amenazadas

Yureli García-De La Cruz¹, Fabiola López-Barrera^{2*} and José María Ramos-Prado³

¹ Universidad Veracruzana. Centro de Investigaciones Tropicales. Xalapa, Veracruz, México.

² Instituto de Ecología, A. C. Red de Ecología Funcional. Xalapa, Veracruz, México.

³ Universidad Veracruzana. Centro de Ecoalfabetización y Diálogo de Saberes. Xalapa, Veracruz, México.

* Corresponding author. fabiola.lopez@inecol.mx

ABSTRACT

Germination and emergence of the endangered cloud forest oak species *Quercus germana*, *Q. insignis*, *Q. sartorii* and *Q. xalapensis* were observed under different light conditions (sun *vs.* shade) in a secondary forest fragment (SFF) and in a greenhouse (GRE). Seed weight variability was evaluated for each species and its relationship to germination and emergence determined. After 60 days, a total of 62.17% of the acorns had germinated and 37.79% had emerged in both experiments. Germination was highest in *Q. sartorii* (71.83% \pm 2.09%), followed by *Q. germana* (66.33% \pm 2.06%), *Q. insignis* (60.83% \pm 2.34%) and *Q. xalapensis* (53.50% \pm 2.32%). In the GRE, *Q. insignis* germination was higher under sun (62.00% \pm 4.73%) than shade (48.00% \pm 5.12%), whereas its emergence was the lowest (37.66% \pm 3.46%) compared to other species in both light environments. In the SFF, germination and emergence only differed among species; *Q. xalapensis* germination was lowest (47.00% \pm 3.11%) and *Q. sartorii* emergence was highest (58.66% \pm 3.35%), compared to the other species. Acorn weight did not influence germination or emergence in any species. The implications of this study are discussed, along with recommended propagation techniques for growing oaks for forest restoration in disturbed areas.

KEYWORDS: early seedling establishment, light environment, *Quercus*, seed mass, tropical montane cloud forest.

RESUMEN

La germinación y emergencia de encinos amenazados del bosque de niebla, *Quercus germana*, *Q. insignis*, *Q. sartorii* y *Q. xalapensis* fue evaluada bajo diferentes condiciones lumínicas (sol *vs.* sombra) en un fragmento de bosque secundario (SFF) y un invernadero (GRE). Para cada una de las especies, la variabilidad del peso de la semilla fue relacionada con la germinación y emergencia. Después de 60 días, en ambos experimentos, un total de 62.17% de las bellotas germinaron y 37.79% emergieron. La germinación fue mayor en *Q. sartorii* (71.83% \pm 2.09%), seguido de *Q. germana* (66.33% \pm 2.06%), *Q. insignis* (60.83% \pm 2.34%) y *Q. xalapensis* (53.50% \pm 2.32%). En el GRE, la germinación de *Q. insignis* fue mayor bajo el sol (62.00% \pm 4.73%) que bajo la sombra (48.00% \pm 5.12%), mientras que su emergencia fue la más baja (37.66% \pm 3.46%) comparada con otras especies en ambos ambientes lumínicos. En el SFF, la germinación y emergencia solo fueron diferentes entre especies; *Q. xalapensis* registró la germinación más baja (47.00% \pm 3.11%) y *Q. sartorii* la emergencia más alta (58.66% \pm 3.35%) comparada con el resto de las especies. El peso de la bellota no influyó en la germinación y emergencia de las especies. Se discuten las implicaciones de este estudio, así como recomendaciones sobre técnicas de propagación para la producción de encinos para restaurar bosques en áreas perturbadas.

PALABRAS CLAVE: establecimiento temprano de plántulas, ambiente lumínico, *Quercus*, peso de semilla, bosque de niebla.

INTRODUCTION

Tropical montane cloud forests (TMCF) are a group of mountain communities characterized by the frequent presence of cloud and normally high levels of relative air humid-

ity (Hamilton, Juvik, & Scatena, 1995). Their physiognomy, structure and composition depend on factors such as latitude, elevation, wind and precipitation patterns, as well as evolutionary history, all of which lead to the high beta

diversity reported for this forest type (Bubb, May, Miles, & Sayer, 2004). Worldwide, TMCF cover a mere 0.14% of the land surface (Scatena, Bruijnzeel, Bubb, & Das, 2010) and are considered one of the most endangered ecosystems because of their limited distribution and the high rates of deforestation to which they are subjected (Toledo-Aceves, Meave, González-Espinosa, & Ramírez-Marcial, 2011).

Oaks (genus *Quercus*) are an important component of TMCF, since they are dominant canopy species of high importance values and can generate microenvironments that are suitable for the establishment of other species (Kapelle, 2006). Mexico has the highest richness of oaks in the world, with approximately 160 species (109 endemic species; Valencia, 2004; Valencia & Gual-Díaz, 2014). Of these, 38 have been reported in the TMCF of Mexico and 33 of these are at some degree of risk (González-Espinosa, Meave, Lorea-Hernández, Ibarra-Manríquez, & Newton, 2011).

Despite the risk of extinction of the oak populations that dominate TMCF canopies, little is known about their regeneration ecology (Valencia & Gual-Díaz, 2014). While they are considered intermediate or late successional species, some species have been reported to successfully regenerate in open areas and thus demonstrate potential for use in ecological restoration programs (López-Barrera, Manson, González-Espinosa, & Newton, 2006; Ramírez-Marcial, Camacho-Cruz, González-Espinosa, & López-Barrera, 2006). However, for other oak species, different limiting factors that affect regeneration have been documented in open areas and difficulties have been reported in terms of their conservation (Quintana-Ascencio, González-Espinosa, & Ramírez-Marcial, 1992; Ortega-Pieck, López-Barrera, Ramírez-Marcial, & García-Franco, 2011; Montes-Hernández and López-Barrera, 2013).

Several studies have analyzed early establishment in oaks and compared different habitats, including: a) forest successional stages (Li and Ma, 2003; Gómez, 2004; González-Rodríguez, Barrio, & Villar, 2012), b) light gradients within the forest (Gómez-Aparicio *et al.*, 2008; Pérez-Ramos, Gómez-Aparicio, Villar, García, & Marañón, 2010), c) open sites *vs.* closed canopy forest

(Negi, Negi, & Singh, 1996; Fan, Guo, Wang, & Duan, 2014) and different light environments under greenhouse and laboratory conditions (Khan and Shankar, 2001; Quero, Villar, Marañón, Zamora, & Poorter, 2007). Temperature, light and humidity have been identified as the most important factors for the germination and emergence of oak seedlings (Ashton and Larson, 1996; Puerta-Piñero, Gómez, & Valladares, 2007).

Other factors have been identified that affect germination and emergence in oaks, including maternal origin (González-Rodríguez *et al.*, 2012), seed size (Tripathi and Khan, 1990), insect damage (Branco, Branco, Merouani, & Almeida, 2001; Yi and Zhang, 2008) and substrate characteristics (López-Barrera and González-Espinosa, 2001; Li and Ma, 2003; Flores-Cano, Badano, & Flores, 2012). These studies have demonstrated that the responses of the oaks to the evaluated factors are species specific; however, most of the study has been conducted with oaks of the temperate zone in forests dominated by a few species and little information is available about the effect of the light environment and seed quality on germination and emergence in the oak species that coexist in TMCF (Camacho-Cruz, González-Espinosa, Wolf, & De Jong, 2000).

OBJECTIVE

The objective of this study was to evaluate and compare the germination and emergence of four endangered oak species in TMCF (*Quercus germana*, *Q. insignis*, *Q. sartorii* and *Q. xalapensis*) in two experiments carried out in (1) a secondary forest fragment (SFF) and (2) a greenhouse (GRE), each featuring two light environment treatments (sun *vs.* shade). Acorn weight variability was also evaluated for each species and examined in the context of germination and emergence.

MATERIALS AND METHODS

Study species

Species were selected based on seed availability and the following criteria: 1) species were co-dominants of the TMCF canopy, 2) species were included on the red list of



Mexican tropical montane tree species (González-Espinosa *et al.*, 2011), 3) species were white or red oaks, and 4) seed weight and size were highly variable between species. *Quercus germana* (Schltdl. & Cham.) and *Quercus insignis* (M. Martens & Galeotti) belong to the *Quercus* section (white oaks) and are classified as critically endangered species. *Quercus sartorii* (Liebm.) belongs to the *Lobatae* section (red oaks). It is classified as an endangered species but there is no information about its regeneration ecology. *Quercus xalapensis* (Bonpl.) is also a red oak and is classified as a critically endangered species. *Quercus germana* and *Q. sartorii* are endemic to Mexico, while *Q. insignis* and *Q. xalapensis* occur in Mexico and Central America (González-Espinosa *et al.*, 2011).

Germination and emergence tests

This study was conducted in a secondary forest fragment, SFF (19° 27' 59.7" N and 96° 57' 09.1" W) and a greenhouse, GRE (19° 28' 00.6" N and 096° 57' 08.1" W) located in the municipality of Coatepec, in central Veracruz, Mexico (1250 m asl). The regional climate is tropical with a mean annual temperature of 17 °C - 20 °C (García, 1973) and mean annual rainfall of 1700 mm (Barradas *et al.*, 2010). The SFF is dominated by several arboreal species, including *Q. germana*, *Q. leiophylla*, *Alchornea latifolia*, *Clethra mexicana*, *Heliocarpus appendiculatus* and *Persea schiedeana*, among others. This site was TMCF but was then converted into a coffee plantation (1942) and subsequently abandoned 15 years ago (2000). Two light conditions were selected in the SFF: a 20 m x 20 m canopy gap (sun) and a 20 m x 20 m area with a closed canopy (shade). In the GRE, two light conditions were created: sun or open conditions (under a transparent plastic cover) and partial shade (created using a black shade cloth that blocked 30% of the light). In each treatment, Photosynthetically Active Radiation (PAR) was recorded once a month (November and December 2012) using the average of 30 readings taken over an hour with a ceptometer (Decagon LP-80) connected to an external sensor for calibration. This sensor was also useful for taking reference PAR readings in open conditions when measurements were taken

in the shade in SFF and in the GRE. To that end, the measurement units ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) were expressed as percentages of the values measured in open conditions. Air temperature and relative humidity were measured in each treatment using sensors (HOBO Pro Series Onset); readings were taken every 10 minutes during 60 days.

In October 2012, approximately 800 acorns were collected from ten trees of each species. Acorns of *Q. germana*, *Q. sartorii* and *Q. xalapensis* were collected from a TMCF fragment in Xalapa, Veracruz, while those of *Q. insignis* were collected from a TMCF fragment in Huatusco, Veracruz. Damaged seeds were discarded using the float method (Gribko & Jones, 1995). Each acorn was weighed, measured (length and width) and individually labeled to facilitate individual monitoring during the germination trials. Prior to the experiment, an adhesive label was used on each acorn for identification. This label was removed when the acorns were sown and replaced with a plastic label indicating the position of each acorn, but not attached to it.

Five acorns per species were sown in black polyethylene bags (20 cm x 25 cm; 7850 cm³) filled with a substrate composed of sieved SFF soil and fine gravel (50:50) sterilized using the solar method. A total of 600 acorns were sown per species (a total of 2400 acorns in 480 bags). A total of 120 bags were randomly assigned to each light condition in the SFF (sun and shade) and GRE (sun and shade) experiments. The bags were rotated to minimize edge effects and watered to field capacity every seven days (600 ml). The number of acorns that germinated and emerged was recorded every 10 days for 60 days, after no further germination or emergence occurred. Germination was defined as the first visual appearance of the radicle, while development of the aerial shoot was taken to define an emergence event.

Statistical analysis

The Pearson correlation coefficient (r) was used to analyze the relationships among morphometric acorn characteristics. The variable of final germination had a binary response (germinated or non-germinated), for which rea-

son generalized linear models (logistic regression, link function, binomial family) were performed to determine the effects of the factors of species (*Q. germana*, *Q. insignis*, *Q. sartorii* and *Q. xalapensis*), light environment (sun and shade) and acorn weight, as well as the interactive effect of species and light environment on germination and emergence. *Quercus germana* was excluded from the emergence analysis because of the low emergence presented by the species. To compare the germination and emergence curves, a survival analysis was performed using the Log-rank statistic (Kaplan-Meier) to analyze the temporal behavior of the variables. Logistic regression analyses were performed using R studio environment (v.0.98.1091) while the survival analysis was performed with SPSS (v.15.0). Values presented in the text are means \pm 1 standard error (SE), unless indicated otherwise.

RESULTS

Light environment

Available PAR in the SFF was $78.56\% \pm 3.34\%$ and $6.54\% \pm 2.21\%$ in the sun and shade experimental treatments, respectively. In the GRE experiment, available PAR was $46.33\% \pm 4.36\%$ and $4.24\% \pm 0.35\%$ in the sun and shade conditions, respectively. In the SFF, relative humidity and temperature under sun conditions were $90.50\% \pm 0.16\%$ and $16.04\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.04\text{ }^{\circ}\text{C}$ respectively. Under shade conditions, these values were $89.32\% \pm 0.12\%$ and $15.70\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.04\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectively.

In the GRE, relative humidity and temperature values under sun conditions were $88.01\% \pm 0.19\%$ and $16.91\text{ }^{\circ}\text{C}$

$\pm 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectively. Under shade conditions, these values were $91.01\% \pm 0.13\%$ and $16.37\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.04\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectively.

Acorn characteristics

The morphometric characteristics of the acorns are presented in table 1. There was greater variation in the weight of white oak (*Q. insignis* and *Q. germana*) acorns compared to those of the red oaks (*Q. xalapensis* and *Q. sartorii*). The maximum values and range of variation in acorn width, length and weight were observed in *Q. insignis* (Table 1). Acorn weight was correlated significantly to acorn diameter in *Q. insignis* ($r = 0.572$, $P < 0.0001$), *Q. germana* ($r = 0.122$, $P = 0.003$), *Q. sartorii* ($r = 0.530$, $P < 0.0001$) and *Q. xalapensis* ($r = 0.572$, $P < 0.0001$). Acorn width/length ratio (\pm SD) was 0.85 ± 0.05 for *Q. sartorii*, with similar values in *Q. insignis* and *Q. germana* (0.83 ± 0.13) but lower values in *Q. xalapensis* (0.68 ± 0.06).

Germination

After 60 days, 62.17% of the acorns in both experiments had germinated. Germination was highest in *Q. sartorii* ($71.83\% \pm 2.09\%$), followed by *Q. germana* ($66.33\% \pm 2.06\%$), *Q. insignis* ($60.83\% \pm 2.34\%$) and *Q. xalapensis* ($53.50\% \pm 2.32\%$). The germination curves revealed significant differences among species (Log-rank = 18.38, df = 3, $P < 0.001$). In all species, acorn germination began within the first 10 days of the experiment. During this period, *Q. germana* had the highest number of germinated seeds (42.50%), followed

TABLE 1. Morphometric characteristics of *Quercus* species. Data obtained from 600 fresh acorns from 10 trees of each species.

Species	Acorn weight (g)			Acorn width (mm)			Acorn length (mm)		
	Mean	SD	Range	Mean	SD	Range	Mean	SD	Range
<i>Q. insignis</i>	34.54	10.25	8.60 - 74.49	41.36	5.63	23.16 - 63.98	40.81	5.25	25.27 - 52.19
<i>Q. germana</i>	10.60	4.32	1.34 - 28.12	25.41	4.42	13.57 - 35.97	30.57	3.72	19.18 - 42.05
<i>Q. sartorii</i>	3.05	0.66	1.33 - 5.26	15.70	1.34	10.86 - 19.78	18.60	1.59	13.46 - 22.79
<i>Q. xalapensis</i>	2.77	0.90	0.47 - 5.29	14.21	1.71	9.09 - 19.37	20.88	2.33	11.37 - 26.30



by *Q. insignis* (29.17%), *Q. xalapensis* (24.17%) and *Q. sartorii* (14%; Fig. 1).

In the GRE experiment, overall acorn germination was $62.83\% \pm 1.66\%$ and was affected by species (Table 2), as well as by the interaction between species and light conditions. *Quercus insignis* germination was higher under sun than under shade conditions ($P < 0.05$; Table 3). In the SFF experiment, overall acorn germination was $63.42\% \pm 1.58\%$ and germination was affected by species (Table 2). Neither light environment nor acorn weight had a significant effect on germination. *Quercus xalapensis*

presented the lowest germination value compared to the other species ($P < 0.001$; Table 3).

Emergence

After 60 days, 37.79% of the seedlings of all four species had emerged in both experiments. *Quercus sartorii* presented the highest degree of emergence ($56.16\% \pm 2.59\%$), followed by *Q. xalapensis* ($53.50\% \pm 2.32\%$), *Q. insignis* ($40.8\% \pm 2.27\%$) and *Q. germana* ($1.33\% \pm 0.45\%$). According to observations made at the end of the experiment, the low proportion of emergence in the latter species was the result of an apparent fungal attack on the germinated acorns. The emergence curves revealed significant differences among species (Log-rank = 301.90, df = 3, $P < 0.001$). In the first emergence count, *Q. xalapensis* had the highest value (24.33%), followed by *Q. insignis* (21.17%), *Q. sartorii* (11.17%) and *Q. germana* (0.83%; Fig. 1).

In the GRE experiment, overall emergence was $38.33\% \pm 2.13\%$ and differed among species. *Quercus insignis* was the species with the lowest emergence and differed ($P < 0.001$) from *Q. sartorii* and *Q. xalapensis*. In the SFF experiment, overall seedling emergence was $37.58\% \pm 1.96\%$ and differences were found between species only. Neither light environment nor acorn weight had a significant effect on emergence (Table 2). *Quercus sartorii* presented the highest emergence, compared to *Q. insignis* and *Q. xalapensis* ($P < 0.001$).

DISCUSSION

Acorn weight

Contrary to our expectations, intraspecific variability in acorn weight did not affect acorn germination or seedling emergence. Species with considerable intraspecific variation in seed size may present enhanced establishment in a heterogeneous environment (Quero *et al.*, 2007). Some studies have reported that heavier and larger acorns also present higher germination (Bonfil 1998; Purohit, Tamta, Nandi, Rikhari, & Palni, 2003), while others report no such correlation (Tilki & Alptekin 2005; Yi, Wang, Liu,

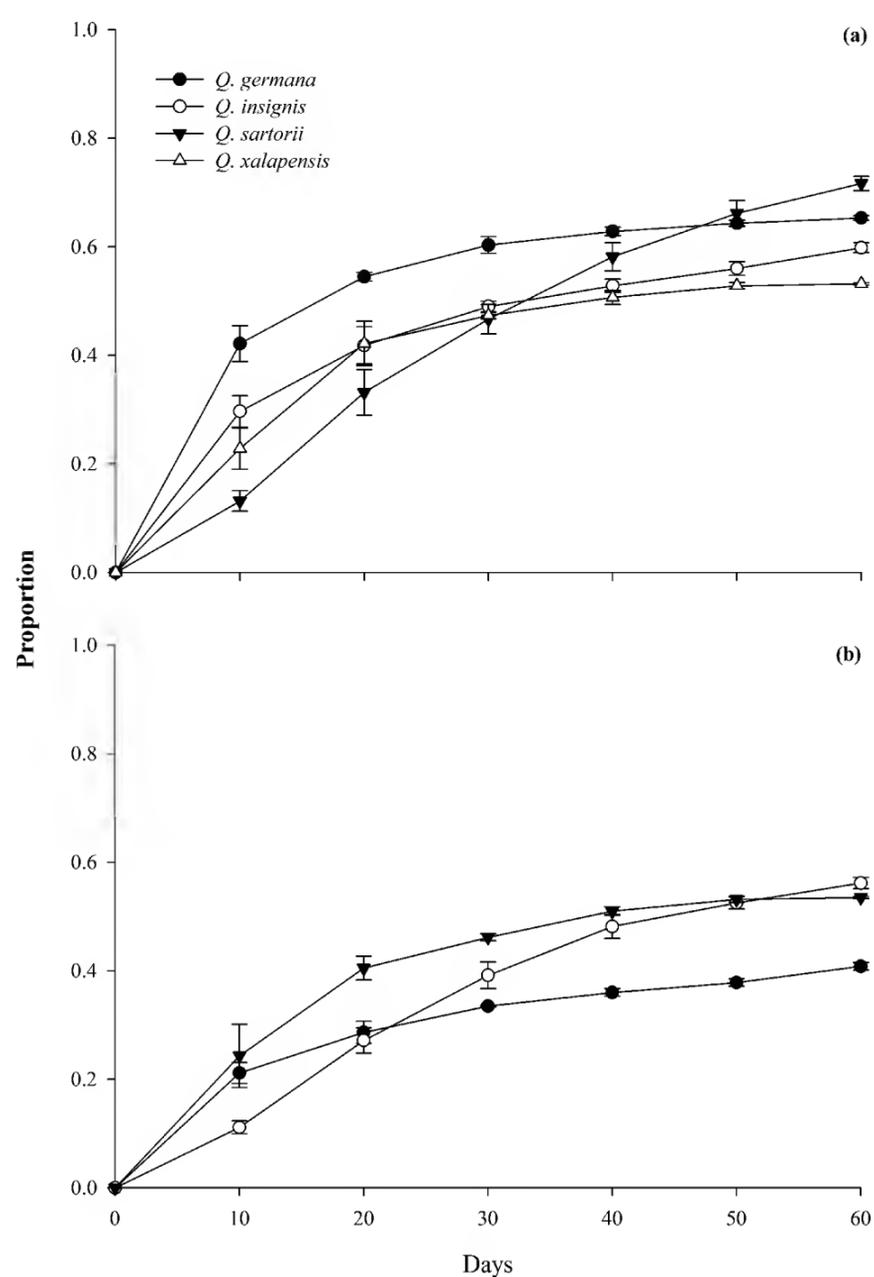


FIGURE 1. Proportion of a) germination and b) emergence in four *Quercus* species over a period of 60 days ($n=600$ acorns per species). Error bars indicate ± 1 standard error. *Quercus germana* was excluded from the emergence analysis because of the low emergence presented by this species.

TABLE 2. Results of the logistic regression model applied to *Quercus* species germination and emergence as a function of light environment (sun *vs.* partial shade), species (*Q. germana*, *Q. insignis*, *Q. sartorii* and *Q. xalapensis*) and acorn weight (continuous variable) in two experiments: Secondary Forest Fragment (SFF) and Greenhouse (GRE).

Germination		d.f.	Wald	p
SFF	Light environment	1	2.24	0.133
	Species	3	49.6	< 0.001
	Acorn weight	1	1.01	0.314
	Light environment × Species	3	7.69	0.052
GRE	Light environment	1	0.35	0.550
	Species	3	17.49	< 0.001
	Acorn weight	1	0.16	0.681
	Light environment × Species	3	10.11	0.017
Emergence		d.f.	Wald	p
SFF	Light environment	1	1.6	0.205
	Species	2	14.49	< 0.001
	Acorn weight	1	0.1	0.751
	Light environment × Species	2	1.46	0.480
GRE	Light environment	1	0.07	0.789
	Species	2	32.07	< 0.001
	Acorn weight	1	0.82	0.362
	Light environment × Species	2	0.44	0.800

Guoqiang, & Zhang, 2014). These differences can be attributed to specific-species responses, variation in maternal origin, differences in provenance and intraspecific temporal and spatial variability in the range of seed size and weight (Tilki & Alptekin 2005; Koenig, Knops, Dickinson, & Zuckerberg, 2009; González-Rodríguez *et al.*, 2012). Methodological factors such as acorn storage prior to the experiment, dry *vs.* fresh acorn weight and exclusive consideration of extreme seed size categories may also affect comparability between results (Seiwa 2000; Khan & Shankar 2001; Quero *et al.*, 2007). There is a clear need for long-term studies that more accurately reflect the variation in seed weight for each species, covering years of high and low seed production in order to accurately determine the intra and interspecific effect of acorn weight on germination and seedling establishment.

Species differences

The results of this study demonstrate that some of the evaluated species differ in terms of their rates and final values of germination and emergence. The studied white oak species (*Q. germana* and *Q. insignis*) mostly germinated within the first 10 days, which was more quickly than the red oaks (*Q. sartorii* and *Q. xalapensis*). This concurs with other reports of white oaks, which have been documented to germinate faster than red oaks in response to greater attack and browsing by predators (Fox 1982). White oak acorns are consumed more than those of the red oaks due to the larger seed size, greater cotyledon content and lower tannin content of the former. Tannins function as inhibitory toxins that deter predatory attack (Weckerly, Sugg, & Semlitsh, 1989; Smallwood, Steele, & Faeth, 2001).

TABLE 3. Percentages of germination and emergence (± 1 S.E.) for each of four *Quercus* species in two experiments.

		<i>Q. germana</i>		<i>Q. insignis</i>		<i>Q. sartorii</i>		<i>Q. xalapensis</i>	
		Germination	Germination	Emergence	Germination	Emergence	Germination	Emergence	
SFF	Sun	66.66 \pm 4.42	68.66 \pm 4.14	44.66 \pm 4.03	66.00 \pm 3.85	54.66 \pm 4.97	44.00 \pm 4.42	44.00 \pm 4.22	
	Shade	66.66 \pm 3.50	64.66 \pm 4.03	43.33 \pm 4.29	80.66 \pm 3.89	62.66 \pm 4.47	50.00 \pm 4.57	50.00 \pm 4.57	
	Total	66.66 \pm 2.79	66.66 \pm 2.87	44.00 \pm 2.92	73.33 \pm 2.87	58.66 \pm 3.35	47.00 \pm 3.11	47.00 \pm 3.11	
GRE	Sun	60.66 \pm 5.11	62.00 \pm 4.73	39.33 \pm 5.02	72.66 \pm 3.64	54.00 \pm 5.84	59.33 \pm 4.64	59.33 \pm 4.64	
	Shade	71.33 \pm 3.13	48.00 \pm 5.12	36.00 \pm 4.83	68.00 \pm 4.94	53.33 \pm 5.45	60.66 \pm 4.64	60.66 \pm 4.64	
	Total	66.00 \pm 3.05	55.00 \pm 3.57	37.66 \pm 3.46	70.33 \pm 3.06	53.66 \pm 3.96	60.00 \pm 3.25	60.00 \pm 3.25	

1. Secondary Forest Fragment experiment (SFF): sun treatment (under a canopy gap) and shade treatment (under closed canopy). 2. Greenhouse experiment (GRE): sun treatment (under transparent plastic cover) and partial shade treatment (under a shade cloth that reduced light by 30%). *Quercus germana* was excluded from the emergence analysis because of the low emergence presented by this species.

In spite of the high germination values of *Q. germana*, in this study, emergence of this species was almost null. *Q. germana* seeds were exposed to the same biotic and abiotic conditions as the other species and experimental replicates within each treatment were randomly determined and were also rotated during the study period. The lack of emergence of *Q. germana* acorns could be attributed to the synergistic effect of several factors, such as insect and fungal damage to the endosperm and/or the plumule (Leiva & Fernández-Alés 2005). Acorn quality varies between species but also presents temporal and spatial intraspecific variation (Yu, Zhou, & Luo, 2003; González-Rodríguez *et al.*, 2012). While we did employ the float method to identify and discard damaged seeds, some of the apparently undamaged acorns may have been infested with larvae but with minimal levels of damage to the cotyledon at the beginning of the experiment. Higher cotyledon damage might have occurred during the course of the study but, due to the large seed reserves of *Q. germana*, its germination rate was unaffected. This pattern has been documented for other species with large acorn reserves (Xiao, Harris, & Zhang, 2007; Yi & Yang 2010). However, this insect damage may have exposed the *Q. germana* acorns to subsequent fungal attacks and thus early embryo and cotyledon rot and decay. Fungal attack has been reported as a factor in mortality during emer-

gence in some oak species (Yamazaki, Iwamoto, & Seiwa, 2009). It is therefore necessary to conduct further emergence trials for *Q. germana* that take these factors (fungal and insect damage) into account, in order to fully understand how variability in emergence is related to the maternal origin of the seeds and intraspecific temporal and spatial variation of insect-infected acorns (Yu *et al.*, 2003; González-Rodríguez *et al.*, 2012).

Light environments

In this study, *Q. insignis* was the only species affected by light, with higher germination presented under the sun condition. *Quercus insignis* seedlings are capable of establishment in open sites; however, seedling survival is higher under partial vegetation cover since mortality is increased in open sites due to herbivory by gophers as well as competition with exotic grasses and bracken (*Pteridium aquilinum*; Montes-Hernández & López-Barrera 2013; Avendaño-Yáñez, Sánchez-Velásquez, Meave, & Pineda-López, 2014)

CONCLUSIONS

We conclude that, in general, variation in the light environment and in acorn weight had no significant effect on germination or emergence in either experiment. These species can therefore be propagated in nurseries for the

purposes of introduction into degraded sites. It is necessary, however, to test whether this plasticity in the studied species continues into the following stages of regeneration, under both controlled and field conditions. Similarly, there are other factors that were not controlled in this experiment, such as differences in evapotranspiration rates in the two experiments, and this remains to be quantified in future studies.

Management implications

In this study, the germination and emergence values did not differ between the experiments conducted in the SFF and the GRE. This suggests that there is no need for a substantial investment in infrastructure in order to reproduce these species, but rather that the local inhabitants or owners of deteriorated forests could propagate them in sites close to their own homes. These sites could be equipped with moderate shading that would act to protect the seeds and seedlings from variations in temperature and humidity.

The oaks studied here are classified as endangered species, owing to the high rate of deforestation to which the TMCF is subjected and which has caused decreased populations. However, the germination and emergence values reported here for *Q. insignis*, *Q. sartorii* and *Q. xalapensis* are within the ranges published for other non-endangered species. While emergence failed in *Q. germana*, the germination was high and it is a species that has been successfully propagated in local nurseries (Carlos Iglesias, pers. comm.). Considering this, there are opportunities to reproduce these species in nurseries and to test their survival and growth under field conditions. Plantations including these species would have a two-fold objective: to encourage their reintroduction in order to increase populations and to restore the structure and function of TMCF, since such plantations can accelerate secondary succession and thus the recuperation of environmental interactions and the services these provide.

ACKNOWLEDGMENTS

The first author thanks CONACYT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología) for the doctoral scholarship (No.

272172) awarded for studies at the *Centro de Investigaciones Tropicales, Universidad Veracruzana*. The authors are grateful to the owners and managers of the sites where the seeds were collected; Alan Wright and Paula Kline of *Rancho Las Bellotas* and to Rafael Fernando Velasco Hernández in Xalapa.

REFERENCES

- Ashton, M. S., & Larson, B. C. (1996). Germination and seedling growth of *Quercus* (section *Erythrobalanus*) across openings in a mixed-deciduous forest of southern New England, USA. *Forest Ecology and Management*, 80, 81-94.
- Avendaño-Yáñez, M. L., Sánchez-Velásquez, L. R., Meave, J. A., & Pineda-López, M. R. (2014). Is facilitation a promising strategy for cloud forest restoration?. *Forest Ecology and Management*, 329, 328-333.
- Barradas, V. L., Cervantes-Pérez, J., Ramos-Palacios, R., Puchet-Anyul, C., Vázquez-Rodríguez, P., & Granados-Ramírez, R. (2010). Meso-scale climate change in the central mountain region of Veracruz State, Mexico. En L. A. Bruijnzeel, F. N. Scatena & L. S. Hamilton (Eds.), *Tropical montane cloud forests* (pp. 549-556). United Kingdom: Cambridge University Press.
- Bonfil, C. (1998). The effects of seed size, cotyledon reserves, and herbivory on seedling survival and growth in *Quercus rugosa* and *Q. laurina* (Fagaceae). *American Journal of Botany*, 85 (1), 79-87.
- Branco, M., Branco, C., Merouani, H., & Almeida, M. H. (2001). Germination success, survival and seedling vigour of *Quercus suber* acorns in relation to insect damage. *Forest Ecology and Management*, 5716, 1-6.
- Bubb, P., May, I., Miles, L., & Sayer, J. (2004). *Cloud forest agenda*. Cambridge, United Kingdom: UNEP-WCMC.
- Camacho-Cruz, A., González-Espinosa, M., Wolf, J. H. D., & De Jong, B. H. J. (2000). Germination and survival of tree species in disturbed forests of the highlands of Chiapas, Mexico. *Canadian Journal of Botany*, 78 (10), 1309-1318.
- Fan, W., Guo, H., Wang, X., & Duan, R. (2014). The effects of microhabitat, plant litter, and seed burial on the regener-



- ation of *Quercus wutaishanica* and *Pinus tabulaeformis*. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 29 (2), 183-192. doi: 10.1080/02827581.2014.885563.
- Flores-Cano, J., Badano, E. I., & Flores, J. (2012). Effects of burial depth on seed germination and seedling emergence of Mexican oaks: a glasshouse experiment. *Archives of Biological Science Belgrade*, 64 (4), 1543-1554.
- Fox, J. F. (1982). Adaptation of gray squirrel behavior to autumn germination by white oak acorns. *Evolution*, 36 (4), 800-809.
- García, M. E. (1973). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gómez, J. M. (2004). Importance of microhabitat and acorn burial on *Quercus ilex* early recruitment: non-additive effects on multiple demographic processes. *Plant Ecology*, 172, 287-297.
- Gómez-Aparicio, L., Pérez-Ramos, I. M., Mendoza, I., Matías, L., Quero, L., Castro, J. Zamora, R., & Marañón, T. (2008). Oak seedling survival and growth along resource gradients in Mediterranean forests: implications for regeneration in current and future environmental scenarios. *Oikos*, 117, 1683-1699.
- González-Espinosa, M., Meave, J. A., Lorea-Hernández, F. G., Ibarra-Manríquez, G., & Newton, A. C. (2011). *The red list of mexican cloud forest trees*. Cambridge. United Kingdom: Fauna and Flora International, BGCI Plants for the Planet, Global Trees Campaign, IUCN and SSC Species Survival Commission.
- González-Rodríguez, V., Barrio, I. S., & Villar, R. (2012). Within-population variability influences early seedling establishment in four Mediterranean oaks. *Acta Oecologica*, 41, 82-89.
- Gribko, L. S., & Jones, W. E. (1995). Test of float method of assessing northern red oak acorn condition. *Tree Planter's Notes*, 46, 143-147.
- Hamilton, L. S., Juvik, J. O., & Scatena, F. N. (Eds.). (1995). *Tropical montane cloud forests*. New York: Springer-Verlag.
- Kappelle, M. (2006). Neotropical montane oak forests: overview and outlook. In M. Kapelle (Ed.), *Ecology and conservation of neotropical montane oak forests* (pp. 449-467). Berlin Heidelberg: Springer.
- Khan, M. L., & Shankar, U. (2001). Effect of seed weight, light regime and substratum microsite on germination and seedling growth of *Quercus semiserrata* Roxb. *Tropical Ecology*, 42 (1), 117-125.
- Koenig, W. D., Knops, J. M. H., Dickinson, J. L., & Zuckerman, B. (2009). Latitudinal decrease in acorn size in bur oak (*Quercus macrocarpa*) is due to environmental constraints, not avian dispersal. *Botany*, 87, 349-356.
- Leiva, M. J., & Fernández-Alés, R. (2005). Holm-oak (*Quercus ilex* subsp. *Ballota*) acorns infestation by insects in Mediterranean dehesas and shrublands: its effect on acorn germination and seedling emergence. *Forest Ecology and Management*, 212 (1-3), 221-229.
- Li, Q., & Ma, K. (2003). Factors affecting establishment of *Quercus liaotungensis* Koidz. under mature mixed oak forest overstory and in shrubland. *Forest Ecology and Management*, 176, 133-146.
- López-Barrera, F., & González-Espinosa, M. (2001). Influence of litter on emergence and early growth of *Quercus rugosa*: a laboratory study. *New Forests*, 21, 59-70.
- López-Barrera, F., Manson, R. H., González-Espinosa, M., & Newton, A. (2006). Effects of the type of montane forest edge on oak seedling establishment along forest-edge-exterior gradients. *Forest Ecology and Management*, 225, 234-244.
- Montes-Hernández, B., & López-Barrera, F. (2013). Seedling establishment of *Quercus insignis*: A critically endangered oak tree species in southern Mexico. *Forest Ecology and Management*, 310, 927-934.
- Negi, A. S., Negi, G. C. S., & Singh, S. P. (1996). Establishment and growth of *Quercus floribunda* seedlings after a mast year. *Journal of Vegetation Science*, 7, 559-564.
- Ortega-Pieck, A., López-Barrera, F., Ramírez-Marcial, N., & García-Franco, J. (2011). Early seedling establishment of two tropical montane cloud forest tree species: The role of native and exotic grasses. *Forest Ecology and Management*, 261, 1336-1343.
- Pérez-Ramos, I. M., Gómez-Aparicio, L., Villar, R., García, L. V., & Marañón, T. (2010). Seedling growth and morphol-

- ogy of three oak species along field resource gradients and seed mass variation: a seedling age-dependent response. *Journal of Vegetation Science*, 21, 419–437.
- Puerta-Piñero, C., Gómez, J. M., & Valladares, F. (2007). Irradiance and oak seedling survival and growth in a heterogeneous environment. *Forest Ecology and Management*, 242, 462–469.
- Purohit, V. K., Tamta, S., Nandi, S. K., Rikhari, H. C., & Palni, L. M. S. (2003). Does acorn weight influence germination and subsequent seedlings growth of central Himalayan oaks?. *Journal of Tropical Forest Science*, 15 (3), 483–492.
- Quero, J. L., Villar, R., Marañón, T., Zamora, R., & Poorter, L. N. (2007). Seed mass effects in four Mediterranean *Quercus* species (Fagaceae) growing in contrasting light environments. *American Journal of Botany*, 94 (11), 1795–1803.
- Quintana-Ascencio, P. F., González-Espinosa, M., & Ramírez-Marcial, N. (1992). Acorn removal, seedling survivorship, and seedling growth of *Quercus crispipilis* in successional forests of the highlands of Chiapas, Mexico. *Bulletin of the Torrey Botanical Club*, 119 (1), 6–18.
- Ramírez-Marcial, N., Camacho-Cruz, A., González-Espinosa, M., & López-Barrera, F. (2006). Establishment, survival and growth of tree seedlings under successional montane oak forests in Chiapas, Mexico. In M. Kapelle (Ed.), *Ecology and conservation of Neotropical Montane oak forests, ecological studies*, Volume 185 (pp. 177–189). Germany: Springer-Verlag.
- Scatena, F. N., Bruijnzeel, L. A., Bubb, P., & Das, S. (2010). Setting the stage. In L. A. Bruijnzeel, F. N. Scatena & L. S. Hamilton (Eds.), *Tropical montane cloud forests* (pp. 3–13). United Kingdom: Cambridge University Press.
- Seiwa, K. (2000). Effects of seed size and emergence time on tree seedling establishment: importance of developmental constraints. *Oecologia*, 123 (2), 208–215.
- Smallwood, P. D., Steele, M. A., & Faeth, S. H. (2001). The ultimate basis of the caching preferences of rodents, and the oak-dispersal syndrome: tannins, insects, and seed germination. *American Zoologist*, 41, 840–851.
- Tilki, F., & Alptekin, C.U. (2005). Variation in acorn characteristics in three provenances of *Quercus aucheri* Jaub. et Spach and provenance, temperature and storage effects on acorn germination. *Seed Science and Technology*, 33, 441–447.
- Toledo-Aceves, T., Meave, J. A., González-Espinosa, M., & Ramírez-Marcial, N. (2011). Tropical montane cloud forest: current threats and opportunities for their conservation and sustainable management in Mexico. *Journal of Environmental Management*, 92, 974–981.
- Tripathi, R. S., & Khan, M. L. (1990). Effects of seed weight and microsite characteristics on germination and seedling fitness in two species of *Quercus* in a subtropical wet hill forest. *Oikos*, 57, 289–296.
- Valencia, S. (2004). Diversidad del género *Quercus* (Fagaceae) en México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 75, 33–53.
- Valencia, S., & Gual-Díaz, M. (2014). La familia Fagaceae en el bosque mesófilo de montaña de México. *Botanical Sciences*, 92, 193–204.
- Weckerly, F. W., Sugg, D. W., & Semlitsh, R. D. (1989). Germination success of acorns (*Quercus*): insect predation and tannins. *Canadian Journal of Forest Research*, 19, 811–815.
- Xiao, Z., Harris, M. K., & Zhang, Z. 2007. Acorn defenses to herbivory from insects: Implications for the joint evolution of resistance, tolerance and escape. *Forest Ecology and Management* 238:302–308.
- Yamazaki, M., S. Iwamoto & Seiwa, K. (2009). Distance and density dependent seedling mortality caused by several diseases in eight tree species co-occurring in a temperate forest. In A. Van der Valk (Ed.), *Forest Ecology*, Volume 201 (pp. 181–196). Germany: Springer.
- Yi, X. F., & Yang, Y. Q. (2010). Large acorns benefit seedling recruitment by satiating weevil larvae in *Quercus aliena*. *Plant Ecology*, 209, 291–300.
- Yi, X. F., & Zhang, Z. B. (2008). Influence of insect-infested cotyledons on early seedling growth of Mongolian oak, *Quercus mongolica*. *Photosynthetica*, 46, 139–142.
- Yi, X., Wang, Z., Liu, C., Guoqiang, L., & Zhang, M. (2014). Acorn cotyledons are larger than their seedlings' need:



evidence from artificial cutting experiments. *Nature Scientific Reports*, 5, 1-6.

Yu, X., Zhou, H., & Luo, T. (2003). Spatial and temporal variations in insect-infested acorn fall in a *Quercus liaotungensis* forest in North China. *Ecological Research*, 18, 155-164.

Received: 21 October 2015

Accepted: 4 July 2016

This paper must be cited as:

García-De La Cruz, Y., López-Barrera, F., & Ramos-Prado, J. M. (2016). Germination and seedling emergence of four endangered oak species. *Madera y Bosques*, 22 (2), 77-87.



Caracterización del crecimiento de plantaciones jóvenes de teca (*Tectona grandis* Linn f.) y estimación de curvas de índice de sitio en el área septentrional de la República de Guatemala

Growth and productivity characterization of young teak (*Tectona grandis* Linn f.) plantations and estimation of site index curves in the septentrional area of the Republic of Guatemala

Manuel Sabino Mollinedo García^{1*}, Miguel Ángel Herrera Machuca² y Fernando Muñoz Sáez³

¹ Estudiante Doctorado. Universidad de Córdoba, España. Carrera Ingeniería Forestal, Campus La Verapaz. Alta Verapaz, Guatemala.

² Universidad de Córdoba. Departamento de Ingeniería Forestal. Córdoba, España. mherrera@uco.es

³ Universidad de Concepción. Facultad de Ciencias Forestales. Concepción, Chile. fmunoz@udec.cl

* Autor de correspondencia.
north.consultants@gmail.com

RESUMEN

Para el 2015 en Guatemala las plantaciones de teca (*Tectona grandis* Linn f.) alcanzan aproximadamente 33 000 hectáreas, de las cuales 80% se ubican en la región septentrional. Para caracterizar estas plantaciones, su evolución en términos de crecimiento y desarrollo, se analizaron datos de un total de 248 parcelas permanentes de monitoreo establecidas entre 1998 y 2001 con mediciones efectuadas cada año entre el 2004 y 2009; encontrándose que en promedio 13,01% de los sitios presentan crecimientos altos, 70,66% crecimientos medios y 16,33% crecimientos bajos. Para sitios medios a altos, es decir en 83,67%, el índice de sitio a una edad base de diez años que alcanzará, será entre 19,13 m y 25,32 m, incremento medio anual de la altura total (IMAHTOT) entre 1,98 m año⁻¹ y 2,62 m año⁻¹, incremento medio anual del DAP (IMADAP) entre 2,23 cm año⁻¹ y 2,82 cm año⁻¹ y una productividad (IMAVol) desde 9,89 m³ año⁻¹ hasta 17,22 m³ año⁻¹. Entretanto, los sitios que presentan crecimientos bajos, alcanzarán un índice de sitio de 12,94 m, un IMAHTOT de 1,34 m año⁻¹, IMADAP de 1,65 cm año⁻¹ y una productividad máxima de 2,55 m³ año⁻¹. El análisis de varianza mostró diferencias estadísticamente significativas con p-valor ≤ 0,001 en índice de sitio, IMAHTOT, IMADAP, IMAAB e IMAVol. Las curvas de índice de sitio basadas en un modelo de crecimiento modificado permitieron identificar y definir una clasificación de los terrenos en función de su capacidad productiva en sitio y así evidenciar el crecimiento y desarrollo de la teca en Guatemala.

PALABRAS CLAVE: crecimiento, desarrollo, índice de sitio, productividad, teca.

ABSTRACT

In 2015 the teak (*Tectona grandis* Linn f.) plantations of Guatemala covered approximately 33 000 hectares, of which 80% are located in the septentrional northern region and, in order to characterize the evolution in terms of growth and development, data from a total of 248 permanent monitoring plots (in plantations established between 1998 and 2001 with measurements each year between 2004 and 2009) have been analyzed. The results show that, on average, 13,01% of the sites present high growth, 70,66% medium growth and 16,33% low growth. For the sites of medium to high growth, i.e., 83,67 %, the Site Index at a base age of 10 years that will be achieved will be between 19,13 m and 25,32 m, a mean annual increase in total height (MAIHTOT) of between 1,98 m yr⁻¹ and 2,62 m yr⁻¹, a mean annual increase in DBH (MAIDBH) of between 2,23 cm yr⁻¹ and 2,82 cm yr⁻¹ and productivity (MAIVOL) of 9,89 m³ yr⁻¹ to 17,22 m³ yr⁻¹. The sites that present low growth rates will reach a site index of 12,94 m, a MAIHTOT of 1,34 m yr⁻¹, a MAIDBH of 1,65 cm yr⁻¹ and a maximum productivity of 2,55 m³ yr⁻¹. The analysis of variance showed significant differences with a p-value ≤ 0,001 in site index, MAIHTOT, MAIDBH, MAIBA and MAIVOL. The site index curves based on a modified growth model allowed the identification and definition of a land classification based on its productive capacity on site, and thus evidences the growth and development of teak in Guatemala.

KEYWORDS: growth, development, Site Index, productivity, teak.

INTRODUCCIÓN

A inicios del primer decenio del presente siglo XXI, Pandey y Brown (2000) concluyeron que, derivado de la disminución del suministro sostenible de teca procedente de bosques naturales y del incremento constante de la demanda (desde 1990 ha alcanzado 1795 millones de metros cúbicos anualmente), aumentaría la producción y utilización de teca procedente de plantaciones, que según estos mismos autores alcanzaba las 100 000 ha al año desde 1995. Esto sugería la necesidad de adquirir un mayor conocimiento sobre temas como: la selección adecuada de sitios y material genético para el establecimiento de las plantaciones, así como sobre la silvicultura, manejo, utilización y aspectos ecológicos tanto de las plantaciones como de las masas naturales, para garantizar las inversiones y retornos financieros.

A juzgar por la reciente publicación de la evaluación mundial de los recursos y mercado de teca (Kollert y Cherubini, 2012, De Camino y Morales, 2013), elaborada por la oficina de Alimentación y Agricultura de las Naciones Unidas conocida por sus siglas en inglés, FAO; es relevante el cultivo de teca a través de plantaciones forestales —debido tanto a la disminución de las áreas naturales como al aumento en la demanda y oferta—, aunque deja claro que las plantaciones de teca constituyen un recurso emergente al que le falta aún mucho camino por recorrer para llegar a ser un recurso importante desde un punto de vista social y privado (De Camino y Morales, 2013). De acuerdo con Kollert y Walotek (2015) entre 2005-2014 se comercializó poco más de 1 millón de metros cúbicos de madera rolliza con un valor exportable que alcanzó US\$487 millones, lo cual representa 3% del valor total mundial de ventas. Según Fonseca (2004), la madera de teca tiene un aceite natural antiséptico que la hace muy resistente y la protege contra ataque de insectos y hongos, en comparación con otras maderas, es fácil de trabajar, no presenta problemas de secado y reúne buenas características para trabajos de carpintería. Relacionado a las propiedades físicas y mecánicas, Fonseca (2004) cita a diferentes autores sobre los primeros resultados obtenidos a nivel de Centroamérica, aduciendo que todavía hace falta profundizar y aclarar las controver-

sias, tales como la calidad de la madera según la altura y el grosor del árbol, alrededor de este tema.

Durante los primeros quince años de este siglo se han desarrollado cuatro conferencias mundiales en los años 2003, 2009, 2010 y 2015, liderados por el Kerala Forest Institute de la India y con apoyo de la FAO destinado exclusivamente al tratamiento de esta especie, lo que ha generado como lo señala Keogh (2006), un nuevo enfoque que visualiza más allá de un simple cultivo, una opción de gran interés futuro.

En diferentes publicaciones se hablaba por vez primera, de la existencia de una crisis en torno a maderas tropicales, lo que permitió comprender mejor su mercado dentro de las maderas de alta calidad; tal como lo señala Keogh (2009) citado por De Camino y Morales (2013) “ahora se entiende mejor el mercado dentro de la maderas de alta calidad”. De Camino y Morales (2013) comparten la idea de que se establecen restricciones al ir disminuyendo o acabándose los recursos, pues se combinan áreas certificadas y deforestación, y es esta poca sostenibilidad de la oferta la que ha generado una crisis en las maderas duras tropicales, la cual puede ser resuelta con el abastecimiento de madera desde bosques naturales manejados como plantaciones forestales en forma complementaria. De hecho, Kollert y Walotek (2015) identifican que el futuro del cultivo de teca está en el establecimiento de plantaciones, derivado de la prohibición de suministrar madera desde bosques naturales a partir del 1 de abril de 2014 en Myanmar, uno de los principales productores. De acuerdo con cifras de Kollert y Walotek (2015), de 2005 a 2014 los tres principales países productores (China, India y Tailandia) han doblado su importación en términos de volumen de madera rolliza desde 557 000 hasta 1,2 millones de metros cúbicos. Para el caso de Centroamérica, De Camino, Alfaro y Sage (2002) indican que existían aproximadamente unas 225 000 ha de plantaciones forestales, de las cuales 41 000 ha correspondían a teca (equivalente a 18,1% del total plantado), señalando también que el uso de teca en plantaciones se incrementó a inicios de la década de los 90, principalmente en Costa Rica (57,5%), en Panamá (32,2%), en El Salvador (6,1%) y en Guatemala con 4,2%.



Sobre los hallazgos en la evaluación de Kollert y Cherubini (2012) mencionados por De Camino y Morales (2013), se puede mencionar que, aunque globalmente y en términos de volumen la teca es una especie cuya comercialización ocupa una pequeña porción en el negocio del mercado forestal (se estima que mueve alrededor de 2% del volumen mundial de madera), en términos de valor comercial su importancia es mucho mayor, debido a que es una especie que ha atraído un segmento importante de inversionistas, mostrando a dicha especie como promisoría para incrementar su presencia en términos de área plantada. De acuerdo con la Kollert y Cherubini (2012) la teca plantada se distribuía en 32 países alcanzando 4346 millones de ha, de las cuales 83% se ubicaban en Asia, 11% en África y 6% en América tropical. Los resultados que mostraron Kollert y Cherubini (2012) y Kollert y Walotek (2015) incluyen entre otros: área y distribución por edades, desempeño en términos de crecimiento, cosecha mundial, mercado mundial y futuros mercados, precios y calidades.

Para el caso de Guatemala, país donde se desarrolló la presente investigación, desde que se aprobó en 1996 la actual Ley Forestal y se implementó el Programa de Incentivos Forestales -PINFOR-; la actividad forestal en general y particularmente, las plantaciones forestales no han sido una prioridad para el desarrollo socioeconómico del país, tal como lo señala Cabrera (2003) en una evaluación realizada siete años después de su puesta en marcha. Esto se debe a características intrínsecas de las plantaciones forestales que dificultan su desarrollo, tales como determinar el ecosistema donde se establecerán en función de la composición florística y el origen de las especies y finalmente el destino de la producción, y por otro lado, los inconvenientes financieros, así como las condiciones socioeconómicas y políticas públicas adversas, cultura forestal y visión de corto plazo, entre otros. Aquí es importante mencionar lo que ISTF NOTICIAS (2009) —la red de Sociedad Internacional de Forestales Tropicales— concluye acerca de que en los primeros ensayos de plantación en África y América Central, se descubrió que las fuentes de semilla originaria de Myanmar producían árboles con

mejor forma y crecimiento que las fuentes de India. En ese mismo contexto, Cabrera (2003) sostiene que se tiene una visión de muy corto plazo y que en ese entonces se desconocían muchos aspectos técnicos alrededor de un proyecto forestal, sin menospreciar los beneficios sociales y ambientales que son generados por las plantaciones forestales.

Es importante resaltar algunos aspectos del negocio forestal: tal y como lo mencionan Zamora y Barrera (2010) en los resultados de su diagnóstico para el Sector Forestal de Guatemala, cuando se opta por el uso del bosque para la producción de materia prima, se debe hacer de manera sustentable, considerando además que todo inversionista desea realizar un proyecto financieramente rentable. Los aspectos económicos, legales, capital humano, cuidados silviculturales, medio ambientales, entre otros, se deben considerar en cualquier proyecto forestal y todos ellos están asociados.

En síntesis, se debe entender que una adecuada planificación y consideración de cada uno de los aspectos mencionados, debe conllevar a un mayor éxito social, económico, productivo y financiero, porque de lo contrario fomentará la pérdida de credibilidad y desincentiva la inversión. Cabe señalar que la base primordial del éxito de la inversión en plantaciones forestales está dada por la calidad de sitio utilizado. A este respecto, y para determinar el crecimiento de una especie en un sitio, Vásquez y Ugalde (1995) y Vallejos y Ugalde (1998) proporcionan la metodología para determinar cuándo un sitio es de crecimiento “alto”, “medio” o “bajo”, basado en el índice de sitio (IS) y la altura dominante (AltDom).

De acuerdo con estadísticas aún no oficiales del Instituto Nacional de Bosques de Guatemala (INAB), al 2015 se tienen contabilizadas poco más de 33 000 ha de plantaciones de teca, de las cuales 80% se ubican en el área de estudio. Las primeras aproximaciones para caracterizar el crecimiento y desarrollo de dicha especie a nivel de la República de Guatemala, la realizaron Ávila (2003) y Vaidés (2004), cuyos principales hallazgos indican la presencia en sitios en los que la teca puede alcanzar crecimientos buenos y hasta excelentes, así como medios, pero se han

encontrado sitios donde la especie crece por debajo de su promedio. Específicamente interesa la condición de la clase de crecimiento bajo; en Costa Rica, Montero (1999) documentó que estos eran equivalentes a 13% de la superficie plantada y para el caso de Panamá, Molinedo (2003) evidenció que dicho porcentaje alcanzaba 29%. Para Guatemala, Ávila (2003) encontró que 20% de los sitios tenían un crecimiento bajo, mientras que Vaides (2004) indicó que tales sitios alcanzaban 38%.

OBJETIVO

Determinar crecimiento y productividad de plantaciones jóvenes de teca (*Tectona grandis* Linn f.) y desarrollar las primeras curvas de índice de sitio en el área septentrional de la República de Guatemala.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio corresponde a las regiones forestales II y VIII, de acuerdo con la clasificación del Instituto Nacional de Bosques de Guatemala (INAB) (Fig. 1) y corresponde a la llamada “Área septentrional” de la República de Guatemala. Las regiones comprenden los departamentos de Alta y Baja Verapaz (región II) y El Petén (Región VIII). La figura 1 muestra la ubicación de cada región forestal en relación con el resto de la República de Guatemala y los países vecinos: México —al norte y Oeste—, El Salvador y Honduras —al Este— y Belice —al Noreste—; asimismo rodeada por los océanos, Pacífico —al Sur— y Atlántico —al Noreste—.

De acuerdo con la información de los mapas contenidos en URL (2006), el área septentrional objeto de estudio se caracteriza por tener una topografía variada desde planicies de inundación y terrazas aluviales (mayoritariamente la región forestal VIII de El Petén) con altitudes desde 100 m snm hasta los 600 m snm, y desde los 200 m snm hasta los 1400 m snm correspondiente a la región forestal II comprendida por los departamentos de Alta, Baja Verapaz y El Ixcán. Las coordenadas entre la que está comprendida son: $x = 811123$, $y = 1971799$ y $x = 762284$, $y = 1645907$.

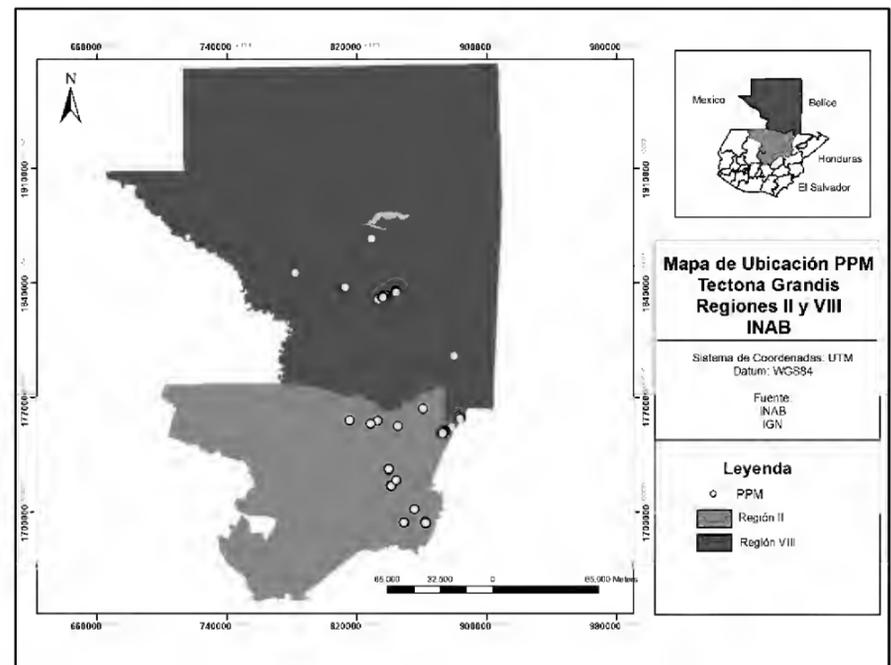


FIGURA 1. Mapa de ubicación de las regiones forestales II y VIII del área septentrional de la República de Guatemala, en Centro América.

Utilizando la primera aproximación de un primer mapa de suelos según la taxonomía del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) elaborado por Tuy (2006), se identificaron las clases taxonómicas existentes en Guatemala, siendo lo más representativas y en orden de importancia en el cultivo de la teca para el área de estudio las clases alfisoles, andisoles, inceptisoles y vertisoles. Con respecto al clima, y de acuerdo con el Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente, IARNA (2006), las zonas de vida predominantes son: bosque húmedo, subtropical cálido bh-S(c), Bosque muy húmedo, subtropical cálido bmh-S(c), con precipitaciones anuales totales promedio entre 1,800 mm y 2,500 mm y una temperatura anual promedio de entre 25 °C y 27 °C.

Fuente de información

Los datos para el estudio provienen de una red de 248 parcelas permanentes de monitoreo (PPM), establecidas en las plantaciones de teca, según la prescripción para la especie, por el INAB de acuerdo con la metodología establecida en el programa conocido como Manejo de Información Arbórea y Silvícola (MIRASILV), desarrollado



por Ugalde (2002) del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) en Costa Rica. Dicho programa utiliza ecuaciones generadas por Vásquez y Ugalde (1995) para el cálculo del Índice de Sitio (IS) a una edad base de 10 años, así como ecuaciones para el cálculo de las variables silvícolas indirectas y volúmenes generados en Costa Rica. Las plantaciones de teca fueron establecidas a un distanciamiento inicial de 3,00 m por 3,00 m, de acuerdo con el Plan de Manejo que se deriva del reglamento que define los lineamientos y especificaciones técnicas del INAB. Con relación a la distribución, todas las plantaciones de teca fueron establecidas de manera reticular, con separaciones de 3 m.

Una PPM es una parcela permanente de monitoreo de 1000 m² y mayoritariamente de forma rectangular, aunque dadas las características topográficas de los sitios puede ser también circular. En la PPM se puede recolectar información silvícola a partir de los valores de variables directas (altura total en m (HTOT) y diámetro a la altura del pecho (Dap) en centímetros, para luego ingresarlas al programa Mira-Silv 2.9, desarrollada por Ugalde (2002), programa que luego realiza los cálculos de volúmenes en base a ecuaciones desarrolladas en Costa Rica para teca, que en conjunto genera la información silvícola de las variables indirectas: área basal (m² ha⁻¹), incrementos medios anuales en altura total (m año⁻¹), altura dominante (m) y volumen total (m³ ha⁻¹), entre otras variables importantes. Luego, la información es exportada al formato .xls de Excel para su posterior análisis estadístico utilizando el programa Infostat versión 12 (mediante el cual se realizó el análisis de varianza, prueba de hipótesis, comparación de medias y prueba de Tukey) y uso en la generación de cuadros y gráficas. Esta información la controla el Departamento de Monitoreo de Plantaciones del INAB, quien a su vez facilitó los archivos en formatos .zip del Mira-Silv 2.9 para su uso en este trabajo de investigación.

La base de datos exportada a Excel contiene los valores de variables principalmente silvícolas directas e indirectas, provenientes de plantaciones establecidas en los años 1998, 1999, 2000 y 2001, con mediciones anuales en 2003, 2005, 2006, 2007, 2008 y 2009.

Para construir la clasificación por crecimiento de los sitios, se utilizó la metodología de Vásquez y Ugalde (1995), desarrollada para teca en Costa Rica, la cual, desde un punto de vista práctico estratifica en “clases de sitio” definiendo a la clase alta, como aquellas plantaciones con crecimientos superiores al promedio y con un mayor potencial económico; a la clase media, como aquellas plantaciones alrededor del promedio con sitios considerados como buenos, que con un manejo adecuado tienen buenas posibilidades de ser rentables; mientras que los sitios considerados como bajos, son aquellas plantaciones con sitios por debajo del promedio, considerados sitios marginales y que son difícilmente rentables como para facilitar que desde un nivel técnico o extensionista puedan generarse, manejarse e interpretarse. Por último, en su mayoría, los resultados se presentan enfocados a dos grandes grupos divididos en segmentos de tiempo: hasta 72 meses (6 años) y a partir de 72 meses (6 años), esto derivado de análisis previo que indica abrupta diferencia en su densidad (arb ha⁻¹), mientras que otra parte mediante un análisis grupal de los datos de todas las PPM incluidas.

RESULTADOS

Efecto de distribución y espaciamiento (densidad)

De acuerdo con los datos analizados en campo, la diferencia con relación al distanciamiento teórico no supera $\pm 2,00\%$ que equivale a $\pm 0,10$ m entre árboles.

Al considerar el tema de la densidad (arb/ha⁻¹), es interesante apreciar cómo a lo largo del tiempo (años), se dieron cambios de densidad (Fig. 2) debido a raleos practicados cerca de los 72 meses (6 años), con reducción en la densidad en 53%, reduciendo desde un promedio de 1111 a 550 árboles por hectárea. Lo interesante es apreciar el abrupto descenso de la densidad en el tiempo indicado y que representa una de las consideraciones más importantes de una prescripción silvicultural, como es el raleo. Los puntos en la dispersión representan sitios con diferentes densidades y consecuentemente clases de crecimiento, tal y como Vásquez y Ugalde (1995) lo describen en su meto-

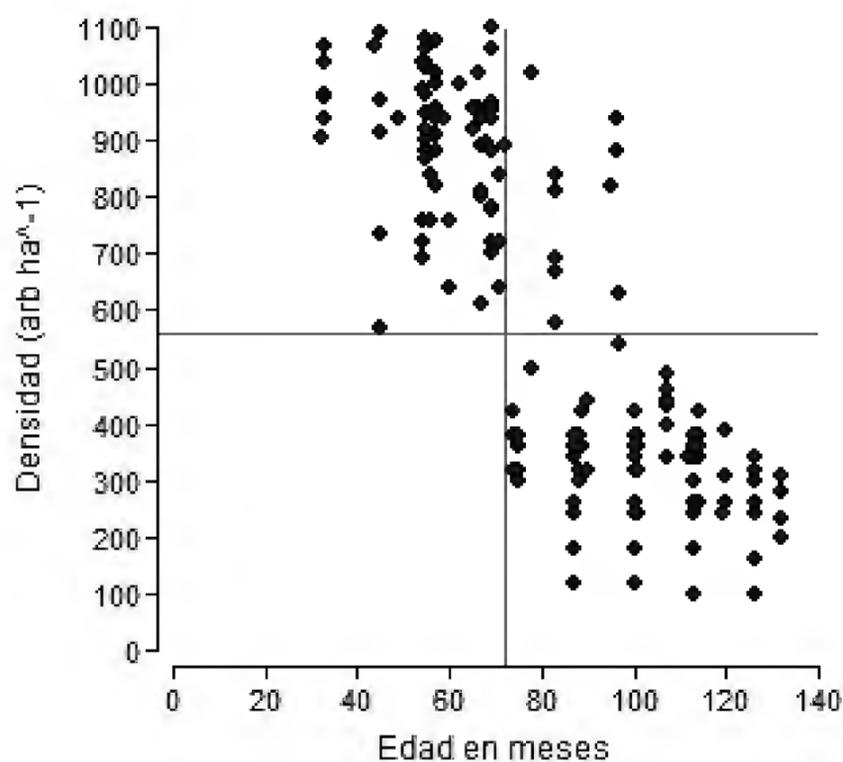


FIGURA 2. Densidad (árboles por hectárea) y la edad en meses.

dología. La heterogeneidad de las densidades a lo largo del tiempo (casi 12 años) mostraba que las plantaciones sí tuvieron un raleo prescrito, es decir, conforme se da el crecimiento de los árboles, se hace necesario el raleo. Claramente se aprecia en la figura 2 cómo es posible realizar una partición de los 72 meses (cuadrante superior izquierdo hacia abajo en el cuadrante inferior derecho), como un punto en el tiempo donde fueron evidentes los raleos practicados, lo cual muestra que las condiciones in situ de suelos en cada sitio en particular no fue tomado en cuenta a la hora de seleccionar los sitios, porque de lo contrario, los raleos hubieran sido más sistematizados, al menos en tiempo. La densidad en esta partición, se redujo hasta una de \leq a 560 arb/ha⁻¹.

Esta reducción en la densidad de árboles se debió a la aplicación de raleos sistemáticos, en el mejor de los casos obedeciendo la prescripción silvicultural de la especie aprobada por la institución (INAB). Sin embargo, cuando se analiza la figura 3a respecto a una edad límite de 72 meses o 6 años (izquierda), la situación muestra que a los 30 meses (2,5 años) ya se había realizado un primer raleo (equivalente a aproximadamente 7,74%), reduciendo la densidad desde un aproximado de 1111 árboles por hectárea

hasta un aproximado de entre 860 árboles por hectárea hasta un aproximado de 600 árboles por hectárea.

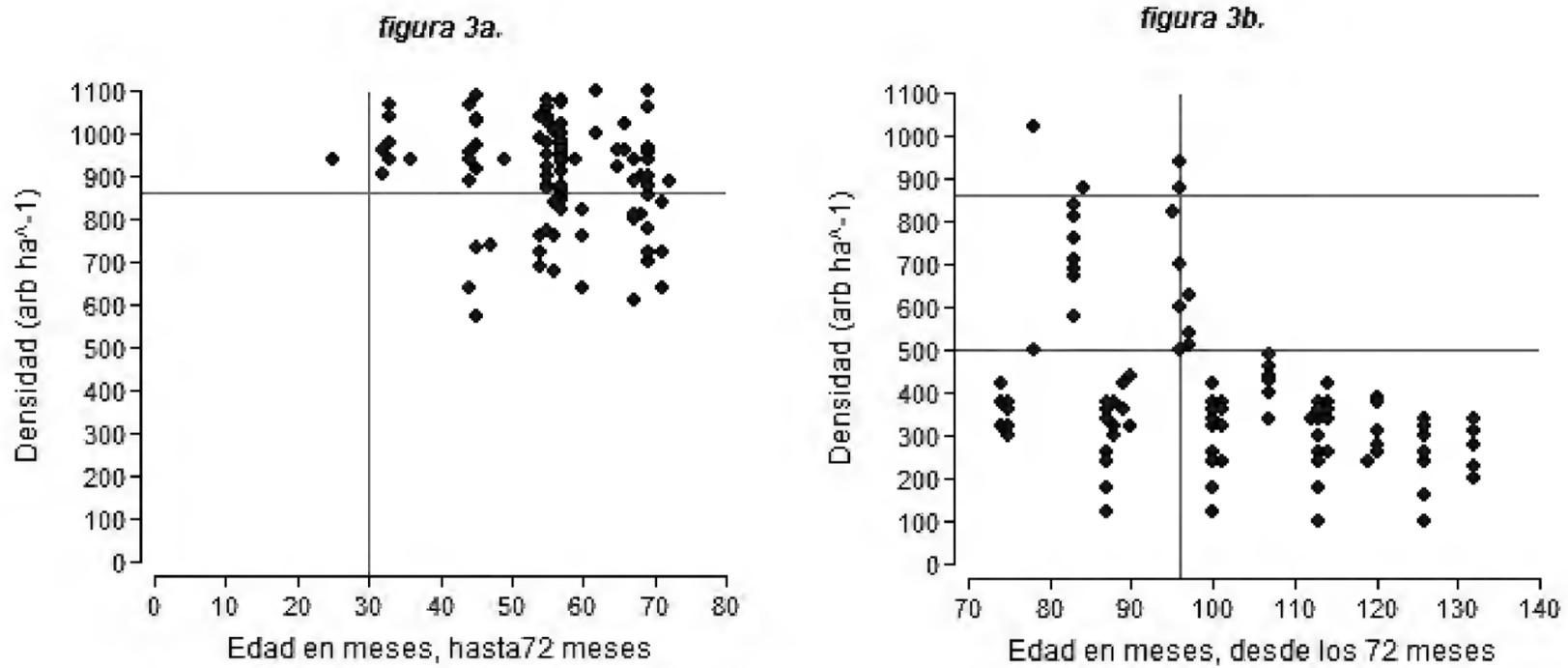
Cuando se analiza la figura 3b se nota una curva descendente en la reducción de árboles por hectárea desde a los 72 meses (6 años), siendo más evidente una reducción a partir de los 96 meses (8 años), reduciéndose la densidad hasta por debajo de los 500 árboles por hectárea. La figura 3b, incluye densidades muy bajas inclusive hasta 100 arb/ha⁻¹ a edades entre 96 y 125 meses, 8 y 10 años, lo cual evidencia la aplicación de raleos muy altos en porcentaje.

Desarrollo y crecimiento a través del índice de sitio (IS) y el incremento medio anual en altura total (IMAHTOT).

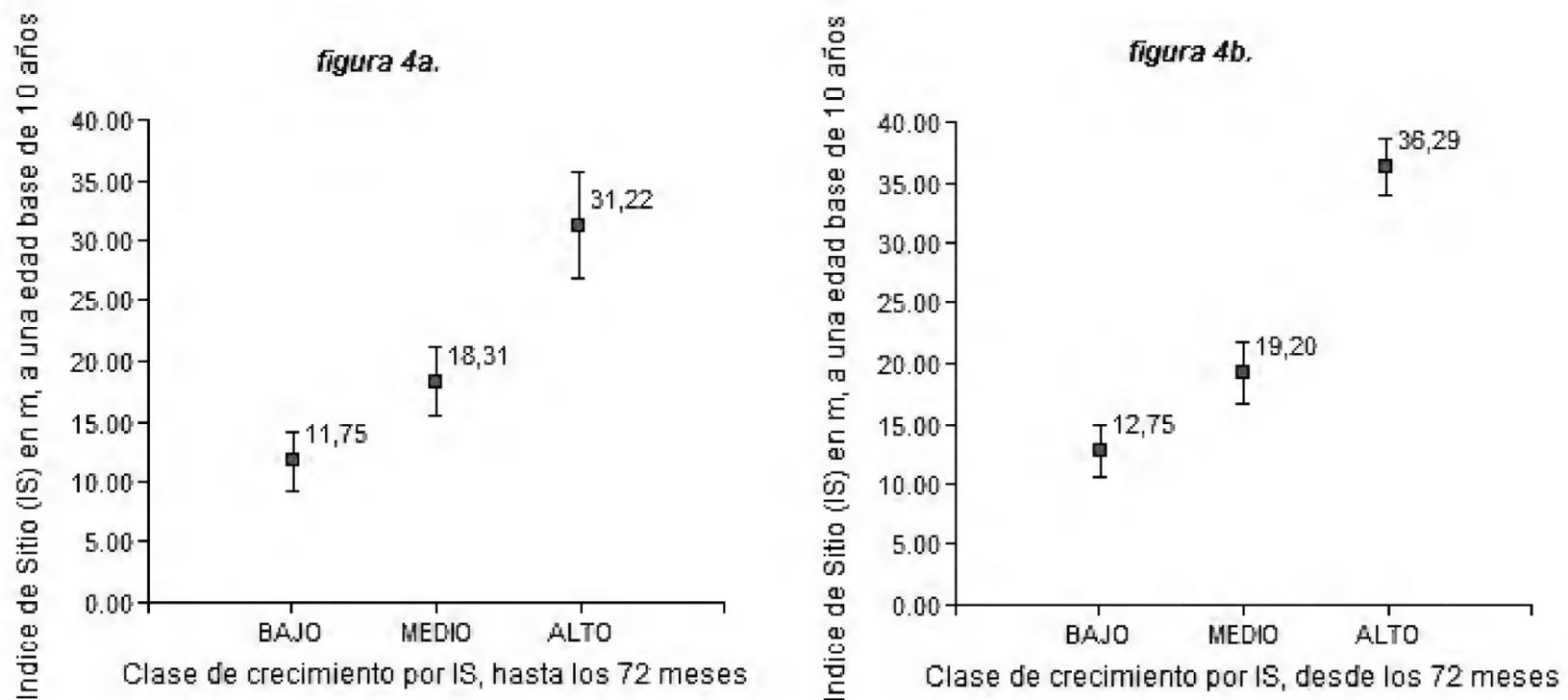
Para el caso de sitios de hasta 72 meses de edad (Fig. 4a.), en promedio los sitios de bajo crecimiento alcanzarán un índice de sitio (IS) a una edad base de 10 años con 11,75 m, mientras que los sitios de crecimiento medio lo harán con 18,31 m y los sitios con crecimiento alto con 31,22 m. Entre el índice de sitio en m y las clases de crecimiento en cada sitio, alto, medio o bajo, existen diferencias estadísticamente significativas a ($p = 0,001$). Es decir, que hay evidencia estadística de que existe una diferencia entre las variables estudiadas sin que tal diferencia sea grande, importante o significativa en el sentido estricto de la palabra; sólo indica que hay diferencias, en este caso numéricas. Esta misma situación se da en los siguientes análisis de varianza y resultados obtenidos.

En el caso de los sitios con edades desde los 72 meses (Fig. 4b.), los sitios bajos alcanzarán un IS con 12,75 m. Sin embargo, los sitios clasificados como de crecimiento medio, lo harán con 19,20 m y los sitios de crecimiento alto con 36,29 m. En estas condiciones, también, existen diferencias estadísticamente significativas entre el IS y las clases de crecimiento de cada sitio a ($p = 0,001$).

Según el análisis del Incremento Medio Anual en Altura Total (IMAHTOT) en los sitios de hasta 72 meses de edad (Fig. 5a), los sitios de crecimiento bajo alcanzaron 1,02 m año⁻¹; entre tanto los sitios medios 2,02 m año⁻¹ y los sitios altos 2,93 m año⁻¹. Asimismo, entre esta variable



FIGURAS 3 a y b, Densidad y edad en meses para sitios con edades hasta 72 meses y desde los 72 meses.



FIGURAS 4 a y b. Índice de sitio y su distribución basado en las clases de crecimiento hasta los 72 meses y desde los 72 meses de edad.

(IMAHTOT) y las clases de crecimiento de sitio, existen diferencias estadísticamente significativas a ($p = 0,001$). El mismo comportamiento sucedió para los sitios desde los 72 meses de edad (Fig. 5b), los sitios de crecimiento bajo alcanzaron $0,90 \text{ m año}^{-1}$, los sitios medios $2,08 \text{ m año}^{-1}$, y los sitios altos $2,79 \text{ m año}^{-1}$. Relativamente los valores son mejores hasta los 72 meses de edad, con excep-

ción de los valores en sitios de crecimiento medio, desde los 72 meses de edad. También entre esta variable (IMAHTOT) y las clases de crecimiento en cada sitio existen diferencias estadísticamente significativas a ($p = 0,001$).

Por otra parte, empleando la metodología de Vásquez y Ugalde (1995), considerando la base de datos en conjunto sin dividir en grupos, muestra que en términos por-

centuales la representatividad de las clases de sitios, encontrando que los sitios de crecimiento bajo están presentes en 16,33% del total de sitios muestreados. En tanto, los sitios de crecimiento medio son los que mayoritariamente están presentes en 70,66%, mientras que los sitios de crecimiento alto están presentes en 13,01%. Cabe resaltar que, entre cada clase de sitio existen diferencias estadísticamente significativas a ($p = 0,001$).

La tabla 1 muestra los datos promedio calculados. La forma de leer tales valores promedio es la siguiente: para el caso del Incremento Medio Anual en diámetro a la altura del pecho (IMADap), los sitios de crecimiento bajo alcanzaron 1,65 cm año⁻¹, mientras que los sitios de crecimiento medio tuvieron 2,23 cm año⁻¹ y los sitios de crecimiento alto 2,82 cm año⁻¹. Aquí también se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre todas las variables silvícolas indirectas y las clases de crecimiento de sitio a ($p = 0,001$).

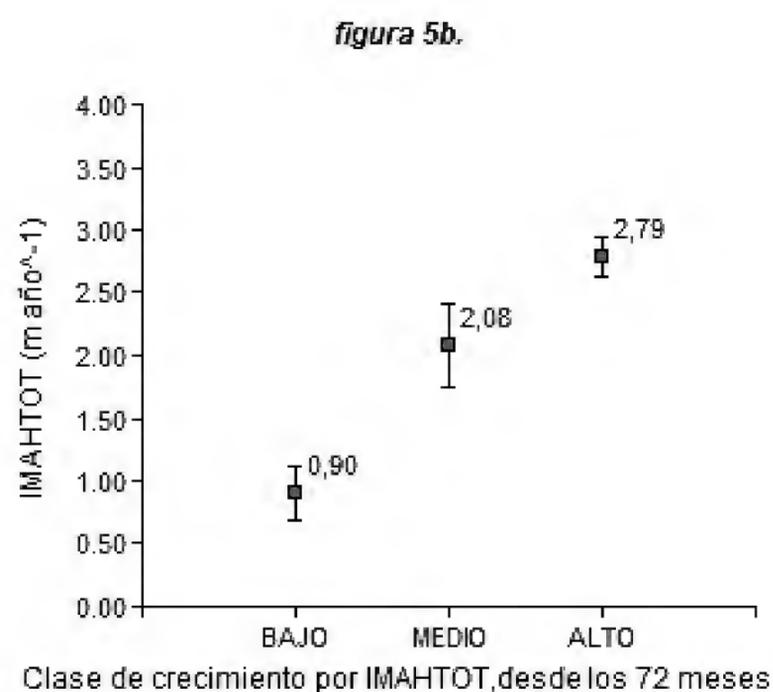
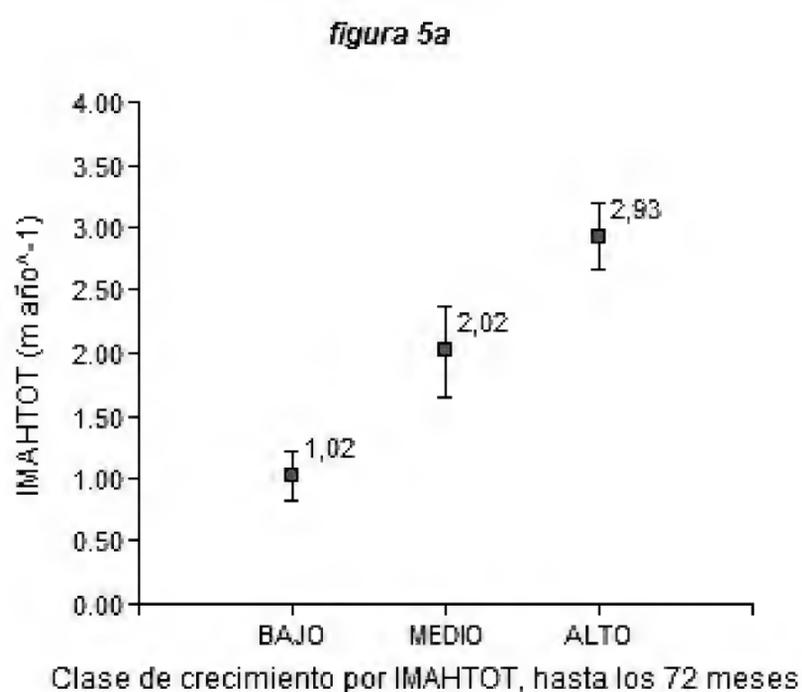
Productividad

En primer lugar, se analiza el incremento medio anual en diámetro a la altura del pecho (IMADap), el incremento medio anual en volumen y la altura dominante (AltDom).

Los valores a analizar aquí tienen otra perspectiva con relación a la Tabla 1, en la cual el dato de las variables se muestra más en función de promedios totales por clase de crecimiento. En cambio, cuando los valores se separan por grupo, hasta los 72 meses y desde los 72 meses, los valores de las variables silvícolas deben leerse desde una perspectiva de su crecimiento en el tiempo.

Cuando se analiza el incremento medio anual en diámetro a la altura del pecho (cm año⁻¹), se observa que hasta los 72 meses (Fig. 6a), los sitios de crecimiento bajo alcanzaron 1,48 cm año⁻¹, mientras que los sitios medios 2,31 cm año⁻¹ y los sitios altos 2,94 cm año⁻¹. Entre tanto, en los sitios desde los 72 meses (Fig. 6b), se encontró que los mejores sitios son los de crecimiento medio que alcanzaron 2,80 cm año⁻¹, inclusive mejor que los sitios de crecimiento alto que alcanzaron 2,35 cm año⁻¹. Los sitios bajos, apenas alcanzaron 1,09 cm año⁻¹. Para esta variable y las clases de crecimiento de sitio, existen diferencias estadísticamente significativas a ($p = 0,001$).

Los resultados del incremento medio anual en volumen (IMAVol), en sitios hasta 72 meses de edad (Fig. 7a), son los siguientes: los sitios con crecimiento bajo alcanzaron 1,67 m³ año⁻¹, mientras que los sitios de creci-



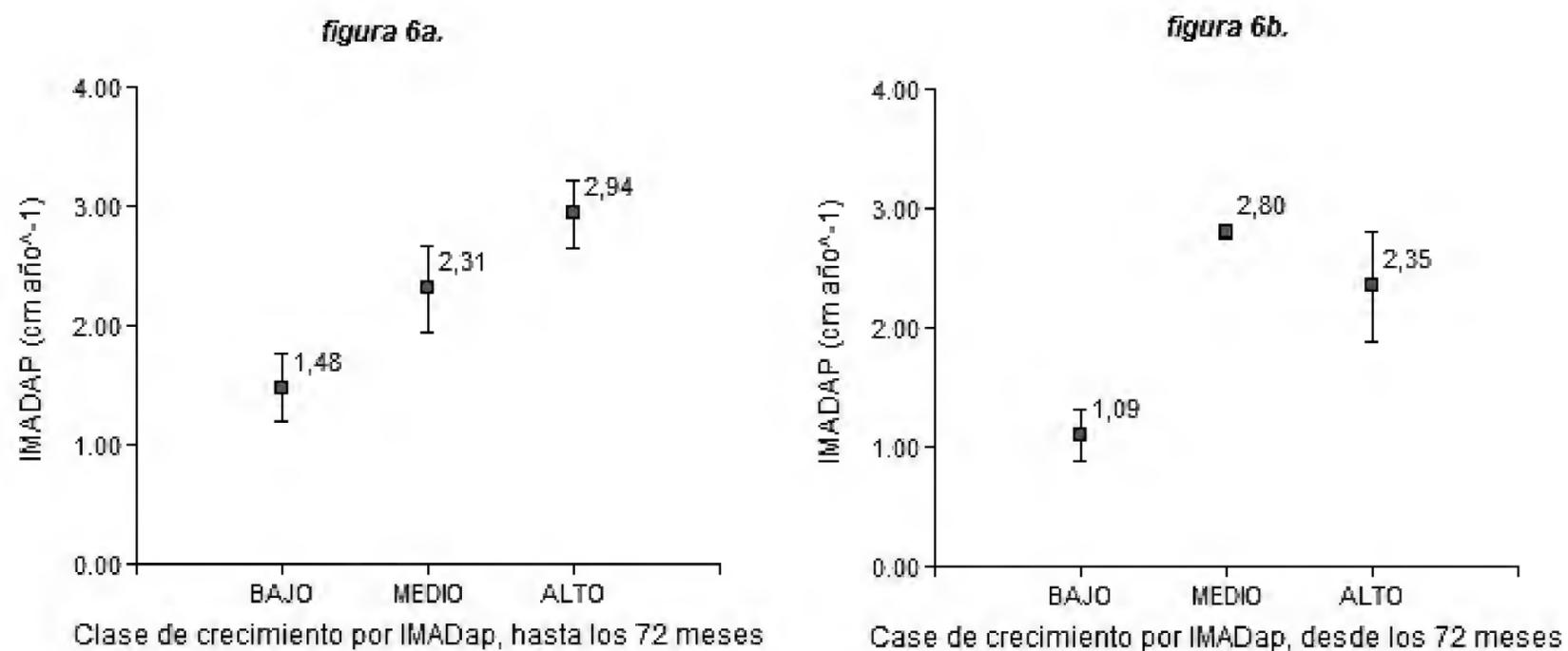
FIGURAS 5. a y b, Incremento Medio Anual en Altura Total y su distribución por clases de crecimiento hasta 72 meses y desde los 72 meses de edad.



TABLA 1. Resumen de valores promedios de variables silvícolas indirectas por clase de crecimiento para cada sitio.

Clase de Crecimiento	IS ₁₀ (m)	IMA Dap (cm año ⁻¹)	IMA HTOT (m año ⁻¹)	IMA AB (m ² año ⁻¹)	IMA VOLUMEN (m ³ año ⁻¹)
BAJO	12,94	1,65	1,34	0,62	2,55
MEDIO	19,13	2,23	1,98	1,55	9,89
ALTO	25,32	2,82	2,62	2,48	17,22

Fuente: Elaboración propia, basada en el análisis de datos provenientes de 248 parcelas permanentes de monitoreo proporcionada por el INAB en el año 2011. Todos los valores alcanzaron la diferencia estadísticamente significativa (*) ($p = 0,005$)

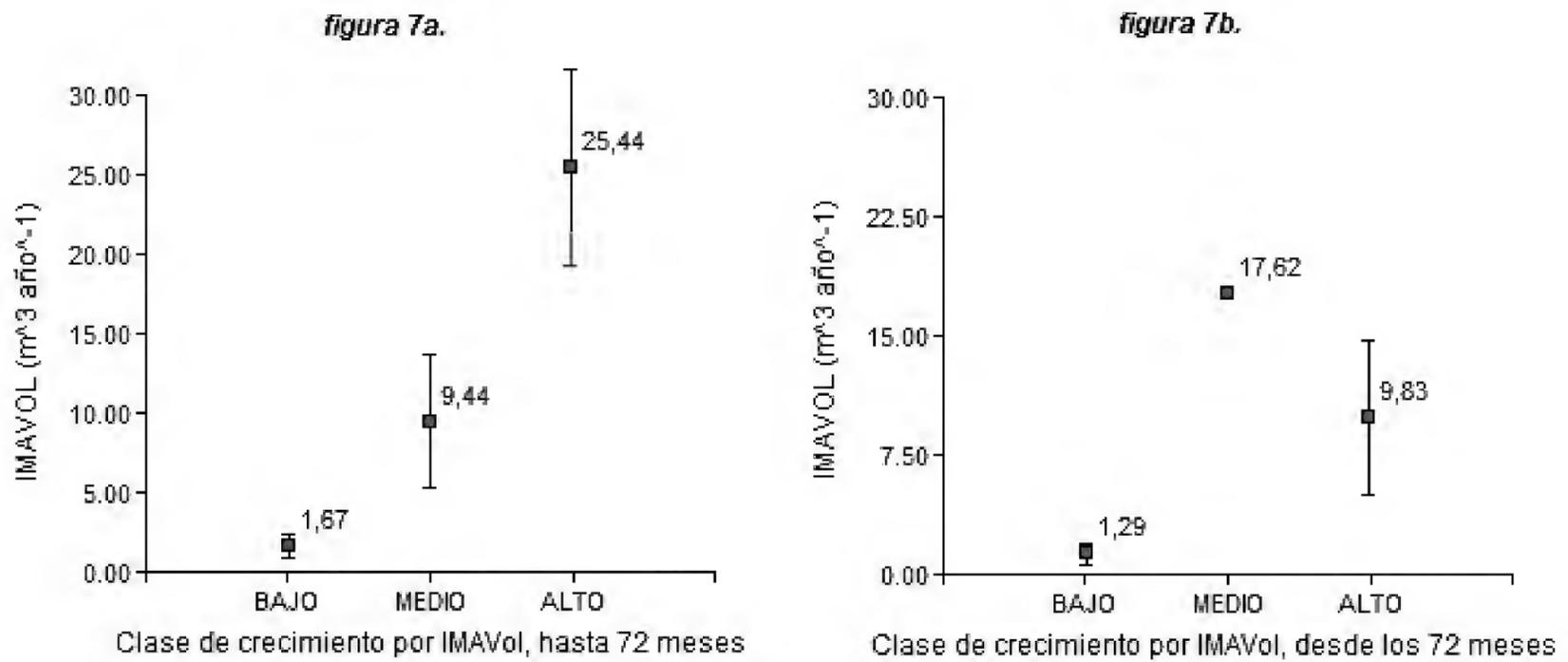


FIGURAS 6 a y b, Incremento medio anual en diámetro a la altura del pecho y su distribución por clases de crecimiento hasta 72 meses y desde los 72 meses de edad.

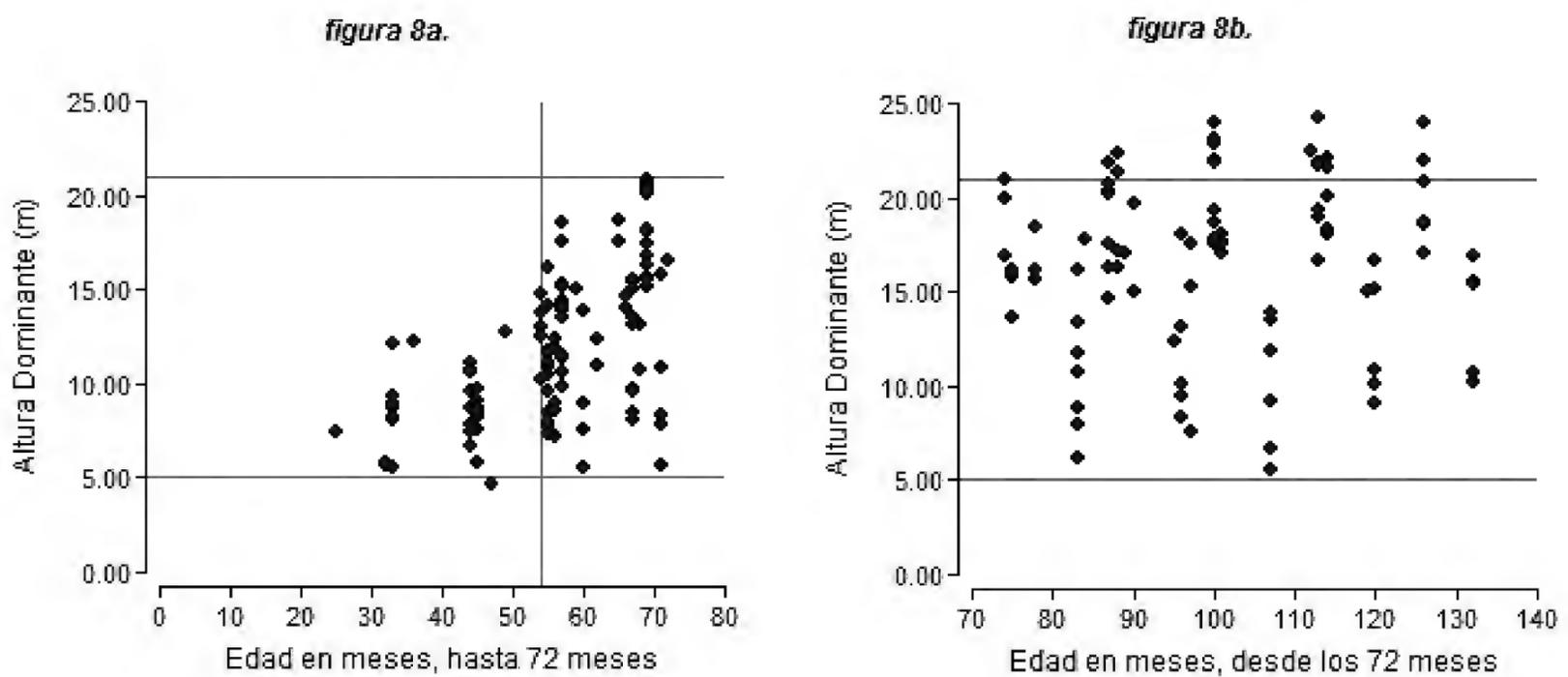
miento medio lograron acumular $9,44 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$, entre tanto, los sitios de crecimiento alto pudieron acumular cantidades mayores a $25,44 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$. Entre esta variable (IMAVol) y las clases de crecimiento por productividad, existen diferencias estadísticamente significativas a ($p = 0,001$). Lo contrario se da en los sitios desde los 72 meses de edad (Fig. 7b), donde siempre los sitios bajos alcanzaron un IMAVol de $1,29 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$, sin embargo, los sitios medios superaron inclusive a los sitios altos, con valores de $17,62 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ por encima de los $9,83 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$, respectivamente.

En seguida, se muestra la situación para la variable altura dominante (m) como precursora para determinar el

índice de sitio (IS), analizada por grupo por edad, permitió visualizar en los sitios clasificados según el crecimiento de las plantaciones, hasta la edad de 72 meses (Fig. 8a), en la cual se aprecia hasta los 54 meses (4,5 años) el valor de dicha variable no superaba los 12 m. Mientras que a partir de los 72 meses (Fig. 8b), tal altura ya había sido superada por la gran mayoría de sitios. Un segundo hallazgo para ambos grupos es que, para una gran mayoría de sitios, la altura dominante osciló entre los 5 y 21 m, dadas las condiciones de sitio bajo análisis, es decir, una gran mayoría de los sitios a diferentes edades osciló en ese rango, y lo que se espera por defecto es que sitios desde los 72 meses puedan alcanzar mayores alturas dominantes.



FIGURAS 7 a y b, Incremento medio anual en volumen y su distribución por clase de crecimiento.



FIGURAS 8, a y b. Altura dominante en metros y la edad en meses, hasta 72 meses y desde los 72 meses de edad.

Lo que dejan ambos hallazgos es que en la figura 8a, ya existían sitios de crecimiento alto antes de los 72 meses, en mayor proporción que la Figura 8b, después de los 72 meses; detectable en los sitios donde la altura dominante supere los 15 m. Es decir, se asume que no se eliminaron árboles dominantes durante los raleos, por consiguiente, las condiciones de sitio serían las que explicarían este comportamiento.

Por último, se analiza la situación para el área basal relacionada con la edad en meses y el valor del área basal ($m^2 ha^{-1} año^{-1}$), y se encontró que hasta los 72 meses (6 años), y según la Figura 10a, el área basal de las plantaciones de teca alcanzan su valor más alto cercano a los $27 m^2 ha^{-1} año^{-1}$, valor que no es superado por los sitios a edad mayores (a partir de 72 meses) (Figura 10b) considerando que después de los 6 años no todos los sitios han sido raleados.



Con esto se evidencia que en algunos sitios las plantaciones respondieron muy bien a un raleo practicado durante ese periodo. Sin embargo, el análisis por separado de los grupos por edades (ver Fig. 9a), hasta 72 meses y desde los 72 meses (Fig. 9b), indica que sólo algunos sitios pueden alcanzar hasta $20 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Sin embargo, en los sitios desde los 72 meses, apenas algunos sitios alcanzaron hasta $20 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, valor que se ubica similar a los sitios hasta 72 meses, lo cual indica una buena baja respuesta de la planta al raleo sistemático. Este desorden en el crecimiento y desarrollo, puede deberse precisamente a que los sitios no fueron previamente analizados en términos de un estudio detallado de suelos, y lo que en un principio debía basarse en prescripciones definidas para especie en un sitio determinado fue hecho de manera arbitraria, sin una base técnica-científica apoyada, en el mejor de los casos, en un monitoreo del crecimiento de las plantaciones. En ambas figuras, los sitios con crecimientos altos alcanzaron áreas basales $>$ a $20 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ de los 55 a los 72 meses y de ahí ningún otro sitio lo logró a ninguna otra edad a lo largo de casi 12 años.

Curvas de índice de sitio

Mediante la utilización de la ecuación modificada de Vallejos y Ugalde (1998) fue posible obtener las curvas

que muestran los sitios en los cuales está creciendo y desarrollándose las plantaciones de teca.

La siguiente Figura 9 muestra la altura dominante (m) de los rodales y su clasificación en sitios con crecimientos bajos y sitios crecimientos altos.

A partir de este análisis, fue posible obtener los valores correspondientes para cada clase de sitio a la edad base de 10 años, que se muestra en la Tabla 2.

Utilizando la anterior Tabla 2 es posible caracterizar otros sitios de plantaciones de teca en el rango de edad dentro de las cuales se hizo el presente análisis.

TABLA 2. Resumen de valores promedio por clase de sitio para el índice de sitio (IS) a la edad base de 10 años y altura dominante (m).

IS ₁₀ Mollinedo	Altura dominante, m	Clase de sitio	Calidad de sitio	n
06,98-14,38	< 14,44	Bajo	III	49
14,39-21,54	14,44 – 21,60	Medio	II	126
21,55-28,94	>21,60	Alto	I	73

figura 9a.

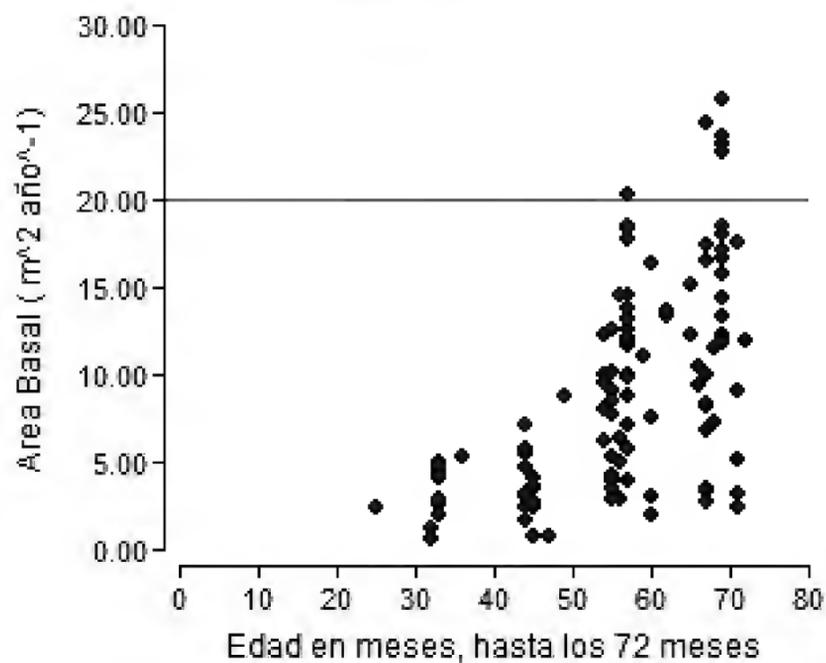
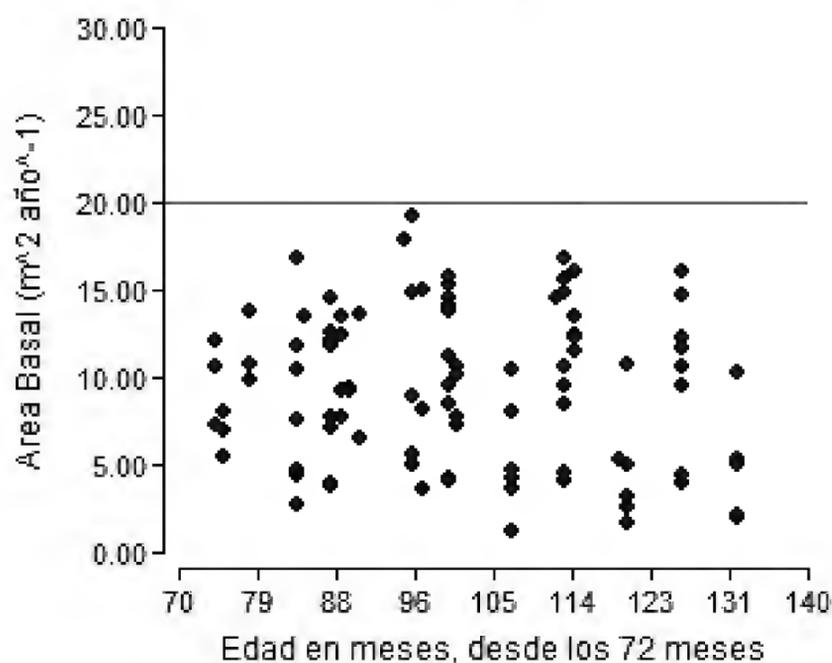


figura 9b.



FIGURAS 9 a y b, Área Basal y la Edad en meses, para sitios hasta 72 meses y a partir de los 72 meses de edad.

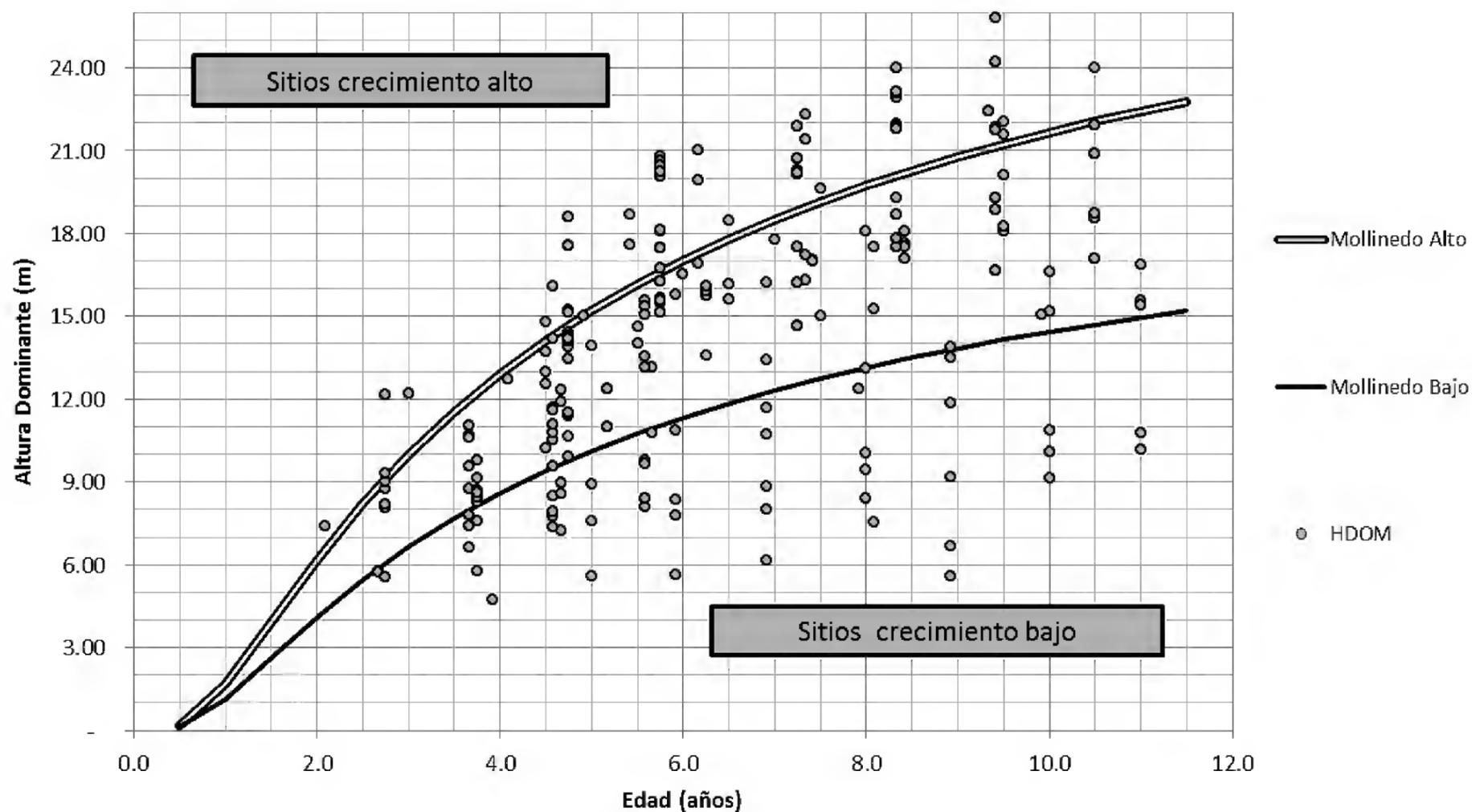


FIGURA 10. Curvas de índice de sitios.

DISCUSIÓN

Distribución, espaciamiento y densidad de las plantaciones de teca

El análisis de los valores en las variables de las PPM, permitió encontrar que las plantaciones sufrieron un raleo equivalente a un promedio de 53% de su densidad inicial, a la edad aproximada de 72 meses (6 años), reduciendo la misma desde un promedio de 1,111 árboles por hectárea (establecidas a un distanciamiento de 3m x 3m), hasta un límite inferior de aproximadamente 570 árboles por hectárea. Sin embargo, y cuando se analiza este primer grupo, se encontró que las plantaciones tuvieron una reducción en su densidad aproximadamente a los 44 meses o 3,5 años. El espaciamiento inicial y el primer raleo son las más importantes decisiones en una rotación, porque definen a lo largo del tiempo el curso y flexibilidad de las operaciones subsiguientes que son críticas para el mantenimiento y el vigor y crecimiento del rodal (Pérez 2005).

El análisis por separado (hasta los 72 meses y desde los 72 meses) permitió encontrar una heterogeneidad en el crecimiento, manifestado más en el IMADap, IMAAB y el IMAVol, al encontrar valores más altos en sitios hasta los 72 meses y en el caso de sitios desde los 72 meses, los sitios medios superan a los sitios altos.

Esto pudo deberse a que no existió una adecuada selección de los sitios al momento de identificar las mejores condiciones de suelo y también, a la tardanza en la implementación de los tratamientos silviculturales, principalmente los raleos, tal como Pérez (2005) lo señala, tanto el raleo como la poda son actividades claves en la especie. Es decir, la plantación responde adecuadamente a un raleo cuando éste es aplicado en el momento propicio. Otro error se presentó al generalizar el manejo a todos los sitios, sin conocer a profundidad y detalle los crecimientos en clases conforme las plantaciones se desarrollan y que al monitorear, permite conocer su comportamiento. Otro ejemplo de la importancia de monitorear el crecimiento de



la especie radica, de acuerdo con Pérez (2005), en la relación entre la composición y estructura de la copa y el crecimiento del fuste, sugiere que la formación de duramen está altamente correlacionada con la cantidad de follaje.

Pérez (2005) indica que la teca crece más rápido en América Central que en muchos otros países y que a pesar de existir muchas prescripciones silviculturales desarrolladas en los Neotrópicos, incluyendo la de Costa Rica según Vásquez y Ugalde (1995), Montero (1999), Ávila (2003), Mollinedo (2003) y Vaídes (2004); sin embargo, cada estudio maneja áreas específicas del potencial de manejo y crecimiento y no presentan una especie de guía para un manejo integrado que sea aplicable a las condiciones de Centroamérica. De ahí que cada sitio, finca o rodal debe tener su propia prescripción silvicultural y no generalizar su manejo.

Bermejo, Cañellas y San Miguel (2004), muestran que en Costa Rica las plantaciones a diez años deberían alcanzar densidades ≤ 400 arb/ha⁻¹, de acuerdo con las calidades de sitio presentes, concluyendo que el modelo de IS calculado en sus resultados puede ser adoptado provisionalmente para el manejo de plantaciones de teca en este país. Una muy importante conclusión de Bermejo *et al.* (2004), respalda los hallazgos encontrados en este estudio y puntualiza que elaborar tablas de crecimiento y rendimiento para cada sitio vendría a convertirse en la mejor herramienta para diseñar regímenes de raleo y las otras actividades relacionadas al manejo de plantaciones de teca.

Altura dominante (AltDom) en m

Al respecto, cuando se da una competencia inicial muy fuerte, como lo señala Pérez (2005), en el sentido de que, si árboles jóvenes entran en competencia, el rango de su crecimiento en volumen se verá rápidamente reducido. De acuerdo con Pérez (2005) el volumen individual se incrementa en un patrón sigmoideal óptimo si no aparece ninguna limitación. Según la figura 9a. al menos tiene una tendencia, aunque es muy temprano en edad (hasta 6 años). Sin embargo, en la Figura 9b. no existe ninguna tendencia y a casi 12 años, se deberían tener ya los indicios de un patrón sigmoideal.

Área Basal en (m² ha⁻¹ año⁻¹)

Del análisis de las figuras 10a y 10b, se destaca que nuevamente muestran una heterogeneidad en el crecimiento de la especie en Guatemala. Sin embargo, si se aplicaran criterios como los de Vásquez y Ugalde (1995) podrían alcanzarse resultados como los encontrados en evaluaciones de teca en varias regiones de Costa Rica, las cuales concluyeron que, en sitios de crecimiento medio, los raleos deberían permitir a tales sitios alcanzar un área basal de entre 15 m² ha⁻¹ a 20 m² ha⁻¹ y alcanzar por encima de los 20 m² ha⁻¹ en sitios de crecimiento alto.

CONCLUSIONES

El comportamiento de los valores encontrados confirma la existencia de una heterogeneidad de sitios, dado que tanto antes, como después de los 72 meses, se encontraron sitios de crecimientos altos, medios y bajos. Los sitios de crecimientos medio (70,66%), que comprende la mayoría de los proyectos estudiados, abarca toda esta heterogeneidad a lo largo del periodo de estudio, casi 12 años. Cabe destacar que la proporción de sitios de crecimiento bajo (16,33%), es bastante representativo (equivalente a unas 5 389 ha), cuyos rendimientos jamás alcanzarán un valor comercial significativo, con la consecuente pérdida en relación con la inversión que representan.

Los valores encontrados en sitios de crecimientos medio a altos (84%) confirman que las inversiones realizadas podrán alcanzar el rendimiento esperado, siempre y cuando continúen o se oriente el manejo de tales plantaciones bajo un esquema sostenible, que implique manejo silvicultural acorde a los sitios donde se establecieron. Lo anterior debido a que los resultados encontrados (mayores valores en sitios medios que en sitio altos para las variables IMADap, IMAAB e IMAVol) señalan ausencia de buenas prácticas de manejo en las plantaciones estudiadas, desde la misma selección de sitios, preparación del terreno y consecuente definición de una prescripción silvicultural por sitio. Esto último resalta la necesidad de estudiar a un mayor detalle las condiciones de cada sitio donde fue establecida la teca o bien, previo a establecer una plantación, hacerlo a nivel de las condiciones de sitio (condiciones de suelo y clima).

RECONOCIMIENTOS

Se agradece al programa de becas de la International Tropical Timber Organization (ITTO), las Universidades de Córdoba, España y Concepción, Chile y al Instituto Nacional de Bosques (INAB), por el apoyo que facilitaron para la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

- Ávila, R. I. (2003). Evaluación del estado y crecimiento inicial de cuatro especies prioritarias (*Pinus maximinoi* H.E. Moore, *Pinus caribaea* Morelet, *Pinus oocarpa* Schiede y *Tectona grandis* L.f.), del programa de incentivos forestales en la región 2, en los departamentos de Alta y Baja Verapaz, Guatemala Tesis de maestría no publicada, CATIE. Turrialba, Costa Rica. 176 p.
- Bermejo, I., Cañellas, I. y San Miguel, A. (2004). Growth and yield models for teak plantations in Costa Rica. *Forest Ecology and Management*, 189 (2004), 97-100.
- Cabrera, C. (2003). *Plantaciones forestales: oportunidades para el desarrollo sostenible* (Serie de documentos técnicos No. 06). Guatemala: Universidad Rafael Landívar. Facultad de Ciencias Ambientales y Agrícolas-Instituto De Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente.
- De Camino, R. y Morales, J. P. (Eds.). (2013). *Las Plantaciones de teca en América Latina: mitos y realidades*. Turrialba, C.R.: CATIE.
- De Camino, R.V., Alfaro, M. M. y Sage, L. F. (2002). *Teak (Tectona grandis) in Central América. Forest Plantations Working Paper 19*. Rome: Forest Resources Development Service, Forest Resources Division. FAO.
- Fonseca G., W. (2004). *Manual para productores de teca (Tectona grandis L.f.) en Costa Rica*. Heredia, Costa Rica. Recuperado de http://www.sirefor.go.cr/Documentos/Reforestacion/2004_Fonseca_ManualProductoresTeca.pdf.
- Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente, Universidad Rafael Landivar (URL) y Asociación Instituto de Incidencia Ambiental (IIA). (2006). *Perfil Ambiental de Guatemala: tendencias y reflexiones sobre la gestión ambiental*. Guatemala: Autor.
- ISTF Noticias. (2009). *Manejo de plantaciones de teca para productos sólidos*. Sociedad Internacional de Forestales Tropicales. Recuperado de http://www.istf-bethesda.org/specialreports/teca_teak/teca.pdf.
- Keogh, R. M. (2006). *Teak market: Central American Focus*. Ireland: Coillte Consult. Head of Coillte International Teak Unit.
- Keogh, R. M. (2009). *The future of teak and the high-grade tropical hardwood sector: planted*. *Forests and Trees Working Paper FP/44E*. Roma: FAO.
- Kollert, W. y Cherubini, L. (2012). *Teak resources and market assessment 2010*. Roma: FAO. Recuperado de <http://www.fao.org/forestry/plantedforests/67508@170537/en/>
- Kollert, W. y Walotek P. J. (Eds.). (2015). *Global teak trade in the aftermath of Myanmar's log export ban*. *Planted Forest and Trees Working Paper FP/49/E*. Roma: FAO.
- Mollinedo G., M. S. (2003). Relación suelo-planta, factores de sitio y respuesta a la fertilización, en plantaciones jóvenes de teca (*Tectona grandis* L.f.) en la zona oeste, cuenca del canal de Panamá. Tesis de maestría no publicada, CATIE, Turrialba, CR.
- Montero, M. (1999). Factores de sitio que influyen en el crecimiento de *Tectona grandis* L. F. y *Bombacopsis quinata* (Jacq.) Dugand, en Costa Rica. Tesis de maestría no publicada, Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales, Valdivia, Chile.
- Pandey, D. y Brown, C. (2000). Teak: a global overview. *Unasylva*, 51 (201), 11 p.
- Pérez, D. (2005). *Stand growth scenarios for Tectona grandis plantations in Costa Rica*. Disertación doctoral no publicada. Universidad of Helsinki. Finlandia.
- Tuy, H. (2006). *Estado del uso de la tierra y ordenamiento territorial de Guatemala*. Guatemala: Universidad Rafael Landívar-Facultad de Ciencias Ambientales y Agrícolas-Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente.
- Ugalde, A. (2002). *Metodología para la instalación de Parcelas Permanentes de Monitoreo y manejo del programa Manejo de Información de Recursos Arbóreos y Silvícolas -MIRASILV-*. Turrialba, C.R.: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.



Váides L., E. E. (2004). *Características de sitio que determinan el crecimiento y productividad de teca (Tectona grandis L. f.), en plantaciones forestales de diferentes regiones en Guatemala*. Tesis de maestría no publicada, CATIE, Turrialba, C.R.

Vallejos, B. O. y Ugalde, A. L. (noviembre 1998). *Índice de sitio dasométrico y ambiental para Tectona grandis, L.f., Bombacopsis quinatum (Jacq) Dugand y Gmelina arborea Roxb. creciendo en Costa Rica*. Documento presentado en el 1er Congreso Latinoamericano, El manejo Sustentable de los Recursos Forestales, Desafío del Siglo XX. Valdivia, Chile.

Vásquez, W. y Ugalde, L. (1995). *Rendimiento y calidad de sitio para Gmelina arborea, Tectona grandis, Bombacopsis quinatum y Pinus caribaea en Guanacaste Costa Rica* (Serie Técnica, Informe Técnico No. 256). Turrialba, C.R.: IDA/FAO-CATIE.

Zamora, R. y Barrera, I. (2010). *Diagnóstico y marco de referencia de la estrategia y Plan de Acción para el Desarrollo Foresto-Industrial de Guatemala*. Recuperado de <http://www.pfn Guatemala.org/files/admin/Descargas/Marco%20de%20Referencia%20Diagnostico%20FODA%20Estrategia%20foresto%20industrial.pdf>

Manuscrito recibido el 9 de diciembre de 2014.

Aceptado el 27 de junio de 2016.

Este documento se debe citar como:

Mollinedo G., M. S., Herrera M., M. Á. y Muñoz S., F. (2016). Caracterización del crecimiento de plantaciones jóvenes de teca (*Tectona grandis* Linn f.) y estimación de curvas de índice de sitio, en el área septentrional de la República de Guatemala. *Madera y Bosques*, 22 (2), 89-103.



Vulnerabilidad climática y situación socioambiental: **percepciones** en una **región semiárida** del noreste de México

Climate vulnerability and socio-environmental situation: perceptions in a semi-arid region of northeastern Mexico

Thania Gabriela López-García¹ y Mario G. Manzano^{2*}

¹ Programa Doctorado en Ciencias de Ingeniería, Especialidad en Sistemas Ambientales y Energía. Escuela de Ingeniería y Ciencias. Tecnológico de Monterrey, Campus Monterrey, México.

² Escuela de Ingeniería y Ciencias, Tecnológico de Monterrey, Campus Monterrey, México.

* Autor de correspondencia. mario.manzano@itesm.mx

RESUMEN

Las interacciones del clima y los recursos naturales con el deterioro ambiental y social son analizadas en este estudio de la región semiárida del Valle de Galeana en el noreste de México. La historia de desarrollo de la región fue construida con base en entrevistas y encuestas. Las percepciones de los campesinos respecto a la vulnerabilidad al cambio climático, al uso del agua y a la posibilidad de adaptación también fueron analizadas. El problema de mayor impacto en la región es la sequía y la pérdida de recursos hídricos cuya única fuente de abastecimiento es el agua del acuífero. Se discute la importancia de las fuentes directas de información y la interacción con actores locales en la construcción de diagnósticos, alineación de apoyos y agendas de desarrollo rural.

PALABRAS CLAVE: adaptación climática, percepciones sociales y ambientales, recursos hídricos.

ABSTRACT

Interactions of climate and natural resources with environmental and social deterioration are analyzed in this study of an arid region of northern Mexico known as Galeana Valley. The story of the social development of the region was constructed through face-to-face interviews. The perceptions of farmers regarding vulnerability to climate change, water use and the possibility of adaptation were also analyzed. The main problems in the region arising from the analysis are drought and the depletion of hydrological resources, for which the aquifers are the only source of supply. The importance of direct sources of information and interaction with local stakeholders for creating diagnostics, aligning assistance and agendas of rural development is discussed.

KEYWORDS: climate adaptation, environmental and social perceptions, water resources.

INTRODUCCIÓN

Gran parte de los estudios sobre las percepciones de los diferentes grupos sociales respecto a temas ambientales han concluido de manera generalizada que, con el fin de lograr una adaptación efectiva ante diferentes situaciones de cambio, no solo es necesario incluir y valorar el conocimiento tradicional ecológico de los grupos locales, sino que además, es necesaria la integración de este conocimiento con los avances científicos y aspectos normativos. Esta afirmación ha sido considerada en investigaciones

sobre las percepciones de diferentes grupos como granjeros en Ghana (Yaro, 2013), grupos étnicos en Bolivia (Boillat y Berkes 2013), comunidades locales en India (Halder *et al.*, 2012), turistas (March *et al.*, 2013) y pobladores en Papua, Indonesia (Boissière *et al.*, 2013).

En México, no obstante que los estudios al respecto no han sido numerosos, algunos de ellos (Arizpe y Velásquez, 1993; Gerritsen *et al.*, 2003; Lazos y Paré, 2000) han logrado mejorar el nivel de comprensión entre los procesos sociales y ambientales relacionados con la degradación del

medio, los cambios del clima, así como las consecuencias y futuras proyecciones ante cambios globales.

Por lo tanto, el conocimiento tradicional ecológico, es considerado un elemento clave en el desarrollo de las capacidades adaptativas para los grupos vulnerables ante las variables climáticas (Berkes *et al.*, 2000). En México, este tipo de investigación ha sido desarrollada desde un punto de vista antropológico con el propósito principal de descifrar cómo los diferentes grupos sociales interpretan su ambiente y la degradación del mismo (Durand, 2008).

El análisis del contexto histórico, por otra parte, permite en buena medida conocer las razones por las que una comunidad es vulnerable a eventos climáticos específicos, así como las estrategias con las que han podido enfrentar algún evento desastroso. Esto podría explicar por qué algún grupo social no tiene la capacidad de aplicar medidas o estrategias que han probado ser suficientemente exitosas en otras regiones o épocas (Conde, 2007).

Magrin *et al.* (2007) han logrado identificar que en las últimas décadas, en diversos países de América Latina, han ocurrido cambios importantes en los patrones de precipitación e incrementos de temperatura; destacando además que los cambios en el uso del suelo han intensificado la explotación de los recursos naturales y agravado algunos procesos de degradación de suelos.

Lo anterior detona la necesidad de conocer el grado al que un sistema o grupo de personas es vulnerable ante efectos adversos del cambio climático, incluyendo variabilidad climática y los eventos extremos. La vulnerabilidad en tales situaciones, debe ser entendida como una función del tipo, magnitud y tasa del cambio climático y de las variaciones a las cuales está expuesto el sistema, a su sensibilidad y a su capacidad adaptativa (Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático-Grupo de trabajo I, 2001). De acuerdo con Magaña *et al.* (2004), las zonas áridas y semiáridas de México son altamente vulnerables al cambio climático, debido a los cambios en los patrones de precipitación, los cuales pueden resultar en sequías prolongadas, o bien, por la variabilidad climática inducida por el efecto de El Niño, resultando invariablemente

en pérdidas en la producción agrícola, incendios forestales y otros eventos naturales de tipo catastrófico.

La motivación de la presente investigación surge en parte de las problemáticas planteadas en los hallazgos de investigación que han sido referidos, pero principalmente emerge de la necesidad de documentar y difundir casos locales utilizando información directa, recogiendo las percepciones de los actores locales en una región caracterizada por complejas situaciones que la hacen vulnerable a las diversas manifestaciones de los patrones climáticos.

La zona de estudio en donde se ha desarrollado la presente investigación se ubica en una región del municipio de Galeana, al sur del estado Nuevo León, México. En esta región, según los escenarios de cambio climático analizados en el Programa Estatal de Acción Climática de Nuevo León, se prevé un incremento en las temperaturas mínimas y máximas de entre 0.5 °C y 3 °C para el año 2080 respecto al escenario base (1960-1990), y una disminución de la precipitación de 0% a 9.7% (PACCNL, 2010). Esto detona la necesidad de desarrollar estrategias de adaptación efectivas, rescatando la historia de la vulnerabilidad y acciones de adaptación tradicionales. A la vez, se requiere una toma de decisiones para un desarrollo incluyente, en donde primordialmente los productores agrícolas marginales obtengan los medios de producción más convenientes y los criterios que desde el punto de vista técnico, socioeconómico y ambiental les confieran mayores fortalezas y capacidades para lidiar con las incertidumbres asociadas a la variabilidad climática y al cambio climático. Se considera que los impactos asociados al cambio climático son un nuevo reto que deberá ser afrontado en primera instancia por las comunidades rurales, un sector con una alta exposición y niveles de riesgo climáticos sobre sus procesos productivos, tal como lo han identificado Bellon *et al.* (2011); Heakin (2005) y Vásquez-León *et al.* (2003) para comunidades del centro, norte y sur de México.

OBJETIVOS

Destacar la importancia de la perspectiva local para la identificación y análisis de las problemáticas asociadas a la vulnerabilidad climática y el desarrollo de capacidades



de adaptación, en comunidades del Valle de Galeana, Nuevo León, México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Zona de estudio

La zona de estudio se encuentra en la zona central del municipio de Galeana, Nuevo León, localizada entre los paralelos 25°15' y 24°15' norte y meridianos 99°50' y 100°50' longitud oeste, con altitudes que varían de los 1000 m y 2200 m snm, esta región forma parte del altiplano mexicano, dentro del desierto chihuahuense (Fig. 1).

El clima predominante es del tipo seco, con precipitación y temperatura media anual, entre los 300 mm y 400 mm y 16 °C a 17 °C, respectivamente, en las zonas bajas; en tanto que en altitudes mayores la temperatura desciende a valores entre 14 °C y 16 °C y la precipitación entre los 400 mm y 500 mm.

Los recursos hídricos son limitados, ya que al no existir fuentes naturales de agua superficial, la única fuente de abastecimiento es el agua proveniente del manto freático. Según los estudios técnicos sobre la disponibilidad de agua del acuífero Navidad-Potosí-Raíces (Comisión Nacional del Agua, 2009), durante los años 1978-2000 el volumen de agua concesionado por la autoridad fue mayor que la recarga hacia el acuífero, lo que ha resultado en una disminución de los niveles estáticos de aproximadamente 0.9 metros anuales, por lo que se le considera un acuífero sobre explotado.

Esta situación de escasez hídrica se caracteriza por la sobre extracción por medio de pozos para abastecer a las zonas de cultivo intensivo que se desarrollan en la región, y es además un factor importante que afecta a las comunidades rurales que habitan en la zona, ya que la calidad y cantidad del recurso ha disminuido con el tiempo, de acuerdo con Conagua (2009).

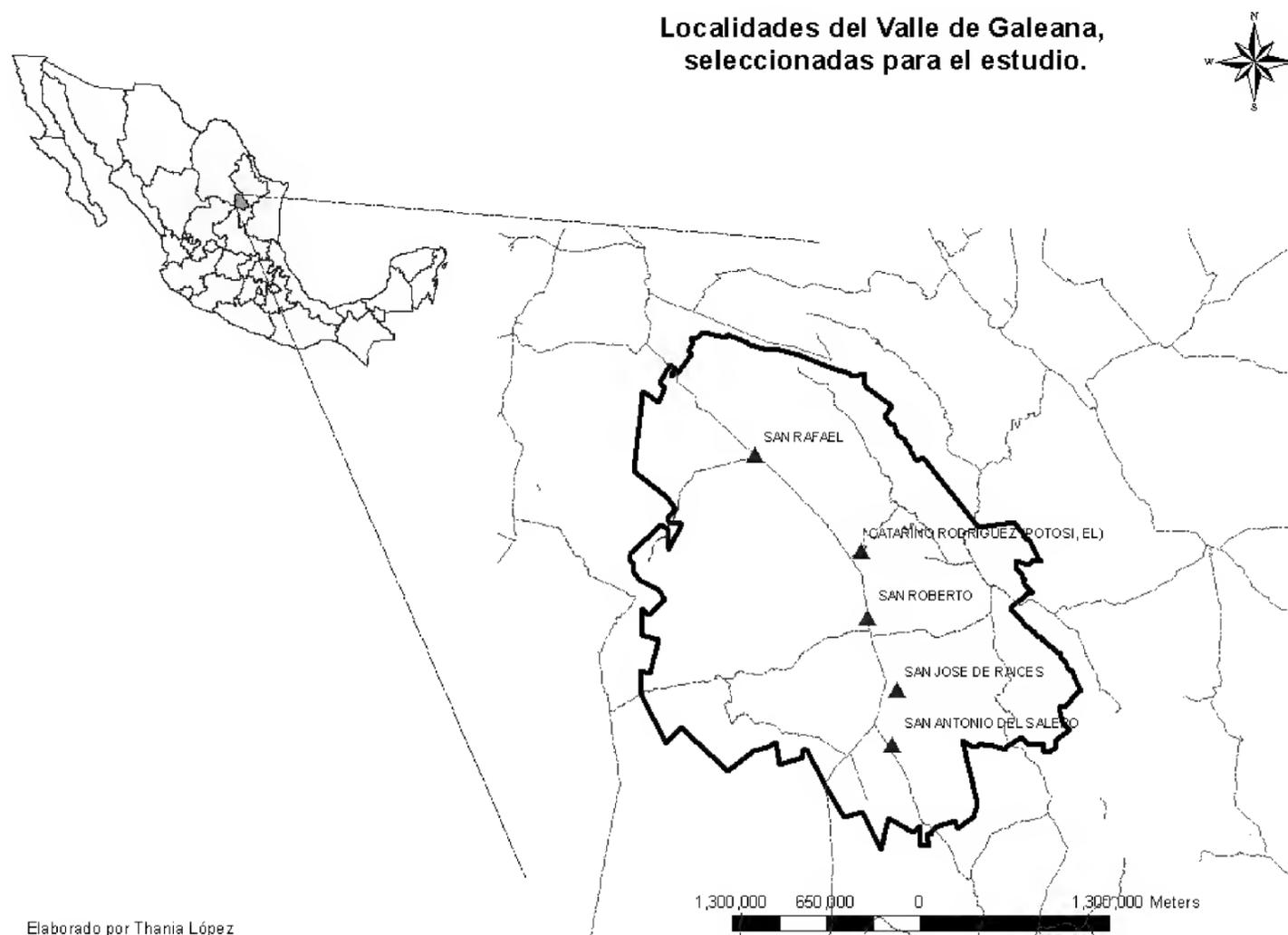


FIGURA 1. Localización de las comunidades estudiadas

El ecosistema natural es considerado de alto valor ecológico, debido a la presencia de especies emblemáticas, algunas de ellas bajo estatus de protección por la normatividad mexicana (Scott *et al.*, 2004; Cotera y Scott 2000; Semarnat, 2010). La vegetación en estas áreas presenta altos índices de endemismos, principalmente por la presencia de vegetación halófila y gypsófila, distintiva de los suelos salinos/sódicos-yesoso (Estrada *et al.*, 2010). Debido a estas características, en esta región se encuentran áreas naturales protegidas de jurisdicción estatal.

La agricultura es una de las principales actividades económicas de la región; particularmente la agricultura intensiva a gran escala ha ocasionado efectos negativos en dos de tres zonas protegidas. Entre los años 2003 y 2005, 50% de la superficie del área natural protegida “La Hediondilla” y 400 ha de “La Trinidad” fueron convertidas a uso agrícola (Cruz Nieto, 2006). En esta región, también se producen variedades de maíz criollo en producción a menor escala, usado básicamente para autoconsumo y para alimento de animales de granja, a dicha variedad se le reconoce por tener además un valor cultural local (Saldaña, 2013; Consejo Nacional para la Cultura y las Artes, 2005).

El paisaje rural en la zona de estudio está compuesto por localidades rurales dispersas, una característica demográfica importante es la tendencia a la migración de las generaciones jóvenes principalmente hacia las zonas urbanas y hacia Estados Unidos, por lo que las comunidades están compuestas en su mayor proporción por personas mayores (de la Vega-Estrada, Téllez-Vázquez y López-Ramírez, 2010).

Método

En esta investigación se utilizaron métodos cualitativos para obtener la información directa por medio de entrevistas con los actores locales de la región, las cuales se llevaron a cabo durante el año 2011. Se aplicaron dos tipos de entrevista: una entrevista semiestructurada con actores clave y otra tipo encuesta a productores locales. El trabajo se complementó con una revisión bibliográfica, para documentar la historia regional reciente en cuanto al uso de los recursos naturales de la zona.

Las localidades de este estudio fueron seleccionadas por su relevancia en la economía local, su tamaño y su tradición como comunidades agrícolas. Éstas fueron San Rafael, Catarino Rodríguez (El Potosí)-Río Verde, San Roberto, San Antonio del Salero y San José de Raíces; estas comunidades se encuentran localizadas sobre un transecto de norte a sur, con acceso desde la carretera federal 57 (Fig. 1).

Las entrevistas semiestructuradas fueron aplicadas a actores locales como servidores públicos del gobierno federal (Comisión Nacional del Agua [Conagua] y Comisión Nacional Forestal, [Conafor]) y servidores públicos locales (Ayuntamientos locales y Comisariados Ejidales). Con los resultados de las entrevistas fue posible complementar el diseño de las encuestas, en las cuales se integraron preguntas de opción múltiple, diagramas y preguntas abiertas y cerradas; estas encuestas fueron aplicadas a los habitantes de las localidades de estudio, en su mayoría productores agrícolas oriundos del lugar; en total se aplicaron 35 encuestas. Las encuestas consideraron aspectos como el acceso a subsidios de gobierno, condiciones de vivienda, tipo de agricultura y productos, superficie dedicada a actividades agrícolas, impactos de la agricultura debidos a efectos del clima, fuentes y uso del agua, así como aspectos de su calidad; otro tema importante que se abordó fue el conocimiento en el tema de cambio climático, y las observaciones en el tiempo sobre las variables de temperatura y precipitación en la zona.

Otras variables consideradas en el desarrollo de las encuestas incluyeron temas de adaptación hacia situaciones de vulnerabilidad climática, aspectos como la obtención de ingresos extra por participación en programas de diferentes instituciones, actividades alternas a la agricultura, oportunidades de diversificación y venta de servicios, entre otros.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Descripción de las comunidades

La información recopilada en las comunidades de estudio indica que todas las personas encuestadas son o han



estado involucradas en actividades agropecuarias, muchas de ellas desde la niñez. El promedio de edad de la población que participó en las encuestas es de 52 años de edad, varones en su mayoría; en algunos casos se entrevistó a familias completas, todas ellas originarias de la región (Tabla 1).

Con respecto a las capacidades de adaptación de las personas que habitan las comunidades estudiadas, algunas características significativas están asociadas a su ubicación geográfica; la localidad de San Rafael, por ejemplo, en virtud de su ubicación sobre la carretera federal 57, posee una mayor diversidad de ocupaciones y actividades económicas que le confieren capacidades y ventajas sobre las demás comunidades.

Otros temas relacionados con las capacidades adaptativas que surgieron de las encuestas fueron el acceso a ingresos extra por actividades diferentes al campo y los apoyos de gobierno. Un ejemplo de éstos últimos es Procampo, programa del gobierno federal administrado por la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Recursos Pesqueros y Alimentos (Sagarpa), el cual es un apoyo con el que contó 100% de los entrevistados y por lo tanto es considerado el de mayor importancia. Otros programas de apoyo como los incentivos para conservación de biodiversidad (como el caso del perro de la pradera), otorgado por Pronatura, AC y el Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos manejado por la Conafor; han fortalecido en algunos años las capacidades económicas de las comunidades, en particular de El Salero y Río Verde.

En el tema de la disponibilidad de agua, el ejido El Salero es el único sitio que cuenta con infraestructura para potabilización de agua por medio de una planta desalinizadora, la cual a través del proceso de ósmosis inversa, purifica el agua y abastece para uso doméstico a las familias de la localidad; esto se logró gracias a un programa desarrollado por la Comisión Nacional de Zonas Áridas (Conaza).

Antecedentes sobre el uso del agua y del suelo

Con la información obtenida en las entrevistas, se logró documentar las prácticas productivas y eventos relevantes en el pasado reciente, con la que fue posible analizar con mayor profundidad el contexto histórico de la región en relación con la manera y los medios con que se ha desarrollado el uso de los recursos suelo y agua, así como los impactos en la comunidad y el ambiente.

Destaca en dicho diagnóstico que en la década de los años cincuenta se formaron grupos de agricultores a quienes se les financió equipamiento agrícola con apoyos de gobierno; entre los beneficios que obtuvieron destaca la instalación de pozos de agua, tractores y compra de semillas. Las actividades de siembra se realizaban en las áreas de uso común, donde cada grupo era responsable de desarrollar las prácticas de cultivo. El auge de tales actividades resultó en el desmonte de grandes extensiones de vegetación natural, para su conversión al cultivo de trigo en un inicio.

Alrededor de las décadas de los años cincuenta y sesenta, el nivel estático del acuífero era tan alto que el agua

TABLA 1. Características de las localidades de estudio.

Localidad	Ubicación geográfica	Altitud (msnm)	Población 2010	Nivel de marginación
1 San Rafael	25° 01'42.40'' N, 100° 32'56.10'' W	1909	2379	Medio
2 Catarino Rodríguez	24° 50'24.28'' N, 100° 19'48.46'' W	1890	1946	Bajo
3 El Salero	24° 27'54.00'' N, 100° 15'16.23'' W	1832	130	Alto
4 San Roberto	24° 41'54.43'' N, 100° 17'59.23'' W	1922	316	Alto
5 San José de Raíces	24° 43'02.47'' N, 100° 14'51.81'' W	1870	2365	Medio

Elaboración propia con información de Inegi y Conapo (2010)

afloraba a la superficie. Según testimonios de algunos entrevistados, en ciertas regiones se apreciaban sistemas de lagunas y cuerpos de agua en las áreas de pastizal, principalmente en la zona del Ejido Catarino Rodríguez; en particular se hizo mención de un cuerpo de agua que era utilizado por los pobladores locales como sitio de recreación.

La apreciación de los pobladores entrevistados es que, después de algunas temporadas de siembra intensiva de monocultivos, el suelo comenzó a perder su capacidad productiva y a degradarse; también se perdió la productividad de los pozos de agua, lo que condujo a problemas entre los miembros de los grupos y eventualmente al abandono de la actividad. Los pobladores se vieron en la necesidad de buscar nuevas formas de sustento. Se gestó también un problema de pérdida del tejido social, debido a disputas por la tenencia del equipamiento agrícola y mala administración de bienes, problema que con el tiempo fue empeorando y que persiste en la actualidad.

Una alternativa económica que se comenzó a desarrollar como opción económica por algunos productores de la región, consistió en rentar sus terrenos para uso agrícola a inversionistas provenientes de ciudades vecinas. La renta de tierras significó un ingreso seguro para los productores, quienes en algunos casos también rentaron los pozos de agua. Toda vez que un terreno era rentado, los inversionistas contaban con las capacidades económicas para el desarrollo intensivo de sistemas agrícolas, a través de la instalación de sistemas de riego y aplicación de agroquímicos a los cultivos, actividad que es realizada hasta la actualidad.

En algunos casos, los productores locales son empleados para realizar labores de cultivo, principalmente durante la época de cosecha; algunos de los principales productos que se manejan son papa, alfalfa, maíz; todos ellos con sistemas de riego sistematizados, siendo el *pivote central* el más empleado. Durante el 2011, en 3339.5 ha de las 5790 ha sembradas para agricultura de riego en el municipio de Galeana, se empleó como sistema de riego el pivote central, lo que corresponde a 58.63% del total (datos comparativos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía [Inegi] e información proporcionada en el Distrito de Desarrollo Rural de Galeana). Por otro lado,

se mantiene la agricultura de temporal por parte de pequeños productores locales, quienes de manera tradicional y bajo esquemas de agricultura en lotes de siembra obtienen productos para autoconsumo, entre los que destacan diversas variedades de maíz criollo y frijol; según datos del Inegi, para el año 2011 solo 22% de la agricultura del municipio se realizaba bajo régimen de temporal.

Como consecuencia de la sequía registrada en el año 2011 se dejaron de sembrar 50 000 ha de maíz y frijol, siendo Galeana uno de los municipios más afectados, junto con Mier y Noriega, Doctor Arroyo y Zaragoza, lo que resultó en una declaratoria de desastre emitida por la Conagua. El gobierno de Nuevo León tuvo que erogar alrededor de 72 millones de pesos en programas emergentes (Ortega-Gaucín, 2012). Debido a lo anterior y a los antecedentes de pérdida del tejido social, muchos productores locales han diversificado sus opciones de empleo. Es común encontrar que hoy día, además de las labores del campo, los pobladores se dedican a atender negocios como vulcanizadoras, talleres, restaurantes, a trabajar como empleados o a ocupar puestos públicos. Las actividades de tipo servicios han prosperado en el caso del Ejido San Rafael por encontrarse ubicado sobre la Carretera 57. Es probable que de estas situaciones se derive un impacto en los ciclos de cultivo y el abasto de alimentos producidos en la región; por lo que es necesaria una investigación socioeconómica más específica con otro tipo de variables.

Los mismos encuestados mencionaron que un gran problema que enfrentan al rentar las tierras de cultivo a inversionistas, es que después de terminar un ciclo de siembra, principalmente cuando se cultiva papa, el suelo se vuelve improductivo; por lo que buscan nuevas zonas y dejan esas áreas en condiciones no aptas para el cultivo y con alta susceptibilidad a la erosión. Será conveniente profundizar en tales problemáticas desarrollando estudios de fertilidad de suelos, así como diagnósticos sobre su erodabilidad e impactos potenciales asociados.

La sequía y la degradación del suelo, factores que incrementan la vulnerabilidad

Durante el desarrollo de las encuestas, la pregunta inicial correspondió a una pregunta abierta sobre los factores y



problemas que han afectado a las labores del campo durante los últimos años. La mayoría de las respuestas indicaron que la sequía es el factor principal que afecta la productividad agrícola. Otros factores que fueron referidos en las respuestas se dividieron en cuatro aspectos principales: climáticos, sociales, técnicos y económicos (Tabla 2).

De acuerdo con los entrevistados, la sequía es el principal factor que afecta a la agricultura de temporal que desarrollan los productores locales, seguido de la presencia de plagas agrícolas. En el caso de los pocos productores locales que tienen pozos de agua, mencionaron que los altos costos de la energía eléctrica empleada en los sistemas de riego provocan que la actividad agrícola sea incosteable la mayoría de las veces.

Las heladas que ocurren previamente a la temporada regular (heladas tempranas), también son consideradas un factor que afecta a los productores locales, mencionando que en algunos años las heladas ocurren desde el mes de octubre y afecta a cultivos tardíos que se encuentran fructificando, lo que impacta directamente en la producción.

En el aspecto económico, los productores indicaron que la falta de recursos para invertir en semillas y pesticidas y, en el caso de productores con pozos de agua, el elevado costo del servicio eléctrico afectan su productividad.

Dentro de los aspectos técnicos señalados, indicaron que debido al uso intensivo de agroquímicos en algunas áreas, principalmente las rentadas a inversionistas, la degradación del suelo se ha incrementado, sobre todo en áreas de producción de papa; algunos entrevistados indicaron que los suelos se encontraban “cansados”.

La calidad del agua, fue calificada por los entrevistados con los siguiente adjetivos: “mala”, “dura”, “gorda” o “salada”, lo anterior refiriéndose a los altos contenidos de carbonatos y sales sódicas. Dichas características hacen el agua inapropiada para consumo humano, y según testimonios tampoco es recomendable para cultivo de hortalizas. Esta condición se presenta principalmente en el Ejido San Rafael.

Muchos pozos de agua han sido explotados hasta su abatimiento; esta situación se manifiesta en un contexto

TABLA 2. Factores que afectan al sector productivo de la agricultura.

Factor	Descripción del factor
Climático	Sequías
	Heladas tempranas
Social	Falta de organización y coordinación entre los grupos de riego.
	Abuso por parte los inversionistas
	Malas prácticas de negocios
	Migración
Técnicos y económicos	Precios de los productos inciertos
	Falta de oportunidad para acceder a fuentes de financiamiento
	Suelos improductivos
	Altos costos de energía eléctrica
Recursos agua y suelo	Calidad del agua deficiente
	Abatimiento de manto freático
	Suelos con exceso de agroquímicos

Elaboración propia con información obtenida en las encuestas de este estudio.

espacial definido, pues la renta a inversionistas comenzó en el mismo sentido de la carretera, desde la parte norte y hacia el sureste y algunos de estos pozos ya han sido cancelados por la Conagua.

En la localidad San José de Raíces, se presenta también la escasez de agua en los pozos; y se comenta que para acceder al recurso ha sido necesario hacer los pozos más profundos; se dice que la calidad del agua tampoco es buena e incluso para el uso agrícola no es muy recomendable, pues da a las plantas “mal aspecto y consistencia seca”.

Por otra parte, aunque escasa, agua de mejor calidad está presente en la región: en la localidad de Río Verde, aledaña a la formación montañosa denominada Cerro El Potosí, existen dos pozos de agua dulce de buena calidad, incluso apta para consumo humano. No obstante su buena calidad, los pobladores la utilizan para el riego de alfalfa, un cultivo poco tolerante al agua dura y de muy alto uso consuntivo de agua. El hecho puede interpretarse de varias maneras; una visión simple denota que la necesidad de mantener funcionando el flujo de bienes y servicios para asegurar un ingreso y la provisión de satisfactores hacia el núcleo familiar es preponderante sobre cualquier otra necesidad vital.

Percepciones sobre el cambio climático

En esta sección se muestran las opiniones que tuvieron los encuestados con respecto a su percepción sobre el tema del cambio climático y los efectos que han percibido en su entorno y que, en su opinión, pudieran atribuirse a este fenómeno.

Durante la entrevista se preguntó a los encuestados su opinión sobre el término “cambio climático” y si podían explicar a qué se refería; las respuestas más recurrentes hicieron referencia a que el cambio climático estaba relacionado con el incremento de la temperatura y de la radiación solar; en su opinión, esto ha afectado la disponibilidad de agua, la incidencia de plagas y en general el clima. En relación al comportamiento de la precipitación, su percepción no es muy errada ya que, según registros meteorológicos de una de las loca-

lidades (Catarino Rodríguez), el volumen de precipitación ha disminuido en los últimos años (Fig. 2). También mencionaron que el calor del suelo se ha incrementado y que esto ha afectado tanto a las zonas de cultivo como a los lugares de pastoreo. Se mencionó que esta situación ha provocado incendios forestales, lo que ha tenido efectos directos en la degradación de los bosques de la región.

También se hizo referencia a que debido a “los cambios climáticos”, sus actividades rutinarias y horarios de trabajo han cambiado con el tiempo, pues actualmente para evitar la alta insolación, salen a realizar las labores del campo a más temprana hora. Mencionaron que el no poder predecir algunos eventos asociados a las variables del clima los limita al planear su calendario de actividades. Solamente dos de los 35 entrevistados, asociaron el término de “cambio climático” con las actividades humanas y la contaminación, mientras que dos entrevistados afirmaron nunca haber escuchado el término.

El año en el que se realizó el estudio, 2011, fue histórico por la prolongada e intensa sequía que ocurrió en toda la región norte de México; este evento fue identificado por los entrevistados como un indicador del cambio climático. Incluso en ese año, debido a la falta de precipitación durante la primavera (Ortega-Gaucín, 2012) los productores locales no pudieron sembrar cul-

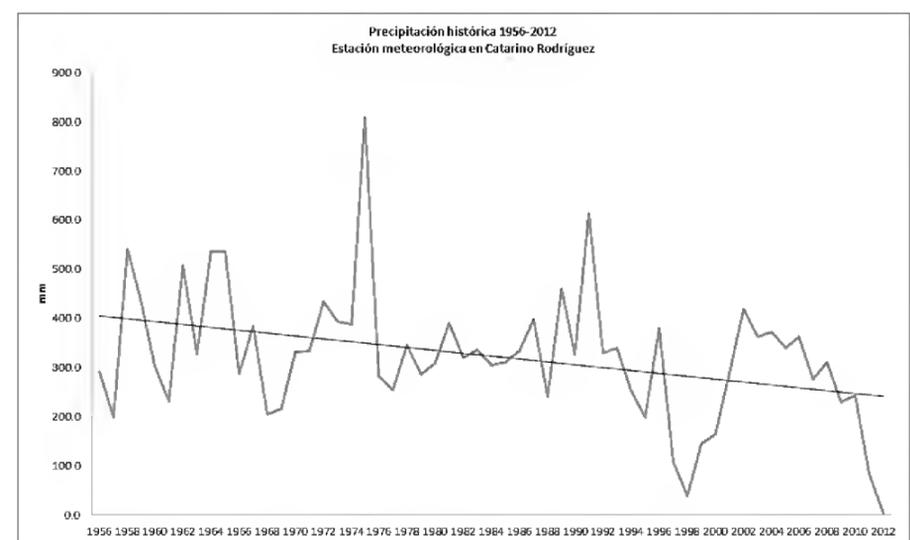


FIGURA 2. Tendencia de la precipitación en el Ejido Catarino Rodríguez. Fuente Estación meteorológica 19020 del Servicio Meteorológico Nacional de CONAGUA.



tivos de temporal; hubo quienes manifestaron que llevaban tres temporadas seguidas sin trabajar este tipo de cultivo.

Integración de resultados en un árbol de problemas

Para su análisis integrado, la información fue organizada en un árbol de problemas (Martinic, 1997), mostrando al centro el problema primordial, sus causas en la base y sus efectos hacia la parte superior. Para su interpretación, conviene señalar que se denotan las relaciones entre ellos desde las diferentes causas (en la base del esquema) y

asciende a través de conceptos que se relacionan, hasta llegar a los efectos esperados (Fig. 3).

El problema central analizado fue el incremento en la vulnerabilidad debido al cambio climático, las causas del problema surgen debido a la naturaleza árida natural de la región, en donde se presentan periodos prolongados y poco predecibles de sequías. Esto, aunado a las situaciones planteadas por los escenarios de cambio climático, lo cual, de acuerdo con lo presentado en el Plan de Acción Climática en Nuevo León, significaría un incremento en las temperaturas medias, mínimas y máximas (PACCNL, 2010). Según los entrevistados, este efecto del aumento de

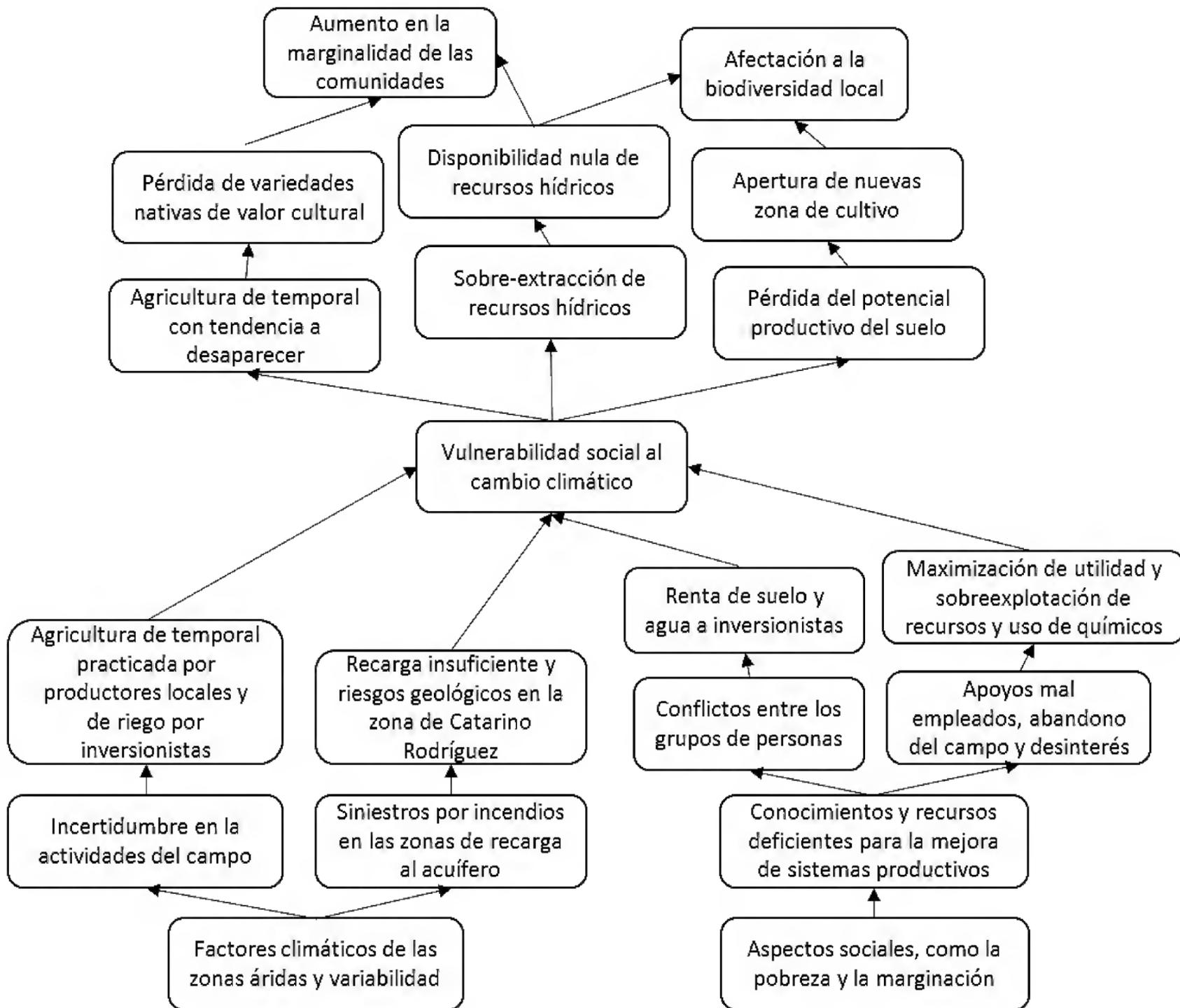


FIGURA 3. Síntesis de resultados representada en un Árbol de Problemas. Elaboración propia.

temperatura provocará que el sector agrícola demande mayor cantidad de agua; un posible incremento en la aparición de plagas que conllevaría a la necesidad del uso de pesticidas. La agricultura de riego se verá limitada debido a la falta de agua en el manto acuífero y la agricultura de temporal mostrará una tendencia a desaparecer debido a lo errático de los patrones de precipitación.

Adicionalmente, la mayoría de las poblaciones estudiadas se identifican con altos niveles de marginación y las actividades agropecuarias no brindan el sustento necesario, por lo que buscan otras opciones para generar ingresos. En este contexto, los productores locales han encontrado en la renta de tierras y agua una opción para generar ingresos, lo que ha dado como resultado la contaminación de los suelos, la pérdida de la vegetación natural y el abatimiento del acuífero. La falta de recursos financieros para inversión en el campo ha limitado también a los productores locales, ya que no cuentan con las capacidades de adquirir soporte técnico, semillas y otros insumos. Otro problema de gran importancia es el fracaso de los grupos de riego formados en décadas pasadas, quienes por la falta de una buena administración generaron deudas y actualmente no son elegibles para recibir ciertos apoyos del gobierno federal. Esto resultó en el abandono del campo; en la migración de los pobladores hacia otros lugares y en otros casos, en la renta de terrenos a inversionistas provenientes de otras regiones, quienes buscando maximizar sus utilidades a través de una agricultura intensiva altamente tecnificada y que mediante el uso de sistemas de riego y uso de agroquímicos han provocado el deterioro de los recursos agua y suelo directamente, con impactos negativos asociados a nivel ecosistema.

Entre los efectos negativos en el medio social y ambiental debido a los efectos del cambio climático destacan el aumento de la vulnerabilidad social (migración principalmente), la pérdida de la productividad del suelo, la disminución de la calidad de los servicios ambientales y la pérdida de especies de flora y fauna de alto valor ecológico, el abatimiento de los pozos y una menor disponibilidad de agua subterránea, así como el incremento en los niveles de pobreza y marginación.

CONCLUSIONES

El esquema de aproximación de este estudio, que consistió en reconocimientos de campo, acercamiento a los actores locales por medio de la aplicación de entrevistas y encuestas, y la misma revisión de literatura, permite concluir que las actividades productivas que se desarrollan en el Valle de Galeana, son vulnerables a eventos climáticos extremos como las sequías, siendo la falta de recursos hídricos lo que limita las actividades productivas debido a la fuerte sobreexplotación que actualmente mantiene al acuífero en un estado crítico. Esta vulnerabilidad se transfiere directamente a las personas: los productores y sus familias, quienes experimentan en su día a día manifestaciones diversas de la variabilidad y cambio climático.

Los productores mencionan que, a través del tiempo, han identificado un cambio en el clima, y relacionan el aumento de temperatura y los cambios en los patrones de precipitación con el fenómeno del cambio climático. Los eventos climáticos extremos, el uso intensivo del suelo y la explotación del agua subterránea han incrementado la vulnerabilidad de toda la región y con ello se ha intensificado la pobreza y la migración. Aun y cuando se identificaron medidas adaptativas y propuestas de diversificación de actividades, es necesario realizar un análisis prospectivo profundo en el contexto local, con un mayor nivel de detalle, para identificar con claridad las estrategias y acciones que se pudieran desarrollar en primer instancia en pruebas piloto para ser posteriormente transferidas y adoptadas por las comunidades.

Algunas actividades emergen como alternativas sostenibles rentables, aprovechando el potencial natural y cultural, como por ejemplo, la producción de cultivos de traspatio o “permacultura”, estas actividades son desarrolladas por algunas familias, proveyendo alternativas alimenticias de alto valor nutricional; otra es el cultivo de dalias, plantas de flor con un alto potencia de comercialización; destaca también el turismo rural, actividad mediante la cual se pueden aprovechar instalaciones antiguas como iglesias y haciendas, así como la observación de la naturaleza del desierto. Asimismo, se puede tomar el ejemplo de proyectos que se desarrollan en localidades



cercanas al Valle de Galeana; el proyecto “Agua y Vida” en el ejido San Felipe, en el municipio de Doctor Arroyo (Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, 2009) que implementó un sistema de recolectores o trampas de agua como techos cuenca para la producción autosuficiente de traspatio. Otro proyecto se encuentra en el Ejido la Providencia (Saldaña, M. 2013) y consiste en la promoción del ecoturismo y la venta de productos regionales elaborados por los pobladores, que va tomando forma como un medio de atracción de ingresos sostenidos hacia las familias de la comunidad.

Desde el punto de vista técnico, es necesaria la implementación de un programa de investigación integral aplicada, en el que se realicen diagnósticos y evaluaciones para conocer con certeza el nivel de degradación físico-química del suelo, las pérdidas por erosión, la disminución de su fertilidad y productividad. Asimismo, se requieren evaluaciones confiables sobre la calidad del agua y la sostenibilidad de sus fuentes a nivel de cada localidad, así como acciones puntuales para el desarrollo de capacidades locales para un uso eficiente del recurso agua.

Este estudio proporciona información sobre la realidad en la zona de estudio en el contexto de la visión y percepción del productor agrícola del altiplano mexicano acerca del origen de sus problemas y la manera en que los enfrentan. La información presentada fue recogida directamente de los actores locales y por lo mismo constituye un testimonio fidedigno de las prioridades por atender y de las consideraciones que se deben tomar al planear cualquier intervención de mejora. Se proporciona una parte de la información que es más escasa cuando se abordan los temas relacionados con la vulnerabilidad climática de las zonas rurales, su origen y las maneras de abordar las posibles soluciones para desarrollar capacidades de adaptación.

REFERENCIAS

- Arizpe, L., Paz, F. y Velásquez, M. (1993). *Cultura y cambio global: percepciones sociales sobre la deforestación en la selva Lacandona*. México: Porrúa.
- Bellon, M. R., Hodson D. y Hellin J. (2011). Assessing the vulnerability of traditional maize seed systems in Mexico to climate change. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, 108 (33), 13432–13437. doi:10.1073/pnas.1103373108
- Berkes, F., Colding, J. y Folke, C. (2000). Rediscovery of traditional ecological knowledge as adaptive management. *Ecological Applications*, 10 (5), 1251-1262. Doi:10.1890/1051-0761(2000)010
- Boillat, S. y Berkes, F. (2013). Perception and interpretation of climate change among Quechua farmers of Bolivia: indigenous knowledge as a resource for adaptive capacity. *Ecology and Society*, 18 (4), 21. doi: 10.5751/ES-05894-180421
- Boissière, M., Locatelli, B., Sheil, D., Padmanaba, M. y Sadjudin, E. (2013). Local perceptions of climate variability and change in tropical forests of Papua, Indonesia. *Ecology and Society*, 18 (4), 13. doi:10.5751/ES-05822-180413
- Comisión Nacional del Agua. (2009). *Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Navidad Potosí-Raíces, Estado de Nuevo León*. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/103175/DR_1916.pdf.
- Conde, A. C. (2007). Vulnerabilidad y adaptación al cambio climático: descripción de un estudio de caso y los retos en las investigaciones actuales. En J. Urbina-Soria y J. Martínez-Fernández (Comps.). *Más allá del cambio climático: las dimensiones psicosociales del cambio ambiental global* (pp. 157-171). México: INE-Semarnat-UNAM-Facultad de Psicología.
- Consejo Nacional para la Cultura y las Artes. (2005). Pueblo de maíz, la cocina ancestral de México: El expediente ante la UNESCO. Recuperado de <http://www.cultura.gob.mx/turismocultural/cuadernos/pdf/cuaderno10.pdf>
- Cotera, M. y Scott, L. (2000). AICA 232 Pradera de Tokio. México, D.F. En M.C. Arizmendi y L. Márquez (Eds.). *Áreas de Importancia para la Conservación de las Aves en México*. México: Cipamex-Conabio-CCA-FMCN.
- Cruz-Nieto, M. Á. (2006). Ecología invernal de la lechuza llanera (*Athene cunicularia*), en pastizales ocupados por perrito llanero mexicano (*Cynomys mexicanus*) Galeana, Nuevo León, México. Disertación doctoral no publicada.

- Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ciencias Biológicas.
- De la Vega-Estrada, S., Téllez-Vázquez, Y. y López-Ramírez, J. (2010). *Índice de marginación por localidad 2010*. México: Consejo Nacional de Población.
- Durand, L. (2008). De las percepciones a las perspectivas ambientales: una reflexión teórica sobre la antropología y la temática ambiental. *Nueva Antropología*, 68, 75-87.
- Estrada, E., Scott, L., Villarreal, J. A., Jurado, E., Cotera, M., Cantú, C. y García, L. (2010). Clasificación de los pastizales halófilos del noreste de México asociados con perrito de las praderas (*Cynomys mexicanus*): diversidad y endemismo de especies. *Revista mexicana de biodiversidad*, 81 (2), 401-416.
- Gerritsen, P., Montero, M. y Figueroa, P. (2003). El mundo un espejo. Percepciones campesinas de los cambios ambientales en el Occidente de México. *Economía, Sociedad y Territorio*, 4 (14), 253-278.
- Gobierno del Estado de Nuevo León. (2010). *Programa de acción ante el cambio climático para el estado de Nuevo León (2010-2015)*. Monterrey, N. L.: Autor.
- Halder, P., Sharma, R. y Ashraful, A. (2012). Local perceptions of and responses to climate change: experiences from the natural resource-dependent communities in India. *Regional Environmental Change*, 12 (4), 665-653.
- Heakin, H. (2005). Institutional change, climate risk, and rural vulnerability: Cases from Central Mexico. *World Development*, 33 (11), 1923-1938. doi:10.1016/j.worlddev.2005.06.005
- Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. (2009). *Agua y Vida. La visión de agua y vida: El ejido San Felipe un modelo sostenible de aprovechamiento de agua de lluvia*. Monterrey, México: Autor.
- Lazos, E. y Paré, L. (2000). *Miradas indígenas sobre una naturaleza entristecida. Percepciones del deterioro ambiental entre nahuas del sur de Veracruz*. México: Instituto de Investigaciones Sociales-UNAM/Plaza y Valdés.
- Magaña, V., Méndez, J. M., Morales, R. y Millán, C. (2004). Consecuencias presentes y futuras de la variabilidad y el cambio climático en México. En: J. Martínez y A. Fernández (Comps.). *Cambio climático: una visión desde México* (pp. 17-27). México: Instituto Nacional de Ecología-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Magrin, G., Gay-García, C., Cruz-Choque, D., Giménez, J. C., Moreno, A. R., Nagy, G. J., Nobre, C. y Villamizar, A. (2007). Latin America. En M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden y C. E. Hanson (Eds.). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 581-615). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- March, H., Saurí, D. y Llundres, J. (2013). Perception of the effects of climate change in winter and summer tourist areas: the Pyrenees and the Catalan and Balearic coasts, Spain. *Regional Environmental Change*, 14 (3), 1189-1201. doi: 10.1007/s10113-013-0561-0
- Martinic, S. (1997). *Diseño y evaluación de proyectos sociales. Herramienta para el Aprendizaje*. México: Comexani-Cejuv.
- Ortega-Gaucín, D. (2012). *Sequía en Nuevo León: vulnerabilidad, impactos y estrategias de mitigación*. Apodaca, Nuevo León: Instituto del Agua del Estado de Nuevo León.
- Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático-Grupo de trabajo II. (2001). *Climate change 2001. Impacts, adaptation and vulnerability*. Recuperado de: <http://www.ipcc.ch>.
- Saldaña M., J. (2013). *Herencia centenaria del maíz criollo en el sur de Nuevo León*. Monterrey, Nuevo León: Programa de Apoyo a las Culturas Municipales y Comunitarias 2012.
- Scott, L., Estrada, E., Chávez, F. y Cotera, M. (2004). Continued decline in geographic distribution of the Mexican Prairie Dog (*Cynomys mexicanus*). *Journal of Mammals*, 85 (6), 1095-1101.
- Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. (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*. México, D.F.: Diario Oficial de la Federación.



Vásquez-León, M., West, C. T. y Finan, T. J. (2003). A comparative assessment of climate vulnerability: agriculture and ranching on both sides of the US–Mexico border. *Global Environmental Change*, 13 (3), 159-173. doi:10.1016/S0959-3780(03)00034-7

Yaro, J. A. (2013). The perception of and adaptation to climate variability/change in Ghana by small-scale and commercial farmers. *Regional Environmental Change*, 13 (6), 1259-1272. doi: 10.1007/s10113-013-0443-5

Manuscrito recibido el 15 de diciembre de 2014.

Aceptado el 14 de julio de 2016.

Este documento se debe citar como:

López-García, T. G. y Manzano, M. G. (2016). Vulnerabilidad climática y situación socioambiental: percepciones en una región semiárida del noreste de México. *Madera y Bosques*, 22 (2), 105-117.



Étude des altérations de la couleur du bois de Chêne lors du séchage sous vide discontinu

Study of color alterations in European oak wood during vacuum drying

Estudio de las alteraciones de color en madera de encino europeo durante el secado a vacío

Sadoth Sandoval-Torres^{1*}, Wahbi Jomaa², Françoise Marc² et Jean-Rodolphe Puiggali²

¹ Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR-Oaxaca. México, Oaxaca, México.

² Université de Bordeaux I, Département TREFLE de l'Institut de Mécanique et Ingénierie de Bordeaux, Talence, France.

* Autor de correspondencia. ssandovalt@ipn.mx

RÉSUMÉ

Une analyse des mécanismes de discoloration du bois de chêne au cours d'un séchage sous vide sur plaques nous a permis de dégager les mécanismes principaux de l'altération de la couleur. Ces mécanismes sont la dégradation des hémicelluloses, l'oxydation des tannins et le dégagement de composants volatiles organiques. Nous avons étudié les altérations du matériau par la mesure de la couleur, le dosage du potentiel antioxydant et l'analyse des surfaces par spectroscopie infrarouge. Différentes conditions de séchage : 46 °C, 61 °C et 70 °C et niveaux de pression 6 kPa - 10 kPa (60 mBar - 100 mBar) ont été appliquées. Malgré la difficulté d'étudier et d'affirmer le rôle des extractibles dans la discoloration du chêne au cours du séchage, nous avons montré des relations entre la température appliquée, les valeurs des potentiels antioxydants et les intensités C=O des spectres FTIR. Par des phénomènes d'oxydation et d'hydrolyse, certains constituants chimiques sont modifiés. En outre, la présence d'eau et d'air accélère la formation d'acides organiques (acide acétique). Ces acides catalysent l'hydrolyse des hémicelluloses. L'augmentation de la saturation et de la luminosité peuvent être liées à la dégradation thermique des extractibles (éllagitanins principalement).

MOTS CLÉS: bois de chêne Européen, changement de la couleur, dégradation thermique, éllagitanins, séchage sous vide.

ABSTRACT

An analysis of the mechanisms of discoloration in oak wood during plain vacuum drying allowed us to identify three mechanisms of discoloration. These include degradation of hemicelluloses, oxidation of tannins and release of volatile organic components. We studied the alterations to the material by measuring color changes, determining the antioxidant potential and analyzing the surface using infrared spectroscopy. Three vacuum drying conditions were applied (46 °C, 61 °C and 70 °C at pressure levels of 6 kPa - 10 kPa (60 mBar - 100 mBar)). Despite the difficulty of studying and establishing the role of the extractives in changes in wood color during vacuum drying, we found relationships between the drying temperature, antioxidant potential and C=O peak intensities in the infrared spectra. By the oxidation and hydrolysis reactions, certain chemical compounds are modified. In addition, the presence of water and air accelerates the formation of organic acids (acetic acid). These acids catalyze the hydrolysis of hemicelluloses. The increase in color saturation and brightness can be related to the thermal degradation of extractives (mainly the ellagitannins).

KEYWORDS: European oak wood, color changes, thermal degradation, ellagitannins, vacuum drying.

RESUMEN

Un análisis de los mecanismos de decoloración de la madera de encino europeo durante un proceso de secado al vacío por contacto ha permitido identificar los principales mecanismos de la alteración del color. Estos mecanismos son la degradación de las hemicelulosas, la oxidación de taninos y la pérdida de compuestos orgánicos volátiles. Se estudiaron las alteraciones del material midiendo los cambios de color, determinando el potencial antioxidante y analizando la superficie del material por espectroscopía infrarroja. Las condiciones de

secado aplicadas fueron las siguientes: 46 °C, 61 °C y 70 °C a niveles de presión de 6 kPa - 10 kPa (60 mBar - 100 mBar). A pesar de la dificultad de estudiar y establecer el papel de los extractivos en los cambios de color durante el secado a vacío, en este trabajo se muestra la relación entre la temperatura de secado, los valores de potencial antioxidante y las intensidades de los picos C=O de los espectros FTIR. Por medio de mecanismos de oxidación e hidrólisis, ciertos compuestos químicos son modificados. Por otro lado, la presencia de agua y aire aceleran la formación de ácidos orgánicos (ácido acético). Estos ácidos catalizan la hidrólisis de las hemicelulosas. Un aumento de la saturación del color y la luminosidad pueden estar relacionados con la degradación térmica de los extractivos (principalmente de los elagitaninos).

PALABRAS CLAVE: encino europeo, cambios de color, degradación térmica, elagitaninos, secado al vacío.

INTRODUCTION

Le bois, contrairement à la plupart des autres matériaux, est une ressource renouvelable disponible en vaste quantité (Walinder, 2006). La couleur du bois est particulièrement intéressante pour la fabrication de matériaux orientés vers les marchés où les clients exigent du bois avec des caractéristiques de perception esthétique bien définies.

Marchal et Mothe (1994) ont établi une hiérarchie des critères de choix exprimés par des consommateurs et des professionnels du bois français (bois de chêne): la clarté et l'homogénéité de la teinte se classent juste après la nodosité et l'orientation du débit. A part cet aspect d'apparence, la couleur a été mise en relation avec la stabilité dimensionnelle et les propriétés mécaniques du matériau (Bekhta et Niemz, 2003), en même temps qu'elle reflète les changements physico-chimiques que le bois a suivis lors d'un procédé. La couleur est aussi liée à la capacité du bois à résister l'attaque fongique (Gierlinger *et al.*, 2004). Les substances phénoliques du bois ont été mises en relation avec les tonalités rougeâtre des bois et l'activation/inactivation des surfaces des planchettes, ce qui est important pour les fabricants de placage et contreplaqué (Sandoval, 2008).

McGinnes et Rosen (1984); Kubinsky et Ifju (1973), ont étudié l'influence de la température sur la couleur de la sève du bois et ont conclu que les extractibles sont des pigments très importants dans les fluides (sève du bois) qui suivent des altérations au cours d'un traitement thermique.

Thompson, Kozak et Evans, (2005) ont étudié la modification thermique de la couleur sur l'aulne rouge (*Alnus rubra* Bong), et ont émis l'hypothèse que la couleur de cette espèce thermiquement modifiée dépend de l'intensité des réactions qu'engendre les chromophores orange/rouge sur le bois, qui permettent le noircissement

thermique du bois. Okino *et al.*, (2015) ont étudié la relation entre la couleur et la résistance à la pourriture du bois de feuillus, car les extractibles peuvent protéger le bois de toute dégradation biologique. L'influence des groupes phénoliques sur la résistance à la dégradation du bois a aussi été démontrée pour le duramen du pin (Harju *et al.*, 2003). Aydin et Colakoglu (2005) ont signalé que certains changements de la couleur naturelle du bois surviennent à la suite de réactions chimiques (extractibles phénoliques) et de la présence d'enzymes dans le bois. Par conséquent, l'inactivation des enzymes pourrait être une solution contre la discoloration du bois.

Le séchage du bois de feuillus pose plus de problèmes au niveau des changements de couleur par rapport au bois résineux. Les espèces de bois de feuillus sont plus sensibles à la discoloration (Alexiadis, Cohen, Kozak et Avramidis, 2007). De plus, en ce qui concerne les bois de feuillus de grande valeur sur le marché européen, certaines caractéristiques d'apparence telles que la couleur et son l'homogénéité sont des critères très importants (Sandoval-Torres, Marc, Jomaa et Puiggali, 2010). Dans le tableau 1, nous résumons les principales causes de discoloration dans le bois.

LA CHIMIE DU BOIS DU CHÊNE

La dégradation ou altération du bois est un sujet complexe car il s'agit d'un mélange de trois polymères naturels (cellulose, hémicellulose et lignine) et des extractibles existants dans le bois (White et Dietengerger, 2001). La cellulose est un polymère linéaire d'unités de glucose cyclique de configuration β (le groupement hydroxyle fixé au premier atome de carbone, à l'endroit où le cycle se ferme, est situé au dessus du plan du cycle), reliées par des liaisons (1-4). Dans le bois, le degré de polymérisation de la

TABLEAU 1. Principales causes de discoloration (Sandoval *et al.*, 2010).

Type	Description
Chaleur	Dégradation thermique de la cellulose ($T > 200$ °C), de l'hémicellulose (i.e. perte de xylanes), de la lignine et des extractibles (Shen <i>et al.</i> , 2015).
Lumière	Photo-dégradation de la lignine, formation de radicaux libres.
Micro-organismes	Champignons (bleuissement par exemple).
Réactions physiologiques	Réactions entre les substances des parois cellulaires et le parenchyme.
Réactions chimiques	Réactions métal-tanins, métal-ion, réactions d'oxydation.

cellulose (poids moléculaire de la cellulose / poids moléculaire du glucose) est compris entre 5000 et 10000. Un degré de polymérisation de 10000 correspond à une chaîne d'une longueur de 5 μm .

Les hémicelluloses sont, comme la cellulose, des polysaccharides (polymères de sucres). Ces deux constituants forment la fraction désignée sous le nom de holocellulose. Les hémicelluloses sont construites à partir de plusieurs unités différentes de sucres. Leurs chaînes sont plus courtes que celle de la cellulose et elles portent des ramifications. On distingue les pentosanes et les hexosanes. La lignine est un polymère tridimensionnel amorphe de nature phénolique. Elle diffère d'une essence à l'autre, notamment de par sa teneur en unités guaiacyles et syringyles. Les feuillus contiennent environ 25% de lignine et les résineux 30%. Enfin, le terme d'extractibles recouvre de nombreux composés qui peuvent être extraits du bois par des solvants polaires ou apolaires. La teneur et la composition des extractibles varient fortement d'une essence à l'autre, les essences tropicales en contenant généralement plus que les bois issus des zones tempérées (Trouy-Triboulot et Triboulot, 2012).

La teneur et la composition des extractibles varient fortement d'une essence à l'autre, les essences tropicales en contenant généralement plus que les bois issus des zones tempérées. Parmi les extractibles, la vescalagine et la castalagine représente plus de 50% des ellagitanins dans le bois de chêne. En fait, près de 10% du duramen du bois de chêne (sec) européen (*Quercus robur* L. et *Q. petraea* (Matt.) Liebl.) contient des ellagitanins extractibles consti-

tués d'acide ester hexahydroxydiphe et du glucose. Les ellagitanins sont des molécules solubles à l'eau, et fortement oxydables et astringentes. Toutes les propriétés mentionnées ont des effets antioxydants et anti-radicaux sur ces produits, ce qui explique certaines substitutions nucléophiles, qui jouent un rôle dans la discoloration du bois.

La formation des chromophores est à l'origine des changements de la couleur des matériaux lignocellulosiques, puisque la couleur est directement affectée par ces groupes (Hon et Shiraishi, 2000). La formation des substances colorées à partir d'un composé phénolique oxydé avec de l'air et la formation des substances de couleurs foncées produits de l'hydrolyse des hémicelluloses ont été généralement considérées comme étant les causes principales de la décoloration (Charrier, Haluk et Janin, 1992 ; Charrier, Haluk et Metche, 1995 ; McMillen 1975). Lorsque les substances chromophores sont hydrosolubles, ces matériaux s'accumulent à la surface *et altèrent* la coloration des bois. La formation des groupes chromophores des pulpes ligno-cellulosiques requiert la présence d'une structure d'hydrate de carbone (Beyer, Koch et Fischer, 2006).

Le traitement par la chaleur, que ce soit dans des conditions de sécheresse ou d'humidité, provoque une altération dans la couleur du bois. Cependant, peu d'articles ont relevé ces informations dans des conditions de séchage sous vide par contact.

MATERIEL ET MÉTHODES

À partir d'une grume de chêne d'environ 100 ans, nous avons obtenu des morceaux de bois frais. Pour chaque

expérience de séchage des disques de bois frais ont été utilisés (7,0 cm de diamètre, 2,5 cm d'épaisseur). Les échantillons de bois sont des disques de bois de coeur de chêne (*Quercus peduncularis*), l'aubier a été écarté dans cette étude, la concentration en composants polyphénoliques étant plus importante dans le coeur de chêne.

Tous les disques ont été protégés de la lumière, emballés dans un film plastique et gardés au congélateur afin d'éviter les dégradations enzymatiques et les processus d'oxydation. Les échantillons de bois seront stockés entre -20 °C à -24 °C pendant un à deux mois. Trois niveaux de températures (46 °C, 61 °C et 70 °C) et un niveau de pression (6 kPa – 10 kPa ; 60 mBar-100 mBar) ont été associés pour le séchage sous vide.

EQUIPEMENT EXPÉRIMENTAL

Le dispositif expérimental (Fig. 1) est une chambre à vide où la pression est réglée entre deux valeurs : P_{min} (6 kPa ; 60 mBar) et P_{max} (10 kPa ; 100 mBar). Le chauffage provient d'une résistance noyée dans une plaque d'aluminium afin d'homogénéiser la distribution de la chaleur dans la zone de contact. Les capteurs de température ont été placés à trois emplacements suivant l'épaisseur du disque de bois.

Un de ces capteurs a été placé à 3 mm à proximité de la plaque, un autre au centre du disque et le troisième à 3 mm en dessous de la surface d'évaporation. Pour chaque expérience, l'historique des trois températures est enregistré.

La régulation de la pression permet de maintenir celle-ci entre deux valeurs de consigne (P_- , et P_+). L'évolution de la pression autour de ces deux points fait apparaître deux régimes, l'un passif et l'autre actif. Un régime actif pendant lequel la pompe à vide est en fonctionnement (chute de pression) et pendant lequel l'évaporation en surface est étroitement lié au débit de la pompe. Cet effet de pompage est visible sur l'évolution de la masse de l'échantillon où l'on observe une diminution brusque chaque fois que la pompe à vide est en fonctionnement.

Dans un souci de maîtriser les conditions d'expérimentation, nous avons mis en place ce dispositif expérimental. Dans le domaine industriel, le bois est empilé entre deux plaques d'aluminium à l'intérieur desquelles circule de l'eau chaude. Ces plaques sont reliées par des flexibles au circuit principal. La chaleur se transmet donc au bois par contact direct, tandis que le vide est maintenu durant tout le cycle de séchage.

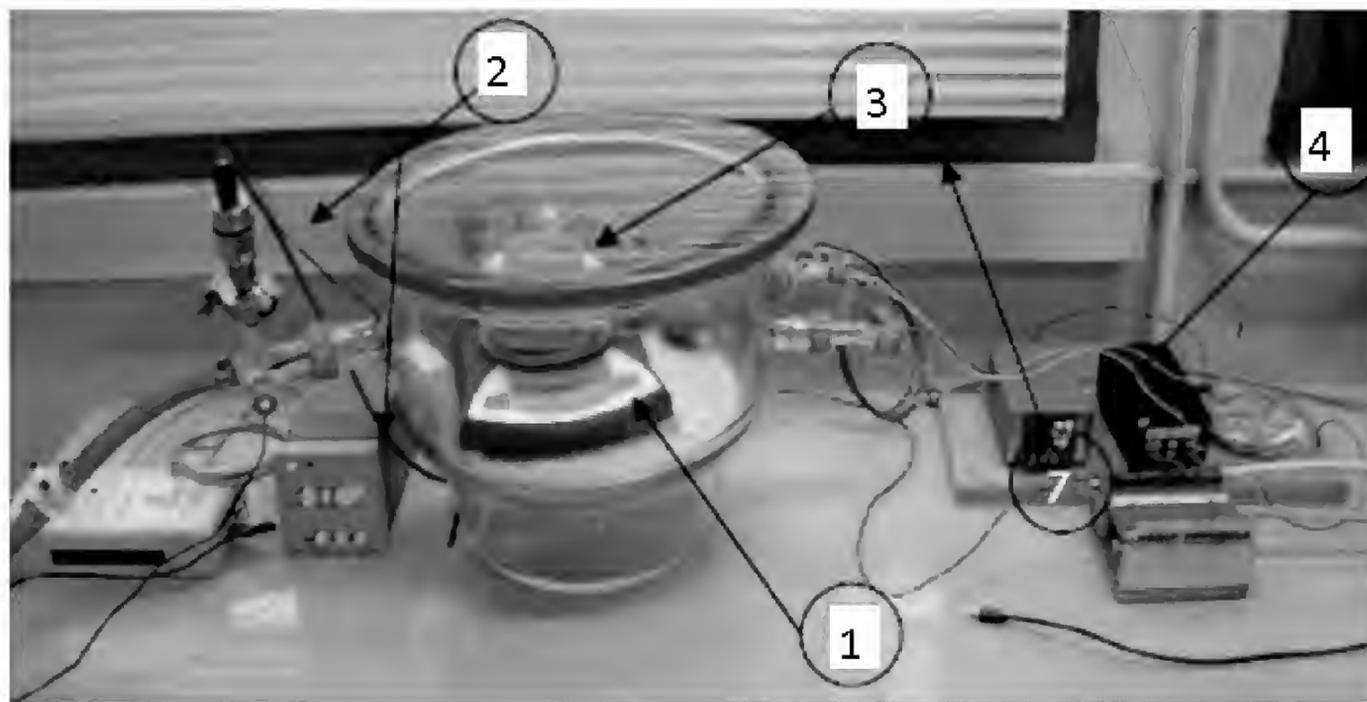


FIGURE 1. Séchoir sous Vide: 1) balance de précision Ohaus Navigator avec interface RS-232; 2) capteur de pression Edwards, et contrôleur de pression Edwards; 3) Thermocouples, résistance, plaque chauffante et porte échantillon; 4) contrôleur de température WEST 6100.



La particularité de ce travail est que nous exposons une surface du bois à la plaque chauffante et l'autre à l'atmosphère (vide), donc nous pouvons ainsi étudier deux effets de séchage sur un échantillon. Les surfaces du bois exposés à la plaque chauffante sont dans la direction radiale. Cette orientation est normale dans l'industrie du bois.

MESURE DE LA COULEUR DU BOIS

La mesure objective de la couleur d'un objet consiste à déterminer d'une part, la valeur de la luminosité L^* (variant de 0 à 100), en utilisant la réflectance globale de cet objet en comparaison avec celle d'un étalon blanc de référence, et d'autre part, les coordonnées chromatiques a (+ ou -, sur un axe rouge-vert) et b (+ ou -, sur un axe bleu-jaune). Ces trois valeurs permettent de repérer le point de couleur correspondant à l'objet mesuré dans le système CIELAB 1976. A partir de ces trois coordonnées sont également calculés un angle de teinte h^* (angle de couleur) par rapport au cercle chromatique, et une saturation C^* de cette teinte (Janin *et al.*, 2001; Forintek, 2006), nous parlons alors de système CIELCh.

Pour l'échantillonnage de sciure de bois de chaque disque de bois, et afin d'obtenir un matériau le plus homogène possible, nous avons brossé la surface du disque très doucement pour éviter l'échauffement du matériau. Nous avons brossé la surface exposée à l'air de l'enceinte et les surfaces qui ont été chauffés directement par la plaque. De chaque surface, nous avons raboté le bois jusqu'à 5 mm de profondeur. Pour chaque échantillon on obtient environ 5 g de poudre lesquels sont gardés dans un flacon bien fermé, protégé de la lumière et placé au congélateur jusqu'aux analyses.

À partir des poudres tamisées à 100 μm (Fig. 2) et à l'aide d'un colorimètre, les paramètres L^* , a^* et b^* des poudres ont été enregistrés (4-7 répétitions par échantillon). Dans le système CIELCh, C^* est zéro au centre de cet espace, la valeur augmente quand C^* se déplace du centre vers l'extérieur. L'angle de teinte h^* est exprimé en degrés: 0° exprime $+a$ (rouge), 90° exprime b^* (jaune), 180° $-a^*$ (vert), et 270° $-b^*$ (bleu). A partir des paramètres L^* , a^* et b^* , on peut donc calculer C^* .

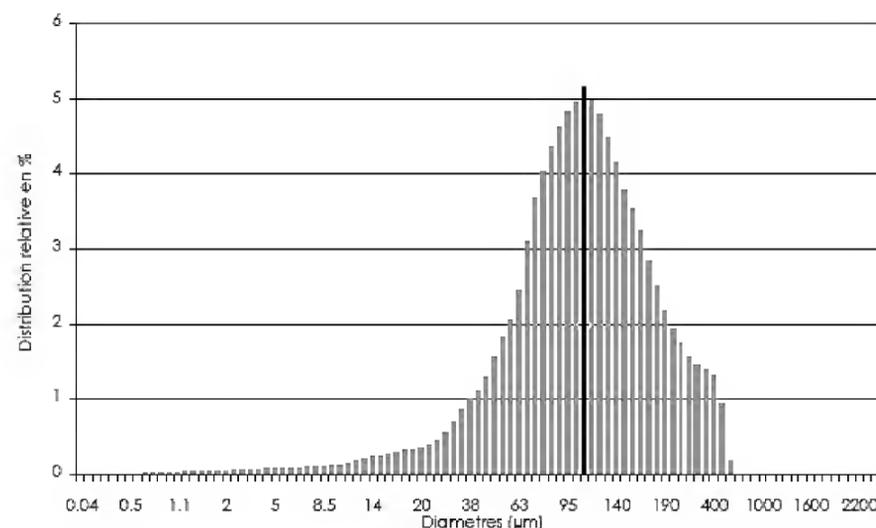


FIGURE 2. Histogramme fréquentiel relatif en volume. Médiane=103 μm .

$$C^* = \sqrt{a^2 + b^2}$$

Après chaque expérience, nous avons mesuré les paramètres des couleurs selon le système Cielab (Communication Minolta), en utilisant un Colorimètre Minolta avec un illuminant C, D65.

LES SPECTRES INFRAROUGES (FTIR).

Les Spectres Infrarouge à Transformée de Fourier des échantillons de bois ont été obtenus avec un spectromètre Bruker EQUINOX 55 (Bruker Optics Inc, Ettlingen, Allemagne), sur la gamme 400 cm^{-1} - 4000 cm^{-1} et une résolution de 4 cm^{-1} , les spectres sont enregistrés selon le mode de réflexion (R%). Dans un souci d'homogénéisation des échantillons de poudre de bois, nous avons passé les sciures du bois destinées à l'analyse FT-IR dans un tamis à 100 micromètres. Une analyse granulométrique par diffraction laser a été pratiquée en utilisant l'éthanol comme liquide porteur. La distribution relative des particules est présentée dans la (Fig. 2), celles-ci possèdent un diamètre moyen de 103 μm . Trente scans ont été accumulés avant la Transformation Fourier. D'après (Pandey et Pitman, 2003), une ligne de base a été utilisée pour le calcul des aires correspondant au groupe carbonyle (1741 cm^{-1}), le dit point d'intensité correspondant à la bande de vibration de valence de la liaison $\text{C}=\text{O}$. Nous avons utilisé cette méthode proposée par (Pandey et Pitman, 2003).

LE DOSAGE DU POTENTIEL ANTIOXYDANT.

Pour doser le potentiel antioxydant il est nécessaire d'obtenir un extrait de ces poudres. Pour ceci un solvant adéquat est utilisé. Dans ce travail il s'agit d'un mélange éthanol/eau (1/1; v/v). La mesure du potentiel antioxydant et le suivi des processus d'oxydation sont abordés ici globalement en déterminant l'aptitude de l'extrait à piéger des radicaux modèles, et donc à ralentir ou inhiber les réactions d'oxydations radicalaires. Ceci implique la création de radicaux. Dans la méthode AAEAC (Acide Ascorbic Equivalent Antioxidant Capacity), l'activité antioxydante totale d'une molécule est déduite de sa capacité à inhiber le radical $ABTS^{\bullet+}$, obtenu à partir de l'ABTS (sel d'ammonium de l'acide 2,2-azinobis-(3-éthylbenzothiazoline-6-sulfonique)) comparativement à un antioxydant de référence : l'acide ascorbique (Vitamine C). Le radical $ABTS^{\bullet+}$, en contact avec un donneur de H^{\bullet} conduit à l'ABTS et à la décoloration à 734 nm de la solution.

Lors de chaque expérience de séchage, de la poudre de bois homogène est obtenue par tamisage des sciures à la cuillère à thé (0.06 g bois sec). Chaque échantillon de poudre est mis en suspension dans 50 ml d'un solvant (eau-éthanol, 1/1) et placé dans un sonicateur pendant 15 min. Le surnageant est ensuite récupéré, il va constituer l'extrait qui sera analysé. L'action du sonicateur améliore l'extraction des composés d'intérêt, et a l'avantage d'être plus simple et rapide que l'utilisation du soxhlet. Les résultats obtenus ont montrés que cette technique d'extraction était cependant discriminante.

La densité optique de l' $ABTS^{\bullet+}$ en solution aqueuse est fixée initialement à 0.70 ± 0.02 . À 1960 μ l d' $ABTS^{\bullet+}$ sont ajouté 40 μ l d'extrait (dilué 5 fois). La solution est ensuite agitée (vortex) pendant 30s puis la mesure de la densité optique (DO) à 734 nm est effectuée à 1 min et 15 min après avoir ajouté l'extrait. Huit déterminations sont effectuées pour chaque échantillon, chaque échantillon appartenant à un procédé de séchage. Plus la densité optique diminue plus le potentiel antioxydant est important.

Nous avons choisit de présenter les résultats du potentiel après 15 minutes de réaction, car ce temps correspond

à la décoloration maximale des radicaux libres créés ($ABTS^{\bullet+}$). Ce temps a été déterminé par une étude cinétique de la réaction de piégeage (Re *et al.*, 1999).

RESULTATS ET DISCUSSION

Les cinétiques de séchage à partir des six expériences réalisées au cours de ce travail sont montrées dans la (Fig. 3).

Des profils des températures lors d'une expérience de séchage sous vide à 60 °C, sont exposés dans la (Fig. 4). Une diminution de la pression permet d'atteindre le point d'ébullition de l'eau à basse température. Car le vide permet de sécher ces matériaux qui d'ordinaire n'acceptent pas de hautes températures. Durant le séchage sous vide, nous sommes en présence d'un faible taux d'oxygène.

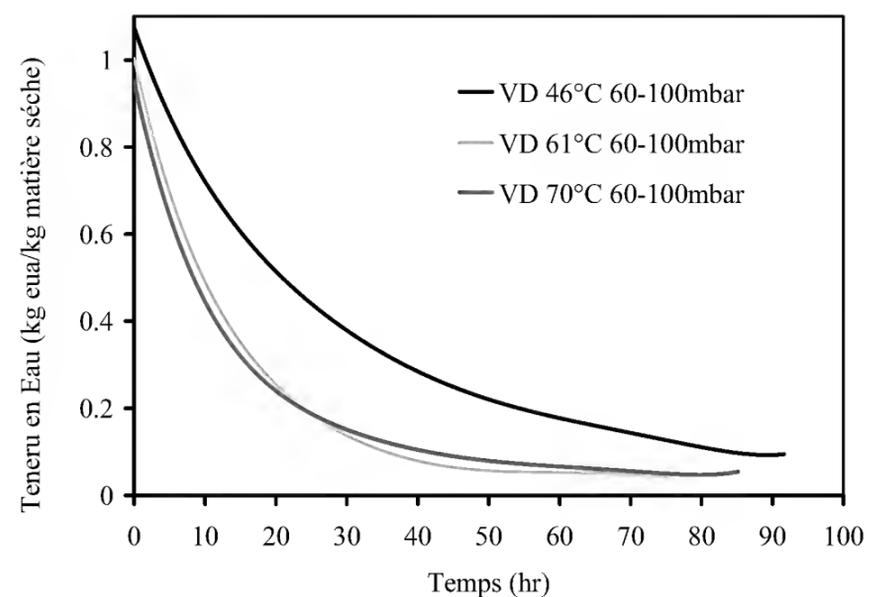


FIGURE 3. Cinétiques de séchage sous vide.

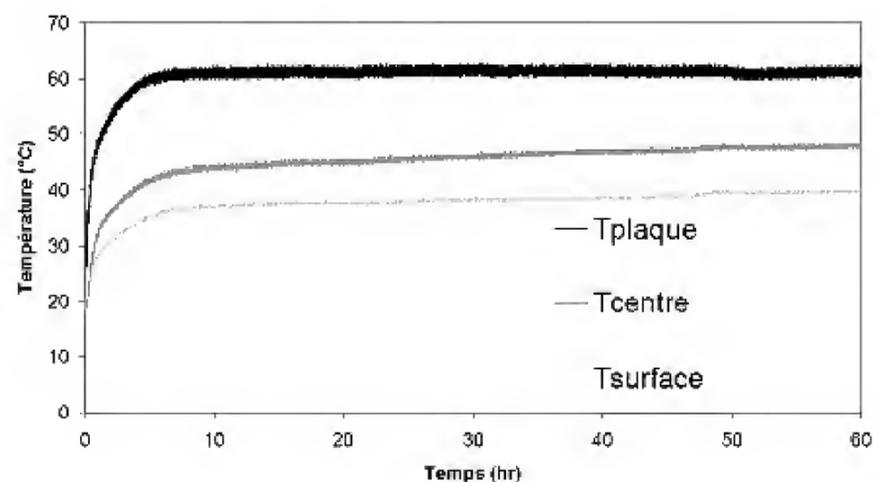


FIGURE 4. Profils de températures au cours d'une expérience de séchage sous vide.



Nous pouvons donc dire aux vues des premiers résultats que les réactions d'oxydation peuvent être réduites dans ces conditions de séchage et la modification de la couleur du bois par la chaleur peut s'expliquer principalement par la production et/ou la destruction des groupes chromophores par *effet thermique*.

Il a été clairement établi que les hémicelluloses sont détériorées par la chaleur provoquant une modification du bois ; les températures doivent être cependant élevées, $T > 200$ °C. Nous avons également mesuré les changements de couleur des surfaces exposés à la plaque chauffante et à l'air de l'enceinte, puisque selon les principes de phénomène de transport, les produits chimiques tels que les sucres, les phénols, les antioxydants et autres substances étrangères auraient pu être transportés du centre à la couche de la surface par l'évaporation de l'eau, où ils peuvent être ensuite modifiés par les conditions de séchage.

La figure 5 montre que la luminosité et la saturation de la couleur du bois sont proportionnelles. L'augmentation de la saturation et de la luminosité peuvent être liées à la dégradation thermique des extractibles (ellagitanins principalement). La luminosité peut être expliquée par une perte en composés phénoliques. La chaleur aussi peut modifier directement la couleur du bois en provoquant l'hydrolyse et l'oxydation de composants en bois. En outre, la discoloration des chênes a été étudié par Kollman, Keywerth et Kubler, (1951), et Wassipaul et Fellner,

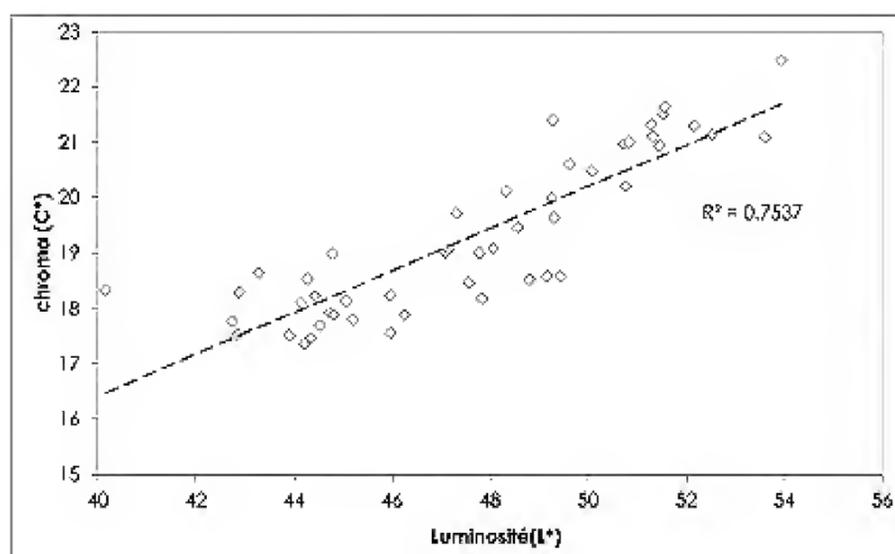


FIGURE 5. Relation entre la saturation de la couleur et luminosité.

(1987), ils ont constaté qu'une humidité au-dessus de 70% facilite l'apparition des discolorations.

Il est bien connu que les extraits du bois de chêne ont des propriétés antioxydants qui peuvent restreindre les changements de couleur pendant le séchage, ces propriétés limitant les dégradations causées par l'oxygène et les radicaux libres (Hon et Minemura, 2000). Parmi les extractibles, les tanins ont des structures phénoliques qui peuvent être dégradés par effets thermiques et par l'oxygène. Ils peuvent par conséquent produire des composés de discoloration. Dans le cas du chêne, la participation des gallotanins et des éllagitanins a été bien identifiée dans les processus de discoloration (Haluk, Schloegel et Metche, 1991; Charrier, 1992; Koch, 2008; Zahri, 2007). Par ailleurs, la vescalagine et la castalagine subissent des réactions qui produisent des composés chromophores au cours du séchage. D'après Zhentian (2002), la vescalagine et la castalagine (éllagitanins) jouent le rôle principal de la discoloration au cours du séchage. Il a été montré que la vitesse de dégradation des éllagitanins est affectée par la température, l'oxygène et le pH; la température étant le paramètre le plus important.

Zanetti (2000), a étudié l'évolution de la couleur du bois de chêne sessile (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) par photodégradation. Il a observé au cours d'un cycle de vieillissement de 500 heures à l'aide d'un spectrophotomètre deux phénomènes: dans un premier temps un assombrissement accompagné d'un jaunissement, ainsi qu'une augmentation de la *saturation de la couleur*; dans un deuxième temps une baisse de la saturation, un rougissement et une augmentation de la luminosité du bois.

La dégradation des éllagitanins est un phénomène difficile à contrôler, car ceux-ci sont constitués de composants hydrolysables, qui en présence d'eau libre et de chaleur peuvent produire de l'acide gallique, de l'acide ellagique et du glucose. Ces acides peuvent aussi jouer un rôle de catalyseurs de réactions, ce qui complique la compréhension des phénomènes contrôlant les changements de couleur des bois. Les produits de l'hydrolyse des éllagitanins sont moins chromophores que les constituants d'origine (Hemingway et Hillis, 1971). L'acide ellagique

peut donner lieu à une décarboxylation, et à des produits d'oxydation. Donc, nous pensons que la dégradation des ellagitanines correspond à des réactions d'hydrolyse qui en absence d'oxygène (sous vide) ne polymérise pas, et donc ne conduisent pas à des produits fortement chromophores. Nous pensons alors la dégradation que nous observons est une phase intermédiaire (cassure des ellagitanines) de l'évolution de ces composés. Les composants phénoliques sont des substances à tonalité rougeâtre, et dans l'espace de couleur leur dégradation concorde avec une tonalité jaune. Même si l'on travaille à basse température, la couleur des bois peut être altérée à partir de 43 °C (Yeo et Smith, 2004). En théorie, la réactivité de l'oxygène est plus élevée en présence d'eau libre ($W > W_{psf}$). C'est pourquoi quelques travaux ont essayé d'élucider les mécanismes de discoloration du bois en amont du point de saturation de la fibre.

Le jaunissement peut être provoqué par une dégradation des composés phénoliques. La forte présence jaune sur la couche décolorée de la surface pourrait être due en partie au composants tels que les extractibles phénoliques. Le jaunissement du bois est lié à la formation des groupes contenant de l'oxygène, tels que les groupes carbonyles, et le peroxyde d'hydrogène. Afin de pouvoir confirmer la présence de groupes carbonyles, nous avons eu recours aux analyses de la Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier.

Néanmoins, l'altération de la couleur du bois n'est pas un sujet totalement compris ce qui nous a amené dans ce travail à explorer et analyser la relation entre le potentiel antioxydant et les groupes carbonyles. Il se peut que les ellagitanins subissent une oxydation et des réactions de polymérisation durant le séchage et participent à la formation des groupes chromophores. Les extractibles ont des propriétés antioxydantes qui peuvent limiter le changement de couleur durant le processus de séchage, ces dites propriétés limitant les dommages causés par les radicaux libres.

Par rapport à la technique de spectroscopie infrarouge, nous avons mesuré l'intensité des bandes à 1740 cm^{-1} /1750 cm^{-1} , et le rapport existant avec les potentiels

antioxydants et les paramètres de l'espace CIELab. Le pic 1740 cm^{-1} /1750 cm^{-1} est mis en relation avec la formation de composants chromophores C=O liés à l'oxydation des structures phénoliques (Zahri *et al.*, 2007). Dans la figure 6 nous présentons les spectres infrarouges du chêne lors du séchage sous vide à plaques.

Dans la figure 7, nous présentons les valeurs du potentiel antioxydant et l'intensité C=O. Le Delta du potentiel antioxydant représente la différence entre le potentiel initial et le potentiel final pour chaque échantillon. Nous pouvons remarquer que le Delta du potentiel antioxydant augmente en même temps que C=O augmente. Le potentiel antioxydant est lié au contenu des extractibles car les groupes phénoliques sont des antioxydants puissants. Parmi les extractibles antioxydants, les ellagitanins et les gallotanins sont les plus importants. Les ellagitanins contribuent à la formation de l'oxydation des produits (groupes chromophores); ce fait a été confirmé par une présence plus importante d'entités carbonyles dans les surfaces de bois identifiés par spectroscopie. Les ellagitanins peuvent être hydrolysables en présence d'eau libre et de chaleur, même à basse température, par conséquent, il est possible de produire de l'acide gallique, de l'acide ellagique et du glucose durant le processus de séchage.

Conformément à ces résultats, nous pouvons dire que la capacité antioxydant et les pics à 1741 cm^{-1} sont directement en corrélation puisqu'une perte plus importante du

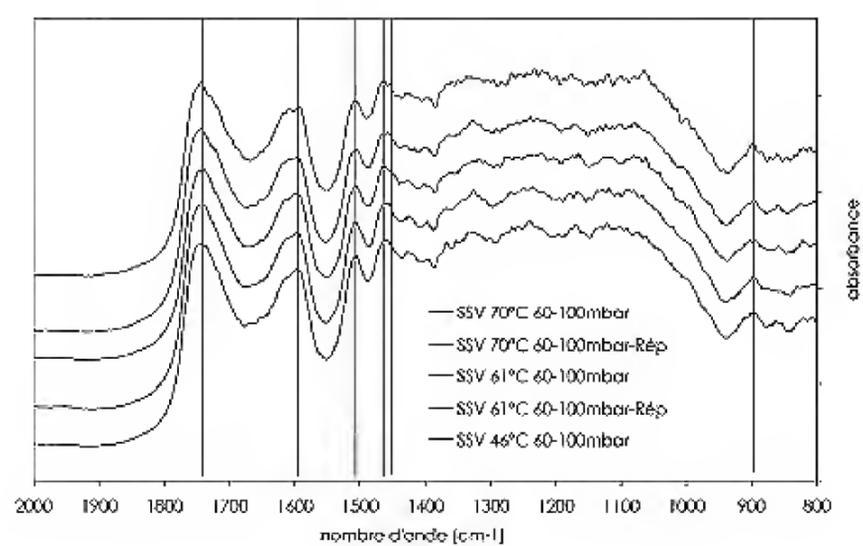


FIGURE 6. Spectres infrarouges du bois de chêne.

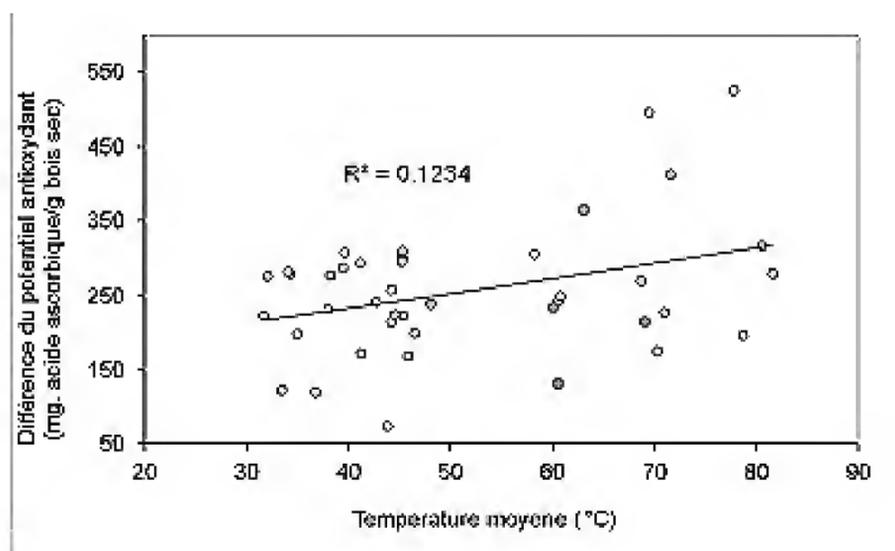


FIGURE 7. Le potentiel antioxydant et la présence de groupes carbonyles.

potentiel antioxydant correspond à une présence plus importante en carbonyle plus importante (groupes chromophores). On peut donc supposer que la couleur du bois de chêne européen thermiquement modifiée est le résultat de la production et/ou destruction des groupes chromophores. L'effet de la température sur le potentiel antioxydant est démontré dans la figure 8. La perte en puissance antioxydante augmente avec la température. Les composés phénoliques sont de couleur rougeâtre, la dégradation des ellagitanins provoque donc une couleur jaunâtre du bois par effet thermique. L'augmentation de la saturation et de la luminosité peut être liée à la dégradation thermique des extractibles (principalement les ellagitanins).

D'après la figure 9, la luminosité est toujours plus forte dans les surfaces en contact avec la source de chaleur. Par conséquent on pourrait penser que l'augmentation de la luminosité est provoquée par l'effet d'une température plus importante du côté de la plaque (le bois étant dans ce cas directement en contact avec la plaque chauffante – sous vide continu à plaques).

Dans son travail, Grekin (2007) mentionne que la teinte rouge des bois du pin est associée avec la teneur en composants extractibles des bois, et que la tonalité jaune est associée à la photochimie des bois (en particulier à la présence de lignine). Il attribue le jaunissement du bois à la formation de

groupes qui contiennent de l'oxygène, comme les groupes carbonyles, carboxyles, et peroxyde d'hydrogène, des observations que nous avons également remarquées.

Au vu des résultats expérimentaux, et étant donné la complexité des phénomènes et des réactions, la forte variabilité de la composition chimique et de la teneur en eau du matériau, il nous paraît difficile d'établir une conclusion définitive à partir des analyses en colorimétrie. Cependant cette augmentation de la luminosité peut être liée aux états intermédiaires des substances, c'est-à-dire à des réactions intermédiaires (cassure des ellagitanins).

En théorie, le bois de feuillus est séché au-dessus de 60 °C et 65% d'humidité, nous avons donc recours au séchage sous vide pour que le bois soit chauffé par la plaque chauffante. Durant les opérations de séchage, les

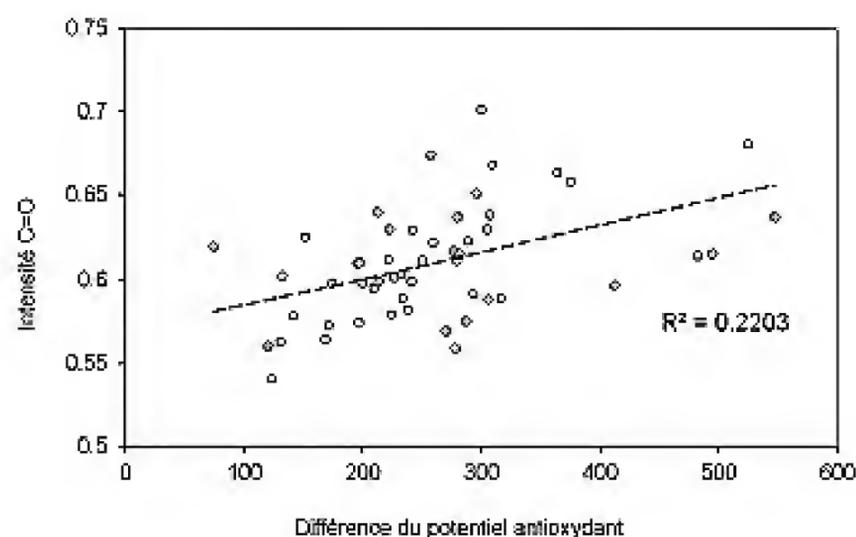


FIGURE 8. Le potentiel antioxydant et la température moyenne.

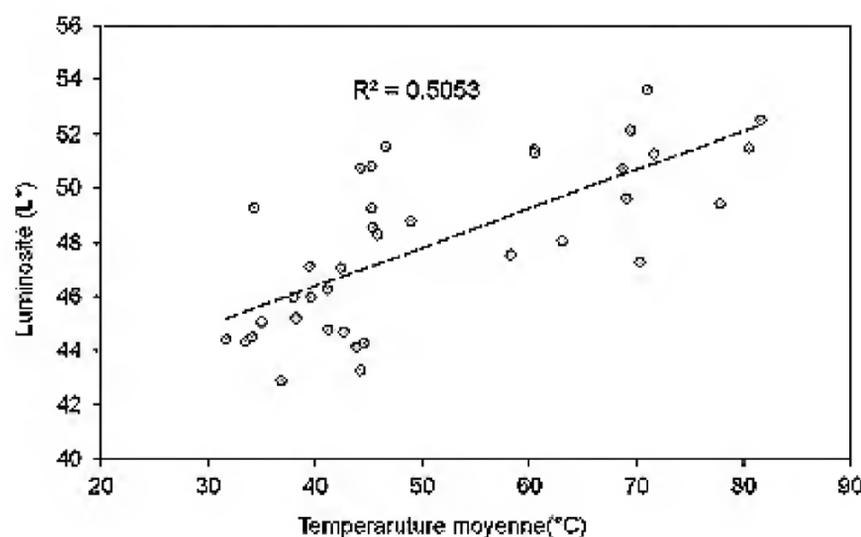


FIGURE 9. La luminosité et température moyenne du matériau.

réactions entraînent la libération des composés organiques volatils (COV). Les dits composés peuvent catalyser les réactions chimiques sur la surface du bois; les réactions chimiques sont donc un phénomène complexe.

CONCLUSION

L'augmentation de la saturation et de la luminosité peuvent être liées à la dégradation thermique des ellagitanins durant le séchage sous vide à plaques. Une augmentation des groupes chromophores C=O dans le bois de chêne durant le processus de séchage est fortement liée au facteur température. La dégradation thermique des composés phénoliques est suivie d'une perte de la capacité antioxydant et on peut noter une tendance au jaunissement de la couleur du bois. L'intensité des groupes chromophores C=O augmente à mesure que la température augmente. Les extractibles (ellagitanins), qui sont des composés phénoliques, et les émissions de composés organiques volatils, ont donc une grande influence sur la luminosité des surfaces du bois. La discoloration durant le processus de séchage du bois implique la formation de substances colorées (tels que les chromophores) à partir des composés antioxydants extractibles.

La dégradation des ellagitanins peut contribuer à la formation des produits d'oxydation ; cette théorie a été appuyée par une plus importante intensité de la bande de vibration de valence de la double liaison C=O (groupe carbonyle) des surfaces du bois. Les ellagitanins sont des composés antioxydants mais ils sont hydrolysables en présence d'eau libre et de chaleur, il est donc ensuite possible de diminuer les quantités en acide gallique, acide ellagique et glucose durant le séchage. Dans nos échantillons, le potentiel antioxydant diminue à mesure que le pic 1741 cm^{-1} augmente. Ce fait est lié à la formation des produits d'oxydation (oxydation des ellagitanins), conséquence directe de la chute du potentiel antioxydant.

Nous avons démontré que la luminosité des surfaces du bois augmente à mesure que la température de séchage augmente, nous pouvons donc suggérer une vitesse d'évolution intermédiaire de la couleur (cassure des ellagitanines) puisque les groupes carbonyles augmentent à mesure que le potentiel antioxydant diminue.

Les différentes conditions de séchage sous vide et la particularité de notre dispositif expérimental permettent d'obtenir des résultats assez intéressants, peu de travaux ayant été orientés vers l'étude de l'altération de la couleur dans une opération de séchage sous vide à plaque.

D'après les résultats énoncés, nous pouvons donc dire que le séchage sous vide par contact réduit les dommages thermiques infligés au bois. Néanmoins les solutions apportées à ce problème restent cependant limitées.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier ici l'ensemble des personnes du département TREFLE de l'I2M (Institut de Mécanique et Ingénierie de Bordeaux) et à l'Université Bordeaux 1. Nos remerciements vont aussi au Conacyt (Mexique) et à la SFERE (France).

Merci à L'Institut de Chimie de la Matière Condensée de Bordeaux (ICMCB - UPR9048) pour les facilités à l'équipement FTIR.

REFERENCES

- Alexiadis, P., Cohen, D. H., Kozak, R. A. et Avramidis, S. (2007). Kiln drying Canadian softwoods and hardwoods: Different Species – Different Problems. *The Journal of Institute of Wood Science*, 17 (5), 259-267.
- Aydin, I. et Colakoglu, G. (2005). Effects of surface inactivation, high temperature drying and preservative treatment on surface roughness and colour of alder and beech wood. *Applied Surface Science*, 252 (2), 430-440.
- Bekhta, P. et Niemz, P. (2003). Effect of high temperature on the change in color, dimensional stability and mechanical properties of spruce wood. *Holzforschung*, 57, 539-546.
- Beyer, M., Koch, J. et Fisher, K. (2006). Role of Hemicelluloses in the Formation of Chromophores during Heat Treatment of Bleached Chemical Pulps. *Macromolecular symposia*, 232 (1), 98-106. doi: 10.1002/masy.200551412
- Charrier, B., Haluk, J. P. et Janin, G. (1992). Prevention of brown discoloration in European oak wood occurring during kiln drying by a vacuum process : Calorimetric comparative study with a traditional process. *Holz Roh-Werkstoff*, 50, 433-437.



- Charrier, B., Haluk, J. P. et Metche, M. (1995). Characterization of European oakwood constituents acting in the brown discoloration during kiln drying. *Holzforschung*, 49, 168-172
- Forintek Canada Corp. (2006). *Application de la colorimétrie aux produits en bois d'apparence* (TP-05-01E report). Vancouver, Canada: Profile Technologique. Valeur au bois.
- Gierlinger, N., Jacques, D., Grabner, M., Wimmer, R., Schwanninger, M., Rozenberg, P., et Paques, L. E. (2004). Colour of larch heartwood and relationships to extractives and brown-rot decay resistance. *Trees - Structure and Function*, 18 (1), 102-108. doi:10.1007/s00468-003-0290-y
- Grekin, M. (2007). Color and color uniformity variation of Scots pine wood in the air-dry condition. *Wood and Fiber Science*, 39 (2), 279-290.
- Haluk, J. P., Schloegel, F. et Metche, M. (1991). Chimie de la couleur du bois. Etude comparative des constituants polyphénoliques dans le chêne sain et le chêne coloré. *Holzforschung*, 45, 437-444.
- Harju, A. M, Venäläinen, M., Anttonen, S., Viitanen, H., Kainulainen, P., Saranpää, P. et Vapaavuori, E. (2003). Chemical factors affecting the brown-rot decay resistance of Scots pine heartwood. *Trees - Structure and Function*, 17 (3), 263-268.
- Hemingway, R. W. et Hillis, W. E. (1971). Behavior of ellagitannins, gallic acid, and ellagic acid under alkaline conditions. *TAPPI Journal*, 54 (6), 933-936.
- Hon, D. N. S. et Minemura, N. (2000) Color and discoloration. In D. N. S. Hon et N. Shirashi (Eds.). *Wood and Cellulosic Chemistry* (pp. 385-442). New York: Marcel Dekker.
- Hon, D. N. S. et Shirashi, N. (2000). *Wood and cellulosic chemistry*. New York, NY: CRC Press. Marcel Dekker, Inc. 928 p.
- Janin, G., Gonzalez, J., Ananías, R. A., Charrier, B., Fernandes, G. et da Silva, A. (2001). Aesthetics appreciation of wood colour and patterns by colorimetry. Part 1. Colorimetry theory for the Cielab System. *Maderas Ciencia y Tecnología*, 3 (1-2), 03-13.
- Koch, G. (October 2008). *Discoloration of wood in the living tree and during processing*. Document de conférence présenté à COST E53. Delft, The Netherlands.
- Kollman, F., Keylwerth, R. et Kubler, H. (1951). Verfärbung des colholzes und der funiere bei der künstlichen Holz-trocknung. *Holz Roh Werkstoff*, 10, 382-390.
- Kubinsky, E. et Ifju, G. (1973). Influence of steaming on the properties of red oak. Part I. Structural and chemical changes. *Forest Products Journal*, 23, 54-56.
- Marchal, R. et Mothe, F. (1994). Appréciation du bois de chêne (*Quercus robur* L., *Quercus petraea* Liebl.) par les consommateurs et les professionnels français du bois. *Annals of Forest Science*, 51, 213-231.
- McGinnes, E. A. et Rosen, H. N. (1984). Macroscopic and microscopic analyses of color changes of wood pressure steam-dried above atmospheric pressure. *Wood and Fiber Science*, 16 (1), 48-56.
- McMillen, J. M. (1975). *Physical Characteristics of seasoning discoloration in sugar maple sapwood* (Paper 248). Washington, DC: USDA. Forest Service.
- Okino, E. Y. A., Pastore, T. C. M., Camargos, J. A. A., Coradin, V. T. R., Teixeira, D. E., Santana, M. A. E. et Fagg, C. W. (2015). Laboratory test of three amazonian wood species called tauari, exposed to white- and brown-rot fungi and color response according to cie L* A* B* system. *Ciencia Florestal*, 25 (3), 581-593.
- Pandey, K. K. et Pitman, A. J. (2003). FTIR studies of the changes in wood chemistry following decay by brown-rot and white-rot fungi. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 52, 151-160.
- Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M. et Rice-Evans, C. (1999) Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology & Medicine*, 26 (9-10), 1231-1237.
- Sandoval-Torres, S. (2008). Effet de paramètres de séchage sous vide sur la discoloration du bois de chêne. These de Doctorat, Université Bordeaux 1.
- Sandoval-Torres, S., Marc, F., Jomaa, W. et Puiggali, J. R. (2010). Causes of color changes in wood during drying. *Forestry Studies in China*, 12 (4), 167-175.
- Shen, D., Zhang, L., Xue, J., Guan, S., Liu, Q. et Xi, R. (2015). Thermal degradation of xylan-based hemicellulose under oxidative atmosphere. *Carbohydrate Polymers*, 127, 363-371.

- Thompson, D. W., Kozak, R. A. et Evans, P. D. (2005). Thermal modification of color in red alder veneer. I: Effects of temperature, heating time, and wood type. *Wood and Fiber Science*, 37 (4), 653-661.
- Trouy-Triboulot, M. C. et Triboulot, P. (2012). *Matériau bois. Structure et caractéristiques*. France: Techniques de l'ingénieur.
- Walinder, M. (2006). Editorial. *Wood Material Science and Engineering*, 1, 2-3.
- Wassipaul, F. et Fellner, J. (1987) Verfärbung von Eichenschnittholz bei der künstlichen Trocknung. *Holzforschung und Holzverwertung*, 40, 1-5.
- White, R. H. et Dietsberger, M. A. (2001). Wood products: Thermal degradation and fire. In S. Mahajan, *Encyclopedia of materials: Science and technology* (pp. 9712-9716). Elsevier.
- Yeo, H. et Smith, W. B. (2004). Control of interior darkening in hard maple. *Wood Fiber Science*, 36 (3), 417-422.
- Zahri, S., Belloncle, C., Charrier, F., Pardon, P., Quideau, S. et Charrier, B. (2007). UV light impact on ellagitannins and wood surface colour of European oak (*Quercus petraea* and *Quercus robur*). *Applied Surface Science*, 253 (11), 4985-4989.
- Zanetti, M. (2000). Etude des variations de la couleur du bois de chêne sessile (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) dues à la photodégradation. Ses conséquences sur la perception des utilisateurs (Mémoire, Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et Forêts, Paris, FRA, Université Henri Poincaré (Nancy 1), Vandoeuvre-lès-Nancy, FRA). <http://prodinra.inra.fr/record/11047>.

Manuscrit reçu 20 mai 2014.

Accepté 2 mai 2016.

Ce document doit être cité comme suit:

Sandoval-Torres, S., Jomaa, W., Marc, F. et Puiggali, J. R. (2016). Étude des altérations de la couleur du bois de Chêne lors du séchage sous vide discontinu. *Madera y Bosques*, 22 (2), 119-130.



Composición química de las hojas y ramas de *Cedrela odorata* L. de dos plantaciones forestales como fuente de materia prima lignocelulósica

Chemical composition of leaves and branches of *Cedrela odorata* L. from two forest plantations as a source of lignocellulosic feedstock

Martha Rosales-Castro¹, J. Amador Honorato-Salazar^{1*}, Ariana Berenice Santos-García¹, Ma. Elena Pérez-López¹,
Gertrudis Colotl-Hernández² y Vicente Sánchez-Monsalvo²

¹ Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR Durango, Durango, México.

² Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (Inifap), Campo Experimental San Martinito, Puebla, México.

* Autor de correspondencia:
honorato.amador@inifap.gob.mx

RESUMEN

Cedrela odorata L., conocida como cedro rojo, es una de las especies de mayor valor económico en la producción forestal de México. Aunque la madera es el producto principal que se obtiene de esta especie, se generan también residuos como ramas y hojas en los aclareos y podas, así como aserrín y costeras en el aserrío. En este trabajo se evaluó la composición química de hojas, madera de ramas y aserrín de cedro rojo, en muestras colectadas en dos plantaciones experimentales en El Palmar, Veracruz y San Felipe Bacalar, Quintana Roo, así como la concentración de fenoles totales, flavonoides y su capacidad de captación de radicales libres, enfocadas hacia valorar su potencial como fuente lignocelulósica para obtención de biocombustibles y/o hacia la aplicación en áreas biomédicas. Las hojas presentan altas concentraciones de extraíbles con valores máximos de 34,78%, polisacáridos 67,11%, lignina 33,10%, azúcares reductores 6,52%, fenoles 211,91 mgEAG/g, flavonoides 81,05 mgEC/g, pero no presentan actividad de antiradicales libres. En cambio, la madera, tanto de ramas como de aserrín, presenta bajas concentraciones de extraíbles 6,10%, polisacáridos 78,46%, lignina 32,24%, azúcares reductores 8,87%, fenoles 355,57 mgEAG/g, flavonoides 178,56 mgEC/g, y alta capacidad de captación de radicales libres. Se encontraron diferencias en las concentraciones lignocelulósicas entre las muestras colectadas en las dos plantaciones, sobresaliendo las colectadas en Bacalar, Q. R. Los resultados obtenidos indican que las hojas, la madera de ramas y aserrín son viables para obtención de carbohidratos, mientras que la madera puede ser una fuente de obtención fenoles y flavonoides con posibles aplicaciones terapéuticas.

PALABRAS CLAVE: cedro rojo, celulosa, extractos, lignina, madera, polifenoles.

ABSTRACT

Cedrela odorata L., known as red cedar, is one of the most economically valuable species in Mexican forestry production. Although timber is the main product obtained from this species, branches and leaves are generated from thinning and pruning activities, as well as sawdust from sawmilling. These materials are currently considered as waste. This study evaluated the chemical composition of the leaves, branch wood and sawdust of red cedar from samples collected in two experimental forest plantations in El Palmar, Veracruz and San Felipe Bacalar, Quintana Roo. Concentrations of total phenols, flavonoids and their capacity for scavenging free radicals were evaluated, focusing on their potential use as a lignocellulosic source for obtaining biofuels and in applications in biomedical areas. The leaves have high concentrations of extractables with maximum values of 34,78%, polysaccharides 67,11%, lignin 31,10%, reducing sugars 6,52%, phenols 211,91 mgGAE/g, flavonoids 81,05 mgCE/g, but did not show free radical scavenging activity. In contrast, the branch wood and sawdust had low extractable levels with 6,10%, polysaccharides 78,46%, lignin 32,24%, reductor sugars 8,87%, phenols 355,57 mgGAE/g, flavonoids 178,56 mgCE/g and a high capacity for free radical scavenging. Differences were found in lignocellulosic concentrations among the samples collected at the two plantations, with the highest values in those collected at Bacalar, QR. The results obtained indicate that the leaves, branch wood and sawdust are viable for obtaining carbohydrates; while the wood can be a source of phenols and flavonoids with possible therapeutic applications.

KEYWORDS: red cedar, cellulose, extracts, lignin, wood, polyphenols.

INTRODUCCIÓN

La superficie de plantaciones forestales comerciales maderables en México, establecidas hasta 2014, es de 177 216 hectáreas. Las plantaciones con especies tropicales incluyen *Cedrela odorata*, *Eucalyptus spp.*, *Tectona grandis*, *Gmelina arborea*, *Swietenia macrophylla* y *Tabebuia rosea* y cubren 73.9% de la superficie. Las plantaciones de *Cedrela odorata* cubren 20.5% de la superficie total plantada, ubicadas principalmente en los estados de Veracruz, Campeche, Chiapas, Tabasco, Oaxaca, Guerrero y Quintana Roo (Comisión Nacional Forestal, 2015).

Cedrela odorata L., conocida como cedro rojo, pertenece a la familia Meliaceae, es una de las especies de mayor valor económico porque la madera se utiliza principalmente para la fabricación de muebles de calidad. Junto con la caoba, constituye uno de los pilares de la producción forestal de maderas preciosas en México. Debido a su valor económico, estas especies han sido severamente afectadas por la selección disgénica y la deforestación, al fragmentar y disminuir sus poblaciones naturales (Sánchez, Salazar, Hernández, López y Jasso, 2003; Martínez-Vento, Estrada-Ortiz, Góngora-Rojas, López-Castilla, Martínez-González y Curbelo-Gómez, 2010). Por esta razón se han emprendido acciones de conservación y mejoramiento genético de esta especie, mediante el establecimiento de ensayos de procedencias y plantaciones en el golfo y sureste de México.

Aunque el producto principal de cedro rojo es la madera aserrada, también se generan residuos como ramas y hojas que provienen de aclareos y podas, así como aserrín y costeras generados en la industrialización de la madera, sin valor comercial aparente.

Los residuos forestales pueden de ser utilizados de una forma ecológica y económica, por ejemplo, en la producción de combustibles renovables como etanol (bioetanol), así como para obtener productos de alta demanda en la industria farmacéutica, química, cosmética y el sector agrícola (Wetzel, Duchesne y Laporte, 2006; Díaz, Alessandrini y Herrera, 2007).

La biomasa lignocelulósica está compuesta principalmente por los polímeros de celulosa, hemicelulosas y lignina, que están asociados y sirven de soporte estructural a

la pared celular (Rowell, Pettersen, Han, Rowell y Tshabalala, 2005). La fracción total de polisacáridos, se le conoce como holocelulosa y está formada por la combinación de celulosa y hemicelulosas.

La celulosa está formada por unidades de glucosa y se considera que es el compuesto químico orgánico más abundante en la tierra, que representa en promedio de 38% a 49% del peso seco de la madera y es la materia para la fabricación de papel, películas, explosivos, plásticos, combustibles, además de tener diversos usos y aplicaciones industriales (Fengel, y Wegener, 2003; Rowell *et al.*, 2005).

Las hemicelulosas son polímeros heterogéneos cortos ramificados compuestos por pentosas, hexosas y diferentes tipos de ácidos urónicos. Estos compuestos representan un inmenso recurso renovable de biopolímeros que pueden usarse en la industria química, alimenticia, farmacéutica y cosmética (Rowell *et al.*, 2005).

La lignina es un polímero amorfo, constituido por tres tipos de monómeros básicos de fenilpropano y representa de 18% a 35% del peso seco de la madera. Este compuesto se obtiene principalmente como residuo de la industria de la celulosa y papel, por lo que se ha considerado como un material de baja calidad y de bajo valor agregado industrial (Fengel, y Wegener, 2003; Rowell *et al.*, 2005). Sin embargo, dado que es una materia prima abundante, en el futuro podría convertirse en el principal recurso para la obtención de diversas sustancias derivadas del petróleo tales como combustible, resinas, aditivos, dispersantes, mezclas termoplásticas y productos farmacéuticos (Stewart, 2008).

Las sustancias extraíbles formadas por el metabolismo secundario de las plantas, son un grupo de compuestos químicos que están constituidos por ácidos grasos, alcoholes grasos, ácidos resínicos, terpenos, fenoles, taninos, esteroides, alcaloides, compuestos nitrogenados, azúcares, grasas y ceras (Rowell *et al.*, 2005; Taiz y Zeiger, 2006). Estos compuestos son de gran interés por sus diversas aplicaciones en medicina, cosméticos, añejamiento de bebidas alcohólicas, como preservadores y en la obtención de aceites esenciales (Arung, Wicaksono, Handoko, Kusuma, Yulia y Sandra, 2009; Hnawia, Menut, Agrebi y



Caballo, 2009; Rodríguez, Suárez, Diñero, del Valle y Picinelli, 2010; Tascioglu, Yalcin, de Troya y Siyrikaya, 2012, Philippov y Bogorodov, 2013).

Los fenoles son compuestos que poseen uno o más anillos aromáticos con uno o más grupos hidroxilo, que abarcan un gran y diverso número de compuestos químicos entre los que se encuentran ácidos fenólicos, flavonoides, taninos, estilbenos y lignanos. Estos compuestos son de interés por sus diferentes efectos beneficiosos en las plantas y son reconocidos por su uso potencial en la prevención y tratamiento de enfermedades crónico-degenerativas, por lo que han sido probadas sus propiedades antioxidantes, anti-mutagénicas, antiinflamatorias, antimicrobianas y anticancerígenas (Lattanzio, Kroon, Quideau y Treutter, 2008).

El uso de materiales lignocelulósicos se investiga intensamente debido a que éstos representan el componente mayor en los residuos agrícolas, agroindustriales y agroforestales en el mundo y constituyen una fuente abundante y sostenible de recursos renovables y energía.

OBJETIVOS

En el presente trabajo se analizaron las hojas y la madera de ramas de cedro rojo procedente de dos plantaciones forestales con los objetivos de evaluar: 1) la composición química, determinando los contenidos de extraíbles totales, holocelulosa, α -celulosa, lignina y azúcares reductores, como fuente de biomasa lignocelulósica para la producción de etanol; 2) la concentración de fenoles totales y flavonoides y 3) la capacidad inhibitoria de radicales libres, con vistas hacia el uso en áreas biomédicas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Colecta del material

El material de estudio se colectó en dos plantaciones forestales experimentales ubicadas en El Palmar, Tezonapa Veracruz y San Felipe Bacalar, Othón Pompeyo Blanco, Quintana Roo.

La plantación de El Palmar tiene una ubicación geográfica de 18° 31,03' latitud Norte y 96° 47,93' longitud Oeste; altitud de 180 m snm, el clima es cálido-húmedo

con lluvias en verano con una precipitación media anual de 2888 mm, y temperaturas medias de 16 °C a 36 °C en el año. La fisiografía presenta terrenos planos y lomeríos, los suelos son del tipo acrisol, profundos y de buen drenaje y poseen una textura de migajón arcillo-arenoso y pH de 4,8 (Sánchez *et al.*, 2003).

La plantación de San Felipe Bacalar está ubicada en las coordenadas geográficas 18° 48,5' latitud Norte y 88° 24,5' longitud Oeste, a una altitud de 10 m snm. El clima del sitio es cálido-subhúmedo, con lluvias en verano y parte del invierno, la oscilación térmica es entre 5 °C a 7 °C. La temperatura media anual es de 26 °C y la precipitación anual de 1000 mm a 1200 mm con una época seca bien marcada entre diciembre y mayo. La fisiografía general del terreno es casi plana (Arguelles y Palafox, 2008).

En El Palmar se colectaron muestras en las plantaciones de 8 y 18 años de edad, mientras que en San Felipe Bacalar la colecta fue en las plantaciones de 9 y 10 años de edad. Se colectaron hojas (H) y las ramas (R) de dos árboles seleccionados al azar, en ambas plantaciones de cada edad. Adicionalmente se realizó una mezcla en partes iguales de hojas (MH) y otra mezcla de la madera de ramas sin corteza (MR).

Se colectó también aserrín de madera (de fuste), en una carpintería en El Palmar, que aprovecha las trozas de cedro rojo.

Preparación del material

Las hojas y ramas se secaron a temperatura ambiente bajo la sombra, después se molieron en un molino tipo Wiley. Las ramas se descortezaron antes de ser molidas, analizándose la madera de las ramas sin corteza. El material se tamizó en mallas de los números 40 (0,42 mm) y 60 (0,250 mm). La fracción del material retenido en la malla del número 60 se utilizó para la determinación de la composición química principal (TAPPI T 257).

Métodos analíticos de estudio

En la figura 1 se muestra el diagrama de flujo experimental de los métodos analíticos usados para los diferentes estudios, los cuales se describen a continuación.

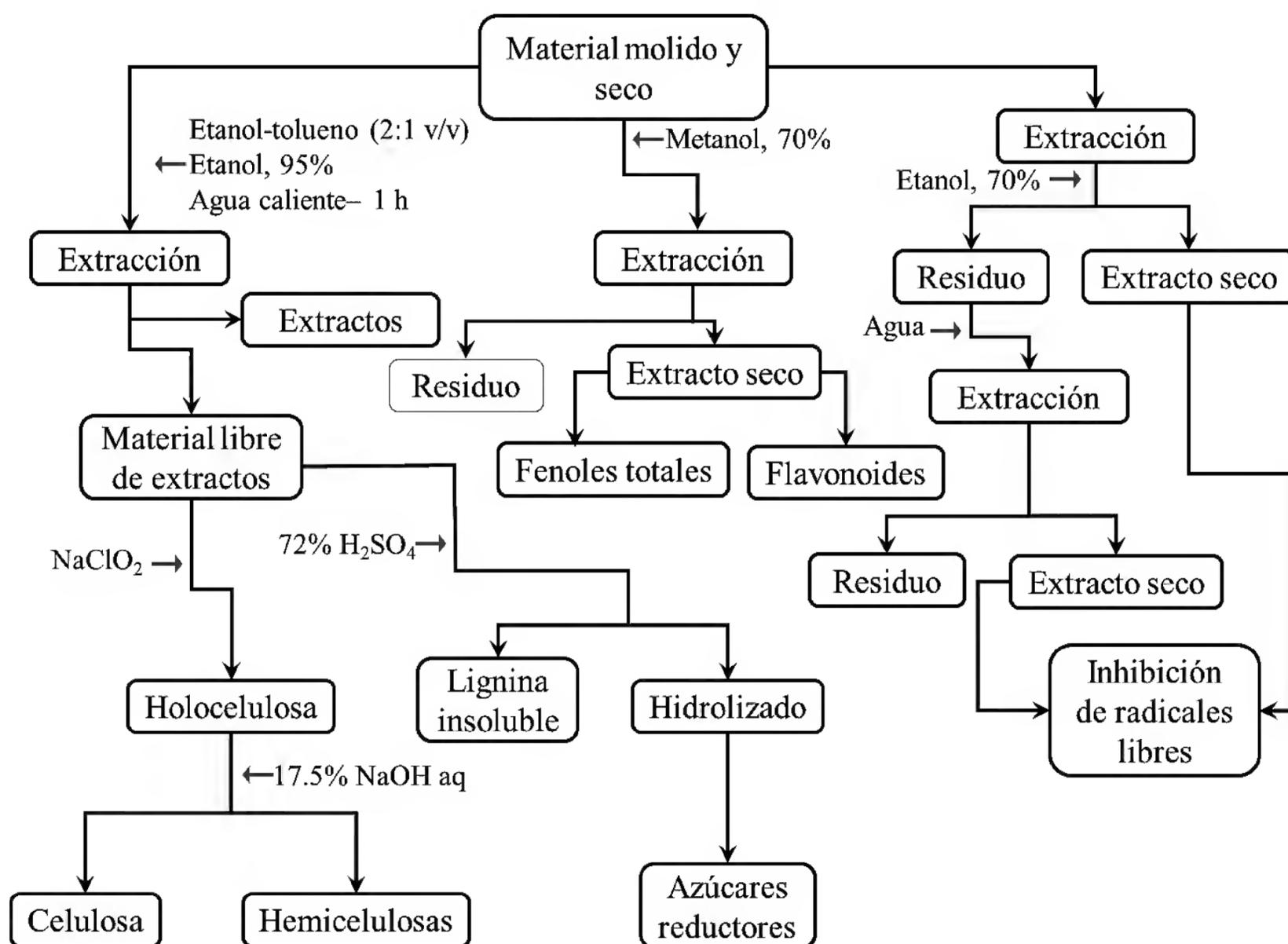


FIGURA 1. Diagrama de flujo experimental.

Composición química

Sustancias extraíbles

La determinación de extraíbles se efectuó en forma secuencial con etanol-tolueno (2:1 v/v), etanol a 95% y agua caliente, siguiendo el procedimiento de la norma ASTM D1105 (ASTM, 2010) y realizando dos repeticiones por muestra.

Los extraíbles totales se calcularon con la suma de los porcentajes de extraíbles en cada disolvente. Las muestras de hojas y madera libre de extractos se utilizaron para la determinación de holocelulosa, α -celulosa y lignina.

Lignina insoluble

Se determinó mediante la técnica descrita por Effland (1977), que consistió en realizarla en una autoclave a

121°C, durante 1 h y la cual es una modificación al procedimiento TAPPI T 222. El residuo insoluble de la hidrólisis se cuantificó gravimétricamente mientras que el hidrolizado (líquido) se guardó para el análisis de azúcares reductores.

Holocelulosa

El contenido de holocelulosa se determinó por el método del clorito ácido, descrito por Rowell *et al.*, (2005), que es similar al procedimiento de Wise.

α -celulosa

La cantidad de celulosa se cuantificó a partir de la holocelulosa, empleando la técnica de la norma ASTM D1103 (ASTM, 1977).



Hemicelulosa

Se calculó por diferencia entre holocelulosa y celulosa.

Azúcares reductores

La concentración de los azúcares reductores se evaluó a partir del hidrolizado obtenido en la cuantificación de lignina insoluble. Se utilizó la técnica del ácido dinitrosalicílico (DNS), de acuerdo con el procedimiento de Chaplin y Kennedy (1994). La concentración de azúcares reductores se calculó a partir de una curva de calibración con glucosa a 200 ppm, 400 ppm, 600 ppm, 800 ppm, 1000 ppm ($y = 0,0002x - 0,0308$; $R^2 = 0,9981$), expresados en mg de glucosa/100 mg de material (porcentaje).

Evaluación de fenoles y flavonoides en extractos metanólicos

Extracción con metanol 70%

Se maceraron 5 g de material (hojas o madera) con 50 ml de metanol acuoso al 70% (v/v), en dos períodos de 24 h cada uno. El extracto se filtró y concentró en un rotavapor a 45 °C para recuperar el disolvente (metanol), y posteriormente se llevó a sequedad en una campana de extracción. A partir del extracto seco se evaluó la cantidad de fenoles totales y flavonoides.

Evaluación de fenoles totales

Se utilizó el método de Folín-Ciocalteu descrito por Rosales-Castro, González-Laredo, Rocha-Guzmán, Gallegos-Infante, Peralta-Cruz y Karchesy, (2009). Se trabajó con una curva de calibración de ácido gálico a concentraciones de 100 ppm, 200 ppm, 300 ppm, 400 ppm, 500 ppm y 600 ppm ($y = 0,001x + 0,0371$; $R^2 = 0,9969$). Los resultados se expresaron como mg equivalentes de ácido gálico/g de extracto seco (mg EAG/g).

Evaluación de flavonoides

La concentración de flavonoides en los extractos metanólicos se realizó de acuerdo al procedimiento descrito por Rosales-Castro *et al.*, (2009), a concentraciones de 50 ppm, 100 ppm, 150 ppm, 200 ppm, 250 ppm y 300 ppm

($y = 0,0035x - 0,0299$; $R^2 = 0,9985$). Los resultados se expresaron como mg equivalentes de catequina/g de extracto seco (mg EC/g).

Evaluación de la capacidad inhibitoria de radicales libres

Extracción con etanol 70% y agua

100 g de material (hojas o madera) se maceró con 500 ml de etanol acuoso a 70% (v/v) durante 48 h a temperatura ambiente. El extracto se filtró, se concentró en rotavapor a 45 °C para recuperar el disolvente (etanol) y el extracto concentrado se llevó a sequedad en campana de flujo laminar. El material remanente se sometió a una extracción (sucesiva) con 500 ml de agua destilada durante 48 horas a 20 °C. Una porción del extracto se llevó a sequedad en campana de extracción a temperatura ambiente. Todas las extracciones se realizaron por triplicado. Se evaluó el rendimiento en sólidos (extracto total), que corresponden a los sólidos disueltos en el disolvente con respecto a la cantidad de material a extraer y a partir del extracto seco se evaluó la inhibición de radicales libres.

Captura de radical DPPH

La capacidad inhibitoria de radicales libres se evaluó mediante el método de DPPH (radical 2,2,-difeníl-1-picril-hidracilo). Se realizó en los extractos de etanol 70% y acuosos. Se aplicó la metodología descrita por Rosales-Castro, Pérez-López y Ponce-Rodríguez, (2006). Los extractos se probaron a concentraciones de 250 ppm, 500 ppm, 750 ppm y 1000 ppm, y se calculó la Concentración Efectiva 50 (CE_{50}), que indica la concentración para inhibir 50% del radical. Como estándares de referencia se utilizaron los flavonoides catequina y rutina a concentraciones de 50 ppm, 100 ppm, 200 ppm y 300 ppm. La capacidad de atrapamiento del radical se calculó con la siguiente fórmula:

$$ARL = \frac{100 (A_o - A_m)}{A_o}$$

Donde:

A_0 = Absorbancia inicial del radical DPPH sin muestra
 A_m = Absorbancia de la solución con muestra (DPPH + extracto)

Análisis estadístico

Los efectos de la edad y el sitio de crecimiento sobre la composición química de las hojas y ramas se analizaron mediante el modelo estadístico siguiente (Montgomery y Runger, 2014):

$$Y_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + e_{ijkl} \quad (1)$$

Donde:

Y_{ijkl} = Compuesto determinado
 μ = Valor promedio general
 α_i = Efecto de la edad
 β_j = Efecto del sitio
 γ_k = Efecto del material
 e_{ijkl} = Error experimental

Se consideraron diferencias significativas cuando, en el análisis de varianza (ANOVA), la probabilidad del valor de F fue menor a 0,05. Para identificar la diferencia entre los valores promedio, se realizó una comparación múltiple de medias por medio del procedimiento de Fisher ($\alpha = 0,05$).

Los valores de la composición química de las hojas, ramas y aserrín se utilizaron para realizar un análisis discriminante canónico (ADC) con el fin de identificar diferencias grupales entre la edad y el sitio, así como los atributos de composición química que más contribuyen a maximizar la diferencia entre los grupos (Rencher, 2002). Esto se realizó usando los procedimientos STEPDISC y CANDISC de SAS (SAS, 2000).

RESULTADOS

Composición química

Sustancias extraíbles

La concentración de extractos fue variable dependiendo de la edad, el tipo solvente y el material (Tabla 1). Para

todos los solventes, las mayores concentraciones ($p < 0,5$) de extractos se obtuvieron en las hojas y la menor concentración en la madera de las ramas. En el caso de etanol-tolueno, las hojas y las ramas de 18 años de El Palmar presentaron la más alta concentración de extractos con 20%, 86% y 3,38%, respectivamente, mientras que las menores cantidades se observaron en hojas y ramas de 8 años de la misma localidad, con un contenido respectivo de 11,06% y 1,69%. El contenido de extractos en etanol fue mayor tanto en las hojas (9,54%) como en las ramas (2,46%) de 9 años de edad para la localidad de Bacalar, mientras que las menores cantidades de extractos fueron para las hojas (1,44%) y las ramas (0,57%) de 18 años de El Palmar. En agua caliente, el contenido de extractos fue mayor en la mezcla de las hojas (16,76%) y las ramas (2,27%) y menor en las hojas de 10 años de Bacalar (30,06%), así como en las ramas de 8 años (4,91%) de El Palmar. Se presentaron problemas en la cuantificación de las repeticiones en el contenido de extractos de las hojas de 18 años de El Palmar, por lo que solo se presenta el valor de una repetición lo que pudiera no reflejar adecuadamente el valor de la comparación significativa en la comparación múltiple con los otros valores, como en el caso de los extractos de etanol-tolueno; en los otros contenidos de extractos la comparación es válida.

La edad y la localidad de crecimiento mostraron efectos significativos sobre la composición química de las hojas y ramas de cedro rojo, así como en la cantidad de azúcares reductores. Los contenidos de holocelulosa, celulosa y azúcares reductores fueron mayores en la madera de las ramas de cedro rojo (Tabla 2) que en las hojas, mientras que para los contenidos de hemicelulosas y lignina fueron similares en las ramas y las hojas. La composición química del aserrín fue similar a la madera de las ramas, pero diferente a la de las hojas. Con excepción de la lignina, la cantidad de los compuestos químicos son mayores entre las edades de 8 y 9 años, tanto para las hojas como para las ramas.

Holocelulosa

El contenido general promedio de holocelulosa fue de 64,20% para las hojas, de 73,85% para las ramas y de



TABLA 1. Contenido de extraíbles de hojas y madera de ramas de cedro rojo.

CLAVE	Etanol Tolueno (%)		Etanol (%)		Agua caliente (%)		Total de extractos (%)	
9BH	13,40* ± 3,54 ¹	B ²	9,54 ± 4,68	A	10,56 ± 1,50	B	33,51 ± 2,64	A B
10BH	13,38 ± 0,12	B	4,43 ± 2,33	A B	12,25 ± 5,46	A B	30,06 ± 3,01	B
8PH	11,06 ± 3,27	B	8,99 ± 1,72	A	13,27 ± 1,78	A B	33,32 ± 3,19	A B
MH	12,66 ± 2,75	B	5,36 ± 4,55	A B	16,76 ± 0,64	A	34,78 ± 1,15	A
9BR	1,71 ± 0,26	C	2,46 ± 0,84	B	1,31 ± 0,15	C	5,47 ± 1,25	C
10BR	1,97 ± 0,21	C	1,86 ± 1,22	B	2,01 ± 1,29	C	5,83 ± 0,14	C
8PR	1,69 ± 0,76	C	1,42 ± 0,45	B	1,81 ± 0,37	C	4,91 ± 0,07	C
18PR	3,38 ± 0,13	C	0,57 ± 0,07	B	2,15 ± 0,55	C	6,10 ± 0,49	C
MR	2,30 ± 0,38	C	1,29 ± 0,64	B	2,27 ± 0,08	C	5,86 ± 0,18	C

P = Palmar, B = Bacalar, H = Hoja, R = Rama, M = Mezcla; Edad=8, 9, 10 y 18 años. Ejemplo de clave: 9BR significa ramas de 9 años de Bacalar. * Valores promedio. ¹ Desviación estándar. ² Valores con la misma letra no son significativamente diferentes ($p < 0,05$).

TABLA 2. Composición química principal y azúcares reductores de hojas y madera de ramas de cedro rojo.

CLAVE	Holocelulosa (%) [*]	α -celulosa (%) [*]	Hemicelulosas (%) [*]			Lignina (%) [*]	Azúcares reductores (%)			
9BH	67,11 ± 0,99 ¹	E ²	30,28 ± 1,07	F	36,83 ± 1,76	A	27,24 ± 0,65	B	6,52 ± 0,99	D
10BH	66,19 ± 0,61	E	32,38 ± 0,53	E	33,81 ± 0,97	C E D	27,89 ± 1,59	B	6,29 ± 0,50	D
8PH	60,81 ± 0,54	F	26,39 ± 0,26	H	34,43 ± 0,43	C B D	26,57 ± 5,28	B	6,15 ± 1,32	D
18PH	60,36 ± 0,71	F	27,41 ± 0,27	G	32,95 ± 0,44	F E D	33,49 ± 0,17	A	5,81 ± 0,30	D
MH	61,62 ± 0,55	F	32,63 ± 0,14	E	28,99 ± 0,41	H	27,84 ± 0,20	B	5,84 ± 0,11	D
9BR	76,94 ± 0,54	B	41,46 ± 0,49	B	35,48 ± 0,60	A B	28,81 ± 1,25	B	8,58 ± 0,50	A B
10BR	78,46 ± 0,75	A	43,40 ± 0,52	A	35,06 ± 0,37	C B	27,07 ± 0,85	B	8,87 ± 0,70	A
8PR	71,65 ± 1,67	C	38,62 ± 0,60	C	33,03 ± 1,99	F E D	31,57 ± 0,48	A	8,00 ± 0,31	C B
18PR	70,40 ± 1,27	C D	38,23 ± 0,79	C	32,16 ± 0,58	F G	31,54 ± 0,22	A	8,70 ± 0,21	A B
MR	69,74 ± 0,62	D	36,93 ± 0,47	D	32,81 ± 0,21	F E	32,24 ± 0,02	A	7,70 ± 0,19	C
Aserrín	71,65 ± 0,21	C	40,85 ± 0,13	B	30,80 ± 0,08	G	33,12 ± 0,02	A	8,68 ± 0,75	A B

P = Palmar, B = Bacalar, H = Hoja, R = Rama, M = Mezcla; Edad=8, 9, 10 y 18 años. Ejemplo de clave: 9BR significa ramas de 9 años de Bacalar. * Valores con base al material anhidro libre de extractos. ¹ Desviación estándar. ² Valores con la misma letra no son significativamente diferentes ($p < 0,05$).

71,65% para el aserrín, con diferencias significativas ($p < 0,05$). La diferencia en la cantidad de holocelulosa se observó en las ramas (69,74% a 78,46%) de las diferentes localidades y en las hojas (60,36% a 67,11%) (Tabla 2). Las hojas y ramas de Bacalar mostraron mayor contenido de holocelulosa que el material de El Palmar.

α -celulosa

Los valores obtenidos de α -celulosa fueron mayores en el aserrín (40,85%) que en las ramas (40,04%) y en las hojas (30,25%), observándose diferencias ($p < 0,05$) entre las localidades de las hojas y las ramas y siendo mayor el contenido de α -celulosa en las hojas y ramas de Bacalar que en las de El Palmar (Tabla 2).

Hemicelulosas

Los contenidos de hemicelulosas fueron de 28,99% a 36,38% en hojas, 32,16% a 35,48% en ramas y 30,80% en aserrín, presentándose diferencias entre las localidades de Bacalar y El Palmar (Tabla 2).

Lignina

El porcentaje promedio de lignina varió poco entre las localidades y el tipo de material, encontrándose diferencias significativas ($p < 0,05$) entre las hojas y ramas del El Palmar de 18 años con respecto a las otras edades y a la localidad de Bacalar (Tabla 2). Los contenidos de lignina obtenidos fueron de 26,57% a 33,49% en hojas, de 27,07% a 32,24% en ramas y 33,12% en aserrín.

Azúcares reductores

Los porcentajes de azúcares reductores en las muestras de *C. odorata* fueron de 6,16% como promedio general en hojas, 8,44% en las ramas y 8,68% en el aserrín (Tabla 2), con diferencias significativas entre el tipo de material y la concentración de azúcares reductores ($p < 0,05$). Solo en las ramas se presentaron diferencias significativas entre los sitios de colecta. Las muestras procedentes de Bacalar presentaron mayores azúcares reductores que las de El Palmar.

La correlación entre el contenido de α -celulosa y el porcentaje de azúcares reductores en las muestras analizadas fue de 0,893, lo cual es razonable ya que la α -celulosa al ser un homopolisacárido formado sólo por unidades D-(+) glucosa enlazadas entre sí por enlaces β -1-4, puede hidrolizarse a D-(+) glucosa, la cual es un azúcar reductor.

Evaluación de fenoles y flavonoides

Fenoles

La concentración de fenoles en los extractos metanólicos de las hojas y la madera presentaron diferencias significativas ($p < 0,05$), obteniéndose una mayor concentración en las ramas (235 mg EAG/g), que en el aserrín (191 mg EAG/g) y las hojas (123,67 mg EAG/g). La localidad tuvo un efecto significativo ($p < 0,05$) en las hojas (Tabla 3), mostrando que la mayor cantidad de fenoles se presenta en El Palmar.

TABLA 3. Concentración de fenoles totales y flavonoides en extractos metanólicos de hojas y madera de ramas de cedro rojo.

Clave	Fenoles totales (mg EAG/g)		Flavonoides (mg EC/g)	
9BH	78,54 ± 7,62 ¹	E ²	41,60 ± 3,69	F
10BH	142,19 ± 36,75	D	61,67 ± 10,18	E
8PH	132,77 ± 17,48	D	67,50 ± 4,95	E
18PH	211,91 ± 10,48	B C	81,05 ± 5,42	D
9BR	217,71 ± 40,02	B C	99,38 ± 16,06	C
10BR	248,13 ± 29,57	B	131,95 ± 16,87	B
8PR	122,75 ± 22,30	D	75,05 ± 9,58	D E
18PR	355,57 ± 52,75	A	178,56 ± 16,91	A
Aserrín	191,00 ± 4,00	C	134,00 ± 5,29	B

P = Palmar, B = Bacalar, H = Hoja, R = Rama, Edad=8, 9, 10 y 18 años. Ejemplo de clave: 09BR significa ramas de 9 años de Bacalar. ¹ Desviación estándar, ² Valores con la misma letra no son significativamente diferentes ($p < 0,05$).

La edad también afecta el contenido de fenoles, ya que el material de los árboles más jóvenes presentó menor cantidad de fenoles que el material de los árboles de mayor edad, para las dos localidades.

Flavonoides

Las cantidades de flavonoides fueron afectadas por el tipo de material y la localidad. El aserrín presentó la mayor concentración de flavonoides (134 mg EC/g), seguido de las ramas (121,23 mg EC/g) y las hojas (60,37 mg EC/g). En general, se obtuvieron mayores cantidades de flavonoides en las hojas de la localidad de El Palmar que de Bacalar. Asimismo, los flavonoides tienden a aumentar con la edad (Tabla 3), obteniéndose las mayores cantidades a los 18 años, 81,05 mg EC/g para hojas y 178,56 mg EC/g para ramas.

Evaluación de la capacidad inhibitoria de radicales libres

El efecto de los extractos etanólicos y acuosos de hojas y madera (ramas y aserrín) de *C. odorata* sobre la inhibición del radical DPPH se presenta en la figura 2, y se compara con los estándares de referencia, el flavanol catequina y el flavanol rutina. En el Tabla 4 se muestran los rendimientos de los extractos y la capacidad inhibitoria del DPPH, expresada

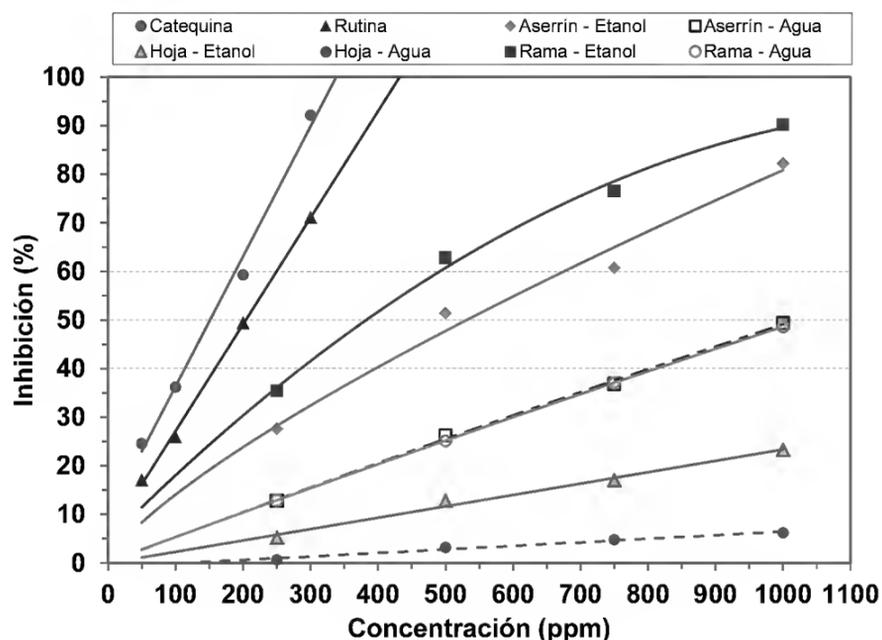


FIGURA 2. Inhibición del radical DPPH por efecto de los extractos etanólicos, acuosos y estándares de referencia.

como concentración efectiva 50 (CE_{50}), que indica la concentración del extracto para inhibir 50% del radical, y se interpreta como: a menor concentración mayor inhibición.

El rendimiento de extractos en la madera, tanto de ramas como de aserrín fueron bajos, de 3,0% y 2,0% con etanol al 70% y de 1,0% y 0,8% con agua, respectivamente. En las hojas se alcanzaron rendimientos de 14,7% y 8,3% con etanol 70% y agua. El rendimiento de extracto máximo alcanzado en la madera de *C. odorata* fue de 4,0%, que corresponde a la suma de extraíbles con etanol 70% seguido por agua.

La mayor inhibición del radical se obtuvo con los extractos etanólicos de la madera de ramas, con CE_{50} de 383,0 ppm, seguida por la de aserrín con 485,0 ppm, aunque ninguno de los dos alcanzó la inhibición de los estándares de referencia, catequina 160,0 ppm y rutina 203,0 ppm. La inhibición fue mucho menor en los extractos acuosos, con valores respectivos de 1028 ppm y 1013 ppm. Los extractos en etanol y agua de hojas también tuvieron baja inhibición, con 2233 ppm y 7366 ppm, respectivamente.

Análisis canónico discriminante

El análisis canónico discriminante mostró que tres funciones discriminantes explican 97% del total de la variación

TABLA 4. Rendimiento de extractos de etanol 70% y agua en muestras de *Cedrela odorata* e inhibición del radical DPPH en extractos y estándares de referencia.

Muestra	Rendimiento de extracto (%)	Inhibición del radical DPPH (CE_{50}) ppm
Rama etanol	3,0	383,0
Aserrín etanol	2,0	485,0
Hoja etanol	14,7	2233,0
Rama agua	1,0	1028,8
Aserrín agua	0,8	1013,0
Hoja agua	8,3	7366,0
Catequina (estándar)	--	160,0
Rutina (estándar)	--	203,0

(Tabla 5) y contribuyen significativamente a la separación entre la localidad y el tipo de material (Lambda de Wilks: $F = 25,07$, $p < 0,0001$, $n = 17$). La primera función explicó 90,4% de la variación con un autovalor de 151,85, la segunda función describió 7,3% con un autovalor de 12,31% y la tercera función expresó 1,6% de la variación con un autovalor de 2,65%. Las variables que más contribuyeron en las funciones discriminantes fueron los contenidos de α -celulosa para la primera función, de flavonoides y lignina para la segunda función y de fenoles y flavonoides para la tercera función (Tabla 6). En la figura 3 se observa que la función CAN1 permite discriminar la madera de las ramas y del aserrín en la parte positiva y las hojas en la parte negativa, mientras que la función CAN2 permite ubicar en la parte positiva la localidad de El Palmar y en la parte negativa localidad de Bacalar.

DISCUSIÓN

Composición química

Sustancias extraíbles

El estudio de extractos en el follaje de especies maderables y no maderables se ha incrementado por ser un recurso

TABLA 5. Resumen de resultados del análisis discriminante canónico de las variables químicas de las hojas, ramas y aserrín de *C. odorata*.

Función canónica	Autovalor	Varianza		Correlación canónica	Pr > F
		Proporción	Acumulada		
Can1	151,85	0,904	0,904	0,997	< 0,0001
Can2	12,31	0,073	0,977	0,962	< 0,0001
Can3	2,65	0,016	0,993	0,852	< 0,0001

TABLA 6. Coeficientes de correlación canónicos de las variables químicas de las hojas, ramas y aserrín de *C. odorata*.

Variable	Can1	Can2	Can3
Azúcares reductores (%)	0,1932	0,1299	0,1262
α -celulosa (%)	0,6759★	0,1016	-0,0102
Fenoles (%)	0,1024	0,4879	0,5575★
Flavonoides (%)	0,1804	0,7486★	0,5438★
Hemicelulosas (%)	-0,0166	-0,4258	0,2331
Holocelulosa (%)	0,4946	-0,4621	0,2876
Lignina (%)	-0,0152	0,6227★	-0,4568

★ Variables que contribuyeron a la separación de los centros de grupo.

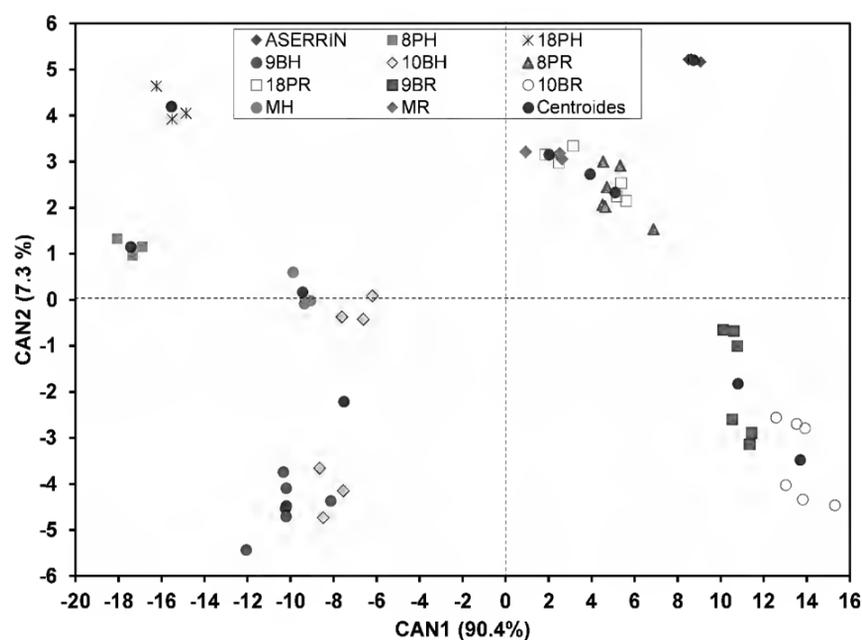


FIGURA 3. Valores canónicos individuales de las dos funciones discriminantes canónicas y posición de los centros por edad, localidad y material. P = Palmar, B = Bacalar, H = Hoja, R = Rama, M= Mezcla; Edad = 8, 9, 10 y 18 años. Ejemplo de clave: 10BR significa ramas de 10 años de Bacalar.

potencial para la obtención de compuestos químicos y forraje (Fengel, y Wegener, 2003; García, Martínez, Quert, Guyat, Acosta y Capote, 2004; Khan, Varshney y Naithani, 2014); quizá esto se deba a que el contenido de extractos es más alto en el follaje, en comparación con la corteza y la madera (Jacob, Da Silva Perez, Dupont, Commandré, Broust, Carriau y Sacco., 2013; Jacob, da Silva Perez, Dupont, Broust, Commandré y Sacco, 2014; Camarena-Tello, Rocha-Guzmán, Gallegos-Infante, González-Laredo y Pedraza-Bucio, 2015). Este comportamiento también se observó en este estudio, en donde, en promedio, el contenido de extractos fue de 4 a 6 veces mayor en las hojas que en las ramas y están dentro del intervalo de 1:1,4 a 1:11,8 publicado por Camarena-Tello *et al.* (2015), para *Psidium guajava* y de 1:2 a 1:6 para clones de *Eucalyptus gundal* (Jacob *et al.*, 2014). Los contenidos totales de extractos obtenidos en cedro rojo son menores a los encontrados en ramas (19,46%) y hojas (43,46%) de *Psidium guajava* (Camarena-Tello *et al.*, 2015), así como los obtenidos en la madera (7%) y hojas (41%) de *Eucalyptus gundal* (Jacob *et al.*, 2014).

La concentración general promedio de extraíbles en la madera *C. odorata* (5,63%) fue mucho menor a la encontrada por Rutiaga, Pedraza-Bucio y López-Albarrán, (2010) para la madera de *Dalbergia granadillo* (14,16% a 33,35%) y *Platymiscium lasiocarpum* (11,19% a 26,93%) y para la madera de *Haematoxylum brasiletto*, con rendimientos de 9,84% a 29,70% (Ávila y Rutiaga, 2014).

Los valores de holocelulosa obtenidos en este trabajo son mayores a los hallados para hojas (26,56% a 34,11%) y ramas (60,20% a 69,49%) de *P. guajava* (Camarena-



Tello *et al.*, 2015). La cantidad holocelulosa en las ramas de *C. odorata* está dentro del intervalo encontrado para la misma especie en la madera de albura (70,9%) y duramen (65,8%) (Suzuki, Matsushita, Imai, Sakurai, Henriques de Jesus, Ozaki, Finger y Fukushima, 2008), pero fue superior a lo publicado para la madera de *H. brasiletto* (51,54% a 66,20%), *D. granadillo* (49,24% - 50,66%) y *P. lasiocarpum* (53,26% - 55,26%) (Rutiaga *et al.*, 2010; Ávila y Rutiaga, 2014). Sin embargo, los valores de holocelulosa son menores a los encontrados por Honorato-Salazar, Colotl-Hernández, Apolinar-Hidalgo y Aburto. (2015), para la madera de *Ochroma pyramidale* (81,99%), *Ceiba pentandra* (79,08%) y *Hevea brasiliensis* (80,13%). McMillan (1997) indica que especies latifoliadas con contenidos de carbohidratos totales de 61,8% a 68,1% son viables para la producción de bioetanol.

En *Psidium guajava* se encontraron contenidos de α -celulosa de 4,12% a 6,21% en las hojas y de 19,78% a 24,57% en ramas, mientras que Sariyildiz y Anderson (2005) mencionan valores de α -celulosa en hojas de 25,4%-29,0% para *Fagus sylvatica*, de 16,7% a 19,3% para *Quercus robur* y de 16,9% a 19,5% para *Castanea sativa*. Con excepción *F. sylvatica*, los valores obtenidos son menores a los obtenidos en las ramas de *C. odorata*.

El contenido de α -celulosa en las ramas y el aserrín (36,93% - 43,40%) de *C. odorata*, están dentro de los valores encontrados de 33,95% a 39,85% para la madera de misma especie y para otras diez especies tropicales (34,0% - 45,7%) (Suzuki *et al.*, 2008), así como para los valores publicados por Honorato-Salazar *et al.* (2015), para *O. pyramidale* (40,30%), *C. pentandra* (41,29%) y *H. brasiliensis* (45,27%).

Las cantidades de hemicelulosas encontradas en las hojas de *C. odorata* son mayores a las obtenidas en hojas (22,4% a 27,9%), pero menores a las de las ramas (40,3% a 44,9%) de *P. guajava* (Camarena-Tello *et al.*, 2015).

En la madera, Suzuki *et al.* (2008), hallaron contenidos de hemicelulosas de 31,05% a 31,85%, para *C. odorata*, los cuales son menores a los obtenidos en las ramas, pero mayores a los de aserrín, mientras que para otras especies tropicales (27,7% a 35,2%) están dentro del

intervalo encontrado. Sin embargo, mayores cantidades de hemicelulosas, a los determinados en *C. odorata*, se han encontrado para *O. pyramidale* (41,67%) y *C. pentandra* (37,77%) (Honorato-Salazar *et al.*, 2015), pero *H. brasiliensis* (34,86%) presenta valores dentro del intervalo de los valores obtenidos.

El contenido de lignina en hojas obtenido en *C. odorata* es similar a lo encontrado por Camarena-Tello *et al.* (2015) en hojas (17,77% - 35,26%) y mayor a lo que estos autores señalan para las ramas (17,87% - 19,54%) de *P. guajava*. Menores contenidos de lignina a los obtenidos en este estudio fueron determinados por Sariyildiz y Anderson (2005) en hojas de *F. sylvatica* (17,4% - 20,6%), *Q. robur* (13,8% - 16,8%) y *C. sativa* (9,4% - 12,9%).

La cantidad de lignina determinada en la madera de ramas de *C. odorata* está dentro de los valores encontrados por Suzuki *et al.* (2008), para la madera de la misma especie (20,9% - 30,0%) y para otras especies tropicales (14,6% - 32,0%), así como dentro de los valores hallados para *H. brasiletton* (26,36%), *P. lasiocarpum* (25,24% - 25,95%), *D. granadillo* (26,24% - 27,24%), *O. pyramidale* (23,05%), *C. pentandra* (26,36%) y *H. brasiliensis* (19,81%).

Azúcares reductores

Aunque los porcentajes de azúcares reductores obtenidos en *C. odorata* son bajos, se debe considerar que se analizaron a partir de un hidrolizado con ácido sulfúrico diluido, que de acuerdo con Sun y Cheng (2002), no es el mejor proceso para hidrolizar carbohidratos a partir de materiales lignocelulósicos. Sin embargo, los porcentajes obtenidos son superiores a los publicados por Gómez, Ríos y Peña, (2013) para *Eucalyptus camaldulensis* (2,13%) y *Pinus patula* (1,9%), especies que consideran como viables para la producción de bioetanol.

Fenoles

El contenido de fenoles obtenidos en las hojas de *C. odorata* es menor a los valores encontrados por Silva, Souza, Rogez, Rees y Larondella (2007), para hojas de 11 especies tropicales (9,8 mg EAG/g a 10,2 mg EAG/g) y está den-

tro del intervalo de 54,7 mg EAG/g a 311,7 mg EAG/g encontrado por Ho, Tung, Chen, Zhao, Chung y Wu (2012), para 11 especies latifoliadas. Los valores menores obtenidos por Silva *et al.* (2007), pueden deberse a que son con base en el peso fresco de las hojas.

Para la madera de las ramas de *C. odorata*, la cantidad de fenoles es mucho mayor a lo obtenido para la madera de *Bauhinia forficata* (1,5 mg EAG/g), *Arrabidaea chica* 4,5 (mg EAG/g) *Broussonetia papyrifera* (56.94 mg EAG/g) (Silva *et al.*, 2007; Xu, Wang, Hu, Lee y Wang, 2010). La cantidad de fenoles, expresados en equivalentes de catequina (EC), es muy variable en la madera de duramen y albura del fuste de diversas especies tropicales, encontrándose valores de 71 mg EAG/g a 868 mg EC/g para especies de África (Huang, Hashida, Makino, Kawamura, Shimizu, Kondo y Ohara, 2009) y de 58 mg EAG/g a 540 mg EC/g para especies de Malasia (Kawamura, Shaharuddin, Sulaiman, Hashim y Ohara, 2010, Kawamura, Ramle, Sulaiman, Hashim y Ohara, 2011). Si bien, no son comparables los procedimientos de cuantificación de fenoles, los valores de fenoles obtenidos en este estudio se encuentran en el intervalo descrito para la madera de especies tropicales.

Flavonoides

Silva *et al.* (2007), encontraron cantidades de flavonoides de 0,06 mg EC/g a 11,71 mg EC/g para hojas para 11 especies y 0,12 mg EC/g para la madera de *Bauhinia forficata*, lo cual es mucho menor a lo obtenido en este estudio.

Capacidad inhibitoria de radicales libres

El tipo de solvente afecta el rendimiento de los extractos, obteniéndose mayores rendimientos con etanol. Se han encontrado rendimientos variables de extractos con metanol de 6,6% a 27,3% en hojas de especies arbóreas (Ho *et al.*, 2012) y de 1,56% a 21,21% en la madera de diversas especies (Suzuki *et al.*, 2008; Huang *et al.*, 2009; Kawamura *et al.*, 2010, 2011). Aun cuando los solventes son diferentes, los valores de rendimiento obtenidos en las hojas de *C. odorata* están dentro de los intervalos publicados, mientras que, en las ramas, los valores obtenidos con

etanol están en el intervalo inferior a lo encontrado en la madera con metanol.

El rendimiento obtenido en la madera de *C. odorata* es similar al mencionado por Rosales-Castro *et al.* (2012), para extractos con metanol 70% en albura (3,8%), duramen (5,0%) y corteza (6,5%) de *C. odorata*. Aunque los rendimientos en extractos de madera son bajos para la especie, se ha encontrado que extractos etanólicos de *C. odorata* reducen los niveles de hiperglicemia en ratones sin presentar toxicidad (Alana, Mamade, Donizeti, Tabajara, Olaitan, Costa, da Silva, Moleta, López, Pereira, de Franca, Balbinotti, y Honda, 2015), así como efecto hipocolesterolémico (Almonte-Flores, Paniagua-Castro, Escalona-Cardoso y Rosales-Castro, 2015), lo cual justifica su posible aplicación terapéutica.

Uno de los métodos más utilizados para determinar la actividad antioxidante es el ensayo para cuantificar la captación de radicales libres, utilizando el DPPH. Los extractos con metanol muestran una mejor inhibición del radical DPPH a CE_{50} en las hojas de especies latifoliadas (5,8 ppm -76,6 ppm) que las obtenidas en *C. odorata*, pero a su vez es mayor a 2,6 ppm del estándar (+)-catequina (Ho *et al.*, 2012). En la madera de diferentes especies, la inhibición de extractos metanólicos del radical DPPH a CE_{50} ha sido variable; por ejemplo, Suzuki *et al.* (2008), encontraron que los extractos del duramen de *Astronium lecointei* y *Hymenaea courbaril* tienen una inhibición respectiva de 50 ppm y 44 ppm, comparada con 48 ppm del estándar α -tocoferol, mientras que la albura y el duramen de otras especies presentan una inhibición de 66 ppm a más de 1000 ppm a CE_{50} . En especies tropicales de África, los extractos de la madera de *Cylicodiscus gabunensis* y *Terminalia ivorensis*, presentaron una inhibición de 1,4 ppm y 2,5 ppm, respectivamente, que es cercano al valor de 2,1 ppm del estándar (+)-catequina, las 20 especies restantes tuvieron valores de inhibición de 4,2 ppm a 72,1 ppm (Huang *et al.*, 2009). Por su parte, Kawamura *et al.* (2010), señalan que los extractos de la madera de *Myristica cinnamomea* mostraron una inhibición de 5,37 ppm y en el resto de las especies, la inhibición fue de 7,95 ppm a más de 30,0 ppm, en compa-



ración de 3,43 ppm de (+)-catequina. En otro estudio, Kawamura *et al.* (2011), indican que los extractos del duramen de *Mangifera indica* fue de 4,71 ppm, cercano a 4,0 ppm del estándar (+)-catequina, pero los extractos del duramen y de la albura de otras especies fue 6,0 ppm a más de 30,0 ppm. Lo anterior indica que los extractos obtenidos de hojas o madera de la mayoría de las especies latifoliadas no alcanzan una inhibición del radical DPPH a CE_{50} cercana a los estándares de referencia.

Análisis discriminante

Al análisis discriminante permitió distinguir que la concentración de las variables químicas es afectada por la localidad y el tipo de material, lo cual puede deberse a las condiciones de crecimiento de cada localidad. De acuerdo con Mariscal-Lucero, Rosales-Castro, Sánchez-Monsalvo y Honorato-Salazar (2015), en plantaciones experimentales de *C. odorata* de un año de edad, las concentraciones de fenoles, flavonoides y proantocianidinas son más elevadas en las hojas de individuos procedentes de Bacalar, que aquellos provenientes de Tezonapa, Veracruz. Esto puede atribuirse a que Bacalar tienen una precipitación anual de 1200 mm, suelo arcilloso, pedregoso y poco profundo, mientras que la precipitación anual en El Palmar es de 2888 mm, suelo migajón arcillo-arenoso y profundo, lo cual está relacionado con los resultados de Sariyildiz y Anderson (2005), quienes señalan que, en sitios de baja fertilidad, los contenidos de α -celulosa, lignina y azúcares en las hojas de *F. sylvatica* son mayores, pero menores en las hojas de *Q. robur* y *C. sativa*.

Asimismo, la variación de las diferentes concentraciones que se presentaron entre muestras individuales y procedencias del sitio de colecta, indican que se debe considerar la variabilidad inter e intraespecífica, por lo cual es necesario tomar muestras de varios individuos y de diferentes partes de un mismo individuo.

CONCLUSIONES

Las hojas de *C. odorata* contienen en promedio de 4 a 6 veces más concentración de extraíbles de diferente polaridad que la madera de las ramas. La edad afectó la canti-

dad de extraíbles en la madera de las ramas, la cual fue mayor con la edad para los extraíbles de etanol-tolueno y agua caliente, pero menor para los extraíbles de etanol.

Las concentraciones de polisacáridos y lignina en las hojas son menores a las de la madera, tanto de ramas como de aserrín, pero son similares a las de otras especies, por lo que podrían considerarse como lignocelulósicos viables para la producción de bioetanol, aunque los altos contenidos de extractos en las hojas podrían ser una desventaja en este uso.

Las hojas y la madera de las ramas de Bacalar presentan cantidades mayores de polisacáridos que las de El Palmar y que del aserrín; mientras que, en el contenido de lignina, el comportamiento es inverso.

La localidad tuvo un efecto significativo en la cantidad de fenoles de las hojas y de la madera de las ramas, siendo mayor en El Palmar que en Bacalar. La edad también afectó el contenido de fenoles, al haberse obtenido un mayor contenido en árboles de mayor edad, tanto en las hojas como en la madera de las ramas, para las dos localidades.

Mayores cantidades de flavonoides se determinaron en la madera de las ramas que en las hojas y a su vez, la cantidad fue más alta en la localidad de El Palmar que en la de Bacalar. El contenido de flavonoides también presentó una tendencia de aumentar con la edad, obteniéndose las mayores cantidades en árboles de mayor edad.

La inhibición del radical DPPH fue mayor en los extractos de etanol de la madera de ramas y de aserrín, pero no alcanzaron una inhibición cercana a los estándares de referencia (catequina y rutina). En los extractos de etanol y agua de las hojas, así como en los extractos acuosos de la madera de las ramas y del aserrín, la inhibición del radical DPPH fue mucho más baja.

Las concentraciones altas de fenoles y flavonoides y la capacidad inhibitoria de radicales libres de los extractos etanólicos de las ramas, indican que puede ser posible su aplicación biomédica.

RECONOCIMIENTOS

Ariana Berenice Santos-García agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) y al Instituto

Politécnico Nacional (IPN) por el apoyo para realizar estudios de Maestría en Ciencias en Gestión Ambiental, en CIIDIR-IPN Durango. Agradecemos al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INI-FAP) por las facilidades prestadas para la realización de este trabajo, derivado del proyecto 2010-C01-134514, del Fondo Sectorial Conacyt-Conafor.

REFERENCIAS

- Alana, M. G., Mamade, T. C., Donizeti, S., Tabajara, D., Olaitan, S., Costa, I. G., da Silva, L., Moleta, A. E., López, R., Pereira, D. L., de Franca, S.A., Balbinotti, C.M. y Honda, N. (2015). Hydroethanolic extract of the inner stem bark of *Cedrela odorata* has low toxicity and reduces hyperglycemia induced by an overload of sucrose and glucose. *Journal of Ethnopharmacology*, 162, 352-361.
- Almonte-Flores D.C., Paniagua-Castro, N., Escalona-Cardoso, G. y Rosales-Castro, M. (2015). Pharmacological and genotoxic properties of polyphenolic extracts of *Cedrela odorata* L. and *Juglans regia* L. barks in rodents. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2015, 8 pp. doi:10.1155/2015/187346.
- Arguelles, S. L. A. y C. Palafox B. (2008). Ordenamiento ecológico territorial del Sitio Experimental San Felipe Bacalar Othón P. Blanco Quintana Roo. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. 36 p.
- Arung, E. T., Wicaksono, B. D., Handoko, Y. A., Kusuma, I. W., Yulia, D. y Sandra, F. (2009). Anti-cancer properties of diethylether extract of wood from sukun (*Artocarpus altilis*) in human breast cancer (T47D) Cells. *Tropical Journal of Pharmaceutical Research*, 8 (4), 317-324.
- American Society for Testing and Materials. (1977). Method of Test for Alpha-Cellulose in Wood ASTM D1103 – 60. En *Annual book of ASTM standards. Part 22: Wood; Adhesives* (pp 346-348). Easton, Md., EUA: Autor, .
- American Society for Testing and Materials. (2010). Standard test methods for preparation of extractive-free wood. ASTM D 1105. En *Annual Book of ASTM standards. Volume 4.10 Wood* (pp176-177). West Conshohocken, PA., EUA: Autor.
- Ávila-Calderón, L. E. A. y Rutiaga-Quiñones, J. G. (2014). Componentes químicos de la madera y la corteza de *Haematoxylum brasiletto* Karsten (Leguminosae). *Madera y Bosques*, 20 (2), 153-158.
- Camarena-Tello, J. C., Rocha-Guzmán, N. E., Gallegos-Infante, J. A., González-Laredo, R. F. y Pedraza-Bucio, F. E. (2015). Chemical composition of biomass generated in the guava tree pruning. *EXCLI Journal*, 14, 204-212.
- Chaplin, M. F. y Kennedy, J. F. (1994). *Carbohydrate analysis: A practical approach*. Nueva York, EUA: IRL Press.
- Comisión Nacional Forestal. (2015). *Principales especies maderables establecidas en PFC por Entidad Federativa en 2000–2014*. Recuperado de <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/ver.aspx?grupo=43&articulo=6019>.
- Díaz, A. S., Alessandrini D., M. y Herrera G., A. (2007). Comportamiento del follaje de *Pinus caribaea* var. *Caribaea* y *Pinus tropicalis* en el desarrollo de una metodología para la obtención de cera conífera, pasta clorofila-caroteno y residuo forrajero a escala de banco. *Revista Cubana de Química*, 19 (1), 81-83.
- Effland, M. J. (1977). Modified procedure to determine acid-insoluble lignin in wood and pulp. *Tappi Journal*, 60 (10), 143-144.
- Fengel, D. y Wegener, G. (2003). *Wood: chemistry, ultrastructure, reactions*. Remagen, Alemania: Verlag Kessel.
- García, C. H., Martínez V., N., Quert Á., R., Guyat D., M. A., Acosta M., I. y Capote P., V. (2004). Caracterización de los extractos obtenidos a partir del follaje de *Pinus caribaea* Morelet var. *Caribaea* Barret y Golfari, y *Pinus tropicalis* Morelet. *Revista Forestal Baracoa*, 23 (2), 83-91.
- Gómez, E. A., Ríos, L. A. y Peña, J. D. (2013). Efecto del pretratamiento de biomasa maderera en el rendimiento a etanol. *Información tecnológica*, 24 (5), 113-122.
- Hnawia, E., Menut, C., Agrebi, A. y Cabalion, P. (2009). Wood essential oils of two endemic trees from New Caledonia: *Callitris sulcata* (Parl.) Schltr. and *Callitris neocaledonica* Dummer. *Biochemical Systematics and Ecology*, 36, 859–866.
- Ho, S., Tung, Y., Chen, Y., Zhao, Y., Chung, M. y Wu., J. (2012). Antioxidant activities and phytochemical study of



- leaf extracts from 18 indigenous tree species in Taiwan. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2012, 8 pp. doi:10.1155/2012/215959.
- Honorato-Salazar, J. A., Colotl-Hernández, G., Apolinar-Hidalgo, F. y Aburto, J. (2015). Principales componentes químicos de la madera de *Ceiba pentandra*, *Hevea brasiliensis* y *Ochroma pyramidale*. *Madera y Bosques*, 21K (2), 131-146.
- Huang, Z., Hashida, K., Makino, R., Kawamura, F., Shimizu, K., Kondo, R. y Ohara, S. (2009). Evaluation of biological activities of extracts from 22 African tropical wood species. *Journal of Wood Science*, 55, 225–229.
- Jacob, S., da Silva Perez, D., Dupont, C., Broust, F., Commandré, J.-M. y Sacco, D. (2014). Suitability of short rotation eucalyptus for thermochemical conversion. En *Proceedings of the 5th international conference on engineering for waste and biomass valorisation*, CD-ROM, paper 230. Rio de Janeiro (Brazil) 25–28 August 2014.
- Jacob, S., Da Silva Perez, D., Dupont, C., Commandré, J.-M., Broust, F., Carriau, A. y Sacco, D. (2013). Short rotation forestry feedstock: Influence of particle size segregation on biomass properties. *Fuel*, 111, 820–828.
- Kawamura, F., Ramle, S. F. M., Sulaiman, O., Hashim, R. y Ohara, S. (2011). Antioxidant and antifungal activities of extracts from 15 selected hardwood species of Malaysian timber. *European Journal of Wood and Wood Products*, 69 (2), 207-212.
- Kawamura, F., Shaharuddin, N. A., Sulaiman, O., Hashim, R. y Ohara, S. (2010). Evaluation on antioxidant activity, antifungal activity and total phenols of 11 selected commercial Malaysian timber species. *Japan Agricultural Research Quarterly*, 44 (3), 319–324.
- Khan, L. H., Varshney, V. K. y Naithani, S. (2014). Utilization of biomass residue (leaves) generated from *Populus deltoides* plantations for development of protein concentrate. *Waste and Biomass Valorization*, 5 (6), 995-1004.
- Lattanzio V., Kroon, P. A., Quideau, S. y Treutter, D. (2008). Plant phenolics-secondary metabolites with diverse functions. En F. Daayf y V. Lattanzio (Eds.), *Recent Advances in Polyphenol Research* (pp.1-35), Vol. 1. Blackwell Publishing Ltd.
- Mariscal-Lucero, S. R., Rosales-Castro, M., Sánchez-Monsalvo, V. y Honorato-Salazar, J. A. (2015). Evaluación de fenoles y limonoides en hojas de *Cedrela odorata* (Meliaceae) de una plantación experimental establecida en Tezonapa Veracruz, México. *Revista de Biología Tropical*, 63 (2), 545-558.
- Martínez-Vento, N., Estrada-Ortiz, J., Góngora-Rojas, F., López-Castilla, R., Martínez-González, L. y Curbelo-Gómez, S. (2010). Bioplaguicida de *Azadirachta indica* A. Juss (Nim) y la poda, una alternativa para el control de *Hypsipyla grandella* Zeller en plantaciones de *Cedrela odorata* L. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, 16 (1), 61-68.
- McMillan, J. (1997). Bioethanol production: status and prospects. *Renewable Energy*, 10 (2,3), 295-302.
- Montgomery D. C. y Runger, G. C. (2014). *Applied statistics and probability for engineers* (6a ed). Nueva York, EUA: John Wiley & Sons, Inc. 832 p.
- Philippov, S. V. y Bogorodov, I. M. (2013). Method of using wood extracts in cosmetic and hygiene products. U.S., 20,130,295,036, A1. (Cl.424/74; 424/770), 07 Nov 2013. Appl. US 13/464,983, 05 May 2012. 10 p.
- Rencher, A. C. (2002). *Methods of multivariate analysis* (2a ed). Nueva York, EUA: John Wiley & Sons, Inc.
- Rodríguez, M. R., Suárez V., B., Diñeiro G., Y., del Valle A., P. y Picinelli L., A. (2010). Alternative woods for aging distillates-an insight into their phenolic profiles and antioxidant activities. *Food Science and Biotechnology*, 19 (4), 1129-1134.
- Rosales-Castro, M., Pérez-López, M. E. y Ponce-Rodríguez, M.C. (2006). Propiedades antirradicales libres y antibacterianas de extractos de corteza de pino. *Madera y Bosques*, 12 (1), 37-49.
- Rosales-Castro, M., González-Laredo, R. F., Rocha-Guzmán, N. E., Gallegos-Infante, J. A., Peralta-Cruz, J. y Karchesy, J. J. (2009). Evaluación química y capacidad antioxidante de extractos polifenólicos de cortezas de *Pinus cooperi*, *P. engelmannii*, *P. leiophylla* y *P. teocote*. *Madera y Bosques*, 15 (3), 87-105.
- Rosales-Castro, M., Honorato-Salazar, J. A. y Sánchez-Monsalvo, V. (2012). Concentración de polifenoles en albura,

- duramen y corteza de *Cedrela odorata* (cedro rojo). Memorias del VII International Congress of Biochemical Engineering. Colegio Mexicano de Ingenieros Bioquímicos, Ixtapa Zihuatanejo, Guerrero.
- Rowell, R. M., Pettersen, R., Han, J. S., Rowell, J. S. y Tshabalala, M. A. (2005). Cell Wall Chemistry. En R. M. Rowell (Ed.), *Handbook of wood chemistry and wood composites* (pp. 35-74). Boca Raton, Florida, EUA: CRC Press.
- Rutiaga Q., J. G., Pedraza-Bucio, F. E. y López-Albarrán, P. (2010). Componentes químicos principales de la madera de *Dalbergia granadillo* Pittier y de *Platymiscium lasiocarpum* Sandw. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 16 (2), 179-186.
- Sánchez, M. V., Salazar, J. G., Hernández, V. J., López, J. y Jasso, M. J. (2003). Parámetros genéticos y respuesta a la selección en características del crecimiento de *Cedrela odorata*. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 26 (1), 19-27.
- Sariyildiz, T. y Anderson, J. M. (2005). Variation in the chemical composition of green leaves and leaf litters from three deciduous tree species growing on different soil types. *Forest Ecology and Management*, 210, 303-319.
- SAS Institute Inc. (SAS). 2000. SAS for windows (Version 9.2 para Windows). Cary, NC. EUA.
- Silva, E. M., Souza, J. N. S., Rogez, H., Rees, J. F. y Larondella, Y. (2006). Antioxidant activities and polyphenolic contents of fifteen selected plant species from the Amazonian region. *Food Chemistry*, 101 (3), 1012-1018.
- Stewart, D. (2008). Lignin as a base material for materials applications: Chemistry, application and economics. *Industrial Crops and Products*, 27, 202-207.
- Sun Y. y Cheng, J. (2002). Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review *Bioresource Technology*, 83, 1-11.
- Suzuki, R., Matsushita, Y., Imai, T., Sakurai, M., Henriques de Jesus, J. M., Ozaki, S. K., Finger, Z. y Fukushima, K. (2008). Characterization and antioxidant activity of Amazonian woods. *Journal of Wood Science*, 54, 174-178.
- Taiz, L. y Zeiger, E. (2006). *Fisiología vegetal. Volumen 1*. Castellón de la Plana: Universitat Jaume.
- Tascioglu, C., Yalcin, M., de Troya, T. y Sivrikaya, H. (2012). Termicidal properties of some wood and bark extracts used as wood preservatives. *BioResources*, 7 (3), 2960-2969.
- Wetzel, S., Duchesne, L. C. y Laporte, M. F. (2006). *Bioproducts from Canada's forests. New Partnerships in the Bioeconomy*. Dordrecht, Países Bajos: Springer. 257 p.
- Xu, M., Wang, L., Hu, J., Lee S. y Wang, M. (2010). Antioxidant activities and related polyphenolic constituents of the methanol extract fractions from *Broussonetia papyrifera* stem bark and wood. *Food Science and Biotechnology*, 19 (3), 677-682.

Manuscrito recibido el 22 de julio de 2015.

Aceptado el 12 de mayo de 2016.

Este documento se debe citar como:

Rosales-Castro, M., Honorato-Salazar, A., Santos-García, A. B., Pérez-López, M. E., Colotl-Hernández, G. y Sánchez-Monsalvo, V. (2016). Composición química de las hojas y ramas de *Cedrela odorata* L. de dos plantaciones forestales como fuente de materia prima lignocelulósica. *Madera y Bosques*, 22 (2), 131-146.



Fe de erratas *Madera y Bosques* 22(1), Primavera 2016

En: Falfán, I. y MacGregor-Fors, I. (2016). Woody neotropical streetscapes: a case study of tree and shrub species richness and composition in Xalapa. *Madera y Bosques*, 22 (1), 95-110.

La página 102 debe ser sustituida por la página 148 del presente número.

TABLE 1. List of recorded tree and shrub species in the streetscape of Xalapa, Veracruz, ordered alphabetically by family. (Continued...)

Family	Species	Origin ¹	Frequency ²
Lauraceae	<i>Persea americana</i> Mill. ^{a, b, c, d, e, g}	Native	6
Lythraceae	<i>Lagerstroemia indica</i> L. ^{b, d}	Exotic	3
	<i>Punica granatum</i> L. ^{c, d}	Exotic	2
Magnoliaceae	<i>Magnolia grandiflora</i> L. ^{a, b, d, e}	Native	3
	<i>Magnolia schiedeana</i> Schlttdl. ^d	Native	1
	<i>Magnolia soulangeana</i> Soul.-Bod. ^{b, d}	Exotic	1
Malvaceae	<i>Ceiba aesculifolia</i> (Kunth) Britten & Baker f. ^d	Native	1
	<i>Ceiba</i> sp.	-	1
	<i>Heliocarpus americanus</i> L. ^g	Native	3
	<i>Heliocarpus mexicanus</i> (Turcz.) Sprague*	Native	1
	<i>Hibiscus radiatus</i> Cav.*	Exotic	1
	<i>Hibiscus rosa-sinensis</i> L. ^{b, c, d, g}	Exotic	20
	<i>Hibiscus syriacus</i> L. ^b	Exotic	1
	<i>Malvaviscus arboreus</i> Cav. ^{b, c, d, f, g}	Native	2
Melastomataceae	<i>Tibouchina urvilleana</i> (DC.) Cogn. ^{b, d}	Exotic	1
Meliaceae	<i>Melia azedarach</i> L. ^{a, b, d, e}	Exotic	3
	<i>Trichilia havanensis</i> Jacq. ^{a, b, c, d, e, g}	Native	5
Moraceae	<i>Ficus benjamina</i> L. ^{b, c, d, e, f}	Exotic	34
	<i>Ficus carica</i> L. ^{c, d, e}	Exotic	1
	<i>Ficus elastica</i> Roxb. ex Hornem. ^{a, b, d, e}	Exotic	1
	<i>Ficus microcarpa</i> L. f. ^{a, b, d, e}	Exotic	6
Myrtaceae	<i>Callistemon citrinus</i> (Curtis) Skeels ^{a, b, c, d, e, f}	Exotic	4
	<i>Eucalyptus camaldulensis</i> Dehnh.*	Exotic	2
	<i>Eugenia uniflora</i> L.*	Exotic	1
	<i>Pimenta dioica</i> (L.) Merr. ^{a, b, c, d, e}	Native	2
	<i>Psidium cattleyanum</i> Sabine*	Exotic	1
	<i>Psidium guajava</i> L. ^{a, b, c, d, e, g}	Native	13
	<i>Syzygium samarangense</i> (Blume) Merr. & L.M. Perry ^{b, d, e}	Exotic	10
Nyctaginaceae	<i>Bougainvillea buttiana</i> Holttum & Standl. ^c	Exotic	5
	<i>Bougainvillea glabra</i> Choisy ^{b, c}	Exotic	16
Oleaceae	<i>Fraxinus uhdei</i> (Wenz.) Lingelsh. ^{a, b, c, d, e}	Native	8
	<i>Jasminum mesnyi</i> Hance ^{b, c}	Exotic	1
	<i>Ligustrum japonicum</i> Thunb. ^{b, d}	Exotic	1
	<i>Ligustrum lucidum</i> W.T. Aiton ^{a, b, c, d, e}	Exotic	11
	<i>Ligustrum ovalifolium</i> Hassk. ^{c, d}	Exotic	2
	<i>Ligustrum sinense</i> Lour.*	Exotic	1
	<i>Ligustrum vulgare</i> L. ^d	Exotic	2
Papaveraceae	<i>Bocconia frutescens</i> L. ^{c, d, g}	Native	3

Guía de autores

ESTRUCTURA DE LOS TRABAJOS

Los manuscritos que se sometan, deben presentarse en archivo digital en la página electrónica de la revista (<http://myb.ojs.inacol.mx/index.php/myb/about/submissions#onlineSubmissions>) en tamaño carta (216 mm x 269 mm), con un tamaño de letra Times New Roman de 12 pt, con interlineado doble, con 30 mm de margen izquierdo y 25 mm en el resto. Se numerarán en la parte superior derecha. Los artículos deben tener una extensión máxima de 30 páginas, incluyendo tablas y figuras. Las notas no deben exceder 15 páginas incluyendo tablas y figuras.

El manuscrito debe omitir los nombres y adscripciones de los autores, así como los reconocimientos, para mantener el anonimato de la autoría hacia los árbitros. En archivo separado, preparar la página titular del manuscrito y enviar como archivo complementario. La página titular debe contener: título en español y en inglés, nombres de los autores y su lugar de adscripción. El título del manuscrito debe ser claro y conciso, no debe exceder 90 caracteres.

Los artículos científicos y las notas científicas deben contener, y en este orden: Título en español, Título en inglés, Resumen, Palabras clave, «*Abstract*», «*Keywords*», Introducción, Objetivos, Materiales y métodos, Resultados, Discusión, Conclusiones, Reconocimientos (optativo) y Referencias.

- a) El título del manuscrito se escribe en mayúsculas y minúsculas, en español y en inglés
- b) El **resumen** (250 palabras) debe ser estructurado incluyendo los siguientes componentes:
 - Propósito del estudio (por qué se realizó, cuáles son las preguntas principales relacionadas con el tema).
 - Métodos
 - Resultados más importantes
 - Conclusiones (qué debe tomar el lector de este artículo)El resumen debe ser escrito de tal forma que capture el interés del lector y debe evitar la inclusión de citas. La versión en inglés se denominará «abstract». Después de cada resumen y «*abstract*» deben incluirse hasta seis palabras clave o «*keywords*» relacionadas con el método o resultados del estudio, pero que no estén contenidas en el título. Solamente los nombres propios deben ponerse en mayúsculas, las palabras clave deben colocarse en orden alfabético, separadas por punto y coma. Seleccione palabras que los lectores pudieran estar buscando y palabras mencionadas frecuentemente en el texto. También puede incluir el nombre de las especies o géneros de las plantas bajo estudio.
- c) En la **introducción** se describe el estado actual del conocimiento sobre el tema, con el debido respaldo de la bibliografía revisada y se discute la importancia que tiene lograr y divulgar avances al respecto. En este punto no se incluyen tablas ni ilustraciones.
- d) En **objetivos** se presentan de manera concisa y clara los propósitos del estudio.
- e) En **materiales y métodos** se explica cuidadosamente cómo se desarrolló el trabajo. En forma precisa y completa se da una visión clara de los métodos aplicados y los materiales empleados. Cuando el método no sea original, se deben citar con claridad las fuentes de información. Se pueden incluir tablas e ilustraciones, que de ninguna manera se repitan en otra parte del texto.
- f) La sección de **resultados** está reservada para todas las informaciones técnicas obtenidas, estadísticamente respaldadas. Los comentarios que se incluyan en este punto son sólo los indispensables para la fácil comprensión de la información presentada.
- g) En **discusión** se analizan los resultados obtenidos, sus limitaciones y su trascendencia, se relacionan con la información bibliográfica previamente reunida y se pueden plantear necesidades de trabajos futuros que aumenten el conocimiento sobre el tema.

- h) Las **conclusiones** rescatan lo más valioso o consistente de los resultados y aquellos aspectos más débiles que requieran de mayor trabajo o investigación.
- i) **Reconocimientos** es un punto optativo, destinado a los créditos a instituciones colaboradoras, fuentes de financiamiento, etc. Si se va a incluir este apartado, en la versión original para revisión debe colocarse el título del mismo, pero no los reconocimientos como tal. Estos sólo se deben incluir en la versión final para publicación.
- j) En las **referencias** solamente se incluyen aquellas citadas en el documento. Deben listarse alfabéticamente por autor y con una línea en blanco entre cada referencia. Se debe utilizar el sistema de referencias APA; en los siguientes enlaces puede encontrar información sobre este sistema de referencias:
 - <http://www.udc.edu.mx/i2012/investigacion/investigacion.html>
 - <http://normasapa.net/normas-apa-2016>
 - <http://www.apastyle.org/learn/tutorials/basics-tutorial.aspx>
- k) Las **tablas** deben utilizarse para presentar resultados. El título se coloca en la parte superior, con mayúsculas y minúsculas. En la versión original, para revisión, se incluyen en el cuerpo del texto. Para la versión corregida, posterior a las evaluaciones, se deben enviar en archivo de Word, separadas del archivo del cuerpo del manuscrito.
- l) Las **ilustraciones** (diagramas, gráficas, mapas, etc.) deben utilizarse cuando contribuyen a presentar la información de manera más clara; pueden ser realizadas en color negro o escala de grises (la revista cuenta con un presupuesto limitado para impresión de figuras en color. Si ese presupuesto fuera rebasado, los costos adicionales por impresión en color serían cubiertos por el autor). En la versión para revisión, las ilustraciones se deben incluir en el archivo de texto. Para la versión corregida, revise las indicaciones más adelante en esta guía en «Presentación final». Los pies de figura se escriben en la parte inferior y con minúsculas; en el texto se citan como «figura X» o bien entre paréntesis como (Fig. X).
- m) Se utilizan las **unidades** de medida del SI. Para mayores detalles, se sugiere consultar el documento «CENAM-MMM-PT-003», que puede obtenerse en la página electrónica del Centro Nacional de Metrología (CENAM)
 - <http://www.cenam.mx/publicaciones/gratuitas/descarga/default.aspx?arch=/CENAM-MMM-PT-003.pdf>
- n) **Notaciones.** La nomenclatura de las ecuaciones se escribe debajo de cada una de ellas. De igual manera, las abreviaturas que se utilicen en las tablas se deben definir al pie de la tabla.

Los manuscritos que no cumplan con el formato no serán enviados a los evaluadores y serán regresados a los autores para que los pongan en el formato. Asimismo, los autores deben firmar el formato de confirmación de originalidad.

PRESENTACION FINAL

La revista requiere que los manuscritos aceptados sean entregados en formato electrónico por medio del sistema OJS, conservando el formato original de los manuscritos revisados: tamaño de papel, de letra, numeración etc. Sin embargo, en esta versión corregida, sí se deben incluir los nombres de los autores y sus adscripciones, además de que los **gráficos** y las **tablas no deben estar integrados al texto**. Todas las figuras deben enviarse en archivos por separado (no archivos de Word), en formato tiff, jpg, etc., con al menos 300 ppp de resolución (considerando el tamaño en que serán impresos; es decir, si la figura será impresa a lo ancho de una columna, se requieren al menos 1050 puntos de ancho; si la figura será impresa a lo ancho de la caja de texto, se requieren al menos 2200 puntos de ancho), o en formato pdf o eps si las imágenes son vectoriales. Las tablas deben enviarse todas juntas en un archivo de Word, adicional al archivo con el cuerpo del manuscrito. No se requieren manuscritos impresos.

A Author's guide

STRUCTURE OF THE MANUSCRIPTS

The manuscripts submitted must be presented in digital form on the electronic page of the journal (<http://myb.ojs.inacol.mx/index.php/myb/about/submissions#onlineSubmissions>) in letter-size paper (216 mm x 269 mm: 8-1/2" x 11"), doubly spaced, with Times New Roman font size of 12 pt., with a left margin of 30 mm and the rest of 25 mm, numbered at the upper right corner. The **maximum extension** of the papers will be 30 pages written on a single side for the full-length papers (including tables and figures) and 15 pages (including tables and figures) for scientific notes.

The manuscript for evaluation must omit names and affiliations of the authors as well as acknowledgements, in order to keep double-blind evaluation. The Title page must be presented in a separate file and should be sent as complementary file. The Title page must contain: Title, names and affiliations of authors, including e-mail addresses.

Scientific papers and notes must contain the following sections in this order: Title, Abstract, Keywords, Introduction, Materials and methods, Results, Discussion, Conclusions, Acknowledgements (optional) and References. The title of the papers should not exceed of 90 characters.

- a) The first page must include the title of the article in upper and lower case characters.
- b) The **abstract** (250 words **maximum**) must be structured as follows:
Purpose of the study (why the work was done, what major questions of research in this field are addressed).
Methods
Key results
Conclusions (what major points should the reader take from this article)
The abstract should be written to capture the interest of the reader. Avoid citation to references.
Provide a list of 5–6 Keywords. Capitalize proper nouns, place in alphabetical order, and separated by semicolons. Choose words that readers might be searching for, and words frequently included in the text. You may also include the name of the plant species or gender under study.
- c) In the **introduction** a brief description of the state of knowledge of the subject matter of the paper must be given, with the appropriate review of literature; the importance of the study reported must be highlighted. In this item, no tables or figures are to be included.
- d) In **objectives**, the purposes of the study will be clearly and concisely stated.
- e) In **materials and methods**, it will be carefully explained how the work was carried out. In a precise and complete form, a clear vision of the methods applied and the materials used shall be given. When the methodology is not original, the sources of information shall be clearly stated. Tables and illustrations can be given that are not repeated in any other part of the text.
- f) The section of **results** will be reserved for all the technical information obtained, statistically supported. Comments included here will be only those necessary to clarify the information presented.
- g) In **discussion**, the results obtained will be analyzed, as well as their limitations and relevance; they will be related with the bibliographic information previously gathered and the eventual necessity of further work which could augment the state of knowledge on the subject could be disclosed.
- h) The **conclusions** will highlight the most valuable or consistent aspects of the work reported along with those aspects deemed the weakest which require further work or investigations.
- i) The **Acknowledgements** section is an optional point, reserved for credits to collaborating institutions, financial sources, etc.
- j) In the **references**, only those quoted in the paper will be included. They must be listed alphabetically by author's last names, separated

by a blank line. The APA citation system should be utilized; in the following links you could find information about this citation system: <http://www.apastyle.org/learn/tutorials/basics-tutorial.aspx>

- k) The **tables** must be utilized to present results. The heading will come on top with upper and lower case letters. In the original version for review, they must be included in the body of the text. For the corrected version after evaluation, they should be sent in a Word file, separate from the body of the manuscript file.
- l) The **illustrations** (pictures, diagrams, graphs, etc.) must be utilized when they contribute to present the information in the clearest way. Figures in black and white or color, when necessary, with excellent resolution and contrast may be accepted. The figures captions shall be written on the bottom and with lower case letters; in the text they will be mentioned as "figure X" or in parenthesis as (Fig. X). In the original version for reviewing, figures must be included in the manuscript. For the corrected version after evaluation, they should be sent in separate files, see details in «Final presentation» bellow.
- m) **Units**. SI system will be used.
- n) **Notations**. The nomenclature of the equations must be listed under each one. Similarly, the abbreviations used in the tables must be defined at the foot of the table.

The manuscripts that do not conform to the format will not be sent to the reviewers. Also, the authors must sign the format of "Confirmation of unpublished manuscript" which must be uploaded into the system as an additional file.

FINAL PRESENTATION

accepted manuscripts must be delivered through OJS, keeping the original format (paper size, font size, page numbering, etc.). However, illustrations and tables must not be included in the text file. They must be uploaded in image format (JPG, TIFF, etc. no Word files); if they are vectorial images, they may be pdf or eps files. Tiff and jpg files must be produced in 300 dpi at least (considering the final size of the figure, i.e. if they are going to be printed in a column width, they must be 1050 dots at least; if they are going to be printed full text box width, they must be 2200 dots at least. Tables must be sent in a separate Word file (not in the main text file). **Hard copies of the documents are not required.**

Madera y Bosques

vol. 22 Núm. 2 Verano 2016

Se terminó de imprimir en el mes de agosto de 2016
En los talleres de Fís. Arturo Sánchez y Gándara
Cuapinol 52, Colonia Pedregal de Santo Domingo,
Delegación Coyoacán, C.P. 04369, México, D.F.

La edición consta de 100 ejemplares
más sobrantes para reposición.

C Contenido

05

Editorial

artículos científicos

Condición de copa, indicador de salud en árboles urbanos del Bosque San Juan de Aragón, Ciudad de México
Luz de Lourdes Saavedra-Romero, Dionicio Alvarado-Rosales, Patricia Hernández-de la Rosa, Tomás Martínez-Trinidad, Gustavo Mora-Aguilera y Jaime Villa-Castillo

15

Comparación de la diversidad estructural de una selva alta perennifolia y una mediana subperennifolia en Tabasco, México
José Luis Martínez-Sánchez

29

Áreas prioritarias para restauración ecológica y sitios de referencia en la región Chignahuapan-Zacatlán
María Luisa González Ovando, F. Ofelia Plascencia Escalante y Tomás Martínez-Trinidad

41

Efecto geográfico de la cubierta del suelo y el mes calendario, en la meteorología superficial e insolación de bosques de coníferas en México
Víctor M. Rodríguez-Moreno, J. Ariel Ruíz-Corral, Gabriela Ramírez-Ojeda y Ramiro Pérez-Miranda

53

Tamaño, color de nuez y sombra afectan la germinación de *Quercus deserticola*
Dante Arturo Rodríguez-Trejo y Marín Pompa-García

67

Germination and seedling emergence of four endangered oak species
Yureli García-De La Cruz, Fabiola López-Barrera y José María Ramos-Prado

77

Caracterización del crecimiento de plantaciones jóvenes de teca (*Tectona grandis* Linn f.) y estimación de curvas de índice de sitio en el área septentrional de la República de Guatemala
Manuel Sabino Mollinedo García, Miguel Ángel Herrera Machuca y Fernando Muñoz Sáez

89

Vulnerabilidad climática y situación socioambiental: percepciones en una región semiárida del noreste de México
Thanía Gabriela López-García y Mario G. Manzano

105

Étude des altérations de la couleur du bois de Chêne lors du séchage sous vide discontinu
Sadoth Sandoval-Torres, Wahbi Jomaa, Françoise Marc y Jean-Rodolphe Puiggali

119

Composición química de las hojas y ramas de *Cedrela odorata* L. de dos plantaciones forestales como fuente de materia prima lignocelósica
Martha Rosales-Castro, J. Amador Honorato-Salazar, Ariana Berenice Santos-García, Ma. Elena Pérez-López, Gertrudis Colotl-Hernández y Vicente Sánchez-Monsalvo

131

147

Fe de erratas