

Revista Mexicana de Ciencias Forestales



inifap

Instituto Nacional de Investigaciones
Forestales, Agrícolas y Pecuarias

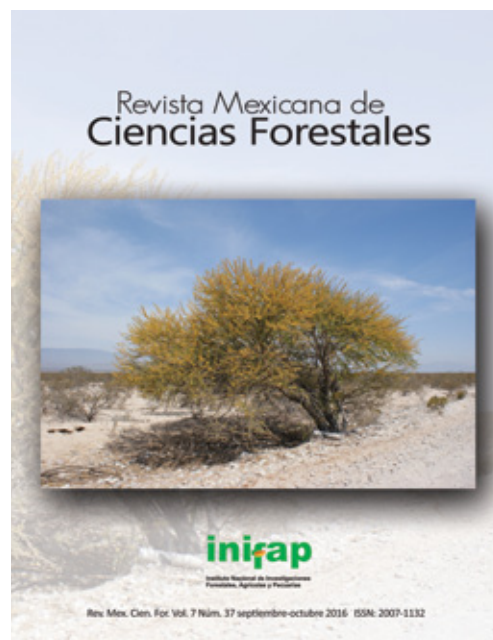
REVISTA MEXICANA DE CIENCIAS FORESTALES

www.cienciasforestales.inifap.gob.mx
ISSN: 2007-1132

La *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* (antes *Ciencia Forestal en México*) es una publicación científica del sector forestal del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Centro Público de Investigación y Organismo Público Descentralizado de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (Sagarpa). Tiene como objetivo difundir los resultados de la investigación que realiza el propio Instituto, así como la comunidad científica nacional e internacional en el ámbito de los recursos forestales. El contenido de las contribuciones que conforman cada número es responsabilidad de los autores y su aceptación quedará a criterio del Comité Editorial, con base en los arbitrajes técnicos y de acuerdo a las normas editoriales. Se autoriza la reproducción de los trabajos si se otorga el debido crédito tanto a los autores como a la revista. Los nombres comerciales citados en las contribuciones, no implican patrocinio o recomendación a las empresas referidas, ni crítica a otros productos, herramientas o instrumentos similares.

Revista Mexicana de Ciencias Forestales está inscrita en el Índice de Revistas Mexicanas de Investigación Científica y Tecnológica, del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt). Es referida en el servicio de CABI Publishing (Forestry Abstracts y Forest Products Abstracts) de CAB International, así como en el Catálogo de Revistas del Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América y El Caribe, España y Portugal (LATINDEX); en el Índice de Revistas Latinoamericanas en Ciencias (PERIÓDICA); en el Catálogo Hemerográfico de Revistas Latinoamericanas, Sección de Ciencias Exactas y Naturales (HELA), Sistema de Información Científica Redalyc y en la Scientific Electronic Library Online (SciELO-México).

La *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* Volumen 7, Número 37, septiembre-octubre 2016, es una publicación bimestral editada por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Av. Progreso No. 5, Barrio de Santa Catarina, delegación Coyoacán, C. P. 04010, Ciudad de México. www.inifap.gob.mx, cienciasforestales@inifap.gob.mx. Distribuida por el Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Conservación y Mejoramiento de Ecosistemas Forestales (Cenid Comef). Editor Responsable: Marisela C. Zamora Martínez. Reservas de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2010-012512434400-102 ISSN: 2007-1132, otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor (Indautor). Certificado de Licitud de Título y Licitud de Contenido: en trámite por la Comisión Calificadora de Publicaciones y Revistas Ilustradas de la Secretaría de Gobernación. El presente archivo digital PDF correspondiente al Volumen 7, Número 37 de la *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, es una versión íntegra y fiel de la impresa en septiembre de 2016 por: Graphx, S.A. de C.V. Tauba 40 - 205 Col. Centro, C.P. 06010, deleg. Cuauhtémoc, Ciudad de México.



Portada: *Acacia farnesiana*. Martín Enrique Romero Sánchez.

COMITÉ EDITORIAL

M.C. Marisela C. Zamora Martínez
EDITORA EN JEFE

Dra. Adriana Rosalía Gijón Hernández
EDITORA ADJUNTA

Dra. Cecilia Nieto de Pascual Pola
COORDINADORA EDITORIAL

CONSEJO CONSULTIVO INTERNACIONAL

Dr. Celedonio Aguirre Bravo
Forest Service, United States Department of Agriculture. Estados Unidos de América

Dra. Amelia Capote Rodríguez
Instituto de Investigaciones Fundamentales en Agricultura Tropical. La Habana, Cuba

Dr. Carlos Rodríguez Franco
Forest Service United States Research and Development. Estados Unidos de América

Ing. Martín Sánchez Acosta
Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Argentina

Dra. Laura K. Snook
International Plant Genetic Resources Institute. Roma, Italia

Dr. Santiago Vignote Peña
E.T.S.I. de Montes, Universidad Politécnica de Madrid. España

CONSEJO CONSULTIVO NACIONAL

Dr. Miguel Caballero Deloya
Fundador de la Revista Ciencia Forestal en México

Dr. Oscar Alberto Aguirre Calderón
Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León

Dr. Francisco Becerra Luna
Centro de Investigación Regional - Centro, INIFAP

Dra. Patricia Koleff Osorio
Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad

Ing. Francisco Javier Musálem López
Academia Nacional de Ciencias Forestales

M.C. Carlos Mallén Rivera
Ex-Editor en Jefe de la Revista Mexicana de Ciencias Forestales

Dra. María Valdés Ramírez
Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, Instituto Politécnico Nacional

Dr. Alejandro Velázquez Martínez
Especialidad Forestal, Colegio de Postgraduados

Dr. Hugo Ramírez Maldonado
División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Chapingo

Dr. Jorge Méndez González
Departamento Forestal, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro

Dr. Carlos Galindo Leal
Dirección de Comunicación Científica, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad

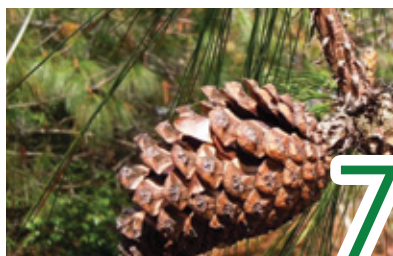
CONTENIDO



EDITORIAL

Escenarios de Cambio Climático en el sector forestal

Martín Enrique Romero Sánchez



ARTÍCULOS

Modelo de crecimiento en altura dominante para *Pinus pseudostrobus* Lindl. en el estado de Guerrero

Dominant height growth model for *Pinus pseudostrobus* Lindl. in Guerrero state

Miguel González Méndez , Francisco Cruz Cobos, Gerónimo Quiñonez Barraza, Benedicto Vargas Larreta y Juan Abel Nájera Luna



Aprovechamiento de productos forestales no maderables en los bosques de montaña alta, centro de México

Utilization of non-timber forest products in the high mountain forests of central Mexico

Nancy Diana Anastacio-Martínez , Sergio Franco-Maass, Esteban Valtierra-Pacheco y Gabino Nava-Bernal



Cambio climático y predicción de incendios al 2050 en el Bosque La Primavera, Jalisco

Climate change and prediction of fires for the year 2050 at the *La Primavera* Forest, Jalisco

José Luis Ibarra Montoya y Francisco Martín Huerta Martínez



Selección de árboles sobresalientes de caoba (*Swietenia macrophylla* King.) en un rodal natural mediante métodos multivariados

Selection of outstanding mahogany (*Swietenia macrophylla* King.) trees in a natural stand based on multivariate methods

Benito N. Gutiérrez Vázquez, Eladio H. Cornejo Oviedo, Bartolo Rodríguez Santiago, Javier López Upton, Mario H. Gutiérrez Vázquez, Martín Gómez Cárdenas y Amelia Flores Montaña



Intercepción de lluvia en bosques de montaña en la cuenca del río Texcoco, México

Rainfall interception in mountain forests in the Texcoco river basin, Mexico

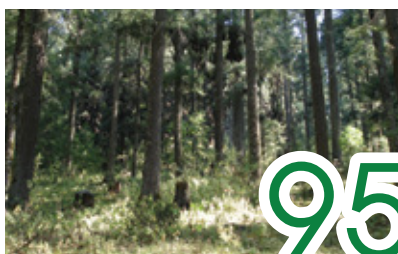
Eulogio Flores Ayala, Vidal Guerra De la Cruz, Gerardo H. Terrazas González, Fernando Carrillo Anzures, Fabián Islas Gutiérrez, Miguel Acosta Mireles, Enrique Buendía Rodríguez



Estimación de biomasa y carbono almacenado en bosques comunitarios de la región Frailesca de Chiapas, México

Estimation of the biomass and stored carbon in community forest of La Frailesca region of Chiapas, Mexico

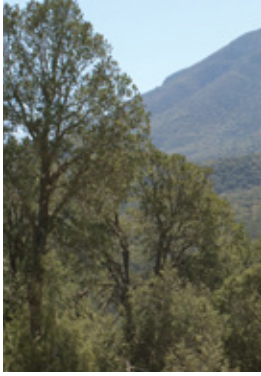
Luis Alfredo Rodríguez-Larramendi, Francisco Guevara-Hernández, Luis Reyes-Muro, Jesús Ovando-Cruz, José Nahed-Toral, Miguel Prado-López, Rady Alejandra Campos Saldaña



Ecuaciones para predecir el diámetro normal en función del diámetro del tocón para *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham.

Equations to predict the normal diameter based on the stump diameter of *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham.

Xavier García-Cuevas, Victorino Herrera-Ávila, Jonathan Hernández-Ramos, José de Jesús García-Magaña y Adrián Hernández Ramos



Editorial

Escenarios de Cambio Climático en el sector forestal.

Hoy día, uno de los temas de mayor interés para la comunidad internacional es el cambio climático, resultado de la actividad humana, específicamente por la intensidad con la que se utilizan combustibles fósiles, así como por la destrucción de grandes áreas de selvas y bosques.

El CO₂ es el principal responsable del aumento del efecto invernadero, ya que provoca incremento en la temperatura; de tal manera que en los últimos 150 años su concentración se ha elevado más de 30 %, mientras que la temperatura global anual registra un aumento de 0,74 °C en 100 años, el cual ha sido constante en aproximadamente 0,13 °C por década desde 1956, de acuerdo a estimaciones del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés). Por lo tanto, se prevé que este aumento en la temperatura induzca alteraciones a nivel global que se traduzcan en cambios, positivos o negativos, en el funcionamiento de los ecosistemas terrestres en el mediano y largo plazo.

No hay certeza de la magnitud, frecuencia e interacciones que el cambio climático ocasionará en el futuro, por lo que el uso de escenarios climáticos es la forma más cercana para estimar los efectos del calentamiento global en ecosistemas terrestres.

Los modelos climáticos simulan las complejas interacciones entre los componentes de un ecosistema global y su interacción con los procesos físicos, biológicos y químicos que suceden a su interior. De esta modelación se desprenden varios escenarios que pudiesen representar lo que sucedería si ciertas condiciones y tendencias se mantienen o son modificadas, debido a cambios en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), ya sea por causas naturales o por influencia antrópica.

La modelación climática a través de escenarios ha permitido determinar los efectos que el cambio climático tendrá en diferentes regiones del planeta y los consecuentes efectos en las poblaciones naturales. Como resultado de diversos esfuerzos sobre modelación climática y generación de escenarios futuros, las investigaciones recientes se han enfocado a determinar qué ecosistemas son los más vulnerables, cuáles serían los que se adaptarían a las nuevas condiciones ambientales y cuáles son las acciones a seguir bajo distintos supuestos.

En el marco de la quinta fase del Proyecto de Comparación de Modelos Acoplados (CMIP5), se han desarrollado un conjunto de escenarios de simulaciones recientes de modelos climáticos, conocidos como Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés), que complementan a los actuales modelos generales de circulación atmosférica. Estos modelos climáticos incluyen el efecto de la radiación global, debido al aumento de gases de efecto invernadero y su influencia en los balances finales de energía. Dichos escenarios climáticos reafirman lo que algunos autores ya han señalado con anterioridad: los efectos del cambio climático están a la vuelta de la esquina. En este sentido, existe una particular preocupación sobre los impactos que el cambio climático tendrá en la distribución, dinámica, productividad y salud de los ecosistemas forestales.

Los ecosistemas forestales proporcionan bienes y servicios de valor inestimable para la sobrevivencia y desarrollo de la población; proveen, entre otros, materias primas, alimentos, medicinas; mejoran la infiltración del agua de lluvia, que soporta ríos, lagos y humedales; producen y mantienen suelos fértiles, conforman el hábitat de múltiples especies animales y capturan el dióxido de carbono de la atmósfera, y con ello, atenúan el potencial de calentamiento del planeta.

La vegetación actúa como sumidero de CO₂, al extraerlo de la atmósfera mediante la fotosíntesis que, a su vez, está regulada por la disponibilidad de agua y nutrientes; además de, acumula en sus tejidos el carbono fijado, lo que conlleva a la creación de biomasa en raíces, ramas, hojas y troncos. La entrada neta de carbono en los ecosistemas está determinada por la productividad primaria bruta (PPB) y los procesos de respiración y descomposición; así, cerca de 50 % del carbono que ingresa por la productividad primaria es empleado por las plantas para la respiración. Por otra parte, las plantas aportan materia orgánica al transferir carbono al suelo por varias vías, las más importantes son la hojarasca, los exudados y la transferencia de carbono a los organismos que están asociados simbióticamente con las raíces, de ahí la importancia de modelar el comportamiento de las emisiones de GEI y las posibles afectaciones a estos procesos naturales.

De los ecosistemas terrestres, los bosques representan importantes reservorios de carbono, ya que les corresponde 80 % del total contenido en los ecosistemas terrestres; dentro de ellos se identifica a la vegetación y a los suelos como los depósitos más significativos de dicho elemento químico. A partir del buen uso de los bosques se pueden obtener capturas constantes de carbono en la biomasa a lo largo del tiempo, y con la aplicación de una serie de prácticas de gestión de bosques, es posible no sólo evitar la pérdida de carbono orgánico del suelo, que frecuentemente tiene lugar en plantaciones forestales, sino que incluso se favorece e incrementa la acumulación de los stocks de carbono orgánico en los suelos.

El potencial de los ecosistemas en el secuestro de carbono se define por el tipo y la condición del hábitat; es decir, por la composición de especies, la edad, los procesos de producción primaria bruta, producción primaria neta, las características geográficas del sitio y por el grado de fragmentación.

Los estudios de modelación de cambio climático utilizados en el sector forestal, descritos en la literatura, abordan principalmente modelos determinísticos de regresión y de migración estocástica, cuya finalidad es examinar la distribución potencial de especies forestales; la realización de investigaciones referentes a la distribución potencial de especies bajo diferentes escenarios de cambio climático, al efecto de los escenarios en la productividad de los bosques, sobre algoritmos para determinación de distribución de nicho ecológico, entre muchos otros.

Respecto a los efectos que el cambio climático tendrá sobre los ecosistemas forestales y de los cuales ya existen registros, destacan: estrés hídrico, mayor incidencia de plagas y enfermedades, disminución en la polinización, baja productividad. Además, de acuerdo a diferentes modelos utilizados en trabajos recientes, se vislumbra que el cambio climático propiciará desplazamientos de especies forestales hacia nuevas zonas de distribución; por lo que será necesario implementar estrategias de reordenación forestal que compensen los desfases de adaptación de las poblaciones, para mantener la productividad y la salud de los bosques.

La investigación sobre la aplicación de escenarios climáticos dirigidos al sector forestal ha evidenciado los efectos del calentamiento global, en algunos casos negativos y en otros positivos. El sector forestal tiene un enorme potencial para funcionar como "palanca" para detener o, al menos, aminorar los efectos del cambio climático; sin embargo, paradójicamente, el sector forestal es uno de los más afectados, de acuerdo a modelaciones y escenarios futuros.

No debemos perder de vista que la modelación climática es un área relativamente nueva y que el empleo de modelos

específicos dependerá de las características particulares del sitio, especies o condición y enfoque por investigar. Es un hecho que en la planeación e implementación de estrategias y políticas para la adaptación o mitigación del cambio climático deberán estar basadas en evidencias científicas, por lo que se requiere que la modelación sea precisa y que provea un mínimo de incertidumbre. Estas características serán fundamentales para la incorporación de los procesos de modelado espacial y temporal como herramientas de gestión en la toma de decisiones en el sector forestal.

Martín Enrique Romero Sánchez

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). 2013. Bases físicas. Resumen técnico. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wgl/WGIAR5_SummaryVolume_FINAL_SPANISH.pdf (20 de marzo de 2016)

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). 2014. Cambio Climático 2014. Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Suiza, 32 p. https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/ar5_wgl_spm_es.pdf. (3 de marzo de 2016).





Artículo / Article

Modelo de crecimiento en altura dominante para *Pinus pseudostrobus* Lindl. en el estado de Guerrero

Dominant height growth model for *Pinus pseudostrobus* Lindl. in Guerrero state

Miguel González Méndez¹, Francisco Cruz Cobos¹, Gerónimo Quiñonez Barraza²,
Benedicto Vargas Larreta¹ y Juan Abel Nájera Luna¹

Resumen

La productividad forestal puede expresarse matemáticamente por medio de modelos que describen los patrones de desarrollo de acuerdo a los diferentes factores involucrados en el desarrollo de cada especie. El objetivo del presente estudio fue evaluar el ajuste de tres ecuaciones dinámicas de crecimiento en altura dominante en diferencia algebraica generalizada (GADA), con el fin de construir una familia de curvas de índice de sitio con una edad de referencia de 15 años. Se utilizaron los análisis troncales de 55 ejemplares de *Pinus pseudostrobus*, que fueron analizados de manera longitudinal, con el propósito de calcular la altura verdadera del anillo central que rodea a la médula del árbol. Los ajustes se realizaron mediante el método iterativo anidado, que es invariante con respecto a la edad base; además, se simuló la estructura del error con un modelo autorregresivo de segundo orden para corregir la dependencia de errores longitudinales inherentes a los datos procedentes del fuste. Las fórmulas tipo GADA definieron una familia de curvas polimórficas con asíntotas variables, lo que implica que en cada lugar existen tasas de crecimiento diferentes. Se seleccionó una expresión dinámica basada en el modelo de Chapman-Richards porque mostró la mejor calidad de ajuste; el coeficiente de determinación (R^2) fue de 0.9931 y la raíz del error medio cuadrático (RMSE) 0.5879 m. La familia de curvas que resultó de esta ecuación modela con precisión la trayectoria de los datos observados para la predicción de la altura dominante e índice de sitio.

Palabras clave: Altura dominante, curvas de crecimiento, GADA, índice de sitio, *Pinus pseudostrobus* Lindl., polimorfismo complejo.

Abstract

Forest productivity can be expressed mathematically through equations describing growth patterns according to the different factors involved in the development of each species. The aim of the present study was to evaluate the fit of three dynamic growth equations in dominant height in generalized algebraic difference (GADA), in order to construct a family of site index curves with a reference age of 15 years. The trunk analyzes of 55 *Pinus pseudostrobus* trees were used, which were analyzed longitudinally, in order to obtain the true height of the central ring that surrounds the core of the tree. The adjustments were made using the nested iterative method, which is invariant with respect to the base age; in addition, the structure of the error was simulated with a second order autoregressive model to correct the dependence of longitudinal errors inherent to the data obtained in the stems of the trees. The equations in GADA form allowed the definition of a family of polymorphic curves with variable asymptotes, which implies that each site has different growth rates. A dynamic equation based on the Chapman-Richards model was selected because it showed the best fit quality; the coefficient of determination (R^2) was 0.9931 and the root mean square error (RMSE) was 0.5879 m. The family of curves obtained with this equation accurately models the trajectory of the observed data for the prediction of the dominant height and site index.

Key words: Dominant height, growth curves, GADA, site index, *Pinus pseudostrobus* Lindl., complex polymorphism.

Fecha de recepción/Reception date: 8 de agosto de 2016; Fecha de aceptación/Acceptance date: 30 de septiembre de 2016.

¹ Instituto Tecnológico de El Salto, Pueblo Nuevo, Dgo. México. Correo-e: cobos_cruz@yahoo.com.mx

² C.E. Valle del Guadiana, CIR Norte-Centro. Inifap. México.

Introducción

La calidad de sitio es la base para desarrollar sistemas de clasificación de terrenos forestales de acuerdo a su capacidad productiva (Mora y Meza, 2003). Se define como el potencial de producción maderable de un lugar, rodal o bosque, para una especie en particular, en la que a mejor calidad, la acumulación de volumen es mayor, razón por la que el potencial de una asociación está estrechamente relacionado con el volumen maderable medido en la cosecha final (Clutter *et al.*, 1983). Para cuantificarlo existen métodos directos e indirectos en los que el de índice de sitio se clasifica como un método indirecto que utiliza un patrón de crecimiento de altura dominante a una edad de referencia o edad base predefinida (Vanclay, 1994; Martín *et al.*, 2008; Quiñonez *et al.*, 2015).

En la modelación y biometría forestal se han propuesto diversas opciones para la construcción de funciones de altura dominante e índice de sitio, entre las que destacan la curva guía, la diferencia algebraica (ADA, *Algebraic Difference Approach*) y la diferencia algebraica generalizada (GADA, *Generalized Algebraic Difference Approach*) (Rodríguez *et al.*, 2015). En la primera se utilizan la expresión y estructura matemática original de los modelos base para obtener el valor de los parámetros que se usan para construir las familias de curvas de crecimiento por regresión, las cuales pueden ser polimórficas o anamórficas; en ADA o GADA los modelos base son manipulados algebraicamente y quedan calibrados en función de si uno o más parámetros se hacen dependientes de la calidad de estación (Clutter *et al.*, 1983; Cieszewski, 2002). Así, resultan ecuaciones dinámicas que se ajustan a bases de datos de intervalo o longitudinales (análisis troncales).

Con ADA se obtienen familias de curvas de crecimiento anamórficas o polimórficas, mientras que GADA combina las dos propiedades y da lugar al polimorfismo asintótico. Los parámetros que se derivan de los métodos para diseñar familias de curvas de crecimiento en altura dominante pueden ser globales, es decir, comunes a todos los rodales, o locales, específicos para cada uno (García, 2006). Las ecuaciones son herramientas efectivas para calcular la productividad e implementación de prácticas efectivas de manejo forestal. Por lo tanto, la predicción correcta de la altura dominante e índice de sitio con ecuaciones dinámicas es esencial para modelar el crecimiento y la producción de rodales con fines maderables (Vargas *et al.*, 2013).

GADA considera que una ecuación de crecimiento puede ser expandida para hacer posible que más de un parámetro esté en función de la calidad de estación; se le asume como dependiente de una variable artificial que representa los factores que determinan la calidad de estación y las familias de curvas son más flexibles y aplicables en el manejo de grupos de árboles coetáneos o incoetáneos (Cieszewski y Bailey, 2000);

Introduction

Site quality is the basis for developing forest land classification systems according to their productive capacity (Mora and Meza, 2003). It is defined as the timber production potential of a site, stand or forest, for a given species, in which a better quality, volume production is greater, reason why the productive capacity of a stand is closely related to the timber volume measured in the final harvest (Clutter *et al.*, 1983). To quantify this productive potential there are direct and indirect methods in which the site index is classified as an indirect method using a dominant height growth pattern at a predefined reference age or base age (Vanclay, 1994; Martín *et al.*, 2008; Quiñonez *et al.*, 2015).

Several methods have been developed for modeling and forest biometrics for the construction of functions of dominant height and site index. The most used are the guiding curve method, the Algebraic Difference Approach (ADA) and the Generalized Algebraic Difference Approach (GADA) method (Rodríguez *et al.*, 2015). In the first one, the original mathematical expression and structure of the base models are used to obtain the value of the parameters that are used to construct the families of growth curves by regression, which can be polymorphic or anamorphic; in the ADA or GADA method, the base models are precisely manipulated algebraically and are fitted according to whether one or more parameters are made dependent on the station quality (Clutter *et al.*, 1983; Cieszewski, 2002). The expressions thus obtained are dynamic equations that fit into interval or longitudinal databases (trunk analyses).

With the ADA methodology families of anamorphic or polymorphic growth curves are obtained, while the GADA methodology combines the two properties and gives rise to the asymptotic polymorphism. The parameters that result from the methods for designing families of growth curves at dominant height can be global, that is, common to all stands, or local, specific to each stand (García, 2006). Equations are effective tools for estimating stand productivity, and allow the implementation of appropriate forest management practices. Therefore, correct prediction of dominant height and site index with dynamic equations is essential for modeling growth and timber production (Vargas *et al.*, 2013).

The equation method in GADA considers that a growth equation can be expanded to allow more than one parameter to depend on the station quality; it is assumed to depend on an artificial variable that represents the factors that determine the station quality and the families of curves obtained are more flexible and applicable in the management of contemporary or incoetaneous stands (Cieszewski and Bailey, 2000; Cieszewski, 2001). With the GADA methodology families of curves with complex polymorphism can be generated, that

Cieszewski, 2001). Con esta metodología se pueden generar familias de curvas con polimorfismo complejo, es decir, que tienen tasas de crecimiento variables y asíntotas múltiples (Cieszewski, 2002), lo que es ideal en el manejo forestal.

Las ecuaciones con polimorfismo complejo describen mejor los patrones de crecimiento en altura que los modelos anamórficos o polimórficos simples (Cieszewski, 2003). Establecen como supuesto la suma de factores como regímenes de manejo, condiciones de suelo y elementos ecológicos y climáticos definidos por una variable artificial denotada por X (variable no observable e independiente) (Cieszewski, 2002); además, preservan las propiedades lógicas de invariancia de la edad de referencia y de ruta o de camino de simulación (Cieszewski, 2003), en las que las proyecciones de la altura dominante pueden ser hacia el futuro o el pasado, sin afectar la capacidad predictiva de la ecuación.

Para el ajuste de las ecuaciones dinámicas de altura dominante en ADA o GADA se requieren pares de observaciones de alturas y edades tomadas en intervalos de tiempo o de manera longitudinal, es decir, medidos en condiciones de tiempo diferente o de manera repetida, como en parcelas permanentes o análisis trocales (Diéguez *et al.*, 2006).

Pinus pseudostrobus Lindl. se distribuye, principalmente, en los bosques de pino y pino-encino de México; crece en suelos volcánicos y en climas templados y templado-cálidos, con precipitación anual entre 800 mm y 1 500 mm y registra cifras que sugieren buena productividad (López, 2002). Desde una perspectiva comercial proporciona madera de calidad procedente de ejemplares con dimensiones de 25 a 40 m de altura y de 40 a 80 cm de diámetro normal a edades adultas. Es por ello que representa una alternativa interesante de producción de planta y reforestación de áreas degradadas en el estado de Guerrero, así como de recuperación de terrenos forestales mediante un manejo eficiente y sustentado en estudios que describan su comportamiento.

Así, el objetivo del presente trabajo fue generar ecuaciones dinámicas de crecimiento en altura dominante e índice de sitio para construir una familia de curvas con polimorfismo complejo, a partir de datos de análisis troncales longitudinales de árboles de *Pinus pseudostrobus* en el ejido El Balcón del estado de Guerrero, México.

Materiales y Métodos

El área de estudio

El área de estudio se ubica en el ejido El Balcón, que pertenece al municipio Ajuchitlán del Progreso, en el centro de la Sierra Madre del Sur del estado de Guerrero, entre las coordenadas geográficas 17°34'00" a 17°51'00" norte y 100°27' 30" a

is, that they have variable growth rates and multiple asymptotes (Cieszewski, 2002), which is ideal in forest management, since the stands have these characteristics.

Complex polymorphism equations better describe height growth patterns than anamorphic or simple polymorphic models (Cieszewski, 2003). These equations consider the sum of factors such as management regimes, soil conditions and ecological and climatic elements defined by an artificial variable denoted by " X " (unobservable and independent variable) (Cieszewski, 2002); also, they preserve the logical properties of invariance of the reference age and the route of way of simulation (Cieszewski, 2003), in which the projections of the dominant height can be towards the future or the past, without affecting the predictive capacity of the equation.

For the fit of the dynamic equations of dominant height in ADA or GADA, pairs of observations of heights and ages taken at intervals of time or in a longitudinal way, that is, measured at different time or in a repeated way, as in permanent plots or trolcal analyzes (Diéguez *et al.*, 2006).

Pinus pseudostrobus Lindl. is found mainly in the pine and pine-oak forests of Mexico; it grows in volcanic soils and in temperate and warm-temperate climates, with annual precipitation between 800 mm and 1 500 mm (López, 2002). It is commercially important due to its high growth rates in sites with good productivity, it provides high quality timber with dimensions at adult ages between 25 and 40 m in height and 40 to 80 cm in normal diameter. This is why it is a good alternative for the current policies of plant production and reforestation of degraded areas of Guerrero state, as well as to raise the production and productivity of forest lands through an efficient management and that is based on studies that describe the dynamics of its growth.

Thus, the aim of the present work was to generate dynamic growth equations in dominant height and site index to construct a family of site index curves with complex polymorphism, based on longitudinal truncal analysis data of *Pinus pseudostrobus* trees in ejido El Balcón at the state of Guerrero, Mexico.

Materials and Methods

Study area

The study area is located in the *El Balcón ejido*, which belongs to the municipality *Ajuchitlán del Progreso*, in the center of the *Sierra Madre del Sur* of the state of Guerrero, between the geographical coordinates 17°3'00" to 17°51'00" North and 100°27'30" to 100°36'45" West. The *ejido* has an area of 25 565 ha, of which 10 000 ha are covered by coniferous forest as well as by tropical and subtropical associations. The predominant ecosystem is pine and pine-oak forest with some

100°36'45" oeste. El ejido tiene una superficie de 25 565 ha, de las cuales 10 000 ha están cubiertas por bosque de coníferas así como por asociaciones tropicales y subtropicales. El ecosistema que predomina es el bosque de pino y pino-encino con algunos manchones dispersos de bosque mesófilo de montaña y bosque de *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham. en las partes más altas. El intervalo altitudinal es de los 1 050 m hasta los 2 960 m, con un promedio de 2 213 m. El clima del lugar A(C)w₂(w), corresponde al templado subhúmedo con lluvias en verano, con una precipitación media anual de 1 400 mm.

Base de datos

La base de datos que se utilizó para el ajuste de las ecuaciones en GADA proviene de árboles individuales en rodales jóvenes, con edad promedio de 19 años. Se seleccionaron 55 ejemplares dominantes libres de daños, que se derribaron y seccionaron. La muestra se distribuyó en diferentes altitudes y exposiciones, y se cubrieron todas las calidades de estación presentes en el área de estudio. Se aplicó un corte longitudinal a lo largo del fuste de cada uno de los individuos, con el fin de medir el crecimiento verdadero por cada etapa de la vida del árbol, esto es, la altura a la que termina el anillo de crecimiento anual. El número de anillos se contabilizó en el tocón, en la sección en la que se toma el diámetro normal y a intervalos de 2 m hasta alcanzar la punta del árbol. Las estadísticas descriptivas de las variables consideradas se reúnen en el Cuadro 1.

scattered patches mountain cloud forest and forest of *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham. in the higher parts. The altitudinal range is from 1 050 m to 2 960 m, with an average of 2 213 m. The climate of the place is temperate sub-humid with rains in summer, with an average annual precipitation of 1 400 mm.

Data base

The database that was used to fit the equations in GADA comes from individual trees in young stands, with an average age of 19 years. 55 dominant specimens free of damage were selected, which were felled and sectioned. The sample was distributed at different altitudes and exposures, and all station qualities present in the study area were covered. A longitudinal cut was made along the stem of each individual, in order to measure true growth for each stage of the tree's life, that is, the height at which the annual growth ring ends. The number of rings was counted in the stump, in the section where the normal diameter is taken and at intervals of 2 m until reaching the tip of the tree. The descriptive statistics of the considered variables are gathered in Table 1.



Cuadro 1. Estadísticas descriptivas de las variables analizadas en el ajuste de las ecuaciones dinámicas.

Especie	Variable	Mínimo	Máximo	Media	DS
<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl.	H	13.6	25.5	21.05	2.59
	DN	15.5	35	24.94	3.85
	t	13	25	18.29	2.66

DS = Desviación estándar; H = Altura (m); DN = Diámetro normal (cm); t = Edad (años).

Table 1. Descriptive statistics of the analyzed variables in the fit of the dynamic equations.

Species	Variable	Minimum	Maximum	Mean	DS
<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl.	H	13.6	25.5	21.05	2.59
	DN	15.5	35	24.94	3.85
	t	13	25	18.29	2.66

DS = Standard deviation; H = Height (m); DN = Normal diameter (cm); t = Age (years).

Para modelar el crecimiento en altura dominante e índice de sitio en función de la edad, se seleccionaron tres ecuaciones cuya estructura matemática en GADA se deriva de los modelos base de Chapman-Richards (Richards, 1959), de Korf (Lundqvist, 1957) y de Hossfeld (Hossfeld, 1922) (Cuadro 2).

For modeling dominant height growth and site index related to age, three equations were chosen whose mathematical structure in GADA comes from the basic model of Chapman-Richards (Richards, 1959), Korf (Lundqvist, 1957) and Hossfeld (Hossfeld, 1922) (Table 2).

Cuadro 2. Modelos base y ecuaciones dinámicas en GADA evaluadas para modelar la altura dominante e índice de sitio en *Pinus pseudostrobus* Lindl.

Ecuación base	Parámetro del sitio	Solución para X_0	Ecuación dinámica	Ecuación
$H = \alpha_1(1 - \exp^{-\alpha_2 t})^{\alpha_3}$	$\alpha_1 \cdot \exp^{kt}$ $\alpha_2 \cdot \beta_1$ $\alpha_2 \cdot \beta_2 + \beta_3/x$	$x_0 = 0.5[\ln H_0 - \beta_2 F_0 + (\ln H_0 - \beta_2 F_0)^2 - 4\beta_2 F_0]^{0.5}$ $F_0 = \ln(1 - \exp^{-\beta_1 t_0})$	$H_t = H_0 \left(\frac{1 - \exp^{-\beta_1 t_1}}{1 - \exp^{-\beta_1 t_0}} \right)^{\beta_2 + \beta_3/t_1}$	(1)
$H = \alpha_1 \exp^{-\alpha_2 t^{\alpha_3}}$	$\alpha_1 \cdot \exp^{kt}$ $\alpha_2 \cdot \beta_1 + \beta_2/x$ $\alpha_2 \cdot \beta_2$	$x_0 = 0.5 \cdot \beta_2 \left[\left((\beta_1 t_0^{-\beta_2} \ln(H_0)) + 4\beta_2 t_0^{-\beta_2} \ln(H_0) \right)^2 \right]^{0.5}$	$H_t = \exp^{(k_0)} \left(\exp^{(\beta_1 \cdot \beta_2 / t_0)} t_1^{\beta_2} \right)$	(2)
$H = \frac{\alpha_1}{1 + \alpha_2 t^{-\alpha_3}}$	$\alpha_1 \cdot \beta_1 + x$ $\alpha_2 \cdot \beta_2/x$ $\alpha_2 \cdot \beta_2$	$x_0 = 0.5[H_0 - \beta_1 + ((H_0 - \beta_1)^2 + 4\beta_2 H_0 t_0^{-\beta_2})^{0.5}]$	$H_t = \frac{\beta_1 \cdot x_0}{1 + (\beta_2/x)t_1^{-\beta_2}}$	(3)

H = Altura dominante (m); t = Edad (años); α_1, α_2 y α_3 = Parámetros del modelo base; β_1, β_2 y β_3 = Parámetros globales de la ecuación dinámica; X_0 = Variable independiente no observable que describe la productividad de un sitio como una suma de regímenes de manejo, condiciones del suelo y factores ecológicos y climáticos; H_0 = Altura dominante en el tiempo inicial t_0 ; H_t = Altura dominante en el tiempo inicial t_1 ; \exp = Función exponencial.

Table 2. Assessed basic models and dynamic equations in GADA to model dominant height and site index in *Pinus pseudostrobus* Lindl.

Basic equation	Site parameter	Solution for X_0	Dynamic equation	Equation
$H = \alpha_1(1 - \exp^{-\alpha_2 t})^{\alpha_3}$	$\alpha_1 \cdot \exp^{kt}$ $\alpha_2 \cdot \beta_1$ $\alpha_2 \cdot \beta_2 + \beta_3/x$	$x_0 = 0.5[\ln H_0 - \beta_2 F_0 + (\ln H_0 - \beta_2 F_0)^2 - 4\beta_2 F_0]^{0.5}$ $F_0 = \ln(1 - \exp^{-\beta_1 t_0})$	$H_t = H_0 \left(\frac{1 - \exp^{-\beta_1 t_1}}{1 - \exp^{-\beta_1 t_0}} \right)^{\beta_2 + \beta_3/t_1}$	(1)
$H = \alpha_1 \exp^{-\alpha_2 t^{\alpha_3}}$	$\alpha_1 \cdot \exp^{kt}$ $\alpha_2 \cdot \beta_1 + \beta_2/x$ $\alpha_2 \cdot \beta_2$	$x_0 = 0.5 \cdot \beta_2 \left[\left((\beta_1 t_0^{-\beta_2} \ln(H_0)) + 4\beta_2 t_0^{-\beta_2} \ln(H_0) \right)^2 \right]^{0.5}$	$H_t = \exp^{(k_0)} \left(\exp^{(\beta_1 \cdot \beta_2 / t_0)} t_1^{\beta_2} \right)$	(2)
$H = \frac{\alpha_1}{1 + \alpha_2 t^{-\alpha_3}}$	$\alpha_1 \cdot \beta_1 + x$ $\alpha_2 \cdot \beta_2/x$ $\alpha_2 \cdot \beta_2$	$x_0 = 0.5[H_0 - \beta_1 + ((H_0 - \beta_1)^2 + 4\beta_2 H_0 t_0^{-\beta_2})^{0.5}]$	$H_t = \frac{\beta_1 \cdot x_0}{1 + (\beta_2/x)t_1^{-\beta_2}}$	(3)

H = Dominant height (m); t = Age (years); α_1, α_2 and α_3 = Parameters of the basic model; β_1, β_2 y β_3 = Global parameters of the dynamic equation; X_0 = Independent non perceptible variable that describes the productivity of a site as a sum of management regimes, soil conditions and ecological and climatic factors; H_0 = Dominant height in the initial time t_0 ; H_t = Dominant height in the initial time t_1 ; \exp = Exponential function.

Ajuste de las ecuaciones dinámicas por regresión estadística

La calidad de ajuste de las ecuaciones dinámicas se evaluó a través del análisis numérico comparativo del coeficiente de determinación ajustado (R_a^2) y la raíz del cuadrado medio del error (RMSE). Además, se analizaron gráficamente las predicciones de las ecuaciones para verificar que tuvieran un comportamiento y tendencia biológicamente realista con respecto a las tendencias observadas (Goelz y Burk, 1992; Sharma *et al.*, 2011) en el ajuste de la altura dominante

Dynamic equations fit by statistical regression

The quality of fit of the dynamic equations was assessed through a comparative numerical analysis of the fitted determination coefficient (R_a^2) and the root of the square mean error (RMSE). Also, there was a graphic analysis of the predictions of the equations to check if they had a biologically realistic behavior and tendency in regard to the observed tendencies (Goelz and Burk, 1992; Sharma *et al.*, 2011) in the dominant height fit in terms of age. The mathematical form that the statistics of the goodness of fit showed was as follows:

en función de la edad. La forma matemática que presentan los estadísticos de bondad de ajuste es la siguiente:

$$RMSE_1 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n - p} \right)^{0.5} \quad (4)$$

$$R_o^2 = 1 - \left[\frac{n - 1 \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n - p \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \right] \quad (5)$$

Donde:

Y_i, \hat{Y}_i y \bar{Y} = Valores observado, medio y predicho de la variable dependiente
 n = Número de observaciones
 p = Número de parámetros del modelo

La estimación de los parámetros para las ecuaciones dinámicas de altura dominante e índice de sitio implica diferentes consideraciones estadísticas: estructuras e independencia de errores, homogeneidad de varianzas y balance en los datos utilizados (Diéguez *et al.*, 2006), por lo que debe confirmarse que se cumplan estos supuestos de la teoría de la regresión y, en su caso, corregirse en el mismo proceso de ajuste.

Los modelos fueron ajustados al considerar invariante la edad base, y de forma simultánea, los parámetros globales y específicos por árbol, para lo cual se usó el procedimiento iterativo (*nested iterative procedure*) (Tait *et al.*, 1988), que genera buenos resultados con bases de datos mayores a 800 pares de altura y edad (Cieszewski, 2003; Krumland y Eng, 2005; Diéguez *et al.*, 2006).

El ajuste de las ecuaciones se realizó por medio del MODEL del paquete estadístico SAS/ETS® (SAS, 2004), que permite la actualización dinámica de los residuos. El proceso iterativo consiste en los siguientes pasos: i) se ajustan los parámetros globales y se considera constante el parámetro local (H_o) que varía para cada árbol y al que en principio se le asigna la altura media observada a la edad de 15 años; ii) los valores de los parámetros globales se consideran como constantes y el parámetro específico del sitio (H_o) es reajustado; los datos observados para cada árbol (H_o) son usados como de inicio para el procedimiento de ajuste; iii) los estimados (H_i) se convierten en valores observados y los parámetros globales son ajustados nuevamente. Esta secuencia se repite hasta que las estimaciones sucesivas de los parámetros globales se estabilizan (Cieszewski y Bailey, 2000), para lo cual se utilizó como criterio que el cuadrado medio del error entre dos iteraciones fuera menor a 0.0001 (Vargas *et al.*, 2010).

Para corregir la autocorrelación del término del error las ecuaciones fueron ajustadas con mínimos cuadrados

$$RMSE_1 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n - p} \right)^{0.5} \quad (4)$$

$$R_o^2 = 1 - \left[\frac{n - 1 \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n - p \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \right] \quad (5)$$

Where:

Y_i, \hat{Y}_i and \bar{Y} = Observed, middle and predicted values of the dependent variable
 n = Number of observations
 p = Number of parameters of the model

The estimation of the parameters for the dynamic equations of dominant height and site index implies different statistical considerations: structures and independence of errors, homogeneity of variances and balance in the used data (Diéguez *et al.*, 2006), so it must be confirmed that these assumptions of the regression theory are fulfilled and, if necessary, corrected in the same fitting process.

The models were fitted when the basic age was taken as invariable, and simultaneously the global and specific parameters for each tree, for which the nested iterative procedure (Tait *et al.*, 1988), was used, which generates good results on the basis of data greater than 800 pairs of height and age (Cieszewski, 2003; Krumland and Eng, 2005; Diéguez *et al.*, 2006).

The equations were fitted using the MODEL procedure of the SAS/ETS® statistical package (SAS, 2004), which allows the dynamic updating of the residuals. The iterative process consists of the following steps i) the global parameters are fitted and the local parameter (H_o) is considered constant for each tree which varies for each tree and to which initially is assigned the value of the observed average height at the age of 15 years; ii) the values of the global parameters are considered as constant and the specific site parameter (H_o) is refitted; the observed values for each tree (H_o) are taken as initial for the fit; iii) the estimated data (H_i) they are transformed into observed values and the global parameters are fitted again. This sequence is repeated until the successive estimations of the global parameter are stabilized (Cieszewski and Bailey, 2000), for which the criterion was that the square mean error between two iterations was lower than 0.0001 (Vargas *et al.*, 2010).

To correct the autocorrelation of the error term, the equations were adjusted with weighted least squares, using a continuous autoregressive error structure (CAR2), based on the distance between height measurements for each tree (Zimmerman and Núñez, 2001; Vargas *et al.*, 2013). The autoregressive model was as follows:

ponderados, con el uso de una estructura autorregresiva continua de los errores (CAR2), a partir de la distancia entre las mediciones de altura para cada árbol (Zimmerman y Núñez, 2001; Vargas *et al.*, 2013). El modelo autorregresivo presentó la forma siguiente:

$$e_{ij} = d_1 \rho_1^{t_{ij} - t_{ij-1}} e_{ij-1} + d_2 \rho_2^{t_{ij} - t_{ij-2}} + \varepsilon_{ij} \quad (6)$$

Donde:

- e_{ij} = j -ésimo residuo de la unidad muestral
- d_k = 1 para $t_{ij} > k$ y 0 para $t_{ij} = k$ ($k = 1, 2$)
- ρ_k = Parámetro autorregresivo de orden k a estimar
- $t_{ij} - t_{ij-k}$ = Tiempo o distancia que separa la medición j -ésima de la medición j -ésima- k en cada unidad muestral $t_{ij} > t_{ij-k}$
- ε_{ij} = Error independiente que sigue una distribución normal con media cero y varianza constante

Resultados y Discusión

Los estimadores de los parámetros para las tres ecuaciones dinámicas ajustadas a las observaciones resultaron estadísticamente significativos en la prueba de hipótesis, con un nivel de significancia de 1 %; no hubo diferencias importantes en los estadísticos RMSE y R^2 , ya que dichas expresiones explican más de 99 % de la varianza total de los datos observados y predicen las alturas totales con un error aproximado de 0.5 m (Cuadro 3).

La estructura autorregresiva continua de los errores (CAR2) corrigió correctamente el problema de autocorrelación de los errores en las expresiones evaluadas, con lo que se logró la independencia de los residuales de la altura dominante en función de la edad, lo que favoreció contar con estimadores de los parámetros más eficientes e insesgados (Parresol y Vissage, 1998). Con ello se previene la subestimación de la matriz de covarianzas de los parámetros y pueden realizar las pruebas estadísticas de los estimadores de los parámetros de dichas ecuaciones (West *et al.*, 1984).

Desde el punto de vista práctico, los parámetros considerados para modelar la estructura del error, por lo general, no se utilizan para las predicciones de la altura dominante (Rodríguez *et al.*, 2015; Castillo *et al.*, 2013; Diéguez *et al.*, 2006), ya que el propósito principal es lograr estimaciones consistentes de los parámetros y de los errores estándar (Gieszewski, 2001). De esta forma, la altura dominante de los árboles de un rodal se calcula en función de su edad, misma que se incorpora directamente al modelo, además de su altura a esa edad inicial para la proyección de la altura dominante a una edad futura o pasada.

$$e_{ij} = d_1 \rho_1^{t_{ij} - t_{ij-1}} e_{ij-1} + d_2 \rho_2^{t_{ij} - t_{ij-2}} + \varepsilon_{ij} \quad (6)$$

Where:

- e_{ij} = j th residual of the sampling unit
- d_k = 1 for $t_{ij} > k$ and 0 for $t_{ij} = k$ ($k = 1, 2$)
- ρ_k = Autoregressive parameter of the k order to be estimated
- $t_{ij} - t_{ij-k}$ = Time or distance that divides the j th measure from the j th- k measure in each sampling unit $t_{ij} > t_{ij-k}$
- ε_{ij} = Independent error that follows a normal distribution with mean zero and constant variance

Results and Discussion

The estimators of the parameters for the three dynamic equations fitted to the observations were statistically significant in the hypothesis test, with a level of significance of 1 %; there were no significant differences in the RMSE and in R^2 statistics, since these expressions explain more than 99 % of the total variance of the observed data and predict total heights with an error of approximately 0.5 m (Table 3).

The continuous autoregressive error structure (CAR2) correctly corrected the problem of autocorrelation of the errors in the evaluated expressions, which achieved the independence of the residuals of the dominant height as a function of age, which favored estimators of the most efficient and unbiased parameters (Parresol and Vissage, 1998). This prevents the underestimation of the covariance matrix of the parameters and can perform the statistical tests of the estimators of the parameters of these equations (West *et al.*, 1984).

From the practical point of view, the parameters considered to model the error structure are generally not used for predictions of the dominant height (Rodríguez *et al.*, 2015; Castillo *et al.*, 2013; Diéguez *et al.*, 2006), since the main purpose is to achieve consistent estimates of parameters and standard errors (Gieszewski, 2001). In this way, the dominant height of the trees of a stand is calculated according to its age, which is incorporated directly into the model, in addition to its height at that initial age for the projection of the dominant height to a future or past age.



Cuadro 3. Parámetros estimados y estadísticos de bondad de ajuste de las ecuaciones dinámicas de altura dominante evaluadas.

Ecuación	Parámetro	Estimador	EE	t	P>t	RMSE	R ² _a
1	β_1	0.055417	0.00383	14.45	<0.0001	0.5873	0.9931
	β_2	-14.2106	3.4433	-4.13	<0.0001		
	β_3	60.08933	13.1903	4.56	<0.0001		
	ρ_1	0.862735	0.0241	35.81	<0.0001		
	ρ_1	0.704432	0.0310	22.67	<0.0001		
2	β_1	-5.65363	0.5864	-9.64	<0.0001	0.6121	0.9925
	β_2	83.21627	5.1662	16.11	<0.0001		
	β_3	0.318418	0.0103	30.97	<0.0001		
	ρ_1	0.861955	0.0242	35.58	<0.0001		
	ρ_1	0.715674	0.0297	24.08	<0.0001		
3	β_1	19.60159	0.4978	39.38	<0.0001	0.6044	0.9926
	β_2	3947.891	158.9	24.85	<0.0001		
	β_3	1.602537	0.0297	54.01	<0.0001		
	ρ_1	0.873108	0.0236	36.93	<0.0001		
	ρ_1	0.71853	0.0291	24.70	<0.0001		

EE = Error Estándar del estimador del parámetro; P>t = Valor de la probabilidad de la distribución de la t de Student; RMSE = Raíz del error medio cuadrático; R²_a = Coeficiente de determinación ajustado.

Table 3. Estimated and statistical parameters of goodness of fit of the dominant height dynamic equations evaluated.

Equation	Parameter	Estimator	EE	t	P>t	RMSE	R ² _a
1	β_1	0.055417	0.00383	14.45	<0.0001	0.5873	0.9931
	β_2	-14.2106	3.4433	-4.13	<0.0001		
	β_3	60.08933	13.1903	4.56	<0.0001		
	ρ_1	0.862735	0.0241	35.81	<0.0001		
	ρ_1	0.704432	0.0310	22.67	<0.0001		
2	β_1	-5.65363	0.5864	-9.64	<0.0001	0.6121	0.9925
	β_2	83.21627	5.1662	16.11	<0.0001		
	β_3	0.318418	0.0103	30.97	<0.0001		
	ρ_1	0.861955	0.0242	35.58	<0.0001		
	ρ_1	0.715674	0.0297	24.08	<0.0001		
3	β_1	19.60159	0.4978	39.38	<0.0001	0.6044	0.9926
	β_2	3947.891	158.9	24.85	<0.0001		
	β_3	1.602537	0.0297	54.01	<0.0001		
	ρ_1	0.873108	0.0236	36.93	<0.0001		
	ρ_1	0.71853	0.0291	24.70	<0.0001		

EE = Standard Error Estándar of the estimator of the parameter; P>t = Value of the probabiity of the distribution of the Studet t; RMSE = Square mean error; R²_a = fitted determination coefficient.

La Figura 1 muestra la comparación de las familias de curvas de crecimiento para los índices de sitio 13, 16, 19 y 22 m a la edad base de 15 años para las ecuaciones dinámicas ajustadas. Se advierte que la ecuación 2 subestima la altura dominante para edades menores a 3 años y la asíntota de las curvas no sigue la tendencia de los datos observados, sobre todo para los índices de 19 y 22 m, por lo que tiende a sobreestimar la altura.

Por su parte, la familia de curvas que genera la ecuación 3 sugiere que la curva ajustada para índices de sitio de 13 m tampoco es consistente con la tendencia de la asíntota de los datos observados en el intervalo de edades mayores a 15 años; por esta razón las ecuaciones dinámicas 2 y 3 se descartaron para modelar el crecimiento en altura dominante en árboles de *P. pseudostrabus*.

Las curvas de IS que se derivan de la ecuación 1 son las que describen de mejor manera el comportamiento del crecimiento en altura dominante, ya que siguen claramente la trayectoria definida en todas las clases de edad y marcan la asíntota en los cuatro índices de sitio. A pesar de que las ecuaciones dinámicas evaluadas no presentan diferencias evidentes en la bondad de ajuste, es conveniente analizarlas mediante gráficas si son distintas, dadas las trayectorias asíntóticas de las curvas. Por ello, la ecuación dinámica 1 fue seleccionada como la mejor para expresar los patrones de crecimiento en altura dominante de *P. pseudostrabus* y también optaron por ella Vargas *et al.* (2013) para la especie de interés en el noreste de México, lo que confirma la condición práctica y flexible del modelo base, así como de la ecuación dinámica para regiones ecológicas diversas.

Si bien las observaciones provienen de árboles y rodales jóvenes que aún no se desarrollan en plenitud, sí se proyecta la trayectoria de las curvas de incremento corriente anual (ICA) e incremento medio anual (IMA) en altura dominante (Figura 2), se puede reconocer, entonces, que el turno absoluto (edad a la cual se logra el crecimiento máximo en altura dominante) sucede antes de los 10 años para sitios ricos, mientras que para sitios más pobres el turno se verifica después de los 20 años. Con ello se demuestra que la especie estudiada exhibe diferentes patrones de crecimiento en altura dominante en relación a la calidad de sitio en la que se toma la muestra. Lo anterior significa que los turnos absolutos serán distintos para los diferentes índices de sitio, los cuales ocurrirán más tarde para los rodales con productividad o índice de sitio menor (Quiñonez *et al.*, 2015). Por lo tanto, las prácticas silvícolas en la planeación del manejo deben obedecer a una especie en particular, a su biología y a las condiciones del sitio con el fin de acortar los turnos absolutos y mejorar los patrones de crecimiento de la especie.

Figure 1 shows the comparison of the families of growth curves for site indexes 13, 16, 19 and 22 m at the base age of 15 years for the fitted dynamic equations. It can be noticed that equation 2 underestimates the dominant height for ages less than 3 years and the asymptote of the curves does not follow the tendency of the observed data, especially for the indexes of 19 and 22 m, and that is why it tends to overestimate height.

On the other hand, the family of curves generated by equation 3 suggests that the fitted curve for 13 m site indexes does not follow the asymptote trend of the data observed in the age range over 15 years; for this reason, the dynamic equations 2 and 3 were discarded to model the dominant height growth in *P. pseudostrabus* trees.

The SI curves derived from equation 1 are those that best describe the behavior of growth in dominant height, since they clearly follow the path defined in all age classes and mark the asymptote in the four site indexes. Although the dynamic evaluated equations do not present obvious differences in the goodness of fit, they must be analyzed by graphs if they are different, given the asymptotic trajectories of the curves. Therefore, the dynamic equation 1 was selected as the best to express growth patterns in dominant height of *P. pseudostrabus* and also Vargas *et al.* (2013) chose it for the species of interest in northeastern Mexico, confirming the practical and flexible condition of the base model as well as the dynamic equation for diverse ecological regions.

Even though the observations come from young trees and stands that have not yet fully develop, the trend of the current annual increase (ICA) curves and average annual increase (MAI) in the dominant height is projected (Figure 2); then it can be recognized that the absolute turn (age at which maximum growth at dominant height is achieved) occurs before 10 years for rich sites, whereas for poorer places the shift occurs after the age of 20, thus demonstrating that the species studied exhibits different patterns of growth in dominant height in relation to the quality of the site in which the sample is taken. This means that the absolute shifts will be different in regard to site indexes, which will occur later for the stands with productivity or lower site index (Quiñonez *et al.*, 2015). Therefore, silvicultural practices in management planning must obey a particular species, its biology and site conditions in order to shorten absolute shifts and improve the growth patterns of the species.



Aunque en la actualidad *P. pseudostrabus* es tratado con el Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares (MMOBI), con selección en grupos, e incluso con la diversidad biológica y las características del mercado, los resultados mostraron que se puede aplicar un manejo silvícola intensivo en los rodales estudiados, por lo tanto, es necesario desarrollar, adoptar o adaptar nuevos esquemas, mediante el replanteamiento de los objetivos y las tecnologías que son relevantes para las nuevas realidades ecológicas, socioculturales, económicas, legislativas e institucionales de las áreas forestales (Torres *et al.*, 2016).

In spite of the fact that *P. pseudostrabus* is currently operated with the *Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares* (MMOBI) (Mexican Management Method of Irregular Forests (MMOBI), with selection in groups, and even considering biological diversity and market characteristics, the results showed that intensive silvicultural management can be applied in the studied stands; therefore it is necessary to develop, adopt or adapt new schemes by rethinking the objectives and technologies that are relevant to the new ecological, socio-cultural, economic, legislative and institutional realities of forest areas (Torres *et al.*, 2016).

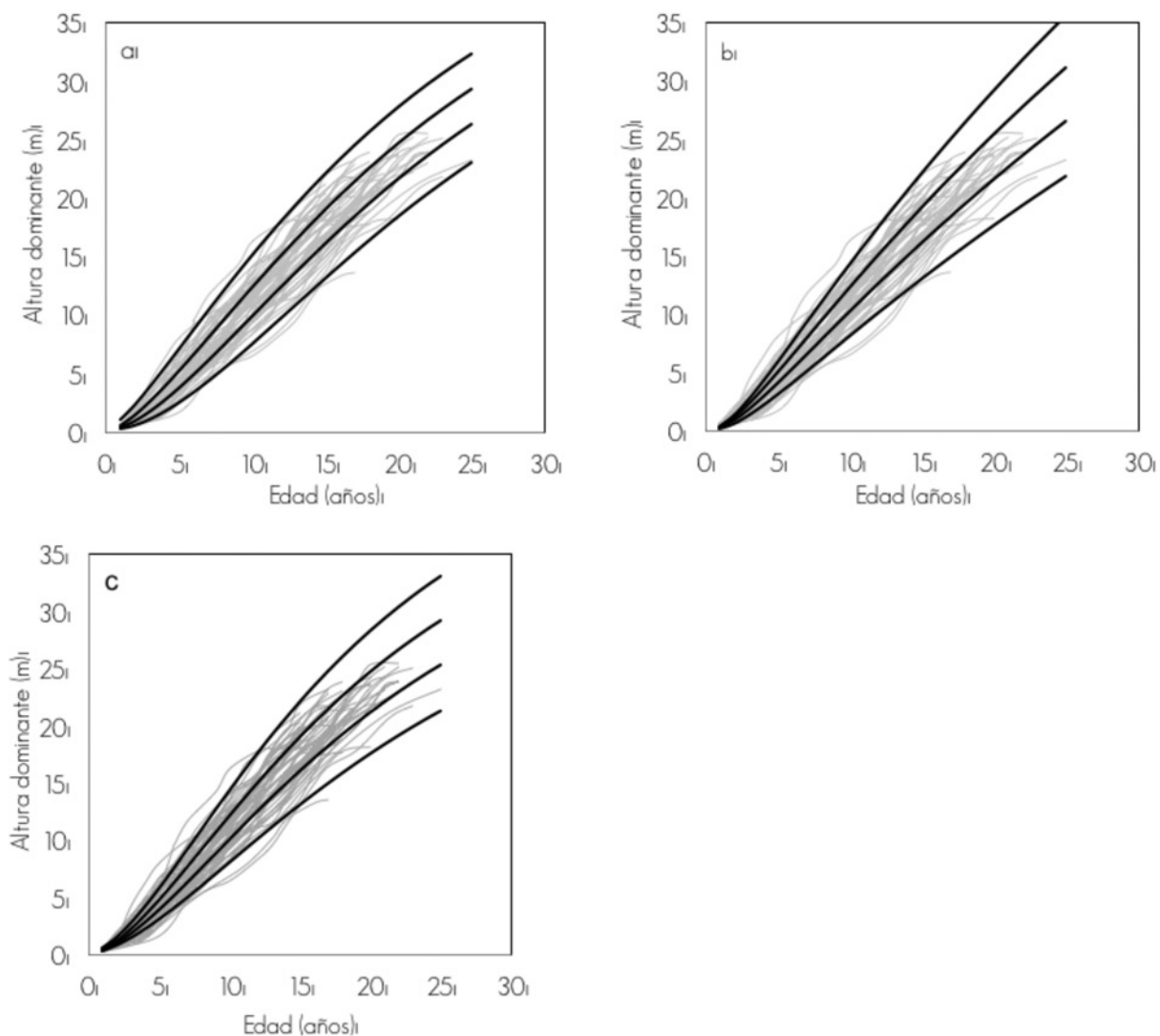


Figura 1. Familias de curvas para índices de sitio de 13, 16, 19 y 22 m a una edad de referencia de 15 años que generan la ecuaciones dinámicas 1 (a), 2 (b) y 3 (c), sobrepuestas a las alturas observadas.

Figure 1. Curve families for 13, 16, 19 and 22 m site indexes at a 15 years reference age that generate the 1 (a), 2 (b) and 3 (c) dynamic equations overlapped at the observed heights.

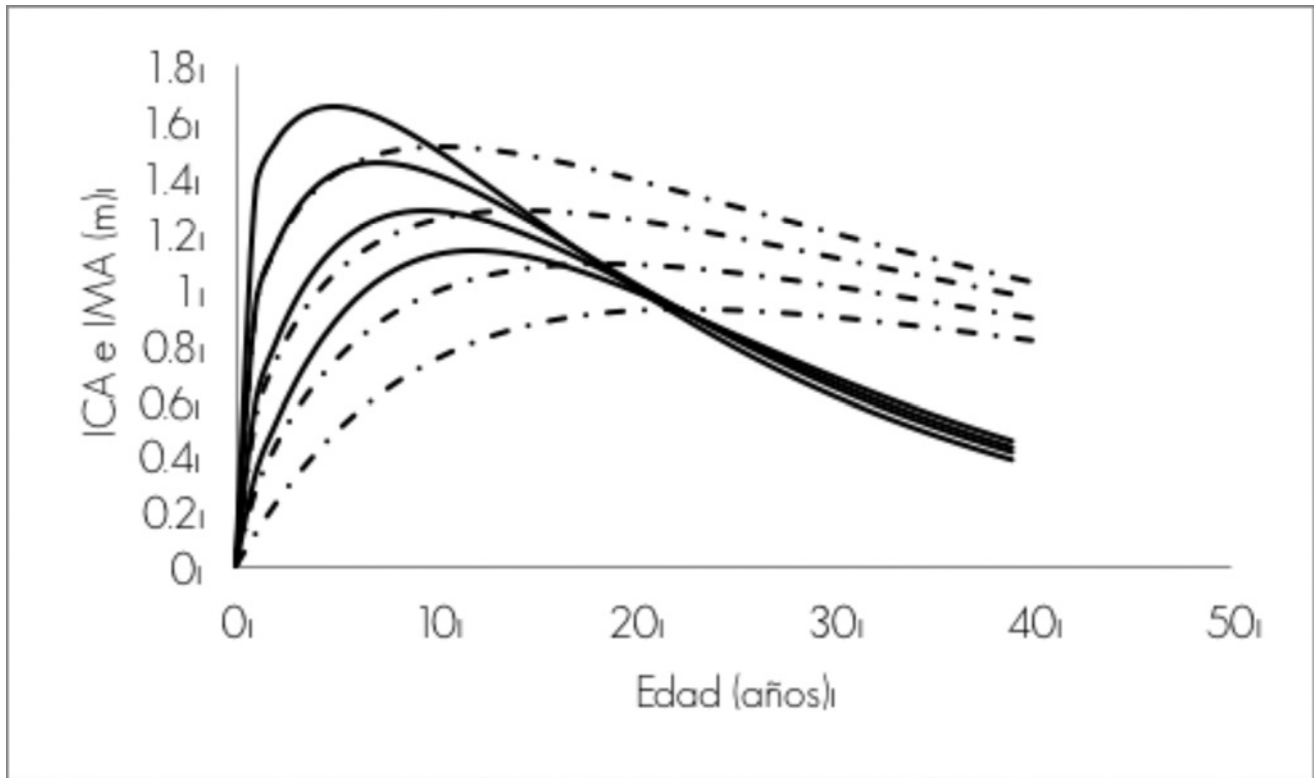


Figura 2. Familia de curvas de incremento corriente anual (ICA) (línea continua), e incremento medio anual (IMA) (línea discontinua), con categorías de índice de sitio 13, 16, 19 y 22 m.

Figure 2. Curve families of the current annual increment (ICA) (continuous line) and mean annual increment (IMA) (dashed line), with 13, 16, 19 and 22 m site index categories.

Todas las familias de curvas obtenidas con las ecuaciones dinámicas presentan polimorfismo complejo, un punto de inflexión a edades menores a 7 años y son invariantes con respecto al camino de simulación. Resultados similares los refieren López *et al.* (2015) con modelos de altura dominante en plantaciones de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco en España.

Aunque la familia de curvas de crecimiento en altura dominante que genera la ecuación dinámica seleccionada sigue la tendencia de los datos observados, se debe tener en cuenta que la altura total del árbol es una suma de periodos más amplios al del límite superior de edad analizado en este estudio; en ello pudieron intervenir otros factores adicionales y distintos a los de la calidad del sitio en un lapso más extenso (Huang, 1999), como la erosión del suelo por malas prácticas de manejo y alta densidad forestal en los sitios (Daniel *et al.*, 1982); por lo tanto, tales curvas sólo tienen validez de aplicación en rodales con edades hasta de 25 años para estimar la altura dominante y calificar la productividad a través del índice de sitio.

La Figura 3a muestra el comportamiento gráfico lineal de los residuos de la ecuación 1, contra un retardo de los residuales ($Lag1$) sin considerar los parámetros autorregresivos; esta tendencia lineal desaparece después de corregir la

All the curve families obtained with the dynamic equations show complex polymorphism, an inflexion point at ages lower than 7 years, and are invariant in regard to the simulation trail. Similar results are reported by López *et al.* (2015) with dominant height models in *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco plantations in Spain.

Although the family of growth curves at dominant height that generates the selected dynamic equation follows the trend of the observed data, it must be taken into account that the total height of the tree is a sum of periods more extensive than the upper limit of age analyzed in this study (Huang, 1999), such as soil erosion due to poor management practices and high forest density in the sites (Daniel *et al.*, 1982); therefore, such curves are only valid for application in stands with ages up to 25 years to estimate the dominant height and to qualify productivity through site index.



autocorrelación con una estructura autorregresiva continua de los errores de segundo orden (CAR2), lo que provee un patrón aleatorio en los residuales al usar tres retardos (Lag3) (Figura 3b); Castillo *et al.* (2013) consignan resultados similares en modelos de índice de sitio para cuatro especies de pino en Santiago Papasquiaro, Durango.

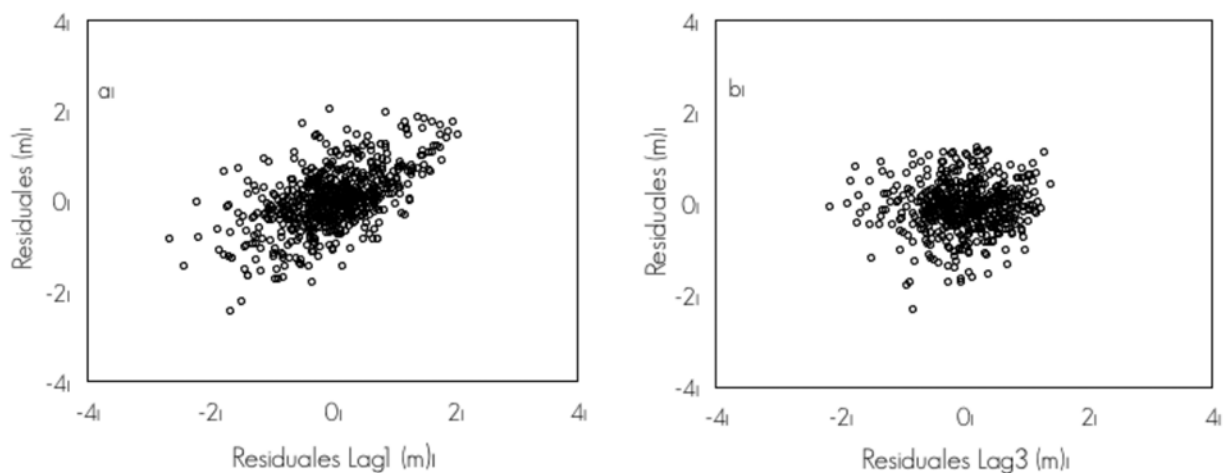


Figura 3. Comportamiento gráfico de los residuales de la ecuación dinámica 1 sin considerar la corrección de autocorrelación (a) y residuales con corrección de autocorrelación al usar CAR2 (b).

Figure 3. Graphic behavior of the residuals of the dynamic equation 1 without considering the correction of the autocorrelation (a) and residuals with correction of the autocorrelation when using CAR2 (b).

Conclusiones

Una ecuación dinámica de altura dominante e índice de sitio tipo GADA, basada en el modelo de Champan-Richard, tuvo la mejor calidad de ajuste a los datos de análisis troncales, por lo que fue seleccionada para predecir el crecimiento en altura dominante y para calificar el nivel de productividad de rodales de *Pinus pseudostrobus* por conducto del índice de sitio en la zona de estudio. Se deberá actualizar el ajuste de esta ecuación e incorporar observaciones de árboles con más edad, con la finalidad de abarcar el intervalo completo de la edad del turno y obtener mejores predicciones.

La ecuación dinámica de índice de sitio seleccionada se recomienda para calcular la productividad de rodales jóvenes y deberá validarse para determinar la factibilidad de usarla en rodales de *Pinus pseudostrobus* de mayor edad, y tomar en cuenta los tratamientos silvícolas de manejo aplicados al bosque.




Conclusions

A dynamic equation of dominant height and GADA-type site index, based on the Champan-Richard model, had the best fit quality to the trunk analysis data, so it was selected to predict growth in dominant height and to qualify the productivity level of *Pinus pseudostrobus* stands through the site index in the study area. The fit of this equation should be updated and the observations of older trees should be incorporated, in order to cover the full range of the age of the shift and obtain better predictions.

The selected site index dynamic equation is recommended for estimating the productivity of young stands and should be validated to determine the feasibility of using it in older stands of *Pinus pseudostrobus* and to take into account the forestry management treatments applied to the forest.

With the use of longitudinal truncal analyzes, acceptable results in the adjustment of the dynamic equations are obtained, so it is proposed to use this methodology for later research work. 🌱

Con el uso de análisis troncales longitudinales se obtienen resultados aceptables en el ajuste de las ecuaciones dinámicas, por lo que se propone el uso de esta metodología para trabajos de investigación posteriores. 

Agradecimientos

Los autores desean expresar su reconocimiento a la Dirección General de Educación Superior Tecnológica (DGEST) por la beca "Movilidad Nacional de Posgrado" otorgada al primer autor. Y al ejido El Balcón municipio de Ajuchitlán del Progreso, Guerrero, México por su gran disposición para permitir la realización del trabajo de toma de datos de campo.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución por autor

Miguel González Méndez: análisis de datos, ajuste de modelos, elaboración y revisión del manuscrito; Francisco Cruz Cobos: análisis de datos, ajuste de modelos, elaboración y revisión del manuscrito; Gerónimo Quiñonez Barraza: análisis de datos, ajuste de modelos, elaboración y revisión del manuscrito; Benedicto Vargas Larreta: análisis de datos, ajuste de modelos, elaboración y revisión del manuscrito; Juan Abel Nájera Luna: análisis de datos, ajuste de modelos, elaboración y revisión del manuscrito.

Referencias

- Castillo L., A., E. Vargas L., J. J., Corral R., J. A. Nájera L., F. Cruz C. y J. Hernández, F. 2013. Modelo compatible altura-índice de sitio para cuatro especies de pino en Santiago Papasquiaro, Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 4(18): 86-103.
- Cieszewski, C. J. 2001. Three methods of deriving advanced dynamic site equations demonstrated on inland Douglas-fir site curves. *Canadian Journal of Forest Research* 31(1): 165-173.
- Cieszewski, C. J. 2002. Comparing fixed-and variable-base-age site equations having single versus multiple asymptotes. *Forest Science* 48(1): 7-23.
- Cieszewski, C. J. 2003. Developing a well-behaved dynamic site equation using a modified Hossfeld IV Function $Y = 3-(axm)/(c + x m - 1)$, a simplified mixed-model and scant subalpine fir data. *Forest Science* 49(4): 539-554.
- Cieszewski, C. J. and L. Bailey. 2000. Generalized algebraic difference approach: theory based derivation of dynamic site equations with polymorphism and variable asymptotes. *Forest Science* 46(1): 116-126.
- Cieszewski, C. J. and M. Strub. 2008. Generalized algebraic difference approach derivation of dynamic site equations with polymorphism and variables asymptotes from exponential and logarithmic functions. *Forest Science* 54(3): 303-315.
- Clutter, J., J. Forston, L. Pienaar, G. Brister and R. Bailey. 1983. *Timber management: a quantitative approach*. John Wiley and Sons Inc. New York, NY, USA. 331 p.
- Daniel, T. W., J. A. Helms y F. S. Baker. 1982. *Principios de silvicultura*. Litográfica Ingramex, S. A. México, D. F., México. 492 p.
- Diéguez A., U., H. E. Burkhart and R. L. Amateis. 2006. Dynamic site model for loblolly pine (*Pinus taeda* L.) Plantations in the United States. *Forest Science* 52(3): 262-272.
- García, O. 2006. Site index: concepts and methods. In: Cieszewski, C. J. and M. Strub. (eds). *Second International Conference on Forest Measurements and Quantitative Methods and Management*. Warnell School of Forestry and Natural Resources. University of Georgia. Athens, GA, USA. pp. 275-283.

Acknowledgements

The authors wish to express their appreciation to the *Dirección General de Educación Superior Tecnológica* (DGEST) (General Directorate of Higher Technological Education, DGEST) for the "Movilidad Nacional de Posgrado" (National Graduate Mobility)" grant awarded to the first author. And to the *El Balcón ejido, Ajuchitlán del Progreso municipality, Guerrero State, Mexico* for its good will to let the collection of field data.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest.

Contribution by author

Miguel Ángel González Méndez: data analysis, model fit, elaboration and review of the manuscript; Francisco Cruz Cobos: data analysis, model fit, elaboration and review of the manuscript; Gerónimo Quiñonez Barraza: data analysis, model fit, elaboration and review of the manuscript; Benedicto Vargas Larreta: data analysis, model fitt, elaboration and review of the manuscript; Juan Abel Nájera Luna: data analysis, model fit, elaboration and review of the manuscript.

End of the English version



- Goelz, J. C. G. and T. E. Burk. 1992. Development of a well-behaved site index equation: jack pine in north central Ontario. *Canadian Journal of Forest Research* 22: 776-784.
- Hossfeld J., W. 1922. *Mathematik für Forstmänner, Ökonomen und Cameralisten*. Gotha, Thüringen, Deutschland. 310 p.
- Huang, S. 1999. Development of compatible height and site index models for young and mature stands within an ecosystem-based management framework. In: Amaro, A. and M. Tomé (eds). *Empirical and process-based models for forest tree and stand growth simulation*. Edições Salamandra-Novas Tecnologias. Lisbon, Portugal. pp. 61-98.
- Krumland, B. and H. Eng. 2005. Site index systems for major young-growth forest and woodland species in northern California. California Department Forestry and Fire Protection. Davis, CA, USA. California Forestry Report Num. 4. 220 p.
- López S., C. A., J. G. Álvarez G., U. Diéguez A. and R. Rodríguez S. 2015. Modelling dominant height growth in plantations of *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco in Spain. *Southern Forests: a Journal of Forest Science* 77(4): 315-319.
- López U., J. 2002. *Pinus pseudostrobus* Lindl. In: Vozzo A., J. A. (ed). *Tropical Tree Seed Manual*. USDA Forest Service. Washington, DC, USA. pp. 636-638.
- Lundqvist, B. 1957. On the height growth in cultivated stands of pine and spruce in northern Sweden. *Medd Fran Statens Skogsforsk Band* 47(2): 1-64.
- Martín B., D., G. Gea I., M. Del Río and I. Cañellas. 2008. Long-term trends in dominant-height growth of black pine using dynamic models. *Forest Ecology and Management* 256: 1230-1238.
- Mora, F. y V. Meza. 2003. Comparación del crecimiento en altura de la teca (*Tectona grandis*) en Costa Rica con otros trabajos previos y con otras regiones del mundo. Seminario y Grupo de Discusión Virtual en Teca. Heredia, Costa Rica. www.una.ac.cr/inisefor (3 de julio de 2016).

- Parresol, B. R. and J. S. Vissage. 1998. White pine site index for southern forest survey. Res. Pap. SRS-10. US Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station, Asheville, NC, USA. 8 p.
- Quiñonez B., G., H. M. De los Santos P., F. Cruz C., A. Velázquez M., G. Ángeles P. y G. Ramírez V. 2015. Índice de sitio con polimorfismo complejo para masas forestales de Durango, México. *Agrociencia* 49(4): 439-454.
- Richards, F. J. 1959. A flexible growth function for empirical use. *Journal of Experimental Botany* 10(2): 290-301.
- Rodríguez C., A., F. Cruz C., B. Vargas L. y F. J. Hernández. 2015. Modelo compatible de altura dominante-índice de sitio para táscate (*Juniperus deppeana* Steud.). *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 21(1): 97-108.
- Statistical Analysis System Institute Inc. (SAS). 2004. SAS/ETS User's Guide, 9.1. Version. Cary, NC, USA. 1315 p.
- Sharma, R. P., A. Brunner, T. Eid and B. H. Øyen 2011. Modelling dominant height growth from national forest inventory individual tree data with short time series and large age errors. *Forest Ecology and Management* 262(12): 2162-2175.
- Tait, D. E., C. J. Cieszewski and I. E. Bella. 1988. The stand dynamics of lodgepole pine. *Canadian Journal of Forest Research* 18(10): 1255-1260.
- Torres R., J. M., R. Moreno S. and M. A. Mendoza B. 2016. Sustainable forest management in Mexico. *Current Forestry Reports* 2(2): 93-105.
- Vanclay, J. 1994. Modelling forest growth and yield. applications to mixed tropical forests. CAB International. Wallingford, UK. 312 p.
- Vargas L., B., O. A. Aguirre C., J. J. Corral R., F. Crecente C., y U. Diéguez A. 2013. Modelos de crecimiento en altura dominante e índice de sitio para *Pinus pseudostrabus* Lindl. en el noreste de México. *Agrociencia* 33(1): 91-106.
- Vargas L., B., J. G. Álvarez G., J. J. Corral R. y O. A. Aguirre C. 2010. Construcción de curvas dinámicas de índice de sitio para *Pinus cooperi* Blanco. *Fitotecnia* 33(4): 344-351.
- West, P. W., D. A. Ratkowsky and A. W. Davis. 1984. Problems of hypothesis testing of regressions with multiple measurements from individual sampling units. *Forest Ecology and Management* 7(3): 207-224.
- Zimmerman, D. L. and V. Núñez A. 2001. Parametric modeling of growth curve data: an overview (with discussion). *Test* 10(1): 1-73.





Artículo / Article

Aprovechamiento de productos forestales no maderables en los bosques de montaña alta, centro de México

Utilization of non-timber forest products in the high mountain forests of central Mexico

Nancy Diana Anastacio-Martínez¹, Sergio Franco-Maass¹,
Esteban Valtierra-Pacheco² y Gabino Nava-Bernal¹

Resumen

Se describe la forma de aprovechamiento de tres Productos Forestales No Maderables (PFNM) en los bosques de montaña alta del centro de México: vara de perilla (*Symphoricarpos microphyllus*), musgo (*Thuidium delicatulum* var. *delicatulum*) y hongos comestibles (reino Fungi). La investigación se realizó en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca y en el ejido de San Bartolo Oxtotitlán, municipio Jiquipilco, Estado de México, a través de encuestas, entrevistas semiestructuradas, transectos por las rutas de extracción, muestreos aleatorios de flora y observación participativa. Los resultados mostraron que, en el caso del musgo, son personas externas a la comunidad quienes realizan su extracción y aprovechamiento; y, por tanto, los pobladores locales no reciben beneficios significativos por dicha actividad. Respecto a vara de perilla su recolección la llevan a cabo unas cuantas familias de la comunidad, quienes son las principales beneficiarias. La recolecta de hongos silvestres comestibles es de libre acceso y la practican la mayoría de los pobladores locales; cabe señalar que, si bien, antes esta actividad se destinaba al autoconsumo, en la actualidad está transitando hacia la comercialización, a través de intermediarios. Las formas de aprovechamiento de cada recurso varían en función de su temporalidad, demanda y canales de comercialización.

Palabras clave: Bosques de montaña alta, hongos silvestres comestibles, productos forestales no maderables, manejo sustentable, *Symphoricarpos microphyllus* (Humb. & Bonpl. ex Schult.) Kunth), *Thuidium delicatulum* var. *delicatulum* (Hewd.) Schimp).

Abstract

The forms of exploitation of three Non-Timber Forest Products (NTFPs) of the high mountain forests of central Mexico are described: pink snowberry (*Symphoricarpos microphyllus*), moss (*Thuidium delicatulum* var. *delicatulum*) and edible mushrooms (Fungi kingdom). The research was carried out in the Nevado de Toluca Flora and Fauna Protection Area in the San Bartolo Oxtotitlán ejido in the municipality of Jiquipilco, State of Mexico, through surveys, semi-structured interviews, transects along the extraction routes, random sampling of the flora and participative observation. The results showed that, in the case of moss, it is extracted and exploited by people outside the community, and therefore the locals receive no significant benefits from this activity. As for the pink snowberry, it is exploited by a few families in the community, who are the main beneficiaries. Access to the harvesting of wild edible mushrooms is free, and it is practiced by most of the local population; although in the past this activity was only for purposes of self-consumption, today it is evolving toward commercialization through intermediaries. The forms of utilization of each resource vary in terms of their temporality, demand and commercialization channels.

Key words: High-mountain forests, edible wild mushrooms, non-timber forest products, sustainable management, *Symphoricarpos microphyllus* (Humb. & Bonpl. ex Schult.) Kunth, *Thuidium delicatulum* var. *delicatulum* (Hewd.) Schimp).

Fecha de recepción/Reception date: 6 de junio de 2016; Fecha de aceptación/Acceptance date: 15 de octubre de 2016.

¹ Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales, Universidad Autónoma del Estado de México. México. Correo-e: sfrancom@uaemex.mx

² Programa de Postgrado en Desarrollo Rural, Colegio de Postgraduados, México.

Introducción

Los Recursos Forestales No Maderables (RFNM) son las especies vegetales de las zonas forestales susceptibles de aprovechamiento, en función de su posible utilidad. Los Productos Forestales No Maderables (PFNM), se refieren a cualquier parte de dichas especies que está siendo aprovechada, a través de su extracción o por el servicio ambiental que presta (Wong *et al.*, 2001).

La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat, 2014) cita que en México el aprovechamiento de los PFNM supera las 70.5 mil toneladas; de ellas, prevalece la comercialización de tierra de monte (62 %), resinas (17.4 %) y las plantas medicinales, hongos comestibles y arbustos (19.1 %). En el Estado de México se recolectan, principalmente, plantas medicinales y hongos comestibles, seguidos por resinas y tierra de monte (Semarnat, 2005a, 2005b).

Los estudios sobre los PFNM son escasos. La Comisión Nacional Forestal (Conafor, 2010) realizó un catálogo de las especies no maderables de mayor importancia en México. Coronel y Pulido (2011) analizaron la posibilidad de conservar y usar la palma (*Brahea dulcis* (Kunth) Mart.) en el estado de Hidalgo. Martínez *et al.* (2007) estudiaron la flora útil de los cafetales en la Sierra Norte de Puebla, e identificaron especies que pueden ser comercializadas, las cuales incluyen plantas medicinales y comestibles. En la zona sur del país, Martínez *et al.* (2011) evaluaron el efecto del aprovechamiento foliar de palma camedor (*Chamaedorea quezalteca* Standl. & Steyerl.) en la Reserva de la Biosfera El Triunfo, Chiapas; Sánchez y Valtierra (2003) documentan una investigación de la *Chamaedorea* spp. en la Reserva de la Biosfera de Montes Azules; Levy *et al.* (2002) caracterizaron el uso tradicional de la flora espontánea en la selva Lacandona, en Lacanhá, Chiapas.

En el Estado de México, Martínez *et al.* (2015) hicieron un estudio de frutos y semillas comestibles que incluye 40 familias y 138 especies de frutos. Arana *et al.* (2014) describen la obtención de cepas y producción de inóculo de cinco especies de hongos silvestres comestibles de alta montaña en el centro de México. Lara *et al.* (2013) consignaron el conocimiento tradicional sobre hongos silvestres en la comunidad otomí de San Pedro Arriba, municipio Temoaya. Franco *et al.* (2012) registraron los hongos silvestres comestibles del Nevado de Toluca; mientras que Franco y Burrola (2010) hacen un compendio y caracterización taxonómica de hongos comestibles procedentes del Nevado de Toluca.

Además del aprovechamiento de los RFNM, se han estudiado las organizaciones sociales rurales, como en el caso de la hoja de laurel (*Litsea glaucescens* Kunth) (Montañez *et al.*, 2011); palma camedor (*Chamaedorea* spp.) (Sánchez y Valtierra, 2003) y vara de perillita (*Symphoricarpos microphyllus* (Humb. & Bonpl.

Introduction

Non-Timber Forest Resources (NTFR) are vegetal species of forest areas that are susceptible of exploitation, due to their potential usefulness. Non-Timber Forest Resources (NTFR) refer to any part of these species being extracted or utilized for their service to the environment (Wong *et al.*, 2001).

According to the *Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales* (Department of the Environment and Natural Resources) (Semarnat, 2014), the exploitation of the NTFRs in Mexico surpasses 70.5 tons; prevalent among these resources being commercialized are soil (62 %), resins (17.4 %) and medicinal plants, edible mushrooms and shrubs (19.1 %). The main resources collected in the State of Mexico are medicinal plants and edible mushrooms, followed by resins and soil (Semarnat, 2005a, 2005b).

Studies on NTFRs are scarce. The *Comisión Nacional Forestal* (National Forestry Commission) (Conafor, 2010) created a catalogue of major non-timber species in Mexico. Coronel and Pulido (2011) analyzed the possibility of preserving and utilizing the palm tree (*Brahea dulcis* (Kunth) Mart.) in the state of Hidalgo. Martínez *et al.* (2007) studied the useful flora of the coffee plantations of the Northern Sierra of Puebla and identified species that can be commercialized, including medicinal and edible plants. In southern Mexico, Martínez *et al.* (2011) assessed the effect of the utilization of chamaedorea (*Chamaedorea quezalteca* Standl. & Steyerl.) at the *El Triunfo* Biosphere Reserve in Chiapas; Sánchez and Valtierra (2003) have documented research on *Chamaedorea* spp. at the *Montes Azules* Biosphere Reserve; Levy *et al.* (2002) characterized the traditional use of the spontaneous flora of the Lacandona rainforest in Lacanhá, Chiapas.

In the State of Mexico, Martínez *et al.* (2015) carried out a study of fruits and edible seeds which includes 40 fruit families and 138 fruit species. Arana *et al.* (2014) describe the obtainment of strains and the production of the inoculum of five wild edible mushroom species of the high mountains of central Mexico. Lara *et al.* (2013) recorded the traditional knowledge of wild mushrooms among the Otomi community of *San Pedro Arriba*, in Temoaya municipality. Franco *et al.* (2012) registered the wild edible mushrooms of *Nevado de Toluca*, while Franco and Burrola (2010) wrote a compendium and a taxonomic characterization of edible mushrooms of *Nevado de Toluca*.

Besides the exploitation of the NTFRs rural social organizations have also been studied, as in the case of bay laurel (*Litsea glaucescens* Kunth) leaves (Montañez *et al.*, 2011); chamaedorea (*Chamaedorea* spp.) (Sánchez and Valtierra, 2003), and pink snowberry (*Symphoricarpos microphyllus* (Humb. & Bonpl. ex Schult.) Kunth) (Mendoza *et al.*, 2011; Mendoza *et al.*, 2012; Monroy *et al.*, 2007). These researches describe the

ex Schult.) Kunth) (Mendoza *et al.*, 2011; Mendoza *et al.*, 2012; Monroy *et al.*, 2007); dichas investigaciones describen el proceso de extracción y comercialización de los recursos y las formas de participación de los diferentes actores sociales.

El objetivo del presente estudio fue caracterizar las formas de aprovechamiento de tres PFSM de las zonas de montaña alta en el Estado de México: vara de perilla, musgo y hongos silvestres comestibles.

Materiales y Métodos

Los bosques de montaña alta se distribuyen en torno a la cota 3 500 m de altitud y en ellos predomina *Pinus hartwegii* Lindl. (ocote) y *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham. (oyamel) (Endara *et al.*, 2013). Son regiones donde abunda la perilla, el musgo y los hongos comestibles (De Beer y McDermott, 1989). Estos productos están sujetos a dinámicas de extracción diferenciadas. Su análisis comparativo permitió identificar similitudes y diferencias en los procesos de extracción y comercialización de cada producto.

El estudio de hongos silvestres y *Symphoricarpos microphyllus* se realizó en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca (APFFNT) donde existe una importante extracción de dichos recursos. Por su carácter de área protegida, sin embargo, no existen aprovechamientos importantes de musgo (*Thuidium delicatulum* W. P. Schimper en B.S.G., 1852), por lo que esta actividad se estudió en el ejido de San Bartolo Oxtotitlán. Dicha comunidad comparte características ecológicas con el Nevado de Toluca en términos de las condiciones ambientales y de organización de las comunidades campesinas.

El APFFNT se localiza en la porción centro sur del Estado de México, con una superficie de 53 590 hectáreas, abarca parte de los municipios Almoloya de Juárez, Amanalco de Becerra, Calimaya, Coatepec Harinas, Temascaltepec, Tenango del Valle, Toluca, Villa Guerrero, Villa Victoria y Zinacantepec (Figura 1). Prevalcen los bosques de pino, oyamel, aile, zacatonales y vegetación alpina. Pese a su carácter de área protegida, la mayor parte del Nevado de Toluca es de propiedad ejidal y los pobladores locales suelen extraer productos forestales maderables (leña y madera), y no maderables (perilla, hongos, tierra de monte y plantas medicinales) (DOF, 1937).

El ejido de San Bartolo Oxtotitlán perteneciente al municipio Jiquipilco, se localiza en la parte central del Estado de México, entre los municipios Jocotitlán, Villa del Carbón, Temoaya e Ixtlahuaca (Figura 1). La vegetación predominante corresponde a bosques de coníferas (pino y oyamel) y algunos encinos. La población local se dedica, principalmente, al comercio, los servicios, y en menor medida a la agricultura de temporal. Además, se extraen madera, musgo, hongos comestibles, plantas medicinales y tierra de monte (GEM, 2004).

extraction process and commercialization of the resources and the forms of participation by various social stakeholders.

The purpose of the present study was to characterize the forms of exploitation of three NTFRs of the high mountain areas of the State of Mexico: pink snowberry, moss and wild edible mushrooms.

Materials and Methods

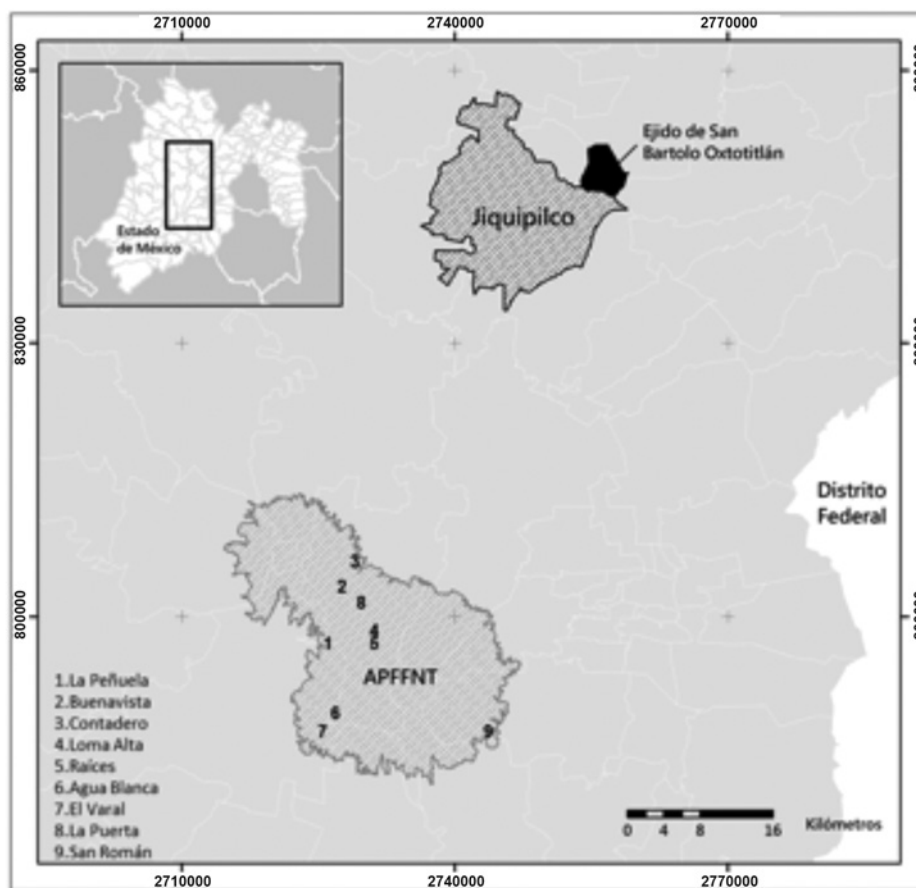
High-mountain forests are distributed at an altitude of 3 500 masl, and predominant species are *Pinus hartwegii* Lindl. (Hartweg's pine) and *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham. (Sacred fir) (Endara *et al.*, 2013). Pink snowberry, moss and edible mushrooms are abundant in this region (De Beer and McDermott, 1989). These products are subject to differentiated extraction dynamics; comparative analysis made it possible to identify similarities and differences in the extraction and commercialization processes of each product.

The study of wild mushrooms and *Symphoricarpos microphyllus* was carried out in the Nevado de Toluca Flora and Fauna Protection Area (NTFFPA), where there is a significant extraction of these resources. However, because it is a protected area, there is no considerable exploitation of moss (*Thuidium delicatulum* W. P. Schimper in B.S.G., 1852); therefore, this activity was researched at the San Bartolo Oxtotitlán ejido. This community shares ecological characteristics with Nevado de Toluca in terms of environmental conditions and of the organization of farmers' communities.

NTFFPA is located in the southern-central State of Mexico and has a surface area of 53 590 hectares, comprising Almoloya de Juárez, Amanalco de Becerra, Calimaya, Coatepec Harinas, Temascaltepec, Tenango del Valle, Toluca, Villa Guerrero, Villa Victoria and Zinacantepec municipalities (Figure 1). Pine, Sacred fir and alder forests and alpine vegetation are prevalent. Despite its being a protected area, most of Nevado de Toluca is communal property, and the locals usually extract timber (wood and firewood) and non-timber (pink snowberry, mushrooms, earth and medicinal plants) forest products (DOF, 1937).

The San Bartolo Oxtotitlán ejido belongs to Jiquipilco municipality; it is located in central State of Mexico, between Jocotitlán, Villa del Carbón, Temoaya and Ixtlahuaca municipalities (Figure 1). The predominant vegetation corresponds to conifers (pine and Sacred fir) and to certain oak species. The main economic activities of the local population are trade, the provision of services and, to a lesser extent, rain-fed agriculture. Besides, they extract wood, moss, edible mushrooms, medicinal plants and soil (GEM, 2004).





APFFNT-NTFFPA.

Fuente: División política del Estado de México, escala 1:250 000 (Conabio, 1995).

Source: División Política del Estado de México; scale: 1:250 000 (Conabio, 1995).

Figura 1. Ubicación del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca y del municipio de Jiquipilco.

Figure 1. Location of the Nevado de Toluca Flora and Fauna Protection Area and of Jiquipilco municipality.

En 2008 se realizó un levantamiento de información para analizar la extracción de los PFNM en el Nevado de Toluca, mediante la aplicación de 165 encuestas en las comunidades de Agua Blanca, Buenavista, San José Contadero, El Varal, La Peñuela, La Puerta, Loma Alta, Raíces y San Román; todas ellas tienen como base un ejido. La encuesta se estructuró considerando ocho ejes de información: datos generales de la localidad, datos del entrevistado, características de la unidad familiar, características de la vivienda, actividades económicas, recursos forestales no maderables, recursos forestales maderables y normatividad para la extracción de los recursos.

El estudio de la vara de perilla requirió la aplicación de 12 entrevistas semiestructuradas aplicadas a informantes clave (cosechadores y un transportista), entre enero y octubre de 2013. Se entrevistó a casi la mitad de las 25 personas involucradas en la actividad; las preguntas correspondieron a cuatro ejes fundamentales: características del informante,

In 2008, information was collected to analyze the extraction of NTFPs on Nevado de Toluca through the application of 165 surveys in the communities of Agua Blanca, Buenavista, San José Contadero, El Varal, La Peñuela, La Puerta, Loma Alta, Raíces and San Román, all of which are ejido-based. The survey was structured around eight information cores: general data of the locality, data of the interviewees, characteristics of the family unit, economic activities, non-timber forest resources, timber forest resources and regulations for the extraction of resources.

The study on pink snowberry required the application of 12 semi-structured interviews applied to key informants (harvesters and a trucker) between January and October, 2013. Almost half of the 25 people involved in the activity were interviewed; the questions were based on four major cores: characteristics of the informer, knowledge regarding the extraction of the resources, workings of the social organization and participation in distribution and commercialization.

conocimiento sobre la extracción de los recursos, funcionamiento de la organización social y participación en la distribución y la comercialización.

Adicionalmente, se realizaron tres transectos, uno por localidad, y en cada uno se hicieron tres muestreos de plantas, para un total de nueve. Las rutas fueron seleccionadas con base en las que siguen los cortadores que conocen los caminos donde hay mayor abundancia de plantas. Los sitios por transecto fueron elegidos al azar y correspondieron con aquéllos donde los cortadores iban a efectuar la recolección de las varas. El muestreo no es representativo de toda el área de las comunidades estudiadas, porque se excluyeron las áreas en las cuales no se llevó a cabo el corte de vara. Por tal motivo, los lugares de muestreo son típicos de las zonas de extracción donde hay mayor abundancia, pero no son representativos de toda el área con presencia de perilla, ya que esta se distribuye de forma heterogénea, las áreas de poca abundancia se dejaron fuera del estudio.

La longitud de los transectos se determinó por la distancia que iban a recorrer los cortadores. En La Peñuela tuvo una longitud de 3.2 km; inició a una distancia de 3 km de la comunidad y terminó a los 6.2 km. En Buenavista empezó a los 2.8 km y terminó a los 3.5 km; en Contadero, el transecto fue muy cercano a la población, inició a 1.5 km y concluyó a 2.5 km.

La perilla crece formando manchones heterogéneos en el bosque. Es una especie que se caracteriza por desarrollarse en zonas con disturbio antrópico y en grupos (Matesanz y Valladares, 2009). Por estas características se optó por seleccionar al azar el sitio de muestreo en los lugares donde se recolecta.

Previo a la extracción se cuantificó el recurso y registró el total de arbustos por metro cuadrado, además de su altura, número de varas por planta y madurez de las varas (retoño, joven o madura). Una vez anotada la información se permitió la entrada a los cortadores y se cuantificó el total de varas cortadas por arbusto. Los rollos de vara se pesaron y midieron para verificar si cumplían con las características de calidad que exige el comprador. La especie se determinó en el laboratorio del Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales de la Universidad Autónoma del Estado de México.

La investigación del musgo incluyó 20 entrevistas semiestructuradas a informantes clave (cosechadores, empresario y transportista). Las preguntas se integraron en los mismos ejes fundamentales del estudio de vara de perilla.

En los meses de noviembre y diciembre de 2012, 2013 y 2014 se realizaron 10 transectos por la zona de extracción de musgo: Cerro de La Bufa, ejido de San Bartolo Oxtotitlán utilizando un GPS; mediante la observación directa se identificaron las técnicas

In addition, three transects were carried out--one for each locality--, and three samples of plants were taken from each, adding up to a total of nine. The routes were selected based on those followed by the harvesters who are familiar with the paths to where the plants are most abundant. The sites in each transect were selected at random and corresponded to those where the harvesters were going to collect the snowberry twigs. The sample is not representative of the entire area of communities studied, for those areas where no twigs were cut were excluded. For this reason, the sampling sites are typical of the extraction areas where the plants are most abundant, but they are not representative of the entire area where pink snowberry is present, as this is distributed in a heterogeneous manner; areas where snowberries were scarce were left out of the study.

The length of the transects was determined by the distance that the harvesters were going to travel. The transect at *La Peñuela* was 3.2 km long; it began 3 km away from the community and ended at the distance of 6.2 km. The transect in *Buenavista* began at 2.8 km and ended at 3.5 km. In *Contadero*, the transect was very close to the town, beginning at 1.5 km and ending at 2.5 km.

Pink snowberry grows in heterogenous patches in the forest. The species is characterized by growing in clusters, in areas with anthropic disturbance (Matesanz and Valladares, 2009). Due to these characteristics, the decision was made to select the sampling site at random in those places where it is harvested.

The product was quantified before its extraction, and the total number of shrubs per square meter, their height, number of twigs per plant and the maturity of the branches (shoot, young or ripe) were recorded. Once this information was recorded, the harvesters were allowed entry, and the total number of twigs cut per shrub was counted. The rolls of twigs were weighed and measured to verify whether they met the quality features demanded by the buyer. The species was determined at the laboratory of the *Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales, Universidad Autónoma del Estado de México* (Institute of Agricultural and Rural Sciences of the Autonomous University of the State of Mexico).

The research on moss included 20 semi-structured interviews to key informants (harvesters, business owner and a trucker). The questions were integrated into the same basic cores as in the study of the pink snowberry.

During the months of November and December, 2012, 2013 and 2014, 10 transects were carried out in the area of extraction of moss--*Cerro de La Bufa*, in the *San Bartolo Oxtotitlán ejido*--using a GPS; the extraction techniques were identified through direct observation; the extracted amount was quantified, and the quality of the harvested resource was determined.

de extracción, se cuantificó la cantidad extraída y se determinó la calidad del recurso obtenido.

A partir de los muestreos de musgo se estimó el porcentaje de aprovechamiento por metro cuadrado, el peso, la superficie extraída y la calidad de las pacas. Para ello, se delimitaron, de manera aleatoria, 10 parcelas de 25 m², en las que se calculó el porcentaje cubierto por musgo y su calidad; una vez recopilada dicha información, se dio acceso a los cortadores y se cuantificó la cantidad de musgo extraído por metro cuadrado, para verificar si se cumplía con lo establecido en la Norma Oficial: NOM-011-SEMARNAT-1996 (DOF, 2003b). La identificación de la especie de musgo extraída se hizo en el Instituto de Biología de la Universidad Nacional Autónoma de México.

En relación con el estudio de la extracción de hongos silvestres comestibles, y con base en las encuestas aplicadas en 2008, se hicieron 13 recorridos de colecta con los informantes clave para obtener referencias sobre ubicación, datos generales del sotobosque, técnicas de corte, nombre común del hongo y formas de organización para la recolecta. Una vez calculada la cantidad de hongos recolectados, los ejemplares se llevaron al laboratorio del Centro de Investigación en Recursos Bióticos de la Universidad Autónoma del Estado de México para su identificación taxonómica.

Resultados y Discusión

Normatividad para la extracción de RFNM

Las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) en materia de RFNM son un instrumento de política ambiental que permite regular el acceso y aprovechamiento de los mismos. Estas normas establecen que debe existir un consentimiento de los dueños de las tierras para la extracción del recurso. Y son los actores sociales interesados (externos o internos a las comunidades) los responsables de gestionar dicho consentimiento, (en el caso del estudio que se documenta, le corresponde hacerlo al Comisariado Ejidal). Posteriormente, el comprador tramita los permisos de extracción y emisión de guías y facturas ante la delegación regional de la Semarnat para amparar la legalidad del recurso extraído para su comercialización.

La encuesta reveló que los hongos comestibles y la vara de perilla son los PFNM que mayormente se extraen en la región del Nevado de Toluca. El aprovechamiento de la vara de perilla, utilizada para elaborar escobas rústicas, se regula a través de la NOM-005-SEMARNAT-1997, que señala la etapa fenológica en que debe hacerse el aprovechamiento: "Para promover el aprovechamiento (de tallos) de grupo de plantas en edad y tamaño homogéneo, solo se permitirá aprovechar como máximo el 60 % de los tallos en madurez de cosecha. Cuando se presenten grupos en etapas de floración

Based on the moss samplings, the percentage of exploitation per square meter, the weight, the surface area extracted and the quality of the bundles were estimated. For this purpose, ten 25 m² plots were delimited at random, and the percentage covered by moss and its quality were calculated. Once this information was collected, the harvesters were given access, and the amount of moss extracted per square meter was quantified in order to verify whether the Official Norm NOM-011-SEMARNAT-1996 was being met (DOF, 2003b). The moss species extracted was identified at the *Instituto de Biología of Universidad Nacional Autónoma de México* (Institute of Biology of the National Autonomous University of Mexico).

As for the study of the extraction of wild edible mushrooms, based on the surveys applied in 2008, 13 harvesting rounds were carried out together with the key informers in order to obtain references of the location of the mushrooms, general data of the undergrowth, cutting techniques, common names of the mushrooms and forms of organization for the harvesting. Once the amount of mushrooms was estimated, the specimens were taken to the laboratory of the *Centro de Investigación en Recursos Bióticos de la Universidad Autónoma del Estado de México* (Center for Research on Biotic Resources of the Autonomous University of the State of Mexico) for their taxonomic identification.

Results and Discussion

Regulations for the extraction of NTFPs

The *Normas Oficiales Mexicanas* (Mexican Official Norms) (NOM) in matters of NTFPs are an environmental policy instrument that allows regulating the access to them and their exploitation. These norms establish that there must be consent from the landowners for the extraction of the resource. And the social stakeholders (both within and outside the communities) are responsible for managing this consent (in the case of the study documented herein, the *Comisionado de las Tierras Comunes* (Commissioner of the Communal Lands) is in charge of doing so). Subsequently, the buyer processes the extraction permits and the issuing of guides and invoices before the regional delegation of Semarnat in order to safeguard the legality of the resource extracted for commercial purposes.

The survey revealed that edible mushrooms and pink snowberry are the NTFPs extracted in the largest amounts in the region of Nevado de Toluca. The exploitation of pink snowberry, utilized for the manufacture of rustic brooms, is regulated via the NOM-005-SEMARNAT-1997 norm, which indicates the phenologic stage at which the exploitation must take place: "In order to promote the exploitation (of the branches) of the group of plants of the same age and size, only the extraction of a maximum of 60 % of the stalks ready for harvest shall be allowed. While the plant groups are in the flowering and seeding periods, only

y semillación, sólo se deberá aprovechar el mismo porcentaje, con la finalidad de favorecer la reproducción por semilla" (DOF, 2003a).

La época ideal de extracción de la perilla es entre mayo y agosto (Monroy *et al.*, 2007); sin embargo, en la zona de estudio se corta durante todo el año: en la comunidad de Buenavista se extrae de enero a junio, en La Peñuela de mayo a junio y en San José Contadero de agosto a octubre.

La extracción de musgo no se ha extendido a todas las zonas boscosas de montaña alta, ya que depende de la abundancia y calidad del recurso; así como, de la accesibilidad a las zonas de extracción. El ejido de San Bartolo Oxtotitlán cuenta con una superficie de 1 625 ha, de las cuales en el 2012 se autorizaron 200 ha para la extracción intensiva (Semarnat, 2012). La NOM-011-SEMARNAT-1996 establece que: "El musgo se debe aprovechar en manchones o franjas de 2 metros de ancho como máximo, siguiendo el contorno del terreno, y extrayendo, como máximo, el 50 % de las existencias en cada sitio aprovechado, para asegurar su regeneración. No se podrá aprovechar el mismo sitio hasta que se haya recuperado completamente... El aprovechamiento en orillas de caminos, ríos, arroyos y en general cuerpos de agua, se realizará dejando una franja de protección de 2 metros como mínimo, para prevenir problemas de erosión" (DOF, 2003b).

La extracción de los hongos comestibles está regulada por la NOM-010-SEMARNAT-1996, que establece los procedimientos, criterios y especificaciones para realizar el aprovechamiento, transporte y almacenamiento de hongos: "El aprovechamiento de hongos, quedará sujeto a los siguientes criterios y especificaciones técnicas: se aprovecharán sólo los cuerpos fructíferos en la etapa de madurez de cosecha, identificándolos por su forma de botón, tamaño y apertura, según la especie de aprovechamiento. Se deberá remover suavemente la hojarasca que cubre al hongo, cortar al nivel del suelo el cuerpo fructífero y cubrir el sitio de donde se extrajo, con el objeto de proteger el micelio" (DOF, 1996).

La época de extracción de los hongos tiende a variar en función del momento de fructificación de cada especie, aunque se intensifica en el verano. De acuerdo con los datos obtenidos el principal destino es el autoconsumo, pero existe una creciente demanda. La normatividad es poco conocida y la comercialización de las especies protegidas se hace de forma ilegal, como es el caso del hongo blanco de pino (*Tricholoma magnivelare* (Peck) Redhead); las pancitas o pambazos (*Boletus edulis* Bull. Fr.); los amarillos o duraznillos (*Cantharellus cibarius* Fr.); el chile seco (*Morchella esculenta* Fr.), el elotillo (*Morchella conica* Pers.), la colmenilla (*Morchella costata* (Vent.) Pers.) y la morilla (*Morchella elata* Fr.), los cuales podrían estar en riesgo productivamente (DOF, 1996).

the same percentage must be exploited, in order to favor their reproduction from the seeds" (DOF, 2003a).

The ideal time for the extraction of pink snowberry is between May and August (Monroy *et al.*, 2007). However, in the study area, it is harvested all year around: in the Buenavista community it is extracted from January to June; in La Peñuela, from May to June, and in San José Contadero, from August to October.

The extraction of moss has not been extended to all the high-mountain forest areas, as it depends on the abundance and quality of the resource, as well as on the accessibility to the extraction areas. The San Bartolo Oxtotitlán ejido has a surface of 1 625 ha, of which 200 were authorized in 2012 for intensive extraction (Semarnat, 2012). The NOM-011-SEMARNAT-1996 norm establishes that: "Moss must be exploited in patches or strips with a maximum width of 2 m, along the contour of the terrain, extracting a maximum of 50 % of the stock in each exploited site, in order to ensure its regeneration. The same site must not be exploited again until it has recovered completely... The exploitation at the edges of roads, rivers, creeks and water bodies in general must be carried out leaving a 2 m wide protective strip in order to prevent erosion problems" (DOF, 2003b).

The extraction of edible mushrooms is regulated by the NOM-010-SEMARNAT-1996 norm, which establishes the procedures, criteria and specifications for the exploitation, transportation and storage of the mushrooms: "The exploitation of mushrooms will be subject to the following criteria and technical specifications: only fruiting bodies will be utilized at the ripe harvesting stage, being identified by their button shape, size and opening, according to the species to be exploited. The dry leaves that cover the mushroom must be removed gently; the fruiting body must be cut at ground level, and the site from which it was extracted must be covered in order to protect the mycelium" (DOF, 1996).

The season for the extraction of the mushrooms tends to vary in terms of the fruiting time of each species, although it is more intense in the summer. According to the data obtained, the mushrooms are harvested mainly for self-consumption, but there is a growing demand in the market. The regulations are little known, and the commercialization of the protected species is carried out illegally, as in the case of the white pine mushrooms (*Tricholoma magnivelare* (Peck) Redhead); pancitas or pambazos (penny buns, *Boletus edulis* Bull., Fr.), the yellow chanterells or duraznillos (*Cantharellus cibarius* Fr.), the morel or chile seco (*Morchella esculenta* Fr.), and the black morels known as elotillo (*Morchella conica* Pers.), colmenilla (*Morchella costata* (Vent.) Pers.) and morilla (*Morchella elata* Fr.), all of which may be productively endangered (DOF, 1996).



Ubicación de los sitios de extracción

Los sitios de extracción de los PFTM están muy ligados con el tipo de bosque. La perilla crece en los linderos del bosque de oyamel, en zonas de disturbio próximas a los caminos y parcelas de cultivo, así como en barrancas con pendientes pronunciadas (Monroy *et al.*, 2007; Matesanz y Valladares, 2009). El musgo se desarrolla en bosques de oyamel con altos grados de humedad (Conabio, 2012). Los hongos crecen en los bosques de pino, encino y, principalmente, oyamel (Franco *et al.*, 2012) donde se ha registrado una mayor variedad y abundancia (Franco y Burrola, 2010).

Características de los PFTM para comercialización

La selección de los recursos para su comercialización depende de las exigencias del comprador del producto. La vara de perilla debe tener un largo mínimo de 1.20 metros, un diámetro mayor a 0.5 cm, coloración marrón oscuro y apariencia de vigorosa, sin rastro de deshidratación o descamación de su corteza. El musgo, color verde bandera o similar, con altura mínima de 2 cm, lozano a la vista, sin hojarasca, semillas u otras especies herbáceas. Los hongos, frescos, sin marcas ni signos de descomposición, deshidratación o exceso de tierra.

Técnicas de extracción

Las técnicas de extracción afectan la propagación y regeneración de los organismos. Hartmann y Kester (1985) indican que el corte de la vara de perilla se tiene que efectuar en forma diagonal para promover tanto el crecimiento de los retoños, como el de la planta. Para la extracción del musgo se identificaron tres técnicas: a) la utilización de un machete para desprenderlo del suelo y obtenerlo lo más limpio posible; b) el uso de un trozo de rafia que se sujeta y se tensa con ambas manos, y se pasa por debajo del musgo para desprenderlo; y c) los dedos para arrancarlo. La extracción de los hongos se realiza de forma manual, trozando su tronco a la altura del suelo (Franco y Burrola, 2010).

Preparación de los PFTM

Los cortadores son, principalmente, hombres (92 %). En el caso de la perilla, una vez cortada, se elaboran rollos de 200 a 220 varas, la cantidad depende de su calidad, si son 200 es porque existe una mayor proporción de material maduro de buena calidad. En ocasiones se incorporan varas jóvenes en el centro del rollo para equiparar el grosor de los mismos de óptima calidad.

El musgo es extraído solo por los hombres. Cuando se tienen las "alfombras", se forman cuadros para introducirlos en cajones de madera de 30 cm de alto por 40 cm de ancho y

Location of the extraction sites

The extraction sites of the NTFPs are closely related to the type of forest. The snowberry grows at the edges of the Sacred fir forests, in disturb areas close to the roads and agriculture plots, as well as in ravines with steep slopes (Monroy *et al.*, 2007; Matesanz and Valladares, 2009). Moss develops in Sacred fir forests with high levels of humidity (Conabio, 2012). Mushrooms grow in the pine, oak and--particularly--Sacred fir forests (Franco *et al.*, 2012), where a larger variety and abundance is found (Franco and Burrola, 2010).

Characteristics of the NTFRs for commercialization

The selection of the resources for commercialization depends on the demands of the buyer. The pink snowberry branches must be at least 1.20 m long, with a diameter of over 0.5 cm, a dark brown color and a vigorous appearance, without signs of dehydration or flaking in their bark. Moss must be of a deep sage green or a similar hue, with minimum 2 cm height, a healthy appearance, without dead leaves, seeds or other herb species. The mushrooms must be fresh, without marks or signs of decay, dehydration or excess dirt.

Extraction techniques

The extraction techniques affect the propagation and regeneration of organisms. According to Hartmann and Kester (1985), snowberry branches must be cut diagonally in order to promote the growth of both the shoots and the plant. Three techniques for the extraction of moss were identified: a) the use of a machete to detach it from the ground and harvest as cleanly as possible; b) the use of a piece of raffia, which is fastened and tensed with both hands and passed underneath the moss in order to detach it, and c) uprooting with the fingers. The mushrooms are pulled out by hand, breaking their stem at ground level (Franco and Burrola, 2010).

Preparation of the NTFPs

The harvesters are mainly men (92 %). In the case of snowberry, after the branches are cut, rolls of 200 to 220 twigs are tied together; the number depends on the quality--if it is 200, this is because there is a larger proportion of high-quality ripe material. Occasionally young twigs are placed at the center of the roll in order to equal the thickness of optimal quality rolls.

Moss is harvested only by men. Once "carpets" have been obtained, squares are formed and placed inside wooden crates measuring 30 cm in height, 40 cm in width and 30 m in length. When the crates are full, the bundles are bound together using branches as supports. Mushrooms are harvested during the early hours of the morning; men, women, adults and

30 cm de largo. Al llenarse el cajón, se ata la paca usando ramas como soporte.

La recolección de hongos inicia a las primeras horas de la mañana, y es una actividad en la que participan indistintamente, hombres, mujeres, adultos y niños. Los hongos recolectados se transportan en canastas o “chiquigüites” para permitir la aireación y evitar su putrefacción, al final de la jornada se clasifican por su nombre común.

Acopio y transporte

La recolección de la vara de perilla se realiza en acuerdo con el empresario y un acopiador local, quien se encarga de reunir la cantidad de rollos requerida. Este define los sitios de carga, la cantidad de rollos por surtir y el costo de la transacción. El ejido de La Peñuela es el único que cuenta con permiso de aprovechamiento de perilla, por parte de la Semarnat, pero el producto extraído en los ejidos de Buenavista y Contadero se comercializa como si fuera parte de dicho permiso, lo que, en sentido estricto, hace ilegal el aprovechamiento en esas dos comunidades. La cantidad de rollos acordada es transportada a las delegaciones políticas de la Ciudad de México para el servicio público de limpieza.

Las pacas de musgo obtenidas en el ejido son apiladas a la orilla de los caminos para que, más tarde, sean recogidas y colocadas en vehículos automotores para su transporte. Los cortadores cargan el material y, al mismo tiempo, registran el total de pacas recolectadas por persona. Los camiones cargados se concentran en un sitio del ejido para salir simultáneamente hacia el lugar de comercialización, ya que la factura de venta debe amparar el total de pacas transportadas.

En el caso de los hongos comestibles, estos se destinan, básicamente, al autoconsumo y en menor medida a la venta. Es una actividad familiar, una vez realizada la separación por tipo de hongo, se llevan para su venta a los mercados locales.

Comercialización de los PFNM

El proceso de comercialización de la vara de perilla depende de la demanda que genere el Gobierno de la Ciudad de México. El gobierno emite licitaciones de perilla para ser surtida en un tiempo determinado. En ellas se establecen las características que debe cumplir la vara; por ejemplo, en la licitación del 2012, el Comité Delegacional de Adquisiciones, Arrendamientos y Prestación de Servicios de la delegación Coyoacán publicó lo siguiente: “Adquisición de vara de perilla de 1.20 a 1.50 m. de altura en tercios y cada tercio se compone de 25 atados y cada atado se compone de 50 varas, para el periodo de enero a junio de 2012, para apoyar los trabajos de barrido manual tradicional en las calles que confinen esta delegación (Coyoacán). Monto a pagar \$5 000 000.00 (cinco millones de

children participate indistinctly. The harvested mushrooms are transported in chiquihuites or baskets to allow airing and prevent rotting. At the end of the day, they are sorted by to their common names.

Storage and transportation

The pink snowberry is harvested in agreement with the business owner and a local stocker, who puts together the required number of rolls. He determines the loading sites, the mount of rolls to be supplied and the cost of the transaction. The *La Peñuela ejido* is the only one with permission by Semarnat to exploit the snowberry. The product harvested in the *Buenavista* and *Contadero ejidos* is commercialized as if it were included in this permit, which, in a strict sense, renders its exploitation illegal. The agreed number of rolls is transported to the political delegations of Mexico City for the public street cleaning service.

The bundles of moss harvested in the *ejido* are piled at the edge of the roads to be picked up later and placed on automotive vehicles for transportation. The harvesters load up the material and at the same time keep record of the total number of bundles collected by each person. The loaded trucks are concentrated at a particular spot in the *ejido* and depart simultaneously toward the place where they will commercialize, as the sales invoice must cover the total number of transported bundles.

In the case of edible mushrooms, these are basically destined to self-consumption and, to a lesser extent, to commercialization. This is a family activity; once the mushrooms have been sorted, they are taken to the local markets to be sold.

Commercialization of NTFPs

The commercialization process of pink snowberry depends on the demand generated by the *Gobierno de la Ciudad de México* (Government of Mexico City, GDF). The government issues tenders for the snowberry to be supplied within a certain time. These tenders establish the characteristics that the twigs must meet. For example, in the 2012 tender, the *Comité Delegacional de Adquisiciones, Arrendamientos y Prestación de Servicios de la delegación Coyoacán* (Purchase, Rental and Service Provision Committee of Coyoacán delegation) published the following: “Purchase of 1.20 to 1.50 m high snowberry twigs in bales, each bale consisting of 25 rolls, and each roll comprising 50 twigs, for the January-June 2012 period, to support the jobs of traditional sweepers who sweep by hand the streets of this delegation (Coyoacán). Sum to be payed: 5 000 000.00 MXN (five million pesos 00/100) for 7 194 bales of snowberry. Coyoacán, Mexico, January 13, 2012” (Anastacio *et al.*, 2015).

This tender established a price of 695.00 MXN per bale. A bale consists of 1 250 twigs, and therefore, a roll of 200

pesos 00/100) por 7 194 tercios de perilla. Coyoacán México a 13 de enero de 2012" (Anastasio *et al.*, 2015).

En tal licitación se estableció un precio de \$695.00 por tercio. Un tercio tiene 1 250 varas por lo que un rollo de 200 varas tenía un valor de \$111.20. Los costos promedio de transporte ascenderían a \$0.64 por rollo y el empresario pagó \$23.00 al acopiador local. Lo anterior significa que el empresario tuvo un ingreso neto por rollo de \$87.56 (78.7 % del valor del rollo vendido al GDF). De los \$23.00 que cobró el acopiador local, pagó \$17.00 por rollo al líder de los cortadores, por lo que recibió un remanente de \$6.00 (5.4 % del valor total del rollo). El líder de los cortadores, a su vez, tuvo que pagar \$10.00 al cortador; por lo tanto, su ganancia fue de \$7.00 (6.3 % del valor total del rollo). El pago a los cortadores representó solo 8.9 % del precio final de la perilla.

En 2013, el precio por rollo varió entre \$10.00 y \$15.00, el cual estuvo en función de su calidad. Un cortador inexperto extraía 10 rollos de baja calidad al día (más varas jóvenes que maduras) para un ingreso de \$100.00; uno experto obtuvo hasta 25 rollos, con una percepción de \$250.00. Cuando el cortador tenía alguna relación familiar, de amistad o compadrazgo, con su líder, este le llegó a pagar hasta \$17.00 por rollo.

La comercialización del musgo responde a la demanda en los mercados locales y regionales. La autorización del ejido para su extracción se otorga al empresario por una cantidad en efectivo, que fija el Comisariado Ejidal. En 2012 y 2013, el pago fue de \$15 000.00 por año. La distribución del valor de la producción fue la siguiente: el ejido obtuvo \$ 3.00 por paca extraída; un cortador, \$1000 por conformar una paca; el líder de cortadores que organizaba, registraba y vigilaba la cosecha ganó \$ 200 por paca; el empresario tuvo una utilidad de \$ 8.00 por paca; y el comerciante de la central de abastos recibió \$ 20.00 por paca. Un camión cargado con 450 pacas de musgo implicó un ingreso de \$1 350.00 para el Comisariado Ejidal; el cortador obtuvo \$ 200.00 por 20 pacas; el líder de cortadores percibió \$ 900 por el total de las pacas; el empresario tuvo un remanente de \$ 3 600.00, y el comerciante de la central ganó \$ 9 000.00.

La comercialización de los hongos comestibles está sujeta, en gran medida, a la oferta del producto y de la demanda que se genere en los mercados locales. No fue posible estimar el flujo de efectivo generado por su aprovechamiento, ya que el valor de la cantidad comercializada está en función de la especie, cuyo precio varía de \$20.00 hasta \$250.00 pesos por kilogramo.

De acuerdo con los recorridos que se hicieron por localidad, se estimó que la extracción anual de hongos fue de poco más de trece toneladas, y de las 165 personas encuestadas, 140 (84 %) recolectaban hongos, principalmente para autoconsumo.

twigs was worth 111.20 MXN. The average transportation costs were of 0.64 MXN per roll, and the business owner paid 23.00 MXN to the local stocker. This implies that the business owner had a net income of 87.56 MNX per roll (78.7 % of the value of the roll sold to GDF). Out of the 23.00 MXN received, the local stocker paid 17.00 MXN per roll to the harvesters' leader, and therefore received a surplus of 6.00 MXN (5.4 % of the total value of the roll). The harvesters' leader, in turn, had to pay 10.00 MXN to the harvester; therefore, his profit was 7.00 MXN per roll (6.3 % of its total value). Payment to the harvesters amounted to a mere 8.9 % of the final price of pink snowberry.

In 2013, the price per roll ranged between 10.00 and 15.00 MXN, according to its quality. An inexperienced harvester extracted 10 poor-quality rolls per day (with more young than ripe twigs) and received an income of 100.00 MXN; an experienced harvester obtained up to 25 rolls per day and earned 250.00 MXN. When the harvester had family or friendship ties with his leader, the latter paid him up to 17.00 MXN per roll.

The commercialization of moss responds to demand by the local and regional markets. The *ejido* grants the business owner authorization to extract the moss in exchange for a sum in cash, established by the Commissioner of the Communal Lands. In 2012 and 2013, the payment received annually by the *ejido* was 15 000.00 MXN. The production value was distributed as follows: the *ejido* obtained 3 MXN per extracted bundle; each harvester received 10.00 per bundle; the harvesters' leader who organized, recorded and oversaw the harvest earned 2 MXN per bundle; the business owner had a profit of 8 MXN per bundle, and the shopkeeper at the wholesale market received 20 MXN per bundle. A truck loaded with 450 bundles implied an income of 1 350.00 MXN for the Commissioner of the Communal Lands; the harvester earned 200 MX for 20 bundles; the harvesters' leader earned 900 MXN for the total of bundles; the business owner had a surplus of 3 600 MXN, and the shopkeeper at the wholesale market earned 9 000 MXN.

The commercialization of edible mushrooms is subjected, to a large extent, to the supply of the product and to the demand generated in the local markets. It was not possible to estimate the cash flow generated as a result of its exploitation, since the value of the commercialized amount is determined by the species, with prices ranging between 20 and 250 MXN per kilogram.

Based on the rounds made in each locality, it was estimated that a little over thirteen tons of mushrooms were harvested annually, and 140 (84 %) of the 165 interviewees harvested mushrooms mainly for self-consumption. The communities where this activity was most prevalent were: *Raíces*, *Agua Blanca*, *La Peñuela*, *Buenavista* and *Loma Alta* (Table 1). 77 mushroom species of

Las comunidades que más se dedican a esta actividad fueron: Raíces, Agua Blanca, La Peñuela, Buenavista y Loma Alta (Cuadro 1). En el estudio se identificaron 77 especies de hongos silvestres comestibles en el APFFNT, aunque por familia se recolectan en promedio cinco taxa (Franco *et al.*, 2012; Franco y Burrola, 2010).

edible wild mushrooms were identified at NTFFPA in the study, although an average of five taxa were harvested by each family (Franco *et al.*, 2012; Franco and Burrola, 2010).



Cuadro 1. Extracción de hongos comestibles por localidad en 2008.

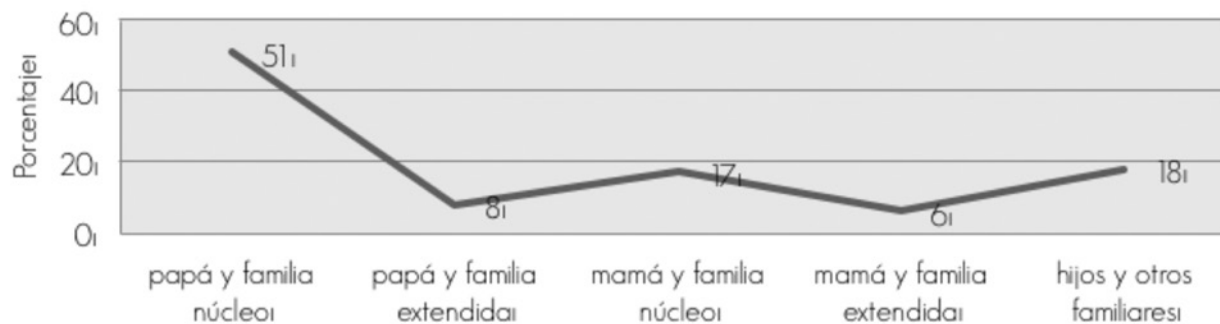
Localidad	Recolectores	Especies recolectadas	Total de viajes de recolección	Viajes por recolector	Total recolectado kg	Total recolectado por recolector kg
Agua Blanca	16	5.2 ± 2.6	520	32.5 ± 16.8	2 912	182.0 ± 222.0
Buenavista	16	5.2 ± 2.4	220	13.8 ± 12.6	1 716	107.3 ± 201.3
Contadero	28	5.1 ± 2.7	247	8.8 ± 13.3	889	31.8 ± 82.3
El Varal	6	4.7 ± 3.0	164	27.3 ± 21.7	564	94.0 ± 87.0
La Peñuela	14	4.8 ± 3.3	293	20.9 ± 15.5	1 223	87.4 ± 104.0
La Puerta	13	5.7 ± 2.8	257	18.8 ± 14.3	588	45.2 ± 34.8
Loma Alta	14	7.6 ± 4.1	442	31.6 ± 26.6	1 093	78.1 ± 53.4
Raíces	26	5.7 ± 3.2	529	20.3 ± 22.6	3 952	152.0 ± 278.6
San Román	4	9.3 ± 9.2	78	19.5 ± 7.5	654	163.5 ± 229.4
Total/Promedio	137	5.7 ± 3.5	2750	20.1 ± 19.7	1 3591	99.2 ± 180.8

Table 1. Extraction of edible mushrooms per locality in 2008.

Locality	Harvesters	Harvested species	Total number of harvesting trips	Trips per harvester	Total amount harvested kg	Total amount harvested by each harvester kg
<i>Agua Blanca</i>	16	5.2 ± 2.6	520	32.5 ± 16.8	2912	182.0 ± 222.0
<i>Buenavista</i>	16	5.2 ± 2.4	220	13.8 ± 12.6	1716	107.3 ± 201.3
<i>Contadero</i>	28	5.1 ± 2.7	247	8.8 ± 13.3	889	31.8 ± 82.3
<i>El Varal</i>	6	4.7 ± 3.0	164	27.3 ± 21.7	564	94.0 ± 87.0
<i>La Peñuela</i>	14	4.8 ± 3.3	293	20.9 ± 15.5	1223	87.4 ± 104.0
<i>La Puerta</i>	13	5.7 ± 2.8	257	18.8 ± 14.3	588	45.2 ± 34.8
<i>Loma Alta</i>	14	7.6 ± 4.1	442	31.6 ± 26.6	1093	78.1 ± 53.4
<i>Raíces</i>	26	5.7 ± 3.2	529	20.3 ± 22.6	3952	152.0 ± 278.6
<i>San Román</i>	4	9.3 ± 9.2	78	19.5 ± 7.5	654	163.5 ± 229.4
Total/Average	137	5.7 ± 3.5	2750	20.1 ± 19.7	13591	99.2 ± 180.8

El porcentaje mayor de aprovechamiento se obtuvo cuando los padres de familia fungen como guías en la extracción, seguido del grupo liderado por los hijos y las madres (Figura 2).

The highest percentage of utilization results when the heads of the family serve as guides in the harvesting, leading the children and their mothers (Figure 2).



La familia núcleo se refiere a que los mismos integrantes de la familia directa realizan la colecta, y la familia extendida es cuando, además de la familia núcleo, se considera a la familia política, amigos y vecinos.
 The term "nuclear family" refers to harvesting by the members of the direct family; the term "extended family" refers to participation not only by the nuclear or direct family but also by in-laws, friends and neighbors.

Figura 2. Porcentaje de extracción de hongos comestibles por grupos en las localidades de estudio, 2008.

Figure 2. Percentage of extraction of edible mushrooms by groups in the study locations, 2008.

Los actores sociales en el aprovechamiento de los PFNM

Se identificaron tres grupos de actores sociales que participan en el aprovechamiento de los PFNM: a) sector gubernamental e instituciones, b) empresarios e intermediarios, y c) población local.

La población local debería ser el sujeto primordial de la gobernanza y de la conservación de sus recursos naturales, pero frecuentemente no es el más importante en el aprovechamiento de los mismos; como lo plantea Leff (2010), la toma de decisiones suele recaer en otros actores.

La gobernanza de los recursos debe definirse por sus dueños con el apoyo de las instituciones gubernamentales (Semarnat, Profepa, Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno del Estado de México) o de algún otro actor social que pueda involucrarse (universidades, organizaciones no gubernamentales, profesionistas u otros) para que el aprovechamiento sea sustentable y con ello se garantice la regeneración de las poblaciones vegetales, y se realice de acuerdo a las leyes, las NOM y la manifestación de impacto ambiental (MIA). Tampoco se puede excluir a los cortadores que viven de ello o a los empresarios que obtienen las mayores ganancias. El término inglés de *Stakeholder* define mejor a los actores sociales con algún interés o responsabilidad en la conservación de los recursos naturales.

De acuerdo con Hasan (2001), la pobreza, la falta de conocimiento sobre la importancia ecológica, el desinterés, la desorganización y la falta de apoyo económico son las posibles causas de que personas ajenas a las comunidades se beneficien del uso de los recursos. En el caso del aprovechamiento y comercialización del musgo y la perilla son las particularidades del mercado las que determinan la baja participación y el poco interés de la población local.

Social stakeholders in the exploitation of NTFPs

Three groups of social stakeholders who participate in the exploitation of NTFPs were identified: a) governmental sector and institutions, b) businesspersons and intermediaries, and c) the local population.

The local population should be the primary subject of governance and of the preservation of the natural resources; however, it does not often have a key position in the exploitation of these resources; as Leff (2010) points out, decision making often falls on other stakeholders.

Governance of the resources must be defined by their owners with the support of governmental institutions (Semarnat, Profepa, *Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno del Estado de México* (Department of the Environment of the Government of the State of Mexico) or of any other social stakeholder involved (universities, non-governmental organizations, professionals or others) in order for the exploitation to be sustainable and to thereby ensure the regeneration of vegetal populations as well as compliance with the laws, the NOM norms and Environmental Impact Statement (EIS). Neither the harvesters who make their living on this exploitation nor the business owners who obtain the largest profits can be excluded. The term "stakeholders" is the one that best defines the social agents with an interest or responsibility in the preservation of natural resources.

According to Hasan (2001), poverty, lack of interest, disorganization, lack of financial support and lack of knowledge of the ecological importance of these resources, may be causing the profits from their utilization to go to people who are alien to the community. In the case of the exploitation and commercialization of moss and pink snowberry, the particularities of the market determine the low participation and the lack of interest of the local population.

En un estudio realizado por la Organización Internacional de las Maderas Tropicales (ITTO) sobre la utilización sostenible y comercialización de un grupo seleccionado de PFNM para apoyar la industria artesanal y el desarrollo de las comunidades rurales (Filipinas), se indica que, pese a existir varios actores sociales en el proceso, solo unos pocos de ellos están presentes en la comercialización de sus productos. En el caso de Filipinas, los habitantes no cuentan con otra fuente de ingresos, ni los medios necesarios para cumplir otro rol en el aprovechamiento de los recursos. Y quienes poseen el conocimiento para difundir los productos son los que obtienen una mayor ganancia económica (ITTO, 2012). En las comunidades estudiadas, el aprovechamiento de PFNM es una actividad complementaria que podría significar un ingreso adicional para los habitantes de la región, pero que no incide de manera significativa en sus condiciones de subsistencia. En tales circunstancias, dadas las particularidades del mercado, resulta una actividad poco atractiva para ellos.

El aprovechamiento de los RFNM es muy desigual. El de la perilla y sobre todo el del musgo se ajustan a lo señalado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2004), en el sentido de que existen comunidades donde los habitantes no realizan directamente la extracción, y no ejercen la gobernanza adecuada para la conservación de los recursos. Los actores privados externos se organizan para explotarlos y se apropian del mayor valor de la producción.

La extracción de hongos comestibles sigue siendo una actividad familiar que beneficia a las comunidades, aunque esta situación ha cambiado en los últimos años, como resultado del incremento de la demanda por la población de las grandes ciudades.

La recolección debería ajustarse a la temporalidad ecológica, regeneración y productividad de cada recurso, la cual no siempre corresponde con los ciclos económicos regidos por la demanda, ni por los procesos sociales y culturales que los contraponen (Leff, 1995). En el caso de la perilla su aprovechamiento no se limita al mejor momento de su calendario fenológico. En el musgo responde a la demanda navideña en las zonas urbanas del Estado de México y Ciudad de México. Para los hongos comestibles, está en función de la temporada de lluvias.

El Artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos señala que: "La nación tendrá en todo tiempo el derecho de imponer a la propiedad privada las modalidades que dicte el interés público, así como el de regular, en beneficio social, el aprovechamiento de los elementos naturales susceptibles de apropiación, con objeto de hacer una distribución equitativa de la riqueza pública, cuidar de su conservación, lograr el desarrollo equilibrado del país y el mejoramiento de las condiciones de vida de la población rural y

A study by the International Tropical Timber Organization (ITTO) on the sustainable utilization and commercialization of a selected group of NTFPs to support the artisanal industry and the development of the rural communities (in the Philippines) points out that, although various social stakeholders are involved in the process, only a few participate actively in the commercialization of their products. In the case of the Philippines, the inhabitants do not have any other source of income or the necessary means to perform any other role in the utilization of the resources. And those who do have the knowledge required to disseminate the products are the ones who obtain the largest profits (ITTO, 2012). In the studied communities, the exploitation of NTFPs is a complementary activity that may involve additional income for the inhabitants of the region, but which do not have a significant impact on their livelihood conditions. Under such circumstances, given the particularities of the market, this activity has little appeal for them.

The exploitation of NTFPs is very variable. That of pink snowberry and, above all, of moss, coincides with the statement of the United Nations' Food and Agriculture Organization (FAO, 2004) in the sense that there are communities whose inhabitants do not extract the resources directly and do not exercise the adequate governance for their preservation. External private stakeholders organize themselves to exploit these resources and appropriate the largest part of the production value.

The extraction of edible mushrooms continues to be a family activity that benefits the communities, although this situation has changed in the last few years as a result of the increase in the demand for the population of large cities.

The harvesting should adjust to the ecological temporality, regeneration and productivity of each resource, which do not always correspond to the economic cycles ruled by the demand, or to the social and cultural processes that oppose to them (Leff, 1995). As for the snowberry, its exploitation is not limited to the best time according its phenologic calendar. The harvesting of moss responds to the demand in the urban areas of the State of Mexico and Mexico City during Christmastime. And the harvesting of edible mushrooms is determined by the rainy season.

Article 27 of the Political Constitution of the Mexican United States points out that: "The nation shall at all times have the right to impose upon private property the modalities dictated by the public interest, as well as to regulate, for social well-being, the exploitation of the natural elements that are susceptible of appropriation, in order to carry out an equitable distribution of public wealth, to watch over its preservation, and to achieve balanced development of the country and the improvement of the living conditions of the rural and urban populations" (Segob, 2016). The governmental institutions do not always comply with

urbana" (Segob, 2016). Las instituciones gubernamentales no siempre cumplen con este precepto constitucional, ni propician que los actores sociales involucrados participen en el buen uso y conservación de los recursos naturales.

En el presente trabajo se observó que la Semarnat no da seguimiento a la recolección de hongos, ni de perllilla para verificar el cumplimiento de la normatividad. En cuanto al musgo, sí se supervisa el proceso, lo cual puede explicarse por su corta temporalidad.

Las comunidades rurales poseedoras de los bosques juegan un papel clave en las condiciones de conservación de los recursos (Merino, 2004). En la investigación que se documenta se observó que la población local no mostró interés por realizar el aprovechamiento del musgo ni de la perllilla. Esto se debe a que se dedican a otras actividades, desconocen el mercado y no hay mecanismos organizativos internos de los ejidos y localidades para realizar la extracción. Ante tal desinterés, se permite que agentes externos lo hagan a cambio de una cantidad de dinero, por ejemplo, en 2013 el empresario pagó \$8 000.00 por la extracción de perllilla. Cantidad que se destinó a "obras comunitarias" y "gastos del Comisariado Ejidal". Si se hubiera distribuido entre los más de 300 ejidatarios habría representado un ingreso per cápita ínfimo. En el caso del musgo, se constató que la comunidad cedió el aprovechamiento del recurso a empresarios, quienes no emplean a los pobladores locales, por lo que el beneficio para la comunidad se redujo al pago que se hizo al Comisariado Ejidal por el permiso para la extracción (\$15 000.00), cuyo monto tampoco se repartió entre los ejidatarios y quedó para "obras sociales".

Un hallazgo importante fue que las comunidades no ejercen una gobernanza adecuada y ceden el aprovechamiento a externos, que extraen los recursos sin una buena supervisión, lo que pone en riesgo la regeneración de las poblaciones de perllilla y musgo. En el aprovechamiento de los hongos, tampoco existe supervisión por parte de las autoridades ejidales o de otro tipo. Aunque, no hay evidencias que demuestren que la recolección de los esporomas pone en riesgo la conservación de las especies.

De acuerdo con Requena (2014), el éxito en la gobernanza de los recursos naturales implica la participación de actores no solo a nivel local, como son las comunidades, sino también las instituciones, como son las entidades del gobierno estatal y federal. Para el musgo y perllilla, se observa la ausencia de la gobernanza para su aprovechamiento sustentable, en la cual hay una gran responsabilidad de las instituciones gubernamentales en todos sus niveles, porque son quienes tienen la función de vigilar que la ley y las normas legales se apliquen. Ello, sin mencionar la responsabilidad de que las generaciones actuales cubran sus necesidades sin poner en riesgo la satisfacción de las generaciones futuras.

this constitutional precept, nor do they favor the engagement of the social stakeholders in the proper use and preservation of the natural resources.

In the present study it was observed that Semarnat does not monitor the harvesting of mushrooms or of pink snowberry to ensure that it is carried out according to the regulations. As for moss, the process is monitored, probably because of its short temporality.

The rural communities that own the forests play a key role in the conditions for the preservation of the resources (Merino, 2004). In the documented research, the local population was observed not to show interest in exploiting moss or pink snowberry. This is because they devote themselves to other activities, they have no knowledge of the market, and no internal organizational mechanisms of the *ejidos* and localities exist to carry out the extraction. As a result of this lack of interest, external stakeholders are allowed to perform it in exchange for a sum of money; for example, in 2013 the business owner paid 8 000 MXN for the extraction of pink snowberry. This sum was destined to "community projects" and "expenses of the Commissioner of the Communal Lands". If it had been distributed among the more than 300 communal land holders, it would have been a minimal income per capita. In the case of moss, we verified that the community ceded the exploitation of the resource to business owners, who do not hire locals, and therefore the profits for the community amounted only to the payment made to the Commissioner of the Communal Lands for the extraction permit (15 000 MXN); this sum was also not distributed among the communal land holders and was left over for "social projects".

An important finding was that communities do not exercise adequate governance and they hand over the exploitation to outsiders, who extract the resources without proper supervision; this endangers the regeneration of the snowberry and moss populations. In the exploitation of mushrooms there is also no supervision by communal or other authorities. However, there is no evidence that the harvesting of the sporomes endangers the preservation of the species.

According to Requena (2014), success in the governance of natural resources entails participation by the stakeholders not only at a local level, such as communities, but also in institutions, such as the agencies of the state and federal governments. In the case of moss and the pink snowberry, we observe the absence of governance for their sustainable exploitation, which involves great responsibility of the governmental institutions at every level, as these are in charge of guaranteeing the application of laws and legal regulations, not to mention the responsibility of ensuring that the present generations will meet their needs without endangering the ability of future generations to satisfy theirs.

El análisis comparativo en el aprovechamiento de los PFNM implica considerar diversos aspectos de carácter natural (temporalidad), social (uso, género, nivel de participación de la comunidad y los actores sociales) y económico (tipo de mercado y canales de distribución).

El mercado de PFNM

El corte de la vara de perilla para la elaboración de escobas rústicas se lleva a cabo durante todo el año, sin respetar las etapas de semillación (de marzo a junio), floración (julio a septiembre) y fructificación (octubre a febrero) que establece el calendario fenológico de la especie. El corte respeta el porcentaje establecido en las normas, no así las recomendaciones sobre las técnicas de corte. Predominan los hombres y el nivel de participación de la localidad se limita a algunos cortadores y líderes locales (Comisariado Ejidal y los miembros de la Asamblea Ejidal) que otorgan el permiso para el aprovechamiento. La venta de perilla corresponde a un mercado de tipo monopsonio, con un comprador único (Gobierno de la Ciudad de México). Se trata, por tanto, de un monopolio como comprador que impone sus condiciones a los vendedores, debido a su influencia y su poder económico (Ávila, 2004). Como lo señala Sainz (2001), el canal de distribución es de tipo indirecto, corto, con la presencia de intermediación (acopiador local y empresario) entre el dueño del recurso y el consumidor final.

La extracción de musgo corresponde a una temporalidad corta. El total de la producción se vende a mayoristas de la Central de Abastos de la Ciudad de México. La extracción del recurso respeta la normatividad vigente, en términos de condiciones de las plantas, porcentaje de corte y procedimiento de corte. La actividad está a cargo de trabajadores del género masculino. Los actores sociales externos establecen contacto con el Comisariado Ejidal para gestionar la autorización y pagar los derechos de extracción que estipula la Asamblea Ejidal. La venta de musgo es de tipo oligopsonio, con un número muy reducido de compradores que definen el precio del producto (Ávila, 2004). Su canal de distribución es mayorista, con la presencia de al menos dos intermediarios entre el productor y el consumidor final. En muchos de los casos los mayoristas se vuelven especializados, dependiendo de la oferta de los recursos (Sainz, 2001).

Los hongos, se recolectan durante la temporada de lluvias (mayo a octubre). De las 77 especies citadas para el Nevado de Toluca, únicamente, dos están en la lista de especies protegidas: *pancitas* (*Boletus edulis*) y *elotitos* (*Morchella elata*) (Franco *et al.*, 2012). El principal destino de los hongos comestibles es el autoconsumo con tendencia creciente a la venta. Es una actividad extractiva de tipo familiar, en la que participan hombres, mujeres y niños.

The comparative analysis in the exploitation of NTFPs takes into account various aspects: natural (temporality), social (use, gender, level of participation by the community and social stakeholders) and economic (type of market and distribution channels).

The NTFP market

The harvesting of snowberry twigs for the manufacture of rustic brooms occurs almost throughout the year, without respecting the seeding (March to June), blooming (July to September) or fruiting (October to February) seasons established by the phenologic calendar of the species. The cutting complies with the percentage established by the norms, not so the recommendations on cutting techniques. The harvesting is carried out predominantly by men, and the level of participation by the locals is limited to a few harvesters and local leaders (Commissioner of the Communal Lands and the members of the Communal Land Holders' Assembly) who grant permission for its exploitation. The sale of the pink snowberry corresponds to a monopsonic market, with a single buyer (the Government of Mexico City). It is therefore a buyer's monopoly which imposes its conditions upon the sellers due to its influence and its economic power (Ávila, 2004). As Sainz (2001) points out, the distribution channel is indirect, short, with intermediaries (the local stocker and the business owner) between the owner of the resource and the final consumer.

The extraction of moss corresponds to a short temporality. The entire production is sold to shopkeepers of the Mexico City Wholesale Market. The extraction of the resource complies with the regulations currently in force, in terms of the conditions of the plants, percentage of cutting, and cutting procedure. The activity is in charge of male workers. The external social stakeholders establish contact with the Commissioner of the Communal Lands in order to manage authorization and pay for the extraction rights established by the Communal Land Holders' Assembly. The sale of moss is an oligopsony, with a very small number of buyers who determine the price of the product (Ávila, 2004). Its distribution channel is through wholesale, with at least two intermediaries between the producer and the final consumer. In many cases, the wholesalers become specialized, depending on the supply of the resources (Sainz, 2001).

The mushrooms are harvested during the rainy season (May to October). Of the 77 species cited for Nevado de Toluca, only two are included in the list of protected species: *pancitas* (penny buns, *Boletus edulis*) and *elotitos* (black morels, *Morchella elata*) (Franco *et al.*, 2012). The main destination of edible mushrooms is self-consumption, with a growing tendency toward their commercialization. It is a family extractive activity in which men, women and children participate.

Unlike the extraction of snowberry twigs and moss, which notably are remunerated activities, the harvesting of

A diferencia de la extracción de vara de perilla y musgo, actividades eminentemente remuneradas, la recolecta de hongos no implica un ingreso económico y suele realizarse de manera esporádica, en función de la disponibilidad de tiempo de los miembros de las familias locales. Cuando los hongos son comercializados, su venta corresponde a un mercado de tipo oligopsonio y el canal de distribución suele ser directo del recolector al consumidor final y, eventualmente, a comerciantes locales (Sainz, 2001).

En los últimos años, se ha incrementado la demanda de hongos, lo cual ha propiciado la aparición de cadenas de distribución (detallista y mayorista) en las cuales es posible identificar la intervención de un acopiador (detallista) o mayorista con la intervención de dos intermediarios más (Miquel, 2008), o la presencia de un acopiador local que posteriormente los comercializará en la ciudad de Toluca.

Conclusiones

Las comunidades dueñas de los bosques de montaña alta del centro de México no están ejerciendo la gobernanza de sus recursos forestales, carecen de interés en su aprovechamiento sustentable, tampoco tienen una organización propia para la extracción directa de perilla, ni de musgo. Estos dos PFMN están siendo aprovechados a través de procesos de organización social dominados por agentes sociales externos (empresarios), quienes se quedan con el mayor beneficio económico; en tanto que, los pobladores locales tienen un beneficio mínimo o nulo. Hay poco control sobre los grupos de cortadores, por parte de la población local y de las instituciones gubernamentales, lo que pone en riesgo la regeneración de las especies.

La extracción de hongos comestibles, originalmente, se realizaba por las familias locales para su autoconsumo, pero se está transformando a una actividad destinada a la venta en mercados regionales y nacionales. Su aprovechamiento no es supervisado por autoridades locales o por la Semarnat, aunque a la fecha, la presión sobre el recurso es baja.

La Semarnat y otros organismos gubernamentales se concretan a la aprobación de los permisos de extracción y darle seguimiento administrativo, pero no verifican el cumplimiento de las normas, lo que puede conducir a que los recolectores dañen los recursos in situ, por malas técnicas de corte o por extracción excesiva.

La gobernanza sobre los recursos naturales no es una prerrogativa única de las comunidades dueñas de los recursos. La sustentabilidad y conservación de los recursos requiere de la participación de un conjunto de actores sociales (*stakeholders*) como son las instituciones gubernamentales en todos los niveles, los profesionistas, las ONG, los académicos de

mushrooms does not generate an income and is carried out sporadically, according to the time availability of the members of local families. When the mushrooms are commercialized, they are sold in an oligopsonic market, and the distribution channel is usually direct—from the harvester to the final consumer and, eventually, to the local shopkeepers (Sainz, 2001).


In recent years, the demand of mushrooms has increased, favoring the emergence of distribution chains (retailers and wholesalers) in which it is possible to identify the intervention of a stocker (retailer) or a wholesaler with the intervention of two other intermediaries (Miquel, 2008), or the presence of a local stocker who will later commercialize them in the city of Toluca.


Conclusions

The communities that own the high-mountain forests of central Mexico are not exercising the governance of their forest resources, in whose sustainable exploitation they are not sufficiently interested; they also lack an organization of their own for the direct extraction of pink snowberry or moss. These two NTFPs are being exploited through social organization processes dominated by external social stakeholders (business owners), who keep the largest economic profits, while the profits for the local population are minute or non-existent. There is little monitoring of the groups of harvesters by the local population and of the governmental institutions, a situation that endangers the regeneration of the species.

Edible mushrooms were originally extracted by local families solely for self-consumption, but the harvesting of these species is becoming a commercial activity directed to regional and national markets. Their exploitation is not monitored by local authorities or by Semarnat; however, pressure on the resource is low so far.

Semarnat and other government organisms restrict themselves to the approval of extraction permits and to their administrative follow-up, but they do not verify compliance with the norms; this may lead to harvesters damaging the resources in situ due to poor cutting techniques or to excessive extraction.

Governance over natural resources is not a unique prerogative of the communities that own them. The sustainability and preservation of the resources requires the participation of a series of social stakeholders, such as governmental institutions at all levels, professionals, NGOs, university academics, harvesters, business owners, and all those who may have a vested interest or responsibility in the status of natural resources. However, both the owners and the State have unavoidable responsibilities for the preservation of natural resources, given that these are a subject of interest for the present society as a whole and a heritage for the future generations. 

las universidades, los recolectores, los empresarios y todos aquellos que pudieran tener cualquier interés o responsabilidad sobre el estado de los recursos naturales. Sin embargo, las responsabilidades de los dueños y del Estado son ineludibles para la conservación de los recursos naturales, por ser una materia de interés del conjunto de la sociedad actual como legado para las generaciones futuras. 

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses

Contribución por autor

Nancy Diana Anastacio Martínez: definición del tema de investigación, selección de unidades de estudio y levantamiento de información de campo, análisis de los datos y estructuración del documento; Sergio Franco Maass: selección de zonas de estudio, estructuración del manuscrito y revisión y análisis de los datos, particularmente lo referente a los Hongos Silvestres Comestibles; Estaban Valtierra Pacheco: asesoría en los trabajos de levantamiento de información en campo, análisis de los datos particularmente en lo referente a los procesos de extracción de vara de perilla y revisión del manuscrito; Gabino Nava Bernal: análisis de los datos y revisión del documento en lo referente a los procesos de extracción del musgo.

Referencias

- Anastacio, N., Valtierra, E., Nava, G. y Franco, S. 2015. Extracción de perilla (*Symphoricarpos microphyllus* HBK.) en el Nevado de Toluca. *Madera y Bosques* 21(2): 103-115.
- Arana, Y., C. Burrola, R. Origel, y S. Franco. 2014. Obtención de cepas y producción de inóculo de cinco especies de hongos silvestres comestibles de alta montaña en el centro de México. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 20(3):213-226.
- Ávila, L. 2004. Introducción a la economía. Apuntes Núm. 31. Escuela Nacional de Estudios Profesionales Aragón, Universidad Nacional Autónoma de México. 3ª ed. Plaza y Valdés. México, D.F., México. 393 p.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio). 2012. Mugas, hepáticas y antoceros. Conabio. http://www.biodiversidad.gob.mx/especies/gran_familia/plantas/musgos/musgos.html (9 de junio de 2015).
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio). 1995. Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad. Conabio. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/> (1 de junio de 2015).
- Comisión Nacional Forestal (Conafor). 2010. Catálogo de recursos forestales maderables y no maderables, áridos, tropicales y templados Semarnat. http://www.conafor.gob.mx/biblioteca/Catalogo_de_recursos_forestales_M_y_N.pdf (9 de junio de 2015).
- Coronel M. y M. Pulido. 2011. ¿Es posible conservar y usar la palma *Brahea dulcis* (Kunth) Mart. en el estado de Hidalgo, México? *In: Manual de herramientas etnobotánicas relativas a la conservación y el uso sostenible de los recursos vegetales. Red Latinoamericana de Botánica* (1): 103-110.
- De Beer, J. and J. Mc Dermott. 1989. The economic value of non-timber forest products in SE Asia. 2nd Edition. Netherlands Committee for the IUCN. Amsterdam, The Netherlands. 157 p.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). 1937. Decreto que reforma, deroga y adiciona diversas disposiciones del diverso publicado el 25 de enero de 1936, por el que se declaró Parque Nacional la montaña denominada "Nevado de Toluca" que fue modificado. *Semarnat*. 19 de febrero de 1937. México, D.F., México. pp. 47-62.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). 1996. NOM-010-SEMARNAT-1996. Que establece los procedimientos, criterios y especificaciones para realizar el aprovechamiento, transporte y almacenamiento de hongos. 28 de mayo de 1996. México, D.F., México. 28 p.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). 2003a. NOM-005-SEMARNAT-1997. Que establece los procedimientos, criterios y especificaciones para realizar el aprovechamiento, transporte y almacenamiento de corteza, tallos y plantas completas de vegetación forestal. *Semarnat*. 23 de abril de 2003. México, D.F., México. 31 p.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). 2003b. NOM-011-SEMARNAT-1996. Que establece los procedimientos, criterios y especificaciones para realizar el aprovechamiento, transporte y almacenado de musgo, heno y doradilla. *Semarnat*. 23 de abril de 2003. México, D.F., México. 5 p.
- Endara, A., R. Calderón, G. Nava and S. Franco. 2013. Analysis of fragmentation processes in High-mountain forest of the Centre of México. *American Journal of Plant Sciences* 4(3):697-204.
- Food and Agriculture Organization (FAO). 2004. Categorías de los productos forestales no maderables. FAO. <http://www.fao.org/documents/es/detail/155970> (25 de febrero de 2015).
- Franco, S. y C. Burrola. 2010. Los hongos comestibles del Nevado de Toluca. Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, Edo. de Méx., México. 147 p.
- Franco, S., C. Burrola y Y. Arana. 2012. Hongos silvestres comestibles: un recurso forestal no maderable del Nevado de Toluca. Ediciones y Gráficos Eón. Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, Edo. de Méx., México. 342 p.
- Gobierno del Distrito Federal (GDF). 2012. Adquisición de varada de perilla. Comité Delegacional de Adquisiciones, Arrendamientos y Prestación de Servicios. Delegación Coyoacán. México, D.F., México. 4 p.
- Gobierno del Estado de México (GEM) Gobierno. 2014. Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Jiquipilco. Periódico Oficial del Gobierno Constitucional del Estado de México. Gobierno del Estado de México. <http://legislacion.edomex.gob.mx/sites/legislacion.edomex.gob.mx/files/files/pdf/gct/2004/feb273.pdf> (9 de septiembre de 2014).

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Contribution by author

Nancy Diana Anastacio Martínez: definition of the research topic, selection of study units and survey of field information, analysis of data and structuring of the document; Sergio Franco Maass: selection of study units, structuring of the manuscript and review and analysis of the data, particularly with regard to edible wild mushrooms; Estaban Valtierra Pacheco: supervision of the field work, analysis of the data, particularly in relation to the processes of extraction of "perilla" stick and revision of the manuscript; Gabino Nava Bernal: analysis of the data and revision of the document in relation to the processes of extraction of moss.

End of the English version



- Hartmann, I. y D. Kester. 1985. Propagación de plantas. CECSA. México, D.F., México. 760 p.
- Hasan, M. 2001. La pobreza rural en los países en desarrollo. Su relación con la política pública. Fondo Monetario Internacional. Washington, DC, USA. 27 p.
- International Tropical Timber Organization (ITTO). 2012. Project technical report: Assessment of marketing of non-timber forest products, Los Baños, Laguna Philippines. Proyecto pd448-07: Utilización sostenible y comercialización de un grupo seleccionado de productos forestales no maderables para apoyar a la industria artesanal y el desarrollo de las comunidades Rurales (Filipinas), ITTO. http://www.itto.int/files/user/pdf/PROJECT_REPORTS/Assessment%20of%20Marketing%20NTFPs%20-%20PD%20448-07%20R2%20I.pdf (14 de marzo de 2016).
- Lara, V., A. Romero y C. Burrola. 2013. Conocimiento tradicional sobre los hongos silvestres en la comunidad otomí de San Pedro Arriba, Temoaya, Estado de México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo* 10: 305-333.
- Leff, E. 1995. ¿De quién es la naturaleza? Sobre la reapropiación social de los recursos naturales. *Gaceta Ecológica* 37: 28-35.
- Leff, E. 2010. *Discursos Sustentables*. 2ª ed. Siglo XXI Editores. México, D.F., México. 270p.
- Levy, S., R. Aguirre, M. Martínez y A. Durán. 2002. Caracterización del uso tradicional de la flora espontánea en la comunidad lacandona de Lacanhá, Chiapas, México. *Interciencia* 27 (10):512-520.
- Martínez, A., V. Francisco, M. Mendoza y A. Cruz. 2007. Flora útil de los cafetales en la sierra norte de Puebla, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 78: 15-40.
- Martínez, R., M. González, M. Pérez, P. Quintana y L. Ruiz. 2011. Evaluación del aprovechamiento foliar en *Chamaedorea quezalteca* Standl. & Steyerl. (Palmae), en la reserva de la biosfera el Triunfo, Chiapas, México. *Agrociencia* 45(4): 507-518.
- Martínez, I., M. Rubí, A. González, D. Pérez, O. Franco y A. Castañeda. 2015. Frutos y semillas comestibles en el Estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 6 (2): 331-346.
- Matesanz, S. y F. Valladares. 2009. Plantas ruderales. *Ciencia y Sociedad* 390: 10-11.
- Mendoza, C., M. López, D. Rodríguez, A. Velázquez y F. García. 2012. Crecimiento de la vara de perilla (*Symphoricarpos microphyllus* HBK) en respuesta a la fertilización y altura de corte. *Agrociencia* 46 (7): 719-729.
- Mendoza, B., F. García, D. Rodríguez y S. Castro. 2011. Radiación solar y calidad de planta en una plantación de vara de perilla (*Symphoricarpos microphyllus* HBK). *Agrociencia* 45(2): 235-243.
- Merino, L. 2004. Conservación o deterioro. El impacto de las políticas públicas en las instituciones comunitarias y en los usos de los bosques en México. Semarnat, INECOL, CCMSS. México, D.F., México. 320 p.
- Miquel, S., F. Parra, C. Lhermie y J. Miquel. 2008. *Distribución comercial*. 6ª ed. ESIC. Madrid, España. 487p.
- Monroy, R., G. Castillo y H. Colín. 2007. La perilla o perilla *Symphoricarpos microphyllus* H.B.K. (Caprifoliaceae) especie no maderable utilizada en una comunidad del Corredor Biológico Chichinutzin. *Morelos, México. Polibotánica* 23: 23-36.
- Montañez, M., E. Valtierra y S. Medina. 2011. Aprovechamiento tradicional de una especie protegida (*Litsea glaucescens*) en Sierra de Laurel. *Aguascalientes, México. Ra Ximhai* 7(2): 155-172.
- Requena, C. 2014. *Gobernanza. Reto de la relación Estado-Sociedad*. IID Editorial Mexicana. México, D.F., México. 166p.
- Sainz, V. 2001. *La distribución comercial: opciones estratégicas*. ESIC. Madrid, España. 497 p.
- Sánchez, D. y E. Valtierra. 2003. La organización social para el aprovechamiento de la palma camedor (*Chamaedorea* spp.) en la selva Lacandona, Chiapas. *Agrociencia* 37 (5): 545-552.
- Secretaría de Gobernación (Segob). 2016. Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. Dirección General Adjunta del Diario Oficial de la Federación. XXII edición. México, CDMX, México. pp. 53-64.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). 2014. Anuario Estadístico de la Producción Forestal 2013. Semarnat. http://www.SEMARNAT.gob.mx/sites/default/files/documentos/forestal/anuarios/anuario_2013.pdf (9 de junio de 2015).
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). 2012. Asignación del código de identificación para el aprovechamiento de recursos forestales no maderables y ejecución del Estudio Técnico. Delegación Estado de México. Oficio Núm. DFMARNAT/3845/2012. México, D.F., México. pp. 1-5.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). 2005a. El medio ambiente en México: en resumen. http://appl.SEMARNAT.gob.mx/dgeia/informe_resumen/pdf/O_info_resumen.pdf (11 de junio de 2015).
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). 2005b. Informe de la situación del medio ambiente en México. Capítulo 5. Aprovechamiento de los recursos forestales, pesqueros y de la vida silvestre. http://appl.SEMARNAT.gob.mx/dgeia/informe_04/05_a_provechamiento/cap5for1.html (11 de junio de 2015).
- Wong, J., K. Thornber and N. Baker. 2001. Resource assessment of non-wood forest products. *Non-wood Forest Products*. Rome, FAO. 124 p.





Artículo / Article

Cambio climático y predicción de incendios al 2050 en el Bosque La Primavera, Jalisco

Climate change and prediction of fires for the year 2050 at the La Primavera Forest, Jalisco

José Luis Ibarra Montoya¹ y Francisco Martín Huerta Martínez¹

Resumen

Durante las últimas dos décadas, los incendios se han incrementado en frecuencia e intensidad en diversas partes del mundo. Las principales causas de estos patrones se asocian, tanto a las actividades de uso de suelo como a los cambios en el clima. El Bosque La Primavera es un área natural protegida de gran importancia, por su cercanía a la ciudad de Guadalajara; de tal suerte que la predicción de incendios es de gran interés, ya que la frecuencia e intensidad de los mismos son una fuerte causa de deterioro de la zona. El objetivo de este trabajo fue construir un modelo espacial para generar un escenario de predicción de incendios para el año 2050 en el Bosque La Primavera, para ello se tomaron como referencia los datos de las proyecciones climáticas para el occidente de México y las ocurrencias históricas de incendios de los últimos años. El modelo predice un área de incendios que cubre casi la totalidad del polígono del área protegida. El mayor efecto del cambio climático en la zona está asociado a la disminución de las precipitaciones y a un aumento en la temperatura, lo cual incide en un incremento del área afectada por los incendios. Bajo ese escenario, el principal desafío será definir, acertadamente, las políticas públicas y estrategias de mitigación, con la finalidad de promover que el Bosque La Primavera sea más saludable, en términos de conservación, productividad, diversidad y resiliencia, lo que asegurará una provisión continua de servicios ecosistémicos bajo un clima cambiante.

Palabras clave: Degradación ambiental, escenarios futuros, MaxEnt, Modelo espacial, SIG, uso de suelo.

Abstract

During the last two decades, forest fires have increased in frequency and intensity in various parts of the world. The main causes of these patterns are associated both with land-use activities and with climate change. The *La Primavera* Forest is a highly important natural reserve due to its proximity to the city of *Guadalajara*; therefore, the prediction of fires is of great interest, as the frequency and intensity of forest fires are a major cause of deterioration of the area. The objective of this work was to build a spatial model in order to generate a fire prediction scenario for the year 2050 in the *La Primavera* Forest, for which purpose the data of climate projections for western Mexico and the historical occurrences of fires in the last few years were taken as a reference. The model predicts a fire zone that covers the protected area almost in its entirety. The most prominent effect of climate change in the area is associated to the reduction of precipitations and to an increase in the temperature, which results in an increase of the surface area affected by the fires. Under this scenario, the main challenge would be to aptly define the mitigation policies and strategies for promoting a healthier *La Primavera* Forest in terms of conservation, productivity, diversity and resilience, which will ensure the ongoing provision of ecosystemic services under a changing climate.

Key words: Environmental degradation, future scenarios, MaxEnt, Spatial model, GIS, land use.

Introducción

Durante las últimas dos décadas los incendios han aumentado en frecuencia e intensidad en diversas partes del mundo; en Europa, entre 1980 y 2009 alcanzaron en promedio de 480 000 ha por año, y 50 000 ocurrencias. Portugal tiene la densidad de incendios y la mayor área relativa de todos los países del sur de Europa. En consecuencia, los incendios se posicionan como el más importante de todos los problemas relacionados con bosques, ya que afectan el paisaje, la vegetación, suelos y la calidad del aire (Nunes *et al.*, 2016).

En Canadá, diversos estudios anticipan un profundo impacto del cambio climático en la frecuencia, extensión y severidad de los incendios en los bosques boreales (Bergeron *et al.*, 2004). En Estados Unidos de América, el área forestal afectada por el fuego crecido seis veces (Mann y Kump, 2009). El aumento repentino y marcado de la frecuencia y duración de incendios de gran magnitud se asocia a un cambio abrupto hacia las primaveras inusualmente cálidas, reducidas de precipitación invernal, derretimiento temprano de la nieve en primavera así como veranos más secos y prolongados (Westerling *et al.*, 2006); mientras que en el territorio nacional, se anticipa un incremento de los incendios relacionado con las variaciones climáticas extremas (Dryry y Veblen, 2008; Pompa-García y Sensibaugh, 2014).

En México, se estima que la siguiente temporada alta de incendios forestales podría iniciar con el próximo mínimo solar, el cual tendrá lugar entre los años 2017 y 2019 (Velasco-Herrera, 2016). Además, en la región occidente se predice una disminución en las precipitaciones hasta de 10 % y un incremento en las temperaturas de 2 a 4 °C, en el escenario de cambio climático más severo (Durán, 2010; Ibarra-Montoya *et al.*, 2011).

El Área de Protección de Flora y Fauna La Primavera (APFFLP), conocida localmente como Bosque La Primavera, es una de las áreas protegidas más importantes del occidente del país. Por su cercanía con la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG) constituye el principal "pulmón" natural para esta gran ciudad, por lo que representa un reto para la ciencia en el contexto de la predicción de incendios, ya que la frecuencia e intensidad de los mismos son una fuerte causa de deterioro de esta zona, en la cual, desde 1949 a la fecha, se presenta un promedio de cinco conflagraciones por año (Semarnat, 2000).

La época del año de mayor intensidad coincide con la de anidación y reproducción de algunas aves y mamíferos, los cuales abandonan sus crías, nidos o madrigueras, o bien perecen víctimas del humo y las llamas.

La producción de la caña de azúcar implica el uso periódico del fuego, que destruye no solo las hojas del cultivo durante la

Introduction

During the last two decades, forest fires have increased in frequency and intensity in various parts of the world. Between 1980 and 2009, there were 50 000 occurrences of fires in Europe, covering an average of 480 000 ha per year. Portugal has the highest fire density and the largest relative area of all the countries in southern Europe. Therefore, fires are the most important issue related to the forests, as they affect the landscape, the vegetation, the soil and the quality of the air (Nunes *et al.*, 2016).

In Canada, various studies predict a profound impact of climate change on the frequency, extension and severity of fires in northern forests (Bergeron *et al.*, 2004). In the United States of America, the forest area affected by fires has increased six-fold (Mann and Kump, 2009). The marked, sudden increase in the frequency and duration of large forest fires is associated to an abrupt change toward unusually warm springs, reduced winter precipitations, early melting of snow in the spring, and drier, longer summers (Westerling *et al.*, 2006), while an increase of forest fires is predicted in Mexico as a result of extreme climatic variations (Dryry and Veblen, 2008; Pompa-García and Sensibaugh, 2014).

In Mexico, the next high forest fire season is predicted to begin with the next solar minimum, which will occur between 2017 and 2019 (Velasco-Herrera, 2016). Furthermore, it is estimated that precipitations will decrease by up to 10 % and temperatures will increase by 2 to 4 °C in the western region, under the harshest climate change scenario (Durán, 2010; Ibarra-Montoya *et al.*, 2011).

At the *La Primavera* Wildlife Conservation Area (APFFLP, Spanish acronym), locally known as *Bosque La Primavera*, is one of the main protected areas in western Mexico. Due to its proximity to the Metropolitan Area of *Guadalajara* (ZMG, Spanish acronym), it is the main natural "lung" for this large city, and therefore poses a challenge for science within the context of the prediction of fires, as the frequency and intensity of these is a major cause of the deterioration of this area, where an average of five forest fires per year have occurred since 1949 (Semarnat, 2000).

The time of the year with the most intense fires coincides with the nesting and reproduction season of certain birds and mammals that abandon their offspring, their nests or their lairs, or perish due to the smoke and the flames.

Sugar cane production entails the periodical use of fire, which destroys not only the leaves of the crop during the harvest but also, very frequently, all of the surrounding vegetation. The surface areas planted with sugar cane increase every year, and this in turn increases the frequency of forest fires (Semarnat, 2000).

zafra, sino también, y con mucha frecuencia, toda la vegetación que lo rodea. Las superficies con caña aumentan cada año y, con ello, la frecuencia de incendios forestales (Semarnat, 2000).

Si se logra generar un modelo predictivo de incendios, las acciones de prevención deberán ser más eficientes, aun con los limitados recursos económicos con los que se cuenta en dicha área protegida. Huerta-Martínez e Ibarra-Montoya (2014) describen espacial y temporalmente la historia de un periodo de 15 años de incendios en esa área, y señalan como siendo los años críticos a 1984, 1987, 1995, 1998, 2005 y 2012, tanto por la superficie afectada como por su intensidad; en el último año se afectaron 7 744 ha. Datos del Gobierno del estado de Jalisco indican que entre 10 a 20 % del arbolado murió como consecuencia del fuego (Huerta-Martínez e Ibarra-Montoya, 2014), sin embargo no existen estimaciones de las emisiones de CO₂ por causa de estos siniestros. Por otro lado, los datos sugieren una relación estrecha con las variaciones climáticas extremas, específicamente el fenómeno del Niño (Huerta-Martínez e Ibarra-Montoya, 2014).

Con base en lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue construir un modelo espacial para generar un escenario de predicción de incendios para el año 2040 en el APFFLP, a partir de los datos de las proyecciones climáticas para el occidente de México publicadas por Durán (2010) y las ocurrencias históricas de incendios descritas en Huerta-Martínez e Ibarra-Montoya (2014), con la finalidad de contribuir con información que apoye la toma de decisiones en materia de protección de esta área natural protegida.

Materiales y Métodos

Área de estudio

El APFFLP se ubica en la región central del estado de Jalisco, México, entre las coordenadas extremas 103°28' a 103°42' de longitud oeste y 20°32' a 20°44' de latitud norte (Figura 1). El APFFLP tiene alrededor de 22 puntos de acceso, mediante caminos de terracería y brechas, tres de los cuales se utilizan principalmente con fines recreativos. Según la clasificación climática de Köppen, modificada por García (1987), los climas predominantes son el templado subhúmedo C (w₁)(w) y semicálido subhúmedo (A) C (w₁)(w). La temperatura media anual es de 20.6 °C, enero el mes más frío y junio el más cálido. El promedio anual de humedad es de 63 %; los vientos dominantes provienen del suroeste, con una velocidad máxima de 53 km h⁻¹ (Semarnat, 2000).

If a predictive model for fires is developed, preventive actions are bound to become more effective, even with the limited financial resources available in that protected area. Huerta-Martínez and Ibarra-Montoya (2014) provide a spatial and temporal description of a 15-year period of fires in that area and highlight the years 1984, 1987, 1995, 1998, 2005 and 2012 as critical, not only for their intensity but also for the surface area affected by them; in the last year, 7 744 ha were affected. Data provided by the Government of the State of Jalisco point out that between 10 and 20 % of the trees died as a consequence of fires (Huerta-Martínez and Ibarra-Montoya, 2014). However, no estimations of CO₂ emissions due to these phenomena exist. On the other hand, the data suggest a close relationship with extreme climatic variations, specifically with the *El Niño* phenomenon (Huerta-Martínez and Ibarra-Montoya, 2014).

Thus, the objective of the present work was to build a spatial model in order to develop a fire prediction scenario for the year 2040 at APFFLP based on the data of the climatic projections for western Mexico published by Durán (2010) and the historical occurrences of fires described by Huerta-Martínez and Ibarra-Montoya (2014), in order to contribute information to support decision-making processes in regard to the protection of this natural reserve.

Materials and Methods

Study area

APFFLP is located in the central region of the State of Jalisco, Mexico, between the extreme coordinates 103°28' to 103°42' W and 20°32' to 20°44' N (Figure 1). APFFLP has approximately 22 points of access through dirt roads and paths, three of which are used mainly for recreational purposes. According to Köppen's climate classification modified by García (1987), the predominant climates are temperate subhumid C (w₁)(w) and semi-warm subhumid (A) C (w₁)(w). The mean annual temperature is 20.6 °C, January being the coldest month, and June, the warmest. The mean annual humidity is 63 %; the predominant winds come from the southwest and reach a maximum speed of 53 km h⁻¹ (Semarnat, 2000).





Figura 1. Ubicación geográfica del APFFLP en Jalisco, México.
 Figure 1. Geographic location of APFFLP in Jalisco, Mexico.

La vegetación se caracteriza principalmente por bosque de encino, bosque de encino-pino, bosque de pino, bosque tropical caducifolio, así como pastizal inducido (Semarnat, 2000).

The main vegetation consists of oak, pine-oak and pine forests, tropical deciduous rainforests and induced grasslands (Semarnat, 2000).

Generación de un escenario predictivo de incendios en el contexto de Cambio Climático

Development of a fire prediction scenario within the context of Climate Change

Se utilizaron los datos mensuales y anuales de precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima y temperatura media de los periodos 1961-1990 (climatología de referencia) y 2041-2060, para determinar las áreas potenciales de incendiarse en el Bosque La Primavera para el año 2050. Estos datos climáticos se obtuvieron del portal de datos de *Earth System Grid* (ESG) de *WorldClim* (Worldclim, 2015) y se trabajaron mediante coberturas en formato *raster*, con una resolución de 30 segundos de arco, en el sistema *Idrisi Selva* (Eastman, 2012). Para el periodo 2014-2060 se consideraron los modelos de circulación general (MCG)

Monthly and annual precipitation and maximum, minimum and mean temperature data for the years 1961-1990 (reference climatology) and 2041-2060 were used to determine the areas that might potentially catch fire at the *La Primavera* Forest by the year 2050. These climate data were taken from the *Earth System Grid* (ESG) database of *WorldClim* (Worldclim, 2015) and were worked in 30 arcseconds raster images, in the *Idrisi Selva* system (Eastman, 2012). For the 2014-2060 period, the general circulation models (GCMs) HadGEM2-AO (Hadley) and MIROC5 (Miroc) were considered, under two of the four scenarios outlined by the IPCC, which assume different levels

HadGEM2-AO (Hadley) y MIROC5 (Miroc), bajo dos de los cuatro escenarios planteados por el IPCC, los cuales asumen diferentes niveles de esfuerzo de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a nivel global (rcp45 y rcp60).

Estos escenarios forman parte de la modelación del clima desarrollado por el proyecto de intercomparación de modelos acoplados fase 5 *Coupled Model Intercomparison Project*, CMIP5 por sus siglas en Inglés) (<http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/>) (Taylor et al., 2012). Los rcp se refieren al forzamiento radiativo expresado en $W m^{-2}$; y se asume que éste varía al incrementar los GEI. El rcp45 asume un forzamiento radiativo de $\approx 4.5 W m^{-2}$ y que las emisiones de GEI llegarán a la cúspide alrededor del año 2040 para después disminuir. La temperatura muy probablemente excede los $2 ^\circ C$; en tanto que el rcp60 considera parte de un forzamiento radiativo de $\approx 6 W m^{-2}$ con emisiones que llegarán a la cima alrededor del año 2080, además de la aplicación de tecnologías y estrategias de reducción de GEI. El total de las variables utilizadas se describen en el Cuadro 1.

of efforts to reduce greenhouse gas (GHG) emissions globally (rcp45 and rcp60).

These scenarios are part of the climate modeling developed by the Coupled Model Intercomparison Project, Phase 5 (CMIP5) (<http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/>) (Taylor et al., 2012). The rcps refer to the radiative forcing expressed in $W m^{-2}$; furthermore, it is assumed that this varies with increased GHG. RCP45 assumes a radiative forcing of $\approx 4.5 W m^{-2}$ and that GHG emissions will reach a peak around the year 2040, after which they will diminish. Most probably, the temperature will exceed $2 ^\circ C$; while RCP60 considers part of a radiative forcing of $\approx 6 W m^{-2}$ with emissions that will reach the peak around the year 2080, besides the application of GHG-reducing technologies and strategies. Table 1 describes the total variables utilized.



Cuadro 1. Variables de tipo climático consideradas en la generación del modelo predictivo de incendios en el Bosque La Primavera al 2050.

Variable	Unidades
Precipitación acumulada promedio anual	mm
Precipitación acumulada promedio junio-octubre	mm
Precipitación acumulada promedio noviembre-abril	mm
Precipitación del mes más húmedo	mm
Temperatura media anual	$^\circ C$
Temperatura media mayo-octubre	$^\circ C$
Temperatura media noviembre-abril	$^\circ C$
Temperatura mínima media anual	$^\circ C$
Temperatura mínima media mayo-octubre	$^\circ C$
Temperatura mínima media noviembre-abril	$^\circ C$
Temperatura máxima media anual	$^\circ C$
Temperatura máxima media mayo-octubre	$^\circ C$
Temperatura máxima media noviembre-abril	$^\circ C$
Temperatura media del mes más frío	$^\circ C$
Temperatura mínima media del mes más frío	$^\circ C$
Temperatura media del mes más húmedo	$^\circ C$
Temperatura máxima media del mes más cálido	$^\circ C$
Oscilación térmica mayo-octubre	$^\circ C$
Fotoperiodo promedio mayo-octubre	h

Table 1. Climatic variables considered in the development of a fire prediction model for the year 2050 at the *La Primavera* Forest.

Variable	Units
Mean annual accumulated precipitation	mm
Mean accumulated precipitation in June-October	mm
Mean accumulated precipitation in November-April	mm
Precipitation during the most humid month	mm
Mean annual temperature	°C
Mean temperature in May-October	°C
Mean temperature in November-April	°C
Minimum mean annual temperature	°C
Minimum mean temperature in May-October	°C
Minimum mean temperature in November-April	°C
Maximum mean annual temperature	°C
Maximum mean temperature in May-October	°C
Maximum mean temperature in November-April	°C
Mean temperature in the coldest month	°C
Minimum mean temperature in the coldest month	°C
Mean temperature in the most humid month	°C
Maximum mean temperature in the warmest month	°C
Thermal oscillation in May-October	°C
Mean photoperiod in May-October	h

Para la construcción del escenario predictivo, se generó un modelo espacial con el enfoque de máxima entropía, versión 3.33k (Maxent). El algoritmo de este sistema fue adaptado por Steven J. Phillips y colaboradores (Phillips y Dudik, 2008; Phillips *et al.*, 2006) para la construcción de modelos de distribución potencial.

De forma general, el algoritmo detecta las relaciones no aleatorias entre dos conjuntos de datos: a) los registros georreferenciados de la presencia de incendios, y b) un conjunto de coberturas, formatos *raster*, de datos digitales que representan las variables climáticas pertinentes para determinar las zonas potenciales de ocurrencia de incendios, a una escala particular de análisis (Pearson y Dawson, 2003; Phillips *et al.*, 2006). El sistema MaxEnt modela la distribución de las ocurrencias de incendios usando solamente datos de presencia de eventos históricos; la distribución de un incendio se representa con una función de probabilidad *P* sobre un conjunto *X* de sitios en el área de estudio.

Se construye un modelo de *P* mediante conjunto de restricciones derivado de datos históricos de presencia de incendios. Las restricciones se expresan como funciones simples de variables climáticas conocidas. El algoritmo de MaxEnt

In order to build the predictive scenario, a spatial model with a maximum entropy, version 3.33k (MaxEnt) was generated. The algorithm of this system was adapted by Steven J. Phillips and his colleagues (Phillips and Dudik, 2008; Phillips *et al.*, 2006) for the construction of potential distribution models.

In general, the algorithm detects the non-random relationships between two sets of data: a) the georeferenced records of the occurrence of fires, and b) a set of coverages, raster images, digital data representing those climatic variables that are relevant for determining the potential areas where fires may occur, at a particular analysis scale (Pearson and Dawson, 2003; Phillips *et al.*, 2006). The MaxEnt system models the distribution of fire occurrences using only data on historical events; the distribution of a fire is represented with a probability function *P* divided by a set of sites *X* in the study area.

A model of *P* is built with a set of restrictions derived from historical data of the occurrence of fires. The restrictions are expressed as simple functions of known climatic variables. The MaxEnt algorithm forces the mean of each function of each variable to approach the actual mean of the variable in those areas where fires occur. Out of all the possible combinations

obliga a que la media de cada función de cada variable se aproxime a la media real de la variable en las áreas de presencia de incendios. De todas las posibles combinaciones de funciones, se selecciona la que logra minimizar la función de entropía, la cual es medida con el índice de Shannon.

La expresión general de la función de probabilidad para i variables climáticas es:

$$P(x) = e^{\lambda \cdot f(x)} / Z \lambda$$

Donde:

- $P(x)$ = Función de probabilidad
- λ = Vector de coeficientes de ponderación
- f = Vector correspondiente de funciones de variables climáticas
- Z = Constante de normalización para asegurar que $P(x)$ equivale a la unidad.

Los valores $P(x)$ obtenidos, representan valores de idoneidad relativa para la presencia de incendios, y constituyen, entonces, la base de un modelo de incendios potenciales.

Para alimentar el modelo se utilizaron, por un lado, los datos de las ocurrencias de eventos de interés del periodo comprendido entre los años 1998-2012 en el APFFLP, proporcionadas por el Departamento de Investigación de la desaparecida Dirección Ejecutiva del Bosque La Primavera, hoy Organismo Público Descentralizado (OPD) "Bosque La Primavera", y por otro lado, las variables climáticas proyectadas para el año 2050. En la modelación MaxEnt 75 % de los registros de ocurrencia se utilizaron como puntos de entrenamiento y 25 % como puntos de validación. Se usó un umbral de convergencia de 10^{-5} con 1 000 iteraciones, como un límite superior para cada corrida. Para estimar la capacidad de predicción del modelo, se analizó el área bajo la curva (AUC), salida gráfica en la que se observa la capacidad de discriminación de una ocurrencia (sensibilidad) *versus* la capacidad de discriminación de una ausencia (especificidad) (Moreno *et al.*, 2011). El formato de salida analizado fue el acumulativo (intervalo de 0 a 100), el cual indica una idoneidad de área por incendiarse relativa para cada pixel, más una probabilidad de ocurrencia del incendio (salida logística).

Dado que el modelo (por ser no determinístico) produce resultados de alguna manera diferentes de una corrida a la siguiente, aun cuando se emplee la misma entrada de datos, adecuado a la asignación aleatoria del proceso de modelación, se desarrollaron 100 modelos de predicción independientes por cada ocurrencia de análisis, y se eligió un subconjunto de los mejores 10 modelos basado en dos criterios: 1) modelos (20) con menos de 10 % de error por omisión; y 2) de ellos, se seleccionaron los 10 modelos más cercanos a la media en las zonas donde las ocurrencias potenciales fueron predichas (Anderson *et al.*, 2003). Estos 10 modelos se examinaron de manera espacial y se generó un mapa de consenso con valores de pixel de 0 a 10, el 10 representa las áreas en las

de funciones, the one that succeeds in minimizing the entropy function--measured using Shannon's index--is selected.

The general expressions of the function of probability for i climatic variables is:

$$P(x) = e^{\lambda \cdot f(x)} / Z \lambda$$

Where:

- $P(x)$ = Function of probability
- λ = Weighting coefficients vector
- f = Vector corresponding to functions of climatic variables
- Z = Normalization constant to ensure that $P(x)$ is equivalent to the unit.

The $P(x)$ values obtained represent relative suitability values for the occurrence of fires and therefore constitute the base for a model of potential fires.

The model was fed the data of the occurrences of events of interest for the 1998-2012 period at APFFLP, provided by the Department of Research of the extinct Executive Direction of *Bosque La Primavera*--today the "*Bosque La Primavera*" Decentralized Public Agency (DPA)--and, on the other hand, the climatic variables projected for the year 2050. According to the MaxEnt model, 75 % of the occurrence records were utilized as training points, and 25 %, as validation points. A convergence threshold of 10^{-5} with 1 000 iterations was used as the upper limit for each run. The area under the curve (AUC)--a graphical output showing the discrimination capacity of an occurrence (sensitivity) versus the discrimination capacity of an absence (specificity)-- was analyzed in order to estimate the predictive capacity of the model (Moreno *et al.*, 2011). The analyzed output format was cumulative (0 to 100 interval), indicating an area's relative suitability for fires per pixel, plus a probability of occurrence of a fire (logistic output).

Since the model is not deterministic, it produces somewhat different results from one run to another, even with the same data input, adjusted for the random assignation of the modeling process, 100 independent predictive models were developed for each analysis occurrence, and a subset of the 10 best models was selected based on two criteria: 1) models (20) with less than 10 % omission error, and, of these, 2) the 10 models closest to the mean were selected in areas where potential occurrences were predicted (Anderson *et al.*, 2003). These 10 models were examined in spatial terms, and a consensus map was developed using pixel values of 0 to 10, the number 10 representing those areas where all models agree as to the fire occurrence prediction.



que todos los modelos están de acuerdo en la predicción de la ocurrencia de incendios.

Resultados y Discusión

El modelo espacial tuvo una AUC de 0.81, lo que indica que la robustez para clasificar las presencias de los incendios en el APFFLP fue buena (Parolo *et al.*, 2008). La predicción del modelo espacial desarrollado muestra una zona continua que cubre gran parte del polígono del APFFLP (Figura 2) con alta probabilidad de incendiarse bajo las condiciones de mayor sequía y calidez, señaladas como menor humedad (-10% en la precipitación) y temperatura superior (+2 °C).

La construcción del modelo espacial es de las pocas aplicaciones de modelado espacial en el contexto de predicción de zonas potenciales de incendios (Mandallaz y Ye, 1997; García *et al.*, 1999; Muñoz *et al.*, 2005; Pompa-García *et al.*, 2013; Pérez-Verdín, 2013), y es el único hasta el momento que integra variables de CMIP5.

El patrón de área incendiada predicha por el modelo espacial para el año 2050 coincide con la historia de incendios descrita por Huerta-Martínez e Ibarra-Montoya (2014), por ello es posible anticipar que en el APFFLP el cambio climático constituye un escenario de alto riesgo, en el que muy probablemente los incendios serán más frecuentes, más extensos y de mayor intensidad; lo anterior concuerda con lo citado por Bergeron *et al.* (2004), Westerling *et al.* (2006), Mann y Kump (2009), van Mantgem *et al.* (2009) y Allen *et al.* (2010), autores que apuntan a que las características de los incendios forestales están cambiando, debido entre otros factores al cambio climático global.

Results and Discussion

The spatial model had an AUC of 0.81, which is indicative of a good robustness for classifying the occurrences of fires at APFFLP (Parolo *et al.*, 2008). The prediction of the developed spatial model shows a continuous area covering a large portion of the surface area of APFFLP (Figure 2) with a high probability of fire under greater drought and warmth conditions, indicate as a lower humidity (-10% in precipitation) and a higher temperature (+2 °C).

The construction of the spatial model is one of the few applications of spatial modeling within the context of prediction of potential fire areas (Mandallaz and Ye, 1997; García *et al.*, 1999; Muñoz *et al.*, 2005; Pompa-García *et al.*, 2013; Pérez-Verdín, 2013), and so far it is the only model integrating CMIP5 variables.

The pattern of burnt areas predicted by the spatial model for the year 2050 coincides with the history of forest fires described by Huerta-Martínez and Ibarra-Montoya (2014); for this reason, climate change can be predicted to be a high-risk scenario at APFFLP, where fires are likely to become more frequent and more intense and to cover larger areas. This agrees with the predictions quoted by Bergeron *et al.* (2004), Westerling *et al.* (2006), Mann and Kump (2009), van Mantgem *et al.* (2009) and Allen *et al.* (2010), all of whom point out that the characteristics of forest fires are changing, due to global climate change among other factors.

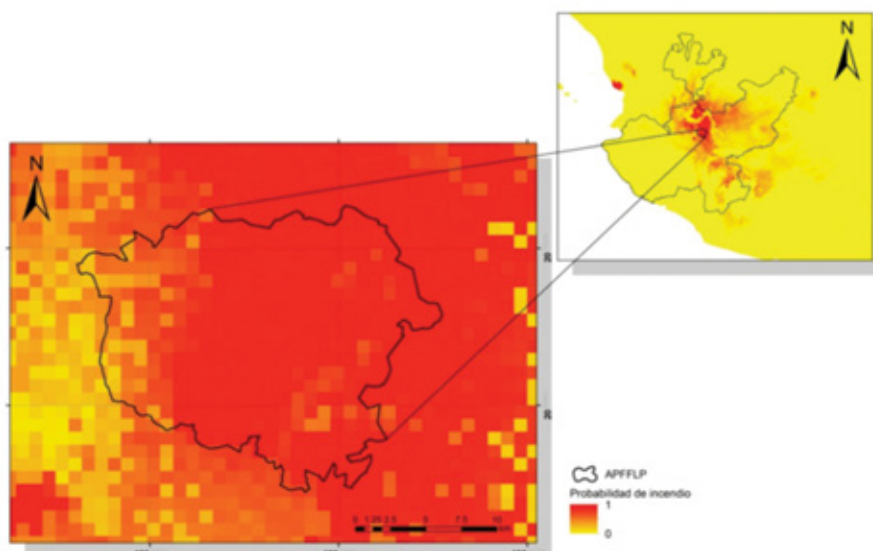


Figura 2. Área potencial de incendios para el año 2050, según lo predicho por el modelo espacial generado.

Figure 2. Potential fire area for the year 2050, as predicted by the generated spatial model.

El APFFLP con frecuencia presenta actividades de cambio en el uso de suelo (Semarnat, 2000), lo cual incide en el aumento de la frecuencia y severidad de los incendios (González *et al.*, 2011). El cambio de uso de suelo es impulsado, sobre todo, para desarrollar cultivos de maíz, agave y caña de azúcar. Además, el incremento de la superficie forestal abandonada, produce un aumento de masas forestales jóvenes, inestables y con poca o nula gestión. A esta situación, se suma la actividad antrópica, responsable de 95 % de los incendios forestales, algunos de ellos intencionales, además del uso cultural del fuego, arraigado en el medio rural.

Cada año, los incendios en el APFFLP originan un gran porcentaje de superficie quemada, con respecto al área total del bosque (Huerta-Martínez e Ibarra-Montoya, 2014); sin embargo, los incendios relacionados con fenómenos meteorológicos extremos, denominados de alta intensidad, tienen un papel destacado, ya que se desarrollan en condiciones de alta temperatura y viento en combinación con baja humedad, por lo que es posible que los siguientes años estas condiciones se repitan con mucha frecuencia.

Entre las principales consecuencias ambientales de los incendios de alta intensidad en el APFFLP sobresalen la reducción de la biodiversidad, aumento de la desertificación (incluso la degradación de los suelos y de la vegetación), contaminación de las aguas subterráneas, así como de la atmósfera; lo cual hace que la recuperación ambiental de las zonas quemadas sea extremadamente complicada y compleja, ya que tras el fuego, el ecosistema es afectado y la fauna debe encontrar un nuevo hábitat natural para sobrevivir, algo complicado ya que el manto vegetal desaparece casi por completo (Weber y Flannigan, 1997; Gitay *et al.*, 2002). Además, después de los incendios intensos, el suelo queda prácticamente estéril, debido a la mineralización de la materia orgánica, lo que limita la recolonización por las especies autóctonas.

Por último, el aumento de la erosión reduce, significativamente, las posibilidades de recuperación (Pompa-García y Sensibaugh, 2014). Asimismo, cuando los incendios son moderados en intensidad son excelentes promotores del repoblamiento natural, tal es el caso particular de *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl., que presenta gran densidad de individuos jóvenes en áreas que presentaron incendios moderados, en un periodo de 5 a 8 años.

Al igual que en otras regiones (Bergeron *et al.*, 2004; Pausas *et al.*, 2008; Mann y Kump, 2009; Conde *et al.*, 2011), el cambio climático en el APFFLP no es teórico y sus efectos comienzan advertirse. Al respecto, el escenario climático proyectado para el 2050 resultó en un incremento en el área afectada por incendios, y serán, particularmente, vulnerables las zonas dominadas por plantaciones y ecosistemas remanentes muy fragmentados, ya que según nuestras observaciones en campo, estos tipos de

Land-use change activities are frequent at APFFLP (Semarnat, 2000); this increases the frequency and severity of forest fires (González *et al.*, 2011). Land-use change is promoted especially for the purpose of planting corn, agave and sugar cane. Furthermore, as larger forest areas are abandoned, young, unstable forest masses with little or no management increase. This situation, together with anthropic activity, accounts for 95 % of forest fires, some of which are intentional, besides the cultural use of fire, deeply ingrained in rural environments.

Each year, fires at APFFLP result in the burning of a large percentage of the total forest surface area (Huerta-Martínez and Ibarra-Montoya, 2014). However, fires related to so-called high-intensity extreme weather phenomena play a major role, since they develop in conditions of high-temperature and wind in combination with low humidity; therefore, these conditions are likely to occur repeatedly and very frequently.

Prominent among the environmental consequences of high-intensity fires at APFFLP are the reduction of biodiversity, increased desertification (including the degradation of soils and vegetation), and pollution of groundwater and of the atmosphere; this renders the environmental recovery of burnt areas extremely difficult and complex as, after the fire, the ecosystem is affected and the fauna must find a new natural habitat in order to survive—a somewhat involved endeavor, as the vegetal mantle disappears almost completely (Weber and Flannigan, 1997; Gitay *et al.*, 2002). Furthermore, after intense fires, the soil becomes virtually sterile due to the mineralization of organic matter, limiting recolonization by native species.

Finally, increased erosion significantly reduces the possibilities of recovery (Pompa-García and Sensibaugh, 2014). Likewise, moderately intense fires are excellent promoters of natural repopulation; such is the case particularly of *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl., of which there is a high density of young individuals in areas where moderate fires occurred within a period of 5 to 8 years.

As in other regions (Bergeron *et al.*, 2004; Pausas *et al.*, 2008; Mann and Kump, 2009; Conde *et al.*, 2011), climate change at APFFLP is not merely theoretical, and its effects are beginning to make themselves felt. In this respect, the climatic scenario projected for 2050 resulted in an increase in the surface area affected by fires, and those areas dominated by plantations and by greatly fragmented remaining ecosystems will be particularly vulnerable, since, according to our in-field observations, these types of forests are invaded by exotic species that generate a large amount of fuel due to their high abundance and spatial distribution, as in the case of *Verbesina* spp.

A major priority for facing the fires predicted to occur at APFFLP is the development of an “adaptation plan” (PACMUN,

bosque están invadidos por especies exóticas que generan una gran cantidad de combustible, debido a sus altas abundancias y distribución espacial, tal es el caso de *Verbesina* spp.

Una de las principales prioridades para hacer frente a los incendios que se predicen en el APFFLP es el desarrollo de un "plan de adaptación" (PACMUN, 2015); entendido como "el ajuste en sistemas naturales o humanos en respuesta a estímulos climáticos reales o esperados y sus efectos, que moderan el daño o explotan oportunidades beneficiosas", entre las que se pueden citar podrían ser: integración de políticas de prevención para la protección de las cuencas contra incendios forestales; mejor gestión de los bosques públicos, considerados como infraestructuras verdes primarias; uso de la biomasa del bosque para energía sin reducir la capacidad de almacenamiento de carbono, como sucede en Italia (Keskitalo *et al.*, 2015), con lo que se reduce el combustible, y por tanto disminuye el riesgo de incendios de gran intensidad; en otras palabras, adoptar un código de buenas prácticas. En este contexto, una opción es la diversificación del bosque, la cual implicaría fomentar el desarrollo y mantenimiento de diversas actividades y usos del territorio dentro del APFFLP; ejemplo: uso agrícola, manejo de bosque nativo, turismo y recreación, así como zonas de exclusión por motivos de restauración. Además de, valorar, en forma adecuada, los servicios ecosistémicos asociados, con la pertinente coordinación entre las instituciones gubernamentales y los dueños de las tierras.

En general, el sector forestal en México y en el mundo está ante un cambio de paradigma en el manejo y prácticas asociadas a las plantaciones productivas de rápido crecimiento. Esto implica importantes desafíos políticos, institucionales y culturales a los cuales, tanto los estados como las empresas tendrán que adaptarse.

Recientes iniciativas internacionales como las definidas por la organización *Forest Stewardship Council* (FSC) son un ejemplo que apunta a promover y normar el buen manejo y sustentabilidad de los bosques y plantaciones. Al respecto, la principal responsabilidad del sector forestal en México radica en promover políticas pertinentes que apunten, en lo general, al ordenamiento del territorio, y en lo particular, a la diversificación del sector forestal, conjuntamente con la tan urgente institucionalidad sectorial, capaz de enfrentar y conducir los desafíos impuestos por el cambio climático y la sociedad. Medidas que constituyen el primer paso para una efectiva adaptación frente al cambio climático, contribuyendo tanto a reducir el riesgo de incendios de alta intensidad como a promover que el APFFLP sea un bosque más saludable, en términos de conservación, productividad, diversidad y resiliencia en el largo plazo. Ibarra-Montoya y Huerta-Martínez (2016) documentaron que de las variables que resultaron con alta importancia en la ocurrencia del fuego para esta zona, la única que puede ser manipulada y controlada por

2015), understood as "the adjustment [carried out] in natural or human systems in response to actual or expected climatic stimuli and their effects, which moderate the damage or exploit beneficial opportunities"; among the latter, we may include: integrating prevention for the protection of basins against forest fires; better management of public forests, considered as primary green infrastructures; use of forest biomass for energy without reducing the carbon storage capacity, as in Italy (Keskitalo *et al.*, 2015), thereby reducing the fuel and, thus, the risk of high-intensity fires; in other words, adopting a good practices code. Within this context, an option is the diversification of the forest, which would imply promoting the development and maintenance of various activities and uses of the territory within the APFFLP, e.g. agricultural use, native forest management, tourism and recreation, and exclusion areas for restoration, as well as adequately assessing the ecosystemic services associated to the relevant coordination between government institutions and landowners.

In general, the forest sector in Mexico and across the world faces a change of paradigm as to the management and practices associated to fast-growing productive plantations. This entails significant political, institutional and cultural challenges to which both states and businesses will have to adapt.

Recent international initiatives, like those defined by the Forest Stewardship Council (FSC), are an example that aims at promoting and regulating the good management and sustainability of forests and plantations. In this regard, the main responsibility of the forest sector in Mexico is to promote relevant policies directed, in general, toward land use planning and, in particular, toward the diversification of the forest sector, as well as to the urgently needed sectorial institutionalality, with which to face and manage the challenges imposed by society and by climate change. These actions are the first step for an effective adaptation in the face of climate change, for contributing to reduce the risk of high-intensity fires and to promote making APFFLP a healthier forest in terms of conservation, productivity, diversity and long-term resilience. According to Ibarra-Montoya and Huerta-Martínez (2016), the only major variable in the occurrence of fires in this area that can be manipulated and controlled by humans is land use; hence, it is there, that an effect must be sought in order to avoid the occurrence of first-magnitude forest fires like those of the years 1998, 2005 and 2012.

The authors hope that the present study may contribute to promote specific actions by the pertinent authorities to prevent fires, and that the efforts may be oriented toward building a close coordination between the local communities, the authorities and the academic world.

el hombre es el uso de suelo, de tal forma que es en ella en la que se debe incidir a fin de evitar la presencia de incendios forestales de la misma magnitud que los de los años 1998, 2005 y 2012.

Los autores esperan que este estudio pueda ayudar a impulsar acciones preventivas específicas contra los incendios por parte de las autoridades correspondientes, y que los esfuerzos se orienten a construir una estrecha coordinación entre las comunidades locales, autoridades y la academia.

Conclusiones

El modelo espacial desarrollado con MaxEnt, bajo el escenario del cambio climático demostró ser una herramienta confiable para predecir las áreas por incendiarse del APFFLP para el año 2050. De acuerdo al modelo se predice que la mayor parte del polígono tiene altas probabilidades de presentar incendios bajo condiciones de menor precipitación y mayor temperatura, por lo que urge tomar acciones preventivas, mas que correctivas, ante este escenario. 🌿

Agradecimientos

Agradecemos a la Biól. Karla Gutiérrez García por su valioso apoyo en la construcción del SIG para el APFFLP; así como en la edición del mapa resultante de la modelación. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por su apoyo con la beca posdoctoral del Dr. Ibarra-Montoya J. L. con el número: 100395.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución por autor

Francisco Martín Huerta Martínez: realizó validación de información en campo y acopio en bases de datos específicas y la estructuración del manuscrito; José Luis Ibarra Montoya: realizó revisión del manuscrito, el análisis espacial y la generación del modelo predictivo.

Referencias

- Allen, C. D., A. K. Macalady, H. Chenchouni, D. Bachelet, N. Mc-Dowell, M. Venetier, T. Kitzberger, A. Rigling, D. D. Bres-Hears, E. H. Hogg, P. González, R. Fensham, Z. Zhangm, J. Castro, N. Demidova, J. Lim, G. Allard, S. W. Running, A. Semerci and N. Cobb. 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management* 259(4): 660-684.
- Anderson, R. P., D. Lew and A. Peterson. 2003. Evaluating predictive models of species distributions: criteria for selecting optimal models. *Ecological Modelling* 162: 211-232.
- Bergeron, Y., M. Flannigan, S. Gauthier, A. Leduc and P. Lefort. 2004. Past, current and future fire frequency in the Canadian boreal forest: Implications for sustainable forest management. *Ambio* 33(6): 356-360.
- Conde, C., F. Estrada, B. Martínez, O. Sánchez y C. Gay. 2011. Regional climate change scenarios for Mexico. *Atmósfera* 24 (1): 125-140.

Conclusions

The spatial model developed under the climate change scenario using MaxEnt proved to be a reliable tool for predicting the areas of APFFLP where forest fires are likely to occur by the year 2050. According to the model, most of the areas have high probabilities of fires under conditions of less precipitation and a higher temperature. Thus, in the face of this scenario, there is a pressing need to develop preventive rather than corrective actions. 🌿

Acknowledgements

We wish to express our gratitude to Biologist Karla Gutiérrez García for her valuable support in building the GIS for APFFLP, as well as for the edition of the map resulting from the modeling. To *Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología* (the National Council for Science and Technology) for its support by providing Dr. Ibarra-Montoya J. L. with a post-doctoral scholarship (No. 100395).

Conflict of interests

The authors declare that they have no conflict of interests.

Contribution by author

Francisco Martín Huerta Martínez: validated the in-field information and collected it in specific databases; he also provided the structure for the manuscript; José Luis Ibarra Montoya: revised the manuscript, carried out the spatial analysis and generated the predictive model.

End of the English version



- Gitay, A., A. Suárez, R. Watson, y J. Dokken. 2002. Cambio climático y biodiversidad. Documento Técnico V del IPCC. Ginebra, Suiza. 85 p.
- González, M., A. Lara, R. Urrutia, y J. Busnich. 2011. Cambio climático y su impacto potencial en la ocurrencia de incendios forestales en la zona centro sur de Chile. *Bosque* 32 (3): 215-219.
- Huerta-Martínez, F. M. y J. L. Ibarra-Montoya. 2014. 15 Años de incendios en el Bosque La Primavera (Jalisco, México): Un acercamiento a sus posibles causas y consecuencias. *CienciaUAT* 8(2): 32-43.
- Ibarra-Montoya, J. L. y F.M. Huerta-Martínez. 2016. Modelado espacial de incendios: una herramienta predictiva para el Bosque La Primavera, Jalisco, México. *Revista Ambiente & Agua* 11(1): 35-49.
- Ibarra-Montoya, J. L., R. Román, K. Gutiérrez, J. Gaxiola, V. Arias and M. Bautista. 2011. Change in land cover and land use in the north of Jalisco, Mexico: An analysis of the future in a context of climate change. *Revista Ambiente & Agua* 6(2): 111-128.
- Keskitalo, E. C. H., M. Legay, M. Marchetti, S. Nocentini and P. Spathef. 2015. The Role of Forestry in National Climate Change Adaptation Policy: Cases from Sweden, Germany, France and Italy. *International Forestry Review* 17(1):30-42.
- Mandallaz, D. and R. Ye. 1997. Prediction of forest fires with Poisson models. *Canadian Journal of Forest Research* 27(10):1685-1694.
- Mann, M. E. and L. R. Kump. 2009. *Dire predictions: understanding global warming*. DK publishing. New York, NY, USA. 208 p.
- Moreno, R., R. Zamora, J. R. Molina, A. Vásquez y M. Herrera. 2011. Predictive modeling of microhabitats for endemic birds south Chilean temperate forest using maximum entropy (Maxent) *Ecological Informatics* 6(6):364-370.
- Muñoz, R., E. Treviño, J. Verástegui, J. Jiménez, y O. Aguirre. 2005. Desarrollo de un modelo espacial para la evaluación del peligro de incendios forestales en la Sierra Madre Oriental de México. *Investigaciones Geográficas* 56: 101-117.
- Nunes, A. N., L. Lourenço and A. C. Castro Meira. 2016. Exploring spatial patterns and drivers of forest fires in Portugal (1980-2014). *Science of the Total Environment* <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.121>. (17 de octubre de 2016).
- Plan de Acción Climática Municipal (PACMUN). 2015. Plan de Acción Climática Municipal. <http://pacmun.org.mx> (23 de mayo de 2015).
- Parolo, G., G. Rossi and A. Ferrarini. 2008. Toward improved species niche modelling: *Arnica montana* in the Alps as a case study. *Journal of Applied Ecology* 45:1410-1418.
- Pausas, J. G., J. Llovet, A. Rodrigo and R. Vallejo. 2008. Are wildfires a disaster in the Mediterranean basin? - A review. *International Journal of Wildland Fire* 17(6): 713-723.
- Pearson, R. G. and T. P. Dawson. 2003. Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimatic envelope models useful? *Global Ecology and Biogeography* 12: 361-371.
- Pérez-Verdín, G., M. Márquez-Linares, A. Cortés-Ortiz y M. Salmerón-Macías. 2013. Análisis espacio-temporal de la ocurrencia de incendios forestales en Durango, México. *Madera y Bosques* 19(2): 37-58.
- Phillips, S. J., R. P. Anderson and R. E. Schapire. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modeling* 190: 231-259.
- Phillips, S. J. and M. Dudik. 2008. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography* 31:161-175.
- Pompa-García, M., L. Vázquez-Vázquez, M. Zapata-Molina y R. Solís-Moreno. 2013. Modelo conceptual del potencial de incendios forestales en Durango: Avances preliminares. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 3(13): 95-102.
- Pompa-García, M. y M. Sensibaugh. 2014. Ocurrencia de incendios forestales y su teleconexión con fenómenos ENSO. *CienciaUAT*. 27(2): 06-10.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). 2000. Programa de Manejo Área de Protección de Flora y Fauna La Primavera. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. México, D.F., México. 132 p.
- Taylor, K. E., R. J. Stouffer and G. A. Meehl. 2012. An Overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society* 93(4):485-498.
- van Mantgem, P. J., N. L. Stephenson, J. C. Byrne, L. D. Daniels, J. F. Franklin, P. Z. Fule, M. E. Harmon, A. J. Larson, J. M. Smith, A. H. Taylor and T. T. Veblen. 2009. Widespread Increase of Tree Mortality Rates in the Western United States. *Science* 323 (5913): 521-524.
- Velasco-Herrera, G. 2016. Mexican forest fires and their decadal variations. *Advances in Space Research* 58(10):2104-2115.
- Weber, M. G. and M. D. Flannigan. 1997. Canadian boreal forest ecosystem structure and function in a changing climate: Impacts on fire regimes. *Environmental Reviews* 5(3-4): 145-166.
- Westerling, A. L., H. G. Hidalgo, D. R. Cayan and T. W. Swetnam. 2006. Warming and earlier spring increase western U.S. forest wildfire activity. *Science* 313(5789): 940-943.
- WorldClim. 2015. WorldClim. Global Climate Data. <http://www.worldclim.org> (08 de mayo de 2015).





Artículo / Article

Selección de árboles sobresalientes de caoba (*Swietenia macrophylla* King.) en un rodal natural mediante métodos multivariados

Selection of outstanding mahogany (*Swietenia macrophylla* King.) trees in a natural stand based on multivariate methods

Benito N. Gutiérrez Vázquez¹, Eladio H. Cornejo Oviedo², Bartolo Rodríguez Santiago³,
Javier López Upton⁴, Mario H. Gutiérrez Vázquez¹, Martín Gómez Cárdenas⁵ y Amelia Flores Montaña¹

Resumen

Se describe una metodología para seleccionar árboles fenotípicamente superiores en rodales naturales de especies tropicales mediante métodos multivariados, con la técnica de análisis de componentes principales (ACP) y la de agrupamiento, con apoyo del programa "Stand Visualization System" (SVS). El estudio se efectuó en un rodal de 50 ha de caoba (*Swietenia macrophylla*) dentro de una selva mediana subperennifolia, donde se definió una población base de 427 árboles con un diámetro normal mayor a 7.5 cm. Se utilizó el método de ACP con datos de ocho variables de estructura del árbol. Las correspondientes al diámetro normal del fuste, altura total y diámetro de copa fueron las que mejor identificaron las características fenotípicas de los ejemplares superiores en el primer componente, al explicar 79.4 % de la varianza total. La aplicación del SVS permitió el análisis espacial de escenarios posibles y finalmente la ubicación de 30 árboles sobresalientes. El diferencial de selección para las características de interés económico dio valores positivos y entre ellos destaca el diámetro normal que corresponde a 84 % de la población base, y el de copa con 61 %. El método basado en ACP resultó efectivo porque los árboles elegidos por este conducto fueron los mejores en campo, por lo que se puede recomendar dicho procedimiento para escoger a los árboles superiores en rodales naturales de especies tropicales, donde las condiciones limitan el uso de los métodos clásicos de selección como el comparativo.

Palabras clave: Análisis de componentes principales, árbol superior, características fenotípicas, diferencial de selección, ganancia genética, *Swietenia macrophylla* King.

Abstract

A methodology to select phenotypically outstanding trees in a natural stand of tropical species based on multivariate methods using the technique of principal components analysis (PCA) and with support of the software System Visualization Stand (SVS) is described here. This study was conducted on a natural stand of mahogany (*Swietenia macrophylla*) of 50 ha, located in a semi-evergreen forest. A base population of 427 mahogany trees with a normal diameter higher than 7.5 cm was defined. The method of PCA was used with data of eight variables of stem, cup and buttress. The variables stem normal diameter, total height and crown diameter, were the ones that better identified the characteristic phenotype of the selected trees in the first component, explaining 79.4 % of the total variance. The application of SVS allowed the spatial analysis of possible scenarios and the selection of 30 plus trees, when setting down as restriction a minimum distance of 70 m between selected trees. The selection differential for the characteristics of economic interest gave positive values. The normal diameter had a higher selection differential (84 %) than that of the crown diameter with 61 %. The PCA-based method proved to be effective since the plus trees selected by it were the best in the field. These results allow recommending the PCA method for selecting superior trees in a natural stand of tropical species, where conditions limit the use of classic methods of selection such as the comparative one.

Key words: Principal components analysis, plus tree, phenotype characteristics, selection differential, genetic gain, *Swietenia macrophylla* King.

Fecha de recepción/ Reception date: 15 de enero de 2016; Fecha de aceptación/Acceptance date: 21 de julio de 2016.

¹ Consultores para la Investigación Aplicada y el Desarrollo Forestal, S. C. México. Correo-e: bngutierrez@hotmail.com

² Departamento Forestal. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. México.

³ Campo Experimental Chetumal. Centro de Investigación Regional Sureste (CIRSE). INIFAP. México.

⁴ Programa Forestal. Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo. México.

⁵ Campo Experimental Uruapan. Centro de Investigación Regional Pacífico Centro (CIRPAC). INIFAP. México.

Introducción

El mejoramiento genético de árboles ha llegado a ser parte significativa del manejo intensivo de bosques. La primera fase en un programa de este tipo para especies nativas es generalmente la selección de fenotipos superiores o de alto rendimiento en poblaciones naturales (Ledig, 1974), por lo que su identificación es fundamental, ya que de ellos depende la ganancia hereditaria que se alcance.

El conocimiento más importante sobre el tema nació a finales de los década de los 50 con el género *Pinus* (Zobel y Talbert, 1988), lo que hace suponer que los criterios utilizados para pinos no coinciden del todo con los destinados a latifoliadas tropicales. Maldonado y Escobar (2000) abordaron este tópico en los últimos años, y usaron un método de puntaje subjetivo para escoger los mejores ejemplares de *Schizolobium parahyba* (Vell.) S. F. Blake conocido como "frijolito", en Santander, Colombia; Murillo *et al.* (2010) trabajaron sobre el particular en plantaciones forestales, con base en el método clásico de comparación (Zobel y Talbert, 1988).

Sin embargo, con frecuencia en los rodales naturales de especies tropicales no es factible aplicar los procedimientos mencionados debido a que están conformados por una mezcla de muchas especies, y los árboles candidato están tan dispersos que no existen testigos cercanos para contrastarlos; además, algunos individuos pueden retoñar de forma vigorosa y los que crecen cerca del de interés tienen un sistema de raíces común y el mismo genotipo (Zobel y Talbert, 1988).

En la práctica, la selección en estos ambientes se hace a partir de diferentes criterios (Salazar y Boshier, 1989); por ejemplo, una serie de grados numéricos o valores asignados a variables como altura, volumen, tamaño de ramas, ancho de copa, ángulo de ramas, habilidad de poda (e.g., se refiere a que las ramas inferiores se secan y caen rápidamente de manera natural) y forma de fuste (Brown y Goddard, 1961; Wright, 1964). Lo anterior ocasiona que el mejorador escoja los árboles de acuerdo con un juicio subjetivo, sin contar con el soporte de un análisis estadístico que elimine dicha condición, y que no cumpla con el objetivo del mejoramiento genético.

En los programas de este tipo, por lo general se desea mejorar varias características a la vez, por lo que desde la primera fase del proceso se buscan árboles superiores en más de una de ellas (Stonecypher, 1970); no obstante, la información de la primera generación con frecuencia es más bien visual (Torres, 2000). Un método de evaluación eficiente es el índice de selección, porque tiene la ventaja de orientarse a genotipos con base en elementos fenotípicos múltiples (Zobel y Talbert, 1988). En este contexto, el índice se puede abordar a través del método multivariado que se basa en el análisis de componentes principales (ACP), cuyo primer componente

Introduction

Genetic tree breeding has become a significant part of intensive forest management. The first phase in a program of this type for native species is generally the selection of higher or high yielding phenotypes in natural populations (Ledig, 1974), so their identification is fundamental, since on them depends the hereditary gain that is scope.

The most important knowledge on the subject was born in the late 1950s with the genus *Pinus* (Zobel and Talbert, 1988), suggesting that the criteria used for pine trees do not entirely coincide with those for tropical hardwoods. Maldonado and Escobar (2000) addressed this topic in recent years, and used a subjective scoring method to choose the best specimens of *Schizolobium parahyba* (Vell.) S. F. Blake known as "frijolito", in Santander, Colombia; Murillo *et al.* (2010) worked on forestry plantations based on the classical method of comparison (Zobel and Talbert, 1988).

However, in natural stands of tropical species it is often not feasible to apply the aforementioned procedures because they are made up of a mixture of many species, and the candidate trees are so dispersed that there are no close controls to check them. In addition, some individuals can vigorously sprout and those growing near the one of interest have a common root system and the same genotype (Zobel and Talbert, 1988).

In practice, the selection in these environments is made from different criteria (Salazar and Boshier, 1989); for example, a series of numerical degrees or values assigned to variables such as height, volume, branch size, crown width, branch angle, pruning ability (i. e., refers to lower branches drying and falling rapidly naturally) and stem shape (Brown and Goddard, 1961; Wright, 1964). This causes the breeder to choose the trees according to a subjective judgment, without the support of a statistical analysis that eliminates such condition, and that does not meet the objective of genetic improvement.

In programs of this type, it is usually desired to improve several characteristics at the same time, so that from the first phase of the process, upper trees are sought in more than one of them (Stonecypher, 1970). However, information from the first generation is often rather visual (Torres, 2000). An efficient evaluation method is the selection index, because it has the advantage of being oriented to genotypes based on multiple phenotypic elements (Zobel and Talbert, 1988). In this context, the index can be approached through the multivariate method that is based on the main component analysis (PCA), whose first main component (PC) determines the proportion and own vector of the phenotypic values under study, which contribute to the new index (Cerón and Sahagún, 2005).

principal (CP) determina la proporción y vector propio de los valores fenotípicos en estudio, que contribuyen al nuevo índice (Cerón y Sahagún, 2005).

El uso actual del índice de selección a través de CP en el mejoramiento genético forestal es mínimo, y entre los pocos casos puede citarse el de árboles semilleros de *Pinus greggii* Engelm. Parl para la conversión de un ensayo de procedencias a un rodal semillero (Cornejo *et al.*, 2009), y la transformación de un ensayo de progenies de *P. greggii* var. *greggii* Engelm. ex Parl. a huerto semillero (Gutiérrez *et al.*, 2010). Existe poca evidencia sobre el particular en el trópico mexicano en bosques naturales, debido a las limitaciones para la aplicación de los métodos clásicos de selección, por la subjetividad que puede ocurrir al carecer de respaldo estadístico.

Con base en todo lo anterior, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar la eficacia de los métodos multivariados en la selección de árboles fenotípicamente superiores de *Swietenia macrophylla* King.

Materiales y Métodos

El área de estudio

Esta investigación se llevó a cabo en un rodal natural de caoba (*Swietenia macrophylla*) localizado en la selva mediana subperennifolia en el Ejido X-Hazil y Anexos, municipio Felipe Carrillo Puerto, en el estado de Quintana Roo, México, a una altitud de 16 m. La delimitación del área se hizo mediante recorridos en el perímetro del predio y caminos de acceso, para georreferenciar los vértices con un error de muestreo de ± 3 m. El área de estudio se localiza entre las coordenadas 19°21'58.74" N y 88°02'58.74" O, en una superficie de 50 ha.

Dentro del área de estudio se establecieron de manera sistemática 30 sitios de muestreo circulares de 500 m² (radio = 12.61 m), y en cada uno de ellos se determinó: estado físico del arbolado de especies diversas; presencia de ejemplares de caoba con un diámetro normal a 1.30 m sobre el suelo \geq a 7.5 cm; diámetro y altura total promedios; especies dominantes; existencia de perturbaciones ocasionadas por actividades de extracción, incendios y huracanes. En cada centro del sitio se colocó una estaca de madera con una placa metálica para indicar el número del sitio y sus coordenadas. La identificación de los árboles que formaron la población base (427 árboles de caoba), se hizo mediante un reconocimiento en el rodal de 50 ha, con recorridos en caminos y brechas.

Los 427 árboles de interés se ubicaron individualmente con coordenadas y se les midieron las siguientes variables: diámetro normal del fuste; diámetro de copa del árbol (m), calculado como el promedio de la proyección de la misma sobre el suelo en los dos puntos más alejados y el diámetro de

The current use of the selection index through PC in forest genetic improvement is minimal, and among the few cases can be mentioned the tree seedlings of *Pinus greggii* Engelm. Parl for the conversion of a provenance test to a seed stand (Cornejo *et al.*, 2009), and the transformation of a progeny test of *P. greggii* var. *greggii* Engelm. ex Parl. a seed orchard (Gutiérrez *et al.*, 2010). There is little evidence on the particular in the Mexican tropics in natural forests, due to the limitations to the application of the classic methods of selection, by the subjectivity that can happen from the lack of statistical support.

Based on all of the above, the present study aimed to evaluate the efficacy of multivariate methods in the selection of phenotypically superior trees of *Swietenia macrophylla* King.

Materials and Methods

Study area

This research was carried out in a natural stand of mahogany (*Swietenia macrophylla*) located in the middle subperennifolia forest in Ejido X-Hazil and Annexes, Felipe Carrillo Puerto municipality, in the state of Quintana Roo, Mexico, at an altitude of 16 m. The delimitation of the area was made through paths in the perimeter of the property and access roads, to georeferentiate the vertices with a sampling error of ± 3 m. The study area is located between the coordinates 19°21'58.74" N and 88°02'58.74" W, on an area of 50 ha.

Within the study area, 30 circular sampling sites of 500 m² (radius = 12.61 m) were systematically established, and in each one of them was determined: physical condition of the tree of diverse species; presence of mahogany specimens with a ≥ 7.5 cm normal diameter at 1.30 m above the ground; diameter and total height averages; dominant species; existence of disturbances caused by extraction activities, fires and hurricanes. In each center of the site a wooden stake with a metal plate was placed to indicate the site number and its coordinates. The identification of the trees that formed the base population (427 mahogany trees), was done by means of a reconnaissance in the stand of 50 ha, with walks in roads and paths.

The 427 trees of interest were placed individually with coordinates and were measured with the following variables: normal diameter of the stem; tree cup diameter (m), calculated as the average of the projection of it on the ground in the two most distant points and the smaller cup diameter measured perpendicular to the larger diameter; total height (m); height of clean stem (m), to the point where the crown or commercial height begins; slenderness index, calculated as the ratio of total height between height of the clean trunk; number of buttresses and their height; and phytosanitary status with a two-level visual scale, healthy or diseased.

copa menor medido perpendicular al diámetro mayor; altura total (m); altura de fuste limpio (m), al punto donde inicia la copa o altura comercial; índice de esbeltez, calculado como la relación de altura total entre altura del fuste limpio; número de contrafuertes y su altura; y estado fitosanitario con una escala visual de dos niveles, sano o enfermo.

Selección de árboles

La selección de árboles sobresalientes se hizo mediante dos análisis multivariados, uno de componentes principales (ACP) y uno de agrupamiento. Los valores de cada variable se estandarizaron con la siguiente fórmula:

$$Z_{ij} = \left(\frac{X_{ij}}{S_j} \right)$$

Donde:

Z_{ij} = Nuevo valor estandarizado

X_{ij} = Valor de la observación i en la variable j

S_j = Desviación típica o estándar de los valores de la variable j

Para calcular las variables útiles en la selección de árboles, el primer paso consistió en aplicar el ACP con el procedimiento PRINCOMP del paquete *Statistical Analysis System* (SAS, 1999) versión 9.1. Mediante un proceso iterativo, este análisis permite encontrar el menor número de las que integren el primer componente principal (CP) y que mejor identifiquen al fenotipo, siempre que la varianza final sea igual o mayor a 70 % de la variación total. Durante este análisis se eliminan las variables que no acusen una alta correlación dentro del CP.

Lo anterior es importante porque el éxito de la selección de la apariencia, expresado como avance o ganancia genética, depende inicialmente de ello (Quijada, 1980). Conforme más características se consideren, resultará más difícil obtener avances en algunas de manera individual, porque cada carácter tiene un patrón hereditario diferente; por lo tanto, son necesarias intensidades de selección distintas, de modo que al escoger los individuos que satisfagan los requerimientos de una variable en particular se podría afectar a otro carácter que haya incluido fenotipos indeseables en la primera característica. Además, caracteres desiguales pueden estar inversamente correlacionados (White *et al.*, 2007), por lo que se recomienda que el número de variables que se desee destacar sea menor o igual a cinco.

El segundo paso consiste en precisar a los árboles candidatos que van a ser elegidos, a través del proceso de agrupamiento CLUSTER de SAS, que se ejecuta con los valores que el ACP haya designado a cada uno. Para definir el número óptimo de grupos se probaron los métodos *Average*, *Twostage K = 3*, *Ward Pseudo*, *Density K = 3*, *Single* y *Centroid*. El método más

Selection of trees

The selection of plus trees was made through multivariate analysis: principal components (PCA) and clustering. The value of each variable was standardized with the following formula:

$$Z_{ij} = \left(\frac{X_{ij}}{S_j} \right)$$

Where:

Z_{ij} = New standardized value

X_{ij} = Value of the i observation in the j variable

S_j = Typical or standard deviation of the values of the j variable

In order to calculate the useful variables in the selection of trees, the first step was to apply the PCA with the procedure PRINCOMP of the Statistical Analysis System (SAS, 1999) version 9.1 package. By means of an iterative process, this analysis allows to find the least number of those that integrate the first main component (PC) and that better identify the phenotype, provided that the final variance is equal to or greater than 70 % of the total variation. During this analysis, variables that do not show a high correlation within the PC are eliminated.

The above is important because the success of the selection of the appearance, expressed as advance or genetic gain, depends initially on it (Quijada, 1980). As more characteristics are considered, it will be more difficult to obtain advances in some of them individually, because each character has a different hereditary pattern; therefore, different intensities of selection are necessary, so that in choosing individuals that meet the requirements of a particular variable, another character that has included undesirable phenotypes in the first characteristic could be affected. In addition, unequal characters may be inversely correlated (White *et al.*, 2007), so it is recommended that the number of variables to be taken into account is less than or equal to five.

The second step is to specify the candidate trees to be chosen, through the CLUSTER SAS process, which is executed with the values that the PCA has assigned to each one. To define the optimal number of groups, the *Average*, *Twostage K = 3*, *Ward Pseudo*, *Density K = 3*, *Single* and *Centroid* methods were tested. The most effective method is the one with the highest cubic grouping (CCA) values and the pseudo F statistic (which measures the separation between all sets at the current level). In order not to lose the identification of each individual, a code is assigned according to the groups generated.

It is recommended that there be three groups: one that meets the highest values of the variables that integrate the first component and that corresponds to the candidate trees; the next one containing the intermediate trees, which if

eficaz es el que tiene los valores más altos del criterio cúbico de agrupamiento (CCA) y de la pseudo F estadística (que mide la separación entre todos los conjuntos del nivel actual). Para no perder la identificación de cada individuo se le asigna un código en función de los grupos generados.

Se recomienda que sean tres grupos: el que reúna los valores más altos de las variables que integren el primer componente y que corresponde a los árboles candidatos; el siguiente que contiene a los árboles intermedios, que en caso de ser necesario podrían ser usados como árboles candidatos; y el tercero incluye a los que registran los valores más bajos de las variables que integren el primer componente, que deben ser descartados y no elegidos.

El último paso es la ubicación y marcaje de los árboles destacados, para lo cual se utilizó el programa *Stand Visualization System (SVS) Versión 3.36* (McGaughey, 1997, 1999). Para alimentar el programa y obtener una representación real de la posición y dimensión de cada árbol dentro del rodal, se consideraron las coordenadas, el diámetro normal y la altura total de cada uno de los 427, lo que hizo posible obtener una visión del patrón de distribución espacial específico (Figura 1). Para maximizar la distancia entre los ejemplares seleccionados y evitar problemas futuros de consanguinidad, se estableció como criterio una separación mínima entre árboles de 70 m, como recomiendan Bramlett *et al.* (1977). El SVS también permite contemplar diferentes escenarios al hacer la selección y descartar árboles como los de interés. Así, cuando se localizaron algunos a una distancia menor a 70 m entre ellos, sólo se eligió a los individuos con las mejores características en diámetro normal, altura total y altura comercial.

necessary could be used as candidate trees; And the third includes those who record the lowest values of the variables that integrate the first component, which must be discarded and not chosen.

The final step is the location and marking of the trees, for which the *Stand Visualization System (SVS) Version 3.36* program was used (McGaughey, 1997, 1999). In order to feed the program and obtain a real representation of the position and dimension of each tree within the stand, the coordinates, the normal diameter and the total height of each of the 427 were considered, which allowed to obtain a vision of the distribution pattern (Figure 1). In order to maximize the distance between the selected individuals and to avoid future problems of consanguinity, a minimum separation between trees of 70 m was established as criterion, as recommended by Bramlett *et al.* (1977). The SVS also allows to contemplate different scenarios when making the selection and discarding trees as the ones of interest. Thus, when some were located at a distance of less than 70 m between them, only the individuals with the best characteristics in normal diameter, total height and commercial height were taken.

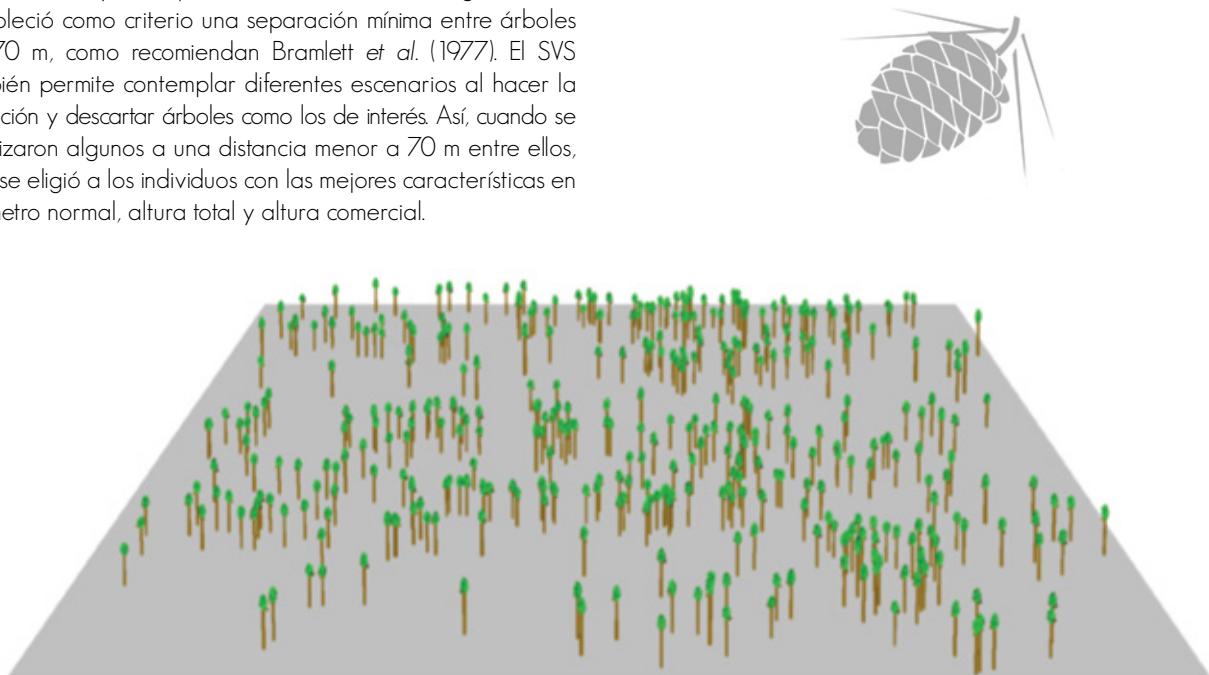


Figura 1. Rodal natural de caoba (*Swietenia macrophylla* King.) en Felipe Carrillo Puerto, Quintana Roo, México (50 ha).
Figure 1. Natural mahogany (*Swietenia macrophylla* King.) stand in Felipe Carrillo Puerto, Quintana Roo, Mexico (50 ha).

En la selección de árboles es importante tener claro que la expresión fenotípica guarda una estrecha relación con el ambiente y el componente genético (dominancia y epistasia); los factores del primer tipo podrían ser muy intensos y en

In selecting trees it is important to be clear that the phenotypic expression has a close relationship to the environment and the genetic component (dominance and epistasis). The factors of the first type could be very intense and in some cases even

algunos casos aún confundirse con los segundos (Cruz, 2005). Lo anterior provoca dos tipos de errores: a) I, cuando se seleccionan individuos que no son genéticamente superiores; y b) II, cuando en un programa no se incluyen individuos que son genéticamente superiores al promedio poblacional (Murillo *et al.*, 2010), y también cuando no se eligen los individuos que a pesar de tener un menor diámetro normal su altura total alcanza el dosel superior (dominante) y la calidad de su fuste es excepcionalmente buena para la producción de madera (Murillo *et al.*, 2003).

La probabilidad de cometer el error de tipo I puede reducirse con la validación en campo de los árboles seleccionados y la eliminación de los seleccionados que en campo se ubican en ámbitos más productivos (que propicien un desarrollo más exitoso en comparación con el resto de los árboles). La probabilidad del error tipo II se puede disminuir al incorporar algunos del grupo intermedio como árboles sobresalientes que inicialmente no fueron catalogados como tales debido a que en campo estaban en condiciones ambientales limitantes (que no favorecen su plenitud), pero que presentan buenas características con respecto a la población general.

Estas consideraciones son fundamentales para el mejoramiento, ya que el error tipo I ocasiona un aumento de materiales indeseables en la población base y una disminución en el progreso genético; el error tipo II también causa una reducción potencial en la ganancia genética, ya que genotipos de alto valor no se incluyen en la población sujeta a manipulación.

Además de lo anterior, se hizo un análisis de correlación de Pearson entre las variables de importancia económica (altura total, diámetro normal, altura de fuste limpio y diámetro de copa), así como el cálculo de la media y del coeficiente de variación (CV) de la población base y de los árboles selectos. Para hacer una estimación del posible avance en la siguiente generación, similar al diferencial de selección (S) propuesto por White *et al.* (2007), se hizo una comparación entre medias de los 427 individuos y de los 30 árboles. Por último, con el valor del diferencial y con la desviación estándar de la población original se calculó la intensidad de selección (i), según Quijada (1980).

La ganancia genética (GG) esperada del diámetro normal y altura de los árboles seleccionados se estimó como sigue:

$$GG = S \times h^2,$$

Donde:

S = Diferencial de selección en %,

h^2 = Heredabilidad en sentido estricto (Murillo *et al.*, 2010)

confused with the latter (Cruz, 2005). The above causes two types of errors: a) I, when selecting individuals which are not genetically privileged; and b) II, when a program does not include individuals which are genetically higher than the population mean (Murillo *et al.*, 2010), and also when individuals are not chosen that, despite having a smaller normal diameter, their total height reaches the upper canopy (dominant) and the quality of its stem is exceptionally good for wood production (Murillo *et al.*, 2003).

The probability of committing the type I error can be reduced with field validation of the selected trees and the elimination of the selected ones that in the field are located in more productive areas (that lead to a more successful development compared to the rest of the trees). The probability of type II error can be reduced by incorporating some of the intermediate group as outstanding trees that were not initially classified as such due to the fact that in the field they were in limiting environmental conditions (which do not favor its fullness), but that they present good characteristics with respect to the general population.

These considerations are basic for improvement, since type I error causes an increase in undesirable materials in the base population and a decrease in the genetic progress; the type II error also causes a potential reduction in genetic gain, since high-value genotypes are not included in the population subject to manipulation.

In addition to the above, a Pearson correlation analysis was made between the variables of economic importance (total height, normal diameter, clean stem height and crown diameter), as well as the calculation of the mean and coefficient of variation (CV) Of the base population and select trees. To make an estimate of the possible advance in the next generation, similar to the selection differential (S) proposed by White *et al.* (2007), a comparison was made between averages of the 427 individuals and that of the 30 trees. Finally, with the value of the differential and the standard deviation of the original population, the intensity of selection (i) was calculated, according to Quijada (1980).

The expected genetic gain (GG) of the normal diameter and height of the selected trees was estimated as follows:

$$GG = S \times h^2,$$

Where:

S = Selection differential in %,

h^2 = Heritability in the strict sense (Murillo *et al.*, 2010)



Para estimar la ganancia genética esperada se utilizaron, los valores de heredabilidad de 0.54 para el diámetro y de 0.55 para la altura total y altura de fuste limpio calculados por Navarro y Hernández (2004).

Resultados y Discusión

El análisis de componentes principales dio como resultado que el diámetro normal, la altura total y el diámetro de copa conducen más atinadamente a la selección de árboles sobresalientes, al representar 79.4 % de la varianza total con el primer componente principal (CP); además, aportaron una contribución relativa semejante para explicar la variación total (Cuadro 1); y para los efectos buscados, son las mejores porque presentaron lo más altos coeficientes de correlación, en comparación con las demás variables evaluadas (Cuadro 2).

Cuadro 1. Vectores Eigen de las variables utilizadas para selección de árboles candidatos de caoba (*Swietenia macrophylla* King.), en Felipe Carrillo Puerto, Quintana Roo, México.

Variable	Componente principal (Varianza explicada)	
	1 (74.9 %)	2 (13.05 %)
Diámetro normal (cm)	0.59898	-0.03717
Altura total (m)	0.56836	-0.68394
Diámetro de copa (m)	0.56409	0.72858

Cuadro 2. Correlaciones de Pearson entre las variables utilizadas para selección de árboles candidatos de caoba (*Swietenia macrophylla* King.), en Felipe Carrillo Puerto, Quintana Roo, México.

	Altura total (m)	Diámetro de copa (m)	Altura de fuste limpio (m)
Diámetro normal (cm)	0.7382**	0.7241**	0.4028**
Altura total (m)		0.6089**	0.5651**
Diámetro de copa (m)			0.2504**

** Significativo con $P < 0.0001$

El método de Ward Pseudo fue el que mejor agrupó a los árboles con el valor más alto del criterio cúbico de agrupamiento (CCA = 0.5), y con el de la pseudo F que fue igual a 1 156. De acuerdo con los valores asignados a los árboles por el ACP, se establecieron tres grupos. Los árboles del Grupo 1 mostraron cifras promedio más altas que las de los Grupos 2 y

In order to estimate the expected genetic gain, the values of heritability of 0.54 for the diameter and of 0.55 for the total height and height of the stem were calculated by Navarro and Hernández (2004).

Results and Discussion

The Principal Component Analysis showed that normal diameter, total height and crown diameter lead more accurately to the selection of major trees, representing 79.4 % of the total variance with the first main component (CP); (Table 1), and for the effects sought, they are the best because they had the highest correlation coefficients, in comparison with the other assessed variables (Table 2).

Table 1. Eigen vectors of the variables used for the selection of candidate mahogany (*Swietenia macrophylla* King.) trees in Felipe Carrillo Puerto, Quintana Roo State, Mexico.

Variable	Principal component (Explained Variance)	
	1 (74.9 %)	2 (13.05 %)
Normal diameter (cm)	0.59898	-0.03717
Total height (m)	0.56836	-0.68394
Crown diameter (m)	0.56409	0.72858

Table 2. Pearson's correlations between the variables used for the selection of candidate mahogany (*Swietenia macrophylla* King.) trees in Felipe Carrillo Puerto, Quintana Roo State, Mexico.

	Total height (m)	Crown diameter (m)	clean stem height (m)
Normal diameter (cm)	0.7382**	0.7241**	0.4028**
Total height (m)		0.6089**	0.5651**
Crown diameter (m)			0.2504**

** Significant = $P < 0.0001$

The Ward Pseudo method was the one that best grouped the trees with the highest value of the cubic criterion of grouping (CCA = 0.5), and with that of the pseudo F that was equal to 1 156. According to the values assigned to the trees by the GPA, three groups were established. The trees in Group 1 showed average values higher than those of Groups 2 and 3, in normal diameter (77.14 vs. 51.79 and 33.32 cm), total height (19.80 vs. 17.43 and 15.86 m) and crown diameter (12.44 vs. 9.61 and 6.25 m), respectively. Thus, this

3, en diámetro normal (77.14 vs. 51.79 y 33.32 cm), altura total (19.80 vs. 17.43 y 15.86 m) y diámetro de copa (12.44 vs. 9.61 y 6.25 m), respectivamente. Así, este conjunto quedó conformado por los 34 ejemplares más grandes, candidatos a ser elegidos como árboles selectos del total de 427 evaluados en el área de estudio.

Sin embargo, al efectuar un análisis espacial con apoyo del SVS para ver el escenario resultante con los 34 árboles escogidos, se observó que al aplicar el criterio de una distancia mínima de 70 m para evitar problemas de endogamia, la población base final sería muy pequeña e insuficiente para iniciar un programa de mejoramiento en esta especie. Por ello se decidió incluir a los mejores árboles del Grupo 2, para así tener un total de 46 candidatos. La selección de los ejemplares del Grupo 2 se hizo con base en su superioridad en altura total, y en menor grado en su diámetro normal, debido a que la altura tiene un efecto menor de la competencia o del ambiente de crecimiento, mientras que el segundo es altamente sensible a tales factores y, por lo general, registra valores de heredabilidad sumamente bajos (Murillo *et al.*, 2010).

La selección de árboles candidatos en el Grupo 2 no sólo se hizo para completar una base aceptable de árboles selectos, sino también para evitar cometer el error de tipo II al utilizar criterios muy estrictos. Los vectores Eigen del CP 1 mostraron que los integrantes de los grupos 1 y 2 tienen valores positivos y son elegibles. Caso contrario ocurrió en los árboles del Grupo 3 con vectores negativos, que los elimina como candidatos, por lo que la selección se restringió a los otros dos conjuntos (Figura 2). Los 46 árboles escogidos mediante ACP se identificaron en los datos del SVS (Figura 3); de ellos, al identificar los que cumplieran con una distancia mínima de 70 m se logró reunir a 30 árboles sobresalientes (Figura 4), lo que equivale aproximadamente a un árbol por cada 1.6 ha, que representan 7 % de la población inicial.

Al igual que Cerón y Sahagún (2005), Cerón *et al.* (2006), Cornejo *et al.* (2009) y Gutiérrez *et al.* (2010), en este estudio el primer componente fue el que mejor explicó la contribución de las variables en la variación total. Las destinadas para hacer la selección en este trabajo también han sido utilizadas para *Pinus radiata* D. Don (Mertens, 1983), *Gliricidia sepium* (Jacq.) Kunth ex Walp. (Salazar y Boshier, 1989) y *Pinus greggii* var. *greggii* (Cornejo *et al.*, 2009; Gutiérrez *et al.*, 2010), pero en el trabajo que se aquí se describe, se consideró el menor número de variables posible, las cuales mostraron una correlación fenotípica positiva (Cuadro 3). Por lo anterior, no habría problema de ser estricto al aplicar la selección con base en un carácter puesto que no resultaría negativo para otro.

set was conformed by the 34 largest individuals, candidates to be chosen as selected trees from the total of 427 evaluated in the study area.

However, when performing a spatial analysis with SVS support to see the resulting scenario with the 34 chosen trees, it was observed that when applying the criterion of a minimum distance of 70 m to avoid problems of inbreeding, the final base population would be very small and not enough to start an improvement program in this species. Therefore, it was decided to include the best trees of Group 2, in order to have a total of 46 candidates. The selection of the trees of Group 2 was made based on their superiority in total height, and to a lesser degree on their normal diameter; This is because height has a lesser effect on competition or growth environment, whereas normal diameter is highly sensitive to competition and usually has extremely low heritability values (Murillo *et al.*, 2010).

The election of candidate trees in Group 2 was not only done to complete an acceptable base of select trees, but also to avoid making type II error by using very strict criteria. The Eigen vectors of CP 1 showed that the members of groups 1 and 2 have positive values and are eligible. Otherwise it occurred in the trees of Group 3 with negative vectors, which eliminated them as optional, so the sample was restricted to the other two sets (Figure 2). The 46 trees chosen by ACP were identified in the SVS data (Figure 3); from them, when identifying those that fulfilled with a minimum distance of 70 m, it was possible to gather 30 outstanding trees (Figure 4), which is equivalent to approximately one tree for each 1.6 ha, representing 7 % of the initial population.

Like Cerón and Sahagún (2005), Cerón *et al.* (2006), Cornejo *et al.* (2009) and Gutiérrez *et al.* (2010), in this study the first component explained in the best way the contribution of the variables in the total variation. Those taken for the selection in this work have also been used for *Pinus radiata* D. Don (Mertens, 1983), *Gliricidia sepium* (Jacq.) Kunth ex Walp. (Salazar and Boshier, 1989) and *Pinus greggii* var. *greggii* (Cornejo *et al.*, 2009; Gutiérrez *et al.*, 2010), but, in this paper, the lowest number of variables was considered, which showed a positive phenotypic correlation (Table 3). Therefore, it would not be a problem to be strict when applying the selection based on one character since it would not be negative for another.



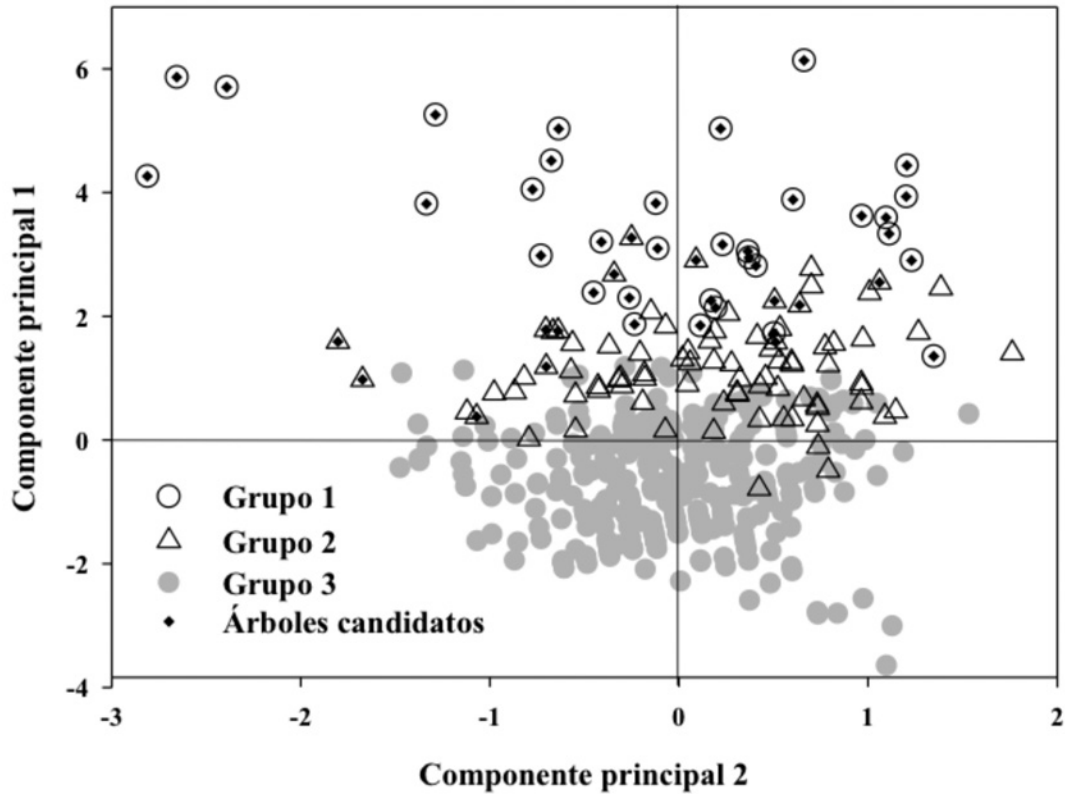


Figura 2. Agrupación de los árboles en los componentes principales 1 y 2 en un rodal natural de caoba (*Swietenia macrophylla* King), en Felipe Carrillo Puerto, Quintana Roo, México.
Figure 2. Cluster of trees in the 1 and 2 principal components in a mahogany (*Swietenia macrophylla* King.) natural stand in Felipe Carrillo Puerto, Quintana Roo State, Mexico.

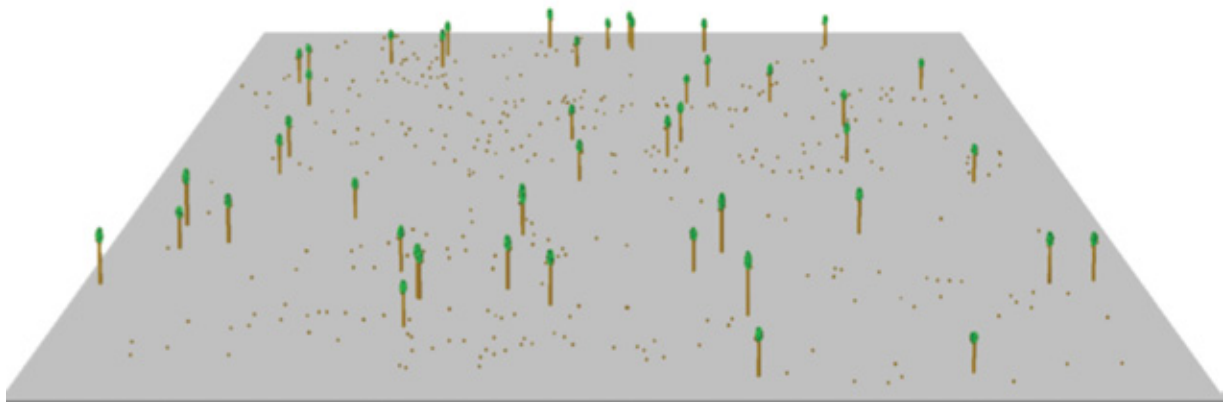


Figura 3. Árboles candidatos dentro del rodal natural de caoba (*Swietenia macrophylla* King), en Felipe Carrillo Puerto, Quintana Roo, México.
Figure 3. Candidate trees in the mahogany (*Swietenia macrophylla* King.) natural stand in Felipe Carrillo Puerto, Quintana Roo State, Mexico.



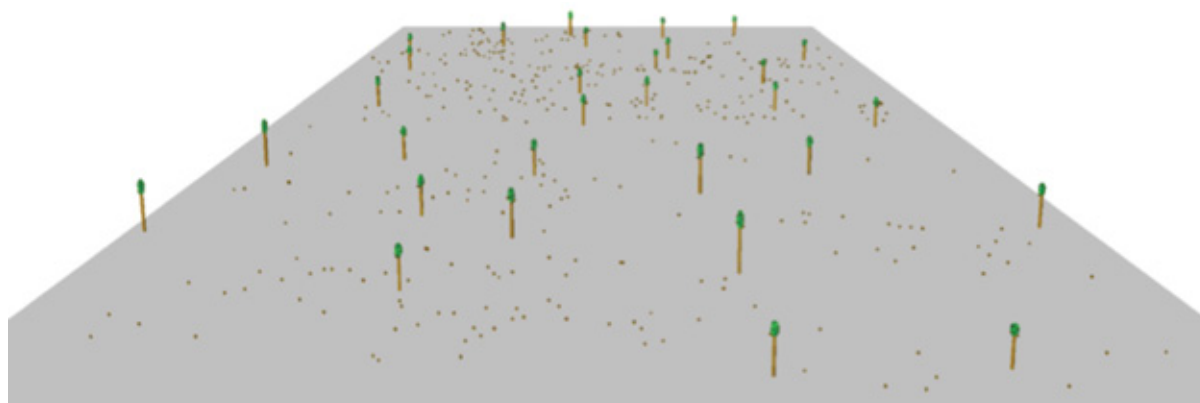


Figura 4. Árboles seleccionados dentro del rodal natural de caoba (*Swietenia macrophylla* King.), en Felipe Carrillo Puerto, Quintana Roo, México.

Figure 4. Selected trees in the mahogany (*Swietenia macrophylla* King.) natural stand in Felipe Carrillo Puerto, Quintana Roo State, Mexico.

Cuadro 3. Características fenotípicas de la población base y la población selecta de caoba (*Swietenia macrophylla* King.), en Felipe Carrillo Puerto, Quintana Roo, México.

	Población base			Población selecta			S (%)	i
	Media	DE	CV (%)	Media	DE	CV (%)		
Diámetro normal (cm)	40.45	14.61	36.1	74.50	12.73	17.08	84	2.33
Altura total (m)	16.49	1.87	11.3	19.45	2.65	13.6	18	1.58
Altura de fuste limpio (m)	8.95	1.89	21.1	10.52	2.58	24.5	18	0.83
Diámetro de copa (m)	7.41	3.00	40.4	11.93	3.56	29.8	61	1.51

CV = Coeficiente de variación; DE = Desviación estándar; S = Diferencial de selección; i = Intensidad de selección.

Table 3. Phenotypic characteristics of the base population and selected mahogany (*Swietenia macrophylla* King.) population in Felipe Carrillo Puerto, Quintana Roo State, Mexico.

	Basic population			Selected population			S (%)	i
	Mean	DE	CV (%)	Mean	DE	CV (%)		
Normal diameter (cm)	40.45	14.61	36.1	74.50	12.73	17.08	84	2.33
Total height (m)	16.49	1.87	11.3	19.45	2.65	13.6	18	1.58
Clean stem height (m)	8.95	1.89	21.1	10.52	2.58	24.5	18	0.83
Crown diameter (m)	7.41	3.00	40.4	11.93	3.56	29.8	61	1.51

CV = Coefficient of variation; DE = Standard deviation; S = Selection differential; i = Selection intensity.

El número de árboles seleccionados afecta la base genética, pues si es reducido constituye una posibilidad estrecha que podría conducir rápidamente a problemas de endogamia. La decisión final de tal cantidad depende también de la variabilidad de los árboles selectos, de la productividad de semillas de cada individuo, y de las necesidades inmediatas de semillas tanto en cantidad como en calidad (Ledig, 1974; Quijada, 1980). Entre menos prolixa sea una especie en producción de semillas, mayor número de individuos será necesario para cubrir las metas de producción de planta. Los 30 árboles aquí seleccionados se consideran suficientes para un programa

The number of selected trees affects the genetic base, because if it is small there is a narrow possibility that could lead to problems of inbreeding. The final decision of such an amount also depends on the variability of the selected trees, on the seed productivity of each individual, and on the immediate needs for seeds in both quantity and quality (Ledig, 1974; Quijada, 1980). The less prolific a species is in seed production, the greater number of individuals will be required to meet plant production goals. The 30 trees selected here are considered enough for a small breeding program (López, 2006), which is close to the assumption of Zobel and Talbert (1988) who considered that

pequeño de mejoramiento (López, 2006), lo que es cercano al supuesto de Zobel y Talbert (1988) quienes consideraron que 20 árboles superiores es una proporción correcta para el establecimiento de huertos semilleros.

El diámetro normal presentó la mayor irregularidad en la población base, de acuerdo con las desviaciones estándar y el coeficiente de variación, mientras que el diámetro de copa lo fue en la población selecta. La primera disminuyó considerablemente en este grupo respecto al diámetro normal y de copa; en cambio, la altura total y de fuste limpio registraron un ligero aumento en los árboles sobresalientes (Cuadro 3). El diferencial de selección para las características de interés económico indica valores positivos; destacan el diámetro normal con el mayor valor, que corresponde a 84 % de la población base, le sigue el diámetro de copa con 61 %. En la altura total y de fuste limpio los valores fueron bajos pues sólo representaron 17 % de la población base.

Con respecto a la ganancia genética estimada se calculó que el diámetro normal sería 45.36 % superior en la nueva generación con relación a la parental (árboles seleccionados). En la altura total y fuste limpio, la siguiente generación sólo sería superior en 9.9 %. El valor para diámetro normal coincide con los datos publicados por Cornelius (1994) con base en el análisis de 24 trabajos sobre la efectividad de la selección de árboles en programas de mejoramiento genético, en los que registró que la ventaja genética reportada y obtenida al utilizar material superior es mayor a 15 % para crecimiento en altura y en diámetro normal, mientras que en altura total y altura de fuste limpio determinó cifras más altas que las aquí calculadas. Las del presente estudio son conservadoras, ya que el cálculo se hizo solo a partir de la reproducción sexual por medio de las semillas de los ejemplares seleccionados; sin embargo, si la reproducción fuera asexual (clonación), las ganancias serían mayores.

El mayor valor de intensidad de selección aquí estimado fue para el diámetro normal con 2.33; la altura total y el diámetro de copa alcanzaron valores medios de 1.58 y 1.51; y la altura de fuste limpio, el menor valor de intensidad de selección (Cuadro 3). Este concepto fue equivalente a dos desviaciones estándar en el diámetro normal, lo que muestra que puede lograrse una ganancia amplia en esta característica mediante la elección de los mejores fenotipos de la población. Según Wright (1976), un diferencial de dos a tres desviaciones estándar es realista cuando se practica en bosques naturales. La intensidad de selección indica en qué medida son fenotípicamente mejores los árboles superiores con respecto a la población original de donde fueron tomados (Zobel y Talbert, 1988).

20 upper trees is a correct proportion for the establishment of seed orchards.

The normal diameter showed the highest irregularity in the base population, according to the standard deviations and the coefficient of variation, while the crown diameter occurred in the selected population. The former decreased considerably in this group with respect to normal and crown diameter; on the other hand, the total height and the clean stem exhibited a slight increase in the major trees (Table 3). The selection differential for the characteristics of economic interest indicates positive values; normal diameter with the highest value, corresponding to 84 % of the base population, is followed by the cup diameter with 61 %. In the total height and clean stem, the numbers were low because they represented only 17 % of the base population.

Regarding the estimated genetic gain, it was estimated that the normal diameter would be 45.36 % higher in the new generation relative to the parent (selected trees). At full height and clean stem, the next generation would only be 9.9 % higher. The value for normal diameter coincides with the data published by Cornelius (1994) based on the analysis of 24 works on the effectiveness of the selection of trees in breeding programs, in which he recorded that the genetic advantage reported and obtained when using better material is greater than 15 % for growth in height and normal diameter, while in total height and height of clean stem determined higher figures than those calculated here. Those of the present study are conservative, since the calculation was made only from the sexual reproduction by means of the seeds of the selected individuals; however, if reproduction were asexual (cloning), the gains would be greater.

The highest value of selection intensity here was for the normal diameter with 2.33; Total height and cup diameter reached mean values of 1.58 and 1.51; And the clean stem height, the lowest selection intensity value (Table 3). This concept was equivalent to two standard deviations in normal diameter, which shows that a broad gain in this characteristic can be achieved by choosing the best phenotypes of the population. According to Wright (1976), a differential of two to three standard deviations is realistic when practiced in natural forests. The intensity of selection indicates to what extent the superior trees are phenotypically better with respect to the original population from where they were taken (Zobel and Talbert, 1988).



Conclusiones

Los análisis de componentes principales (ACP) y de agrupamiento permitieron seleccionar los mejores 30 árboles, cuya superioridad sobre la población base fue de 34 cm en diámetro normal, de 2.9 m en altura total y de 1.5 m en altura comercial. El método basado en análisis multivariados es conveniente porque es sencillo, proporciona un soporte estadístico a los programas de mejoramiento genético forestal porque favorece la presencia de características múltiples. La selección resultó efectiva porque los árboles elegidos por el ACP fueron los mejores en campo. Los resultados hacen recomendable el método planteado porque el objetivo se alcanzó satisfactoriamente y estima el valor porcentual de ganancia genética esperada, aunque debe tomarse en cuenta que existe una tendencia a subestimar o sobreestimar los verdaderos valores.

La selección por medio de ACP y del agrupamiento se fortalece con el uso del programa SVS que hace posible el manejo espacial de los árboles y de los diferentes escenarios en la selección de árboles, lo que supone que esta información es trascendente en la toma de decisiones en lo que compete a los árboles tropicales.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución por autor

Benito N. Gutiérrez Vázquez: análisis de los datos de campo, redacción, estructura y presentación de los resultados dentro del documento; Eladio H. Cornejo Oviedo: análisis de la información de campo, evaluación del análisis estadístico, y revisión del documento; Bartolo Rodríguez Santiago: planeación, diseño y supervisión de trabajo de campo, revisor del documento y análisis de la aplicación de los resultados; Javier López Upton: análisis de la aplicación de los resultados y revisión del documento; Mario H. Gutiérrez Vázquez: evaluación de la aplicabilidad de la información obtenida en campo, evaluación y apoyo en el ajuste estadístico; Martín Gómez Cárdenas: evaluación de la aplicabilidad de la información obtenida en campo y revisión del documento; Amelia Flores Montaña: análisis de la aplicación de los resultados y revisión del documento.

Referencias

- Bramlett, D. L., E. W. Belcher Jr., G. I. DeBarr, J. L. Hertel, R. P. Karrfalt, C. W. Lantz, T. Miller, K. D. Ware and H. O. Yates III. 1977. Cone analysis of Southern pines: a guidebook. USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. SE-13. Asheville, NC, USA. 28 p.
- Brown, C. L. and R. E. Goddard. 1961. Silvicultural consideration in the selection of plus tree phenotypes. *Journal of Forestry* 59: 420-426.
- Cerón R., J. J. y J. Sahagún C. 2005. Un índice de selección basado en componentes principales. *Agrociencia* 39: 667-677.
- Cerón R., J. J., J. Crossa, J. Sahagún C., F. Castillo G. and A. Santacruz V. 2006. A selection index method based on Eigen analysis. *Crop Science* 46: 1711-1721.
- Cornelius, J. 1994. The effectiveness of plus-tree selection for yield. *Forest Ecology and Management* 67:23-34.

Conclusions

Principal component analysis (PCA) and cluster analysis allowed the selection of the best 30 trees, whose superiority over the base population was 34 cm in normal diameter, 2.9 m in total height and 1.5 m in commercial height. The method based on multivariate analysis is convenient because it is simple, it provides statistical support to forest breeding programs because it favors the presence of multiple characteristics. The selection was effective because the trees chosen by the PCA were the best in the field. The results make the proposed method recommendable because the objective was reached satisfactorily and estimates the percentage value of expected genetic gain, although it should be taken into account that there is a tendency to underestimate or overestimate the true values.

The selection through PCA and clustering is strengthened by the use of the SVS program that makes possible the spatial management of trees and the different scenarios in the selection of trees, which means that this information is important in decision making as far as tropical trees are concerned.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

Contribution by autor

Benito N. Gutiérrez Vázquez: analysis of field data, writing, structure and presentation of results in the manuscript; Eladio H. Cornejo Oviedo: analysis of field data, assessment of the statistical analysis and review of the document; Bartolo Rodríguez Santiago: planning, design and supervisions of field work, review of the document and analysis of the application of results; Javier López Upton: analysis of the application of results and review of the document; Mario H. Gutiérrez Vázquez: assessment of the applicability of field work data, assessment and support in statistical fit; Martín Gómez Cárdenas: assessment of the applicability of field work data and review of the document; Amelia Flores Montaña: analysis of the application of results and review of the document.

End of the English versión



- Cornejo O., E. H., E. Bucio Z., B. Gutiérrez V., S. Valencia M. y C. Flores L. 2009. Selección de árboles y conversión de un ensayo de procedencias a un rodal semillero. *Revista Fitotecnia Mexicana* 32: 87-92.
- Cruz C., D. 2005. Principios de genética cuantitativa. Universidad Federal de Vicosa. Vicosa, Minas Gerais, Brasil. 394 p.
- Gutiérrez V., B., E. H. Cornejo O., A. Zermeño G., S. Valencia M. y R. Mendoza V. 2010. Conversión de un ensayo de progenies de *Pinus greggii* var. *greggii* a huerto semillero mediante Eigen-análisis. *Bosque* 31:45-52.
- Ledig, F. T. 1974. Analysis of methods for the selection of trees from wild stand. *Forest Science* 20:2-16.

- López U., J. 2006. Consideraciones en el manejo de germoplasma forestal. In: Ruiz T., N. A. (ed.). Producción y Conservación de Semillas Forestales. XIII Curso Internacional de Actualización en Tecnología de Semillas. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coah., México. pp. 66-72.
- Maldonado B., E. y M. L. Escobar M. 2000. Selección de árboles plus de frijolito (*Schizolobium parahybum*) para mejorar genéticamente la especie en Santander-Colombia. In: Salazar, R. (ed.). 2do. Simposio de Avances en la Producción de Semillas Forestales en América Latina. Turrialba, Costa Rica. pp. 39-45.
- McGaughey, R. J. 1997. Visualizing forest stand dynamics using the Stand Visualization System. Proc. ACSM/ASPRS 4:248-257.
- McGaughey, R. J. 1999. Stand Visualization System. <http://faculty.washington.edu/mcgoy> (30 de abril de 2011).
- Mertens, P. 1983. Criterios de selección de *P. radiata* D. para árboles y rodales semilleros. CICAFOR, INFF y CTB. Cajamarca, Perú. 27 p.
- Murillo, O., J. L. Rojas y Y. Badilla. 2003. Reforestación clonal. 2a ed. Taller de Publicaciones. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. 36 p.
- Murillo, O., F. Picado, Y. Badilla y J. Vallejos. 2010. Metodología para la selección e incorporación de árboles plus en programas de mejoramiento genético forestal. Revista de Agronomía Costarricense 34:105-119.
- Navarro, C. and G. Hernández. 2004. Progeny test analysis and population differentiation of Mesoamerican mahogany (*Swietenia macrophylla*). Revista de Agronomía Costarricense 28:37-51.
- Quijada, M. 1980. Selección de árboles forestales. In: Mejora genética de árboles forestales; curso de capacitación FAO/DANIDA sobre la mejora genética de árboles forestales. FAO. Departamento de Montes. Mérida, Venezuela. Núm. 20. pp.169-179.
- Salazar, R. y D. Boshier. 1989. Establecimiento y manejo de rodales semilleros de especies forestales prioritarias en América Central. CATE-ROCAP. Serie Técnica No. 148. Turrialba, Costa Rica. 78 p.
- Stonecypher, R. W. 1970. Mejoramiento forestal de caracteres múltiples. Unasylva 24:48-51.
- Statistical Analysis System Institute (SAS).1999. SAS/STAT Guide for personal computers. Version 6. Cary, NC, USA. 518 p.
- Torres, J. 2000. Evaluación genética y económica de dos ensayos de progenie de *Pinus radiata* D. Don a base de un índice de selección multicriterio. Universidad de Chile. Revista Ciencias Forestales 14:1-7.
- White, T. L., T. W. Adams and D. B. Neale. 2007. Forest genetics. CABI Publishing, Cambridge, MA, USA. 682 p.
- Wright, J. W. 1964. Mejoramiento genético de los árboles forestales. FAO. Roma, Italia. 436 p.
- Wright, J. W. 1976. Introduction to forest genetics. Academic Press. New York, NY, USA. 463 p.
- Zobel, B. J. y J. T. Talbert. 1988. Técnicas de mejoramiento genético de árboles forestales. Ed. Limusa. México, D. F., México. 545 p.







Artículo / Article

Intercepción de lluvia en bosques de montaña en la cuenca del río Texcoco, México

Rainfall interception in mountain forests in the Texcoco river basin, Mexico

Eulogio Flores Ayala¹, Vidal Guerra De la Cruz², Gerardo H. Terrazas González³,
Fernando Carrillo Anzures¹, Fabián Islas Gutiérrez¹, Miguel Acosta Mireles¹, Enrique Buendía Rodríguez¹

Resumen

El proceso de intercepción de lluvia por la masa arbórea, como componente del ciclo hidrológico en áreas forestales, está determinado, entre otras causas, por las condiciones climáticas, orográficas y por las características de la vegetación. Se presentan resultados de un programa de investigación que tiene como objetivo medir las cantidades de lluvia que interceptan tres comunidades forestales, en la cuenca hidrológico-forestal Río Texcoco. Se establecieron tres módulos de investigación con una superficie de 1.0 ha, en bosques de alta montaña ubicados en un intervalo altitudinal de 2 850 a 3 650 msnm. En cada una, se realizaron mediciones dendrométricas: como diámetro normal, altura total y de fuste limpio, de cada árbol a partir de 7.5 cm de diámetro normal. Durante los periodos de lluvia de los años 2009, 2010 y 2011, se realizaron mediciones de precipitación, y se determinaron las cantidades de precipitación y su distribución por periodo de lluvias. Para las mediciones de precipitación total, se emplearon dos pluviómetros ubicados fuera los módulos. La intercepción se midió con 75 pluviómetros de lectura directa distribuidos aleatoriamente bajo el dosel. La precipitación-intercepción se registraron por evento de lluvia. Las cantidades interceptadas por las copas de los árboles se expresaron como porcentajes, para cada uno de los grupos estudiados: oyamel (26.1 %), encino (21.7 %) y pino (19.2 %). Se generaron los modelos estadísticos de la relación: precipitación total (mm) - lluvia interceptada (%), para cada grupo.

Palabras clave: Ciclo hidrológico, cuenca hidrológico-forestal, intercepción de lluvia, modelos, *Pinus*, *Quercus*, *Abies*.

Abstract

The process of interception of rainfall by tree mass, as a component of the hydrological cycle in forest areas, is determined, among other causes, by the climatic conditions, orographic and by the characteristics of the vegetation. Here are presented the results of a research program that aims to measure the amount of rainfall that three forest communities intercept in the forest -hydrological basin of Texcoco river. Three research modules with an area of 1.0 ha were established in high mountain forests located in an altitudinal range of 2 850 to 3 650 m. In each one, dendrometric measurements were made: normal diameter, total height and clean stem of each tree from 7.5 cm of normal diameter. During the rainy periods of 2009, 2010 and 2011, precipitation measurements were made, and the precipitation amounts and their distribution were determined by rainy season. For the measurements of total precipitation, two rain pluviometers located outside the modules were used. The interception was measured with 75 direct reading pluviometers distributed at random under the canopy. Precipitation-interception were recorded by rainfall event. The amounts intercepted by tree crowns were expressed as percentages for each of the studied groups: fir (26.1 %), oak (21.7 %) and pine (19.2 %). The statistical models of the relationship were generated: total precipitation (mm) - intercepted rain (%), for each group.

Key words: Hydrologic cycle, forest -hydrological basin, rainfall interception, models, *Pinus*, *Quercus*, *Abies*.

Fecha de recepción/Reception date: 2 de febrero de 2016; Fecha de aceptación/Acceptance date: 8 de julio de 2016.

¹ Campo Experimental Valle de México. INIFAP. CIR-Centro. INIFAP. México. Correo-e: flores.eulogio@inifap.gob.mx

² Sitio Experimental Tlaxcala, CIR-Centro. INIFAP. México

³ Académico de la Universidad Autónoma Chapingo. México.

Introducción

La hidrología en ecosistemas forestales está conformada por complejos procesos en los que interactúan factores bióticos y abióticos. Aun cuando la intercepción de la lluvia por la vegetación no es el principal factor en las estimaciones hidrológicas, sí permite identificar que las modificaciones en la cobertura arbórea afectan el balance hidrológico de un área arbolada, ya que altera el contenido de humedad del suelo y la escorrentía superficial del terreno (Sadeghi *et al.* 2015).

El dosel de copas regula el flujo que sigue la precipitación antes de llegar al piso forestal, debido a que modifica la trayectoria de la caída de las gotas dividiéndola en: lluvia directa, lluvia interfolar y lluvia de escurrimiento fustal. En el proceso de intercepción, se reconoce que la vegetación forestal participa en la distribución espacial de la lluvia; incluye sus distintos estratos, y una vez que llega al piso forestal presenta patrones de temporalidad; de tal manera que constituye un proceso de gran complejidad, por los elementos estructurales del bosque y su interacción con el ambiente (Kittredge, 1948).

A pesar de que los bosques no tienen influencia, de manera preponderante, en la precipitación, su participación no se puede considerar como insignificante, en particular, cuando se contabiliza la cantidad y la distribución de la lluvia que llega al piso forestal (Kittredge, 1948). Esta es una de las razones principales por la que diversos estudios de ecología forestal, se han dirigido a generar relaciones entre la composición y variabilidad espacial de la estructura de los bosques, con la intercepción de la lluvia (Flores *et al.*, 2011).

Las precipitaciones en ecosistemas forestales se dividen en precipitación directa (PD), escurrimiento fustal (EF) y pérdida de intercepción (I); clasificación que es importante en los estudios de hidrología forestal (Marín *et al.* 2000; Lida *et al.* 2005).

La precipitación neta (PN) es la cantidad de lluvia que llega al suelo del bosque a través de precipitación directa (PD) y el escurrimiento fustal (EF) (Manfroi *et al.* 2004; Levia y Herwitz 2005; André *et al.* 2008). La PD se refiere a la lluvia que llega al piso del bosque, pasando entre las copas de los árboles o por goteo. El EF corresponde a la fracción de la lluvia que llega al piso del bosque, deslizándose por los fustes y ramas de los árboles, es ocasionada por la precipitación interceptada por los componentes del dosel de copas (Staelens *et al.* 2008). Finalmente, la intercepción de lluvia (I) es la parte de la precipitación retenida por el dosel de copas que no alcanza el piso del bosque, por la evaporación (Taghi *et al.* 2013). La I se calcula de forma indirecta, por la diferencia de la medición de la precipitación bruta (PB), medida por encima del dosel o en un área cercana, y la suma de PD y EF (Aussenac, 1981):

$$I = PB - (PD + EF)$$

Introduction

Hydrology in forest ecosystems is made up of complex processes in which biotic and abiotic factors interact. Although the interception of rainfall by vegetation is not the main factor in hydrological estimates, it does allow identifying that changes in tree cover affect the hydrological balance of a tree area, since it alters the soil moisture content and surface runoff (Sadeghi *et al.*, 2015).

The canopy regulates the flow following precipitation before reaching the forest floor, because it modifies the trajectory of the fall of the drops dividing it into: direct rain, interfolar rain and rain of fustal runoff. In the interception process, it is recognized that forest vegetation participates in the spatial distribution of rainfall. Includes its different strata, and once it reaches the forest floor has patterns of temporality; in such a way that it constitutes a process of great complexity, by the structural elements of the forest and its interaction with the environment (Kittredge, 1948).

Eventhough forests have no major influence on precipitation, their participation can not be considered insignificant, particularly when accounting for the amount and distribution of rainfall on the forest floor (Kittredge, 1948). This is one of the main reasons why several studies of forest ecology have been aimed at generating relationships between the composition and spatial variability of the forest structure with the interception of rainfall (Flores *et al.*, 2011).

Precipitation in forest ecosystems is divided into direct precipitation (PD), fustal runoff (F) and loss of interception (I), classification that is important in studies of forest hydrology (Marín *et al.*, 2000; Lida *et al.*, 2005).

Net precipitation (PN) is the amount of rain that reaches the forest floor through direct precipitation (PD) and fustal runoff (EF) (Manfroi *et al.* 2004; Levia and Herwitz 2005; André *et al.*, 2008). PD refers to the rain that reaches the forest floor, passing between treetops or dripping. EF corresponds to the fraction of the rain that reaches the forest floor, sliding through the branches and branches of the trees, is caused by the precipitation intercepted by the canopy components (Staelens *et al.*, 2008). Finally, rain interception (I) is the part of the precipitation retained by the canopy of canopies that does not reach the forest floor by evaporation (Taghi *et al.*, 2013). It is calculated indirectly by the difference of the gross precipitation (PB) measured over the canopy or in a nearby area, and the sum of PD and EF (Aussenac, 1981):

$$I = PB - (PD + EF)$$

According to Sadeghi *et al.* (2015), rainfall interception can account for 10-25 % of total rainfall (PB) in deciduous forests,

De acuerdo con Sadeghi *et al.* (2015), la intercepción de lluvia puede representar de 10 a 25 % de la precipitación total (PB) en bosques deciduos, y hasta 40 % en bosques perenes. Aussenac (1981), registra una relación de las cantidades de intercepción para distintas especies de *Abies*, *Picea*, *Pinus*, *Pseudotsuga*, *Fagus* y *Quercus*. Lo anterior, se infiere que la densidad o niveles de cobertura de los bosques tendrán un impacto en el proceso de intercepción, ya que inciden en el contenido de humedad del suelo y la escorrentía superficial del terreno.

La intercepción de lluvia y su posterior evaporación afecta al rendimiento hídrico de las cuencas hidrográficas, su estudio es complejo y puede ser muy variable. A gran escala, los factores climáticos, como la velocidad y la exposición del viento, la intensidad de la lluvia, y la incidencia de niebla determinan la pérdida de intercepción. A escala reducida, un control importante de la pérdida de intercepción es la densidad y composición de la vegetación que definen la capacidad de la copa para almacenar, temporalmente, el agua. Otros factores también participan como la exposición de la copa, la rugosidad del dosel y la forma en que penetra el agua de lluvia en este (Fleischbein, 2005; Siebert, 2014).

Los diversos componentes del proceso de intercepción de las lluvias se han medido y modelado para muchos tipos de vegetación, con especial énfasis en los rodales forestales. No obstante, resulta conveniente reconocer la importancia de los modelos de intercepción de lluvias para predecir los efectos de los cambios en la cobertura vegetal sobre los recursos hídricos (Muzylo, 2009), además de permitir la extrapolación de los resultados de las mediciones, tanto en el espacio como en el tiempo, proporcionan información referente a los mecanismos del proceso de intercepción por la vegetación arbórea y de los atributos que controlan dichos procesos (David *et al.*, 2005; Nívar *et al.*, 2008).

En este contexto se plantea determinar la cantidad del agua de lluvia retenida por el dosel de copas por el proceso de intercepción de lluvia, y generar los modelos respectivos en tres tipos de bosque de alta montaña de la cuenca del río Texcoco, México.

Materiales y Métodos

En el año 2009, se inició en el Campo Experimental Valle de México una línea de investigación orientada al estudio de la intercepción del agua de lluvia por vegetación arbórea, en el ámbito de la hidrología forestal en la cuenca del río Texcoco, que junto con los ríos Coatepec, Santa Mónica, San Bernardino, Chapingo, Coxacoaco, Xalapango y Papalotla forman parte de la cuenca hidrológica Texcoco, en el Estado de México (Semarnat, 2015).

and up to 40 % in perennial forests. Aussenac (1981) records a relation of intercept quantities for different species of *Abies*, *Picea*, *Pinus*, *Pseudotsuga*, *Fagus* and *Quercus*. From the above, it is inferred that the density or levels of forest cover will have an impact on the interception process, as they affect the soil moisture content and surface runoff of the land.

The interception of rainfall and its subsequent evaporation affects the water yield of watersheds, their study is complex and can be very variable. On a large scale, weather factors such as wind speed and exposure, rainfall intensity, and fog incidence determine the loss of interception. At a small scale, an important control of the interception loss is the density and composition of the vegetation that define the capacity of the crown to temporarily store water. Other factors are also involved, such as crown exposure, canopy roughness, and rainwater penetration (Fleischbein, 2005; Siebert, 2014).

The various components of the rainfall interception process have been measured and modeled for many types of vegetation, with particular emphasis on forest stands. However, it is important to recognize the importance of rainfall interception models to predict the effects of changes in plant cover on water resources (Muzylo, 2009), in addition to allow the extrapolation of results of measurements, both in space and time, providing information that refers to the mechanisms involved in the interception process by the tree vegetation and of the attributes that control such processes (David *et al.*, 2005; Nívar *et al.*, 2008).

In this context, it is proposed to determine the amount of rainwater retained by the canopy through the rain interception process, and to generate the respective models in three types of high mountain forest in the Texcoco river basin, Mexico.

Materials and Methods

In 2009, a research line was initiated in the *Campo Experimental Valle de México de INIFAP* (Valle de México Experimental Station from INIFAP) to study the interception of rainwater by arboreal vegetation in the area of forest hydrology in the Texcoco river basin. *Coatepec*, *Santa Mónica*, *San Bernardino*, *Chapingo*, *Coxacoaco*, *Xalapango* and *Papalotla* rivers are part of the Texcoco hydrological basin in the State of Mexico (Semarnat, 2015).



Se seleccionaron tres tipos de bosque de alta montaña, que fueron evaluados en tres años diferentes: *Abies religiosa* (Kunth) Schtdl. et Cham. (2009), localizado a 3 000 msnm; *Quercus* spp. (2010) a 2 900 msnm, y *Pinus hartwegii* Lindl. (2011) a 3 650 m (Figura 1). La vegetación en cada tipo de bosque, estrato arbóreo y sotobosque fue identificada mediante colectas botánicas. El diseño de los módulos consistió en parcelas de 1.0 ha (100 x 100 m), en donde se consideraron solo las especies arbóreas dominantes. Las variables incluidas fueron: diámetro a la altura del pecho medida con cinta diamétrica Ben Meadows, altura total y altura de fuste limpio medida con clinómetro Suunto; ubicación, dentro de cada parcela, del arbolado y de los pluviómetros de lectura directa (*Tru-Check*®), utilizando coordenadas cartesianas. Adicionalmente, se midió el desnivel del terreno con nivel de manguera de 20 m, para generar su fisiografía.

Three types of high mountain forest were selected, which were evaluated in three different years: *Abies religiosa* (Kunth) Schtdl. et Cham. (2009), located at 3 000 masl; *Quercus* spp. (2010) at 2 900 masl., and *Pinus hartwegii* Lindl. (2011) at 3 650 masl (Figure 1). The vegetation in each type of forest, arboreal stratum and undergrowth, was identified by botanical collections. The design of the modules consisted of 1.0 ha (100 x 100 m) plots where only dominant tree species were considered. The variables included were: diameter at breast height measured with diametric tape (Ben Meadows), total height and clean stem height measured with Suunto clinometer; location, within each plot, of trees and direct reading pluviometers (*Tru-Check*®), using Cartesian coordinates. Additionally, the unevenness of the terrain was measured with a 20 m hose level to generate its physiography.

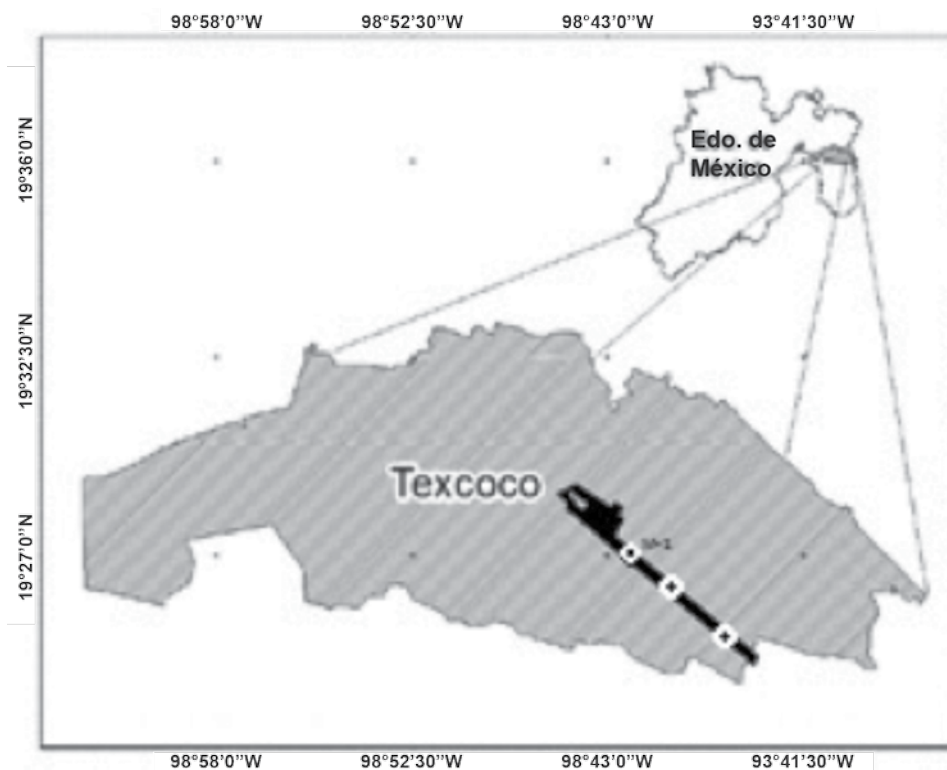


Figura 1. Localización de los módulos de investigación dentro del ejido forestal de San Pablo Ixayoc, municipio Texcoco, Estado de México.

Figure 1. Location of the research modules within the *San Pablo Ixayoc* forest ejido, Texcoco municipality, State of Mexico.

La cantidad de precipitación total anual y su distribución, para cada condición de bosque, se determinó a partir de mediciones de la precipitación diaria, en condiciones abiertas. Para la medición de la cantidad de lluvia interceptada, por módulo en cada módulo, se dispuso de una distribución aleatoria de 75 pluviómetros *Tru-Check*® (de lectura directa) bajo el dosel, equipo con una precisión de 0.1 mm, colocados a

The amount of total annual precipitation and its distribution for each forest condition, was determined from measurements of daily precipitation under open conditions. For the measurement of the amount of intercepted rainfall per module in each module, 75 *Tru-Check*® (direct reading) rain gauges under the canopy, with a precision of 0.1 mm, were placed at random

una altura de 0.9 m sobre el nivel del piso para evitar el efecto de salpicado (Prasad, 2016).

El procedimiento para expresar la cantidad de lluvia interceptada fue mediante la diferencia entre la precipitación total medida en condiciones abiertas y el promedio general del volumen del agua de los colectores bajo el dosel de la vegetación, por cada evento de lluvia (Xiao *et al.*, 2000; Sadeghi *et al.*, 2015).

El estudio inició en el año 2009, en la parcela de oyamel, continuó en 2010, con encino y concluyó en 2011, con pino. Lo anterior permitió generar valores de intercepción por especie y evento de precipitación y anual. No se cuantificó el escurrimiento fustal.

Con base en la dispersión de puntos se analizó la relación de la precipitación total contra el porcentaje de intercepción. Con el fin de correlacionar estadísticamente los valores de precipitación y de intercepción para cada módulo, de manera independiente se ajustaron, mediante análisis de regresión, modelos no lineales de tipo logarítmico y exponencial (Hosseini *et al.*, 2012; Sadeghi *et al.*, 2015).

Los criterios de selección de los mejores modelos ajustados incluyeron el coeficiente de determinación y significancia de los parámetros de regresión. El análisis estadístico se realizó en el programa SAS (SAS, 2007).

Resultados

Precipitación Media Anual

Las características generales, en cuanto a la ubicación de los tres sitios de estudio se resumen en el Cuadro 1. En cuanto a la altitud el bosque de Pino es el que se localiza en la parte más alta de la cuenca, seguido por el bosque de Oyamel y en la parte más baja, el bosque de encino.

Cuadro 1. Localización de los módulos de investigación y año de establecimiento.

Módulo	Localización	Paraje	Coordenadas	Año
Oyamel	Ejido de San Pablo Ixayoc, Texcoco. Estado de México	Atlapulco:	19°26'16.92"	2009
		3 000 msnm	98°45'40.81"	
Encino	Ejido de San Pablo Ixayoc, Texcoco. Estado de México	Tlatzala:	19°27'09.11"	2010
		2 900 msnm	98°46'19.23"	
Pino	Ejido de San Pablo Ixayoc, Texcoco. Estado de México	Cañada Honda:	19°25'09.85"	2011
		3 650 msnm	98°44'15.51"	

at 0.9 m above the floor level to avoid the splashed effect (Prasad, 2016).

The procedure to express the amount of rainfall intercepted was by the difference between the total precipitation measured under open conditions and the overall average of the water volume of the collectors under the vegetation canopy, for each rainfall event (Xiao *et al.*, 2000; Sadeghi *et al.*, 2015).

The study began in 2009, in the fir plot, continued in 2010, with oak and concluded in 2011 with pine. This allowed to generate values of interception by species, precipitation event and per year. The fustal runoff was not quantified.

Based on the dispersion of points, the ratio of total precipitation against the percentage of interception was analyzed. In order to statistically correlate the precipitation and intercept values for each module, logarithmic and exponential non-linear models were fitted by regression analysis (Hosseini *et al.*, 2012; Sadeghi *et al.*, 2015).

The selection criteria of the best adjusted models included the coefficient of determination and significance of the regression parameters. Statistical analysis was performed in the SAS program (SAS, 2007).

Results

Annual Average Precipitation

The general characteristics regarding the location of the three study sites are summarized in Table 1. In terms of altitude, the pine forest is the one located in the highest part of the basin, followed by the fir forest and in the lower part, the oak forest.



Table 1. Location of research modules and year of establishment.

Module	Location	Place	Coordinates	Year
Fir	<i>Ejido de San Pablo Ixayoc, Texcoco. State of Mexico</i>	<i>Atlapulco:</i> 3 000 masl	19°26'16.92" 98°45'40.81"	2009
Oak	<i>Ejido de San Pablo Ixayoc, Texcoco. State of Mexico</i>	<i>Tlatzala:</i> 2 900 masl	19°27'09.11" 98°46'19.23"	2010
Pine	<i>Ejido de San Pablo Ixayoc, Texcoco. State of Mexico</i>	<i>Cañada Honda:</i> 3 650 masl	19°25'09.85" 98°44'15.51"	2011

En el Cuadro 2 se consignan las características dasométricas de la vegetación dominante en cada módulo de investigación.

Table 2 shows some of the population and dasometric characteristics of the dominant vegetation in each research module.

Cuadro 2. Características dasométricas de la vegetación para cada módulo de investigación.

Módulo	Número de árboles por ha	Diámetro promedio (cm)	Altura promedio (m)	Área basal por ha (m ²)
Oyamel ¹ :	369	29.60	22.10	33.98
<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schtdl. et Cham. (oyamel)	315	31.83	24.22	32.36
<i>Garrya laurifolia</i> Benth. (aguacatillo)	36	14.28	8.01	0.62
<i>Quercus rugosa</i> Née (encino)	10	20.35	13.55	0.34
<i>Cupressus lindleyi</i> Klotzsch ex Endl. (cedro)	4	33.75	12.87	0.49
<i>Prunus serotina</i> subsp. <i>capuli</i> (Cav.) McVaugh (capulín)	3	15.17	11.16	0.06
<i>Pinus</i> sp.	1	37.50	26.00	0.11
Encino ¹ :	807	11.00	5.52	10.71
<i>Quercus rugosa</i> Née (hoja ancha)	352	10.30	5.47	4.02
<i>Quercus deserticola</i> Trel. (hoja ancha)	397	11.81	5.50	5.86
<i>Quercus laurina</i> Bonpl. (laurelillo)	10	9.15	7.15	0.07
<i>Arbutus tessellata</i> P. D. Sørensen (madroño)	42	7.80	5.04	0.28
<i>Garrya laurifolia</i> Benth. (aguacatillo)	2	8.40	4.75	0.01
<i>Cupressus lindleyi</i> Klotzsch ex Endl. (cedro)	4	32.35	13.00	0.45
Pino ¹ :	133	43.83	21.44	23.26
<i>Pinus hartwegii</i> Lindl.				

¹ = Identificación taxonómica realizada por el Dr. Enrique Guizar Nolasco. Herbario de la División de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma Chapingo.



Table 2. Dominant vegetation of each research module.

Module	Number of trees per ha	Average diameter (cm)	Average height (m)	Basal area by ha (m ²)
Fir ¹ :	369	29.60	22.10	33.98
<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltdl. et Cham. (fir)	315	31.83	24.22	32.36
<i>Garrya laurifolia</i> Benth. (aguacatillo)	36	14.28	8.01	0.62
<i>Quercus rugosa</i> Née (oak)	10	20.35	13.55	0.34
<i>Cupressus lindleyi</i> Klotzsch ex Endl. (cedar)	4	33.75	12.87	0.49
<i>Prunus serotina</i> subsp. <i>capuli</i> (Cav.) McVaugh (<i>capulín</i>)	3	15.17	11.16	0.06
<i>Pinus</i> sp.	1	37.50	26.00	0.11
Oak ¹ :	807	11.00	5.52	10.71
<i>Quercus rugosa</i> Née (broad-leaved)	352	10.30	5.47	4.02
<i>Quercus deserticola</i> Trel. (broad-leaved)	397	11.81	5.50	5.86
<i>Quercus laurina</i> Bonpl. (<i>laurelillo</i>)	10	9.15	7.15	0.07
<i>Arbutus tessellata</i> P. D. Sørensen (<i>arbutus</i>)	42	7.80	5.04	0.28
<i>Garrya laurifolia</i> Benth. (aguacatillo)	2	8.40	4.75	0.01
<i>Cupressus lindleyi</i> Klotzsch ex Endl. (cedar)	4	32.35	13.00	0.45
Pine ¹ :				
<i>Pinus hartwegii</i> Lindl.	133	43.83	21.44	23.26

¹ = Taxonomic identification performed by Dr. Enrique Guizar Nolasco from the Herbario of the División de Ciencias Forestales of the Universidad Autónoma Chapingo.

Para el caso de *Pinus*, *Abies* y *Quercus*, se midieron 72, 74 y 63 eventos de precipitación, respectivamente. Los resultados indican que para el bosque de *Pinus hartwegii*, se presentó una precipitación acumulada anual de 680.20 mm, en el bosque de *Abies religiosa* de 707.70 mm y para el bosque de *Quercus* spp de 503.00 mm (Cuadro 3). Los intervalos de variación por evento fueron para *Pinus* de 0.2-23.5 mm, para *Abies* de 0.2-33 mm y para *Quercus* de 0.2-38 mm. *Pinus* y *Abies*, registraron datos atípicos, el primero de 82 mm y el segundo de 62 mm.

Medidas de Intercepción de lluvia

La medición de las cantidades de lluvia durante el proceso de intercepción, el número de registros de los eventos de lluvia variaron en cantidad, ya que solo se incluyeron los significativos para los años de evaluación en la zona de estudio.

El procedimiento de cálculo consistió en medir la cantidad de lluvia interceptada, a partir de la diferencia entre la precipitación total, medida en condiciones abiertas, y el promedio general obtenido del volumen del agua de los colectores localizados bajo el dosel por cada evento de lluvia, expresada como porcentaje de la precipitación total.

$$I = P_T - P_{BD}$$

For *Pinus*, *Abies* and *Quercus*, 72, 74 and 63 precipitation events were measured, respectively. Results indicate that for the *Pinus hartwegii* forest, a cumulative annual rainfall of 680.20 mm, in the *Abies religiosa* forest, 707.70 mm and for the *Quercus* spp. Forest, 503.00 mm (Table 3). The intervals of variation per event were 0.2-23.5 mm for *Pinus*, 0.2-33 mm for *Abies* and 0.2-38 mm for *Quercus*. *Pinus* and *Abies* recorded atypical data, the first of 82 mm and the second of 62 mm.

Measures of rainfall interception

The measurement of rainfall amounts during the interception process, the number of records of rainfall events varied in quantity, since only the significant ones were included for the evaluation years in the study area.

The calculation procedure consisted in measuring the amount of rainfall intercepted from the difference between the total precipitation measured under open conditions and the general average obtained from the volume of the water collected by the collectors under the canopy for each rain event, expressed as a percentage of total precipitation.

$$I = P_T - P_{BD}$$

Donde:

- I = Cantidad de lluvia interceptada
- P_T = Cantidad de precipitación total medida en áreas adenañas sin vegetación
- P_{BD} = Cantidad de precipitación medida bajo dosel

Where:

- I = Amount of intercepte rainfall
- P_T = Amount of total rainfall measured in neighboring areas to vegetation
- P_{BD} = Amount of rainfall measured under the canopy

Los resultados se resumen en el Cuadro 3.

Results are summarized in Table 3.

Cuadro 3. Resultados de las medidas de intercepción (%) en los tres módulos de investigación.

Módulo	Año	Precipitación total anual (mm)	Altitud (msnm)	Eventos de lluvia	Intercepción (%)
Oyamel ¹	2009	707.70	3 000	74	26.1
Encino ²	2010	503.00 ²	2 850	63	21.7
Pino ³	2011	680.20 ³	3 600	72	19.2

Periodos de toma de datos: ¹ = 22 mayo al 30 de septiembre; ² = 27 mayo al 30 de octubre; ³ = 24 junio al 30 de septiembre.

Table 3. Results of the interception measurements (%) in the three research modules.

Module	Year	Annual Total Precipitation (mm)	Altitude (msnm)	Events of rain	Interception (%)
Fir ¹	2009	707.70	3 000	74	26.1
Oak ²	2010	503.00 ²	2 850	63	21.7
Pine ³	2011	680.20 ³	3 600	72	19.2

Periods for data taking: ¹ = May 22nd to September 30th; ² = May 27th to October 30th; ³ = June 24th to September 30th.

Los porcentajes de lluvia interceptados indican las cantidades de lluvia que se "pierden" por evaporación, al ser capturada por la cobertura arbolada.

The percentage of intercepted rain refer to the amount of rain that is "lost" from evaporation, since it is captured by the tree cover.

Generación de Modelos de Intercepción

Generation of Interception Models

De acuerdo con la dispersión de puntos de la relación precipitación total contra porcentaje de intercepción, y con el fin de correlacionarlas estadísticamente, se realizó una regresión no lineal utilizando el procedimiento PROC GLM de SAS®. Se ensayaron modelos de tipo logarítmico y exponencial (Scatena, 1990; Hosseini *et al.*, 2012; Sadegi *et al.*, 2015) (Cuadro 4):

According to the point dispersal from the relation of total precipitation against interception percentage, and in order to statistically, correlate them, a non-linear regression was made using the PROC GLM of SAS procedure. Exponential and logarithmic models were tested (Scatena, 1990; Hosseini *et al.*, 2012; Sadegi *et al.*, 2015) (Table 4):

$$y = a \ln X + b$$

$$y = a X^{-b}$$

$$y = a \ln X + b$$

$$y = a X^{-b}$$

Donde:

- y = Intercepción de lluvia bajo dosel, en porcentaje
- X = Precipitación total (en abierto), medida en mm
- \ln = Logaritmo natural
- a, b = Coeficientes de regresión

Where:

- y = Rain interception under the canopy in percentage
- X = Total precipitation (under open sky), measured in mm
- \ln = Natural logarithm
- a, b = Coefficients of regression



Cuadro 4. Modelos de tipo logarítmico y exponencial.

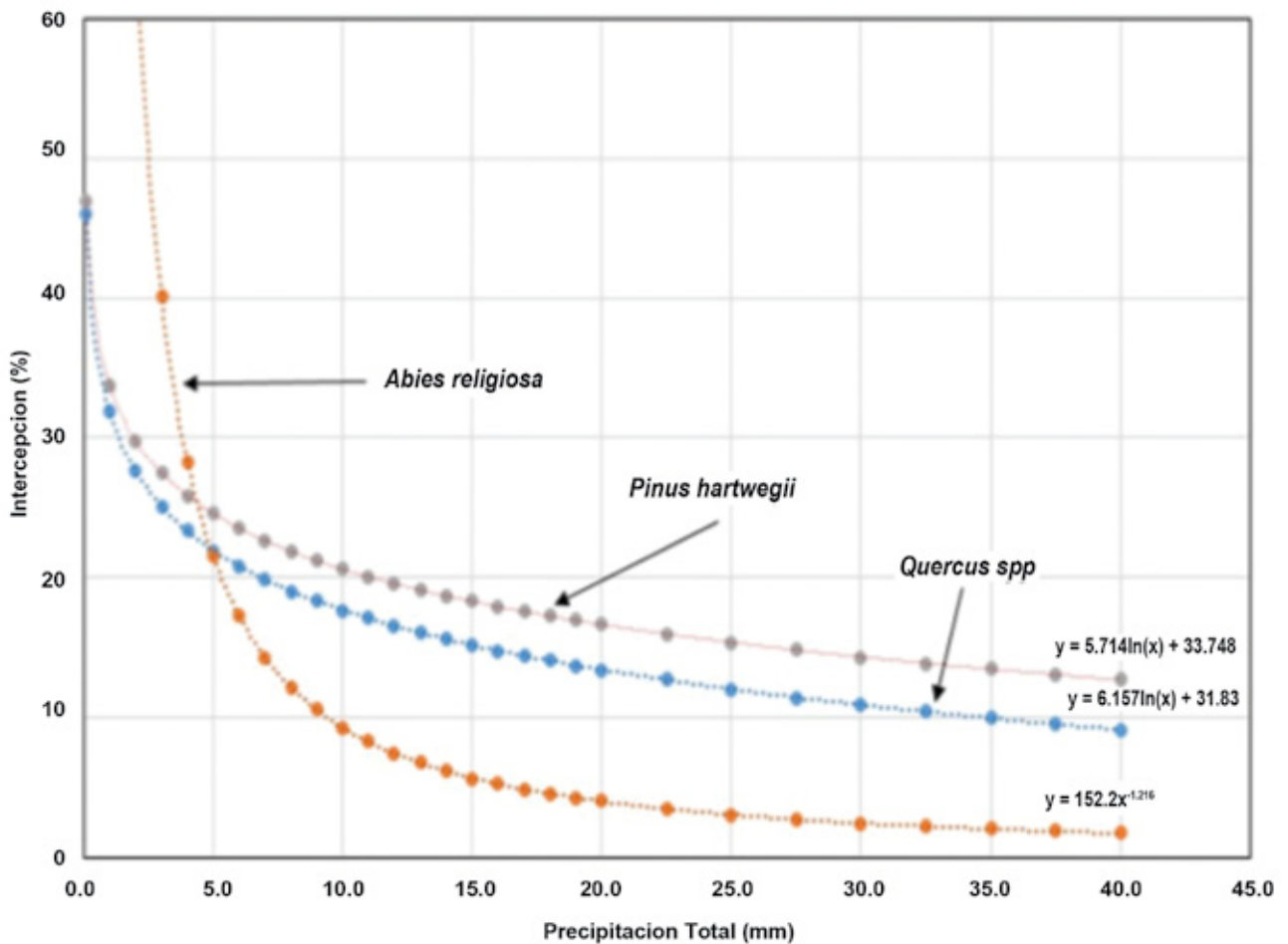
Módulo	Modelo	Coefficiente de determinación
Oyamel	$y = 152.2 X^{-1.216}$	$R^2 = 0.5815$
Encino	$y = -6.1571 \ln X + 31.83$	$R^2 = 0.3883$
Pino	$y = -5.7137 \ln X + 33.748$	$R^2 = 0.4172$

A continuación, se presentan de manera gráfica el comportamiento de los tres distintos modelos generados (Figura 2).

Table 4. Logarithmic and exponential type models.

Module	Model	Coefficiente of determination
Fir	$y = 152.2 X^{-1.216}$	$R^2 = 0.5815$
Oak	$y = -6.1571 \ln X + 31.83$	$R^2 = 0.3883$
Pine	$y = -5.7137 \ln X + 33.748$	$R^2 = 0.4172$

The behavior of the three generated models is graphially shown in Figure 2.



Exponencial negativa para *Abies religiosa* (Kunt) Schldl. et Cham.; logarítmica negativa para *Pinus hartwegii* Lind. y *Quercus* spp., de la relación porcentaje de intercepción como función de la precipitación total.

Negative exponential for *Abies religiosa* (Kunth) Schldl. et Cham.; negative logarithmic for *Pinus hartwegii* Lindl. and *Quercus* spp., from the interception percentage ratio as a function of total precipitation.

Figura 2. Comportamiento gráfico de los modelos de regresión obtenidos para las especies estudiadas.

Figure 2. Graphic behavior of the regression models from the species under study.

La gráfica muestra el comportamiento de la intercepción de lluvia que refleja una parte de la condición del bosque, en cuanto a las características dasométricas de las especies estudiadas. *Abies* tiende a formar masas de mayor densidad que *Pinus* y *Quercus*, y dado su hábito de mantener una gran proporción

The graphic shows the behavior of rainfall interception which reflects a part of the condition of the forest in terms of the mensuration characteristics of the species under study. *Abies* tends to form more dense masses than *Pinus* and *Quercus* and from their habit of keeping a great number of leaves along the

de follaje a lo largo del fuste, resulta que las cantidades de retención de agua de lluvia son mayores que la de los pinos y encinos. Lo anterior explica por qué la intercepción en esta especie es superior, aun en bajos valores de precipitación total.


Aunque el comportamiento de la intercepción es similar en los bosques de encino y pino, es evidente que la curva de intercepción en el bosque de pino es más grande, lo cual puede atribuirse a su mayor densidad en área basal, así como la altura y diámetro promedio. Esta aseveración se refuerza con el comportamiento observado en el bosque de *Abies*, con relación a sus variables dasométricas (Cuadro 2).

Al analizar los porcentajes de intercepción de lluvia en los tres casos, es evidente que son congruentes con los valores obtenidos en otros bosques templados (Aussenac, 1981). Se han documentado valores de intercepción de 21.5 %, para bosques de *Pinus halepensis* y de 20.4 y 24.9 % para *Quercus sessiliflora* (Aussenac, 1981), los cuales son congruentes con los registrados en el presente estudio, excepto para *Abies*. Cantú y González (2001) citan para *Quercus* valores de 13.5 %, en bosques de Linares, Nuevo León, México, que difieren de los señalados en este estudio, explicable por las condiciones climáticas distintas.

De acuerdo con investigaciones más recientes los resultados son consistentes, en términos del comportamiento de los modelos de intercepción (Hosseini *et al.*, 2012; Yáñez-Díaz *et al.* 2014; Sadegi *et al.*, 2015). Es importante resaltar que los porcentajes obtenidos sugieren que otras variables (Torres-Rojo, 2014), como la densidad, arquitectura de las copas y morfología foliar, entre otras que no se analizaron, también participan en el proceso de intercepción de lluvia; por tanto, requieren ser evaluadas.

Conclusiones

Se obtuvieron tres modelos que describen adecuadamente los valores y el comportamiento de la intercepción de lluvia para cada especie dominante considerada. Las características evaluadas permiten, mediante los modelos propuestos, el pronóstico de los efectos de la cubierta vegetal sobre el ingreso del agua de lluvia en la zona de estudio.

Los tres módulos presentan características distintas, en cuanto a especies, altitud, exposición y condiciones micro ambientales. Con base en las diferencias en los modelos de intercepción, es posible que otras variables, climáticas, del sitio o de la vegetación (alométricas) requieran incorporarse al análisis en la modelación del proceso de intercepción de lluvia por los bosques templados. 

stem, as a result, the amounts of rain water retention are greater than those from pine and oaks. The former explains the reason why interception in this species is higher, even in low values of total precipitation.


Even though the behavior of interception is similar in the oak and pine forests, it is evident that the interception curve in the pine forest is greater, which can be attributed to a larger density of the basal area, as well as height and average diameter. This statement is reinforced with the observed behavior of the *Abies* forest in regard to the mensuration variables (Table 2).

When analyzing the rainfall interception percentages in the three cases, it is worth noting that they are consistent with the value obtained in different temperate forests (Aussenac, 1981). Interception values of 21.5 % have been documented for *Pinus halepensis* Miller and of 20.4 and 24.9 % for *Quercus sessiliflora* Salisb. (Aussenac, 1981), which are consistent with those recorded in the actual study, except for *Abies*. Cantú and González (2001) quote 13.5 % for *Quercus* in forests of Linares, Nuevo León State, Mexico, which differ from those indicated in this study, which is understood from the different climatic conditions.

According to more recent research studies, the results are consistent in terms of the behavior of the interception models (Hosseini *et al.*, 2012; Yáñez-Díaz *et al.* 2014; Sadegi *et al.*, 2015). It is important to highlight that the percentages here obtained suggest that other variables (Torres-Rojo, 2014), such as density, crown architecture and leaf morphology, among other things that were not analyzed, also participate in the rain interception process, and thus, need to be assessed.

Conclusions

Three models were obtained that adequately describe the values and behavior of rain interception for each dominant species considered. The evaluated characteristics allow, through the proposed models, the prognosis of the effects of the vegetal cover on the input of rainwater in the study area.

The three modules show different characteristics, in terms of species, altitude, exposure and micro-environmental conditions. Based on the differences in interception models, it is possible that other climatic, site or vegetation variables (allometric) need to be incorporated into the modeling of the interception process of rainfall by temperate forests. 

Acknowledgements

The authors would like to express their gratitude to the ejidal authorities of the community of San Pablo Ixcayoc, Texcoco municipality, State of Mexico, for their support and access facilities to their forests to carry out the present research work.



Agradecimientos

Los autores desean hacer patente su agradecimiento a las autoridades ejidales de la comunidad de San Pablo Ixayoc, municipio de Texcoco, Estado de México por su apoyo y las facilidades de acceso a sus bosques, para la realización del presente trabajo de investigación.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribuciones por autor

Eulogio Flores Ayala: planeación y diseño de la investigación, supervisión de trabajo de campo, toma de datos en campo, análisis de la aplicación de los resultados y redacción del documento; Vidal Guerra De la Cruz: apoyo de la investigación, análisis de los datos de campo, redacción, estructura y presentación de los resultados dentro del documento; Gerardo H. Terrazas González: análisis estadístico y ajuste de los modelos generados; Fernando Carrillo Anzures: Toma de datos en campo, evaluación de la aplicabilidad de la información obtenida en campo e interpretación silvícola; Fabián Islas Gutiérrez: evaluación de la aplicabilidad de la información obtenida en campo y revisión en el ajuste de las ecuaciones; Miguel Acosta Mireles: toma de datos de campo, apoyo de la investigación, análisis de los datos de campo, interpretación del ajuste de los modelos generados, redacción, estructura y presentación de los resultados dentro del documento; Enrique Buendía Rodríguez: revisión y depuración de datos de campo y presentación de los resultados dentro del documento.

Referencias

- André F., J. Mathieu, and Q. Ponette. 2008. Effects of biological and meteorological factors on stemflow chemistry within a temperate mixed Oak-beech stand. *Science of the Total Environment* 393(1):72-83.
- Aussenac, G. 1981. L'interception des précipitations par les peuplements forestiers. *La Houille Blanche* (7-8):531-536.
- Cantú S., I. and H. González R. 2001. Interception loss, throughfall and stemflow chemistry in pine and oak forests in northeastern Mexico. *Tree Physiology* 21:1009-1013.
- David, J., F. Valente and J. Gash. 2005. Evaporation of intercepted rainfall. In: Anderson, M. (ed.). *Encyclopedia of Hydrological Sciences*. John Wiley and Sons, West Sussex, England, pp. 627-634.
- Fleischbein, K., W. Wilcke, R. Goller, J. Boy, C. Valarezo, W. Zech and K. Knoblich. 2005. Rainfall interception in a lower montane forest in Ecuador: effects of canopy properties. *Hydrological Processes* 19(7):1355-1371.
- Flores, A. E., F. Becerra, L. E. Buendía, R., F. Carrillo A. y M. Acosta M. 2011. Intercepción de lluvia por vegetación forestal. Estado actual de la investigación en México e Hidalgo. Aportes para el desarrollo del estado de Hidalgo. In: Colegio del Estado de Hidalgo (comp.). Vol.1 Agua y Medio Ambiente. Ed. Miguel Ángel Porrúa. México, D.F., México, pp. 151-166.
- Hosseini, G. B., S. M., P. Attarod, V. Bayramzadeh, M. T. Ahmadi and A. Radmehr. 2012. Throughfall, stemflow, and rainfall interception in a natural pure forest of chestnut-leaved Oak (*Quercus castaneifolia* C.A. Mey.) in the Caspian Forest of Iran. *Annals of Forest Research* 55(2):197-206.
- Kittredge, J. 1948. *Forest influences. The effects of woody vegetation on climate, water, and soil, with applications to the conservation of water and the control of floods and erosion*. Dover Publications, Inc. New York, NY, USA. 349 p.
- Levia, D. F. and S. R. Herwitz. 2005. Interspecific variation of bark water storage capacity of three deciduous tree species in relation to stemflow yield and solute flux to forest soils. *Catena* 64: 117-137.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests

Contributions by author

Eulogio Flores Ayala: design and planning of the research, supervision of field work, data taking at the field, analysis of the application of results and writing of the document; Vidal Guerra De la Cruz: research support, field data analysis, structuring, presentation and writing of results in the document; Gerardo H. Terrazas González: statistical analysis and fitting of the generated models; Fernando Carrillo Anzures: field data taking, assessment of the applicability of the information taken in the field and forestry interpretation; Fabián Islas Gutiérrez: assessment of the applicability of the information taken in the field and review of the fit of the equations; Miguel Acosta Mireles: data taking at the field, research support, field data analysis, interpretation of the fit to the generated models, structuring, presentation and writing of results in the document; Enrique Buendía Rodríguez: field data review and depuration and presentation of results in the document.

End of the English version



- Lida, S., T. Tanaka and M. Sugita. 2005. Change of interception process due to the succession from Japanese red pine to evergreen oak. *Journal of Hydrology* 315: 154-166.
- Manfroi O., K. Koichiro, T. Nobuaki, S. Masakazu, M. Nakagawa, T. Nakashizuka and L. Chong. 2004. The stemflow of trees in a Bornean lowland tropical forest. *Hydrological Processes* 18 (13): 2455-2474.
- Marin, T. C., W. Bouten and J. Sevink. 2000. Gross rainfall and its partitioning into throughfall, stemflow and evaporation of intercepted water in four forest ecosystems in western Amazonia. *Journal of Hydrology* 237:40-57.
- Návar Ch., J. J., J. Méndez G. y H. González R. 2008. Intercepción de la lluvia en especies de leguminosas del nordeste de México. *Terra Latinoamericana* 26 (1):61-68.
- Prasad G., C., L. Adrian Bruijnzeel, M. W. Lubczynski, M. Ravelona, B. W. Zwartendijk and H. J. (I)ja van Meerveld. 2016. Measurement and modelling of rainfall interception by two differently aged secondary forests in upland Eastern Madagascar. *Journal of Hydrology*. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.10.032>.
- Sadeghi S. M. M., P. Attarod and T. G. Pypker. 2015. Differences in rainfall interception during the growing and non-growing seasons in a *Fraxinus rotundifolia* Mill. plantation located in a semiarid climate. *Journal of Agricultural Science and Technology* 17 (1):145-156.
- Statistical Analysis System Institute (SAS). 2007. *The SAS System for Windows ver. 9.1.3*. SAS Institute Inc. Cary, NC, USA.
- Scatena, F. N. 1990. Watershed scale rainfall interception on two forested watersheds in the Luquillo mountains of Puerto Rico. *Journal of Hydrology* 113 (1990): 89-102.
- Siegert, C. M. and D. F. Levia 2014. Seasonal and meteorological effects on differential stemflow funneling ratios for two deciduous tree species. *Journal of Hydrology* 519: 446-454.

Staelens J., A. D. Schrijver, K. Verheyen and N. E. C. Verhoest. 2008. Rainfall partitioning into throughfall, stemflow, and interception within a single beech (*Fagus sylvatica* L.) canopy: influence of foliation, rain event characteristics, and meteorology. *Hydrological Processes* 22 (1): 33-45.

Taghi A. M., P. Attarod and V. Bayramzadeh. 2013. The role of rainfall size in canopy interception loss: An observational study in a typical beech forest. *Middle-East Journal of Scientific Research* 3(7): 876-882.

Torres-Rojo, J. M. 2014. Exploring volume growth-density of mixed multiaged stands in northern Mexico. *Agrociencia* 48 (4): 447-461.

Yáñez-Díaz, M. I., I. Cantú-Silva, H. González-Rodríguez y J. I. Uvalle-Sauceda. 2014. Redistribución de la precipitación en tres especies arbustivas nativas y una plantación de eucalipto del noreste de México. *Tecnología y Ciencias del Agua* 5 (2):71-84.

Xiao, Q., E. G. McPherson, S. L. Ustin, M. E. Grismer and J. R. Simpson. 2000. Winter rainfall interception by two mature open-grown trees in Davis, California. *Hydrological Processes* 14(4): 763-784.





Artículo / Article

Estimación de biomasa y carbono almacenado en bosques comunitarios de la región Frailesca de Chiapas, México

Estimation of the biomass and stored carbon in community forest of La Frailesca region of Chiapas, Mexico

Luis Alfredo Rodríguez-Larramendi¹, Francisco Guevara-Hernández², Luis Reyes-Muro³,
Jesús Ovando-Cruz⁴, José Nahed-Toral⁵, Miguel Prado-López¹, Rady Alejandra Campos Saldaña¹

Resumen

Con el objetivo de estimar la biomasa y el carbono acumulado en bosques de pino (*Pinus maximinoii*), encino (*Quercus rugosa*), roble (*Quercus robur*) y ocote (*Pinus patula*), en 11 ejidos de la región Frailesca de Chiapa, se seleccionaron 22 parcelas de 500 m² (dos por cada ejido); en las que se determinaron la altura (H), la edad (años) y el diámetro normalizado (DN) de 358 árboles. Se ajustaron ecuaciones de regresión entre la biomasa acumulada (BM_t) y la edad de cada árbol. Los ajustes resultaron estadísticamente significativos para el modelo exponencial $y=b \cdot e^{cx}$. Se demuestra que, a partir de la edad del árbol, es posible estimar la biomasa total acumulada y que la mayor acumulación, tanto de biomasa como de carbono, se produjo en los bosques de pino y la menor en los de roble, debido a su estado fisiológico determinado por la menor edad del arbolado. Los bosques de pino registraron un almacén de 158 Mg ha⁻¹, seguido del encino con 117 Mg ha⁻¹. La especie que menos carbono almacenó fue el roble con 5.9 Mg ha⁻¹. De los sitios estudiados, los bosques del ejido "24 de Febrero" presentaron mayor captura potencial de carbono.

Palabras clave: Acumulación de biomasa, biomasa aérea, biomasa radicular, bosques comunitarios, captura de carbono, relaciones alométricas.

Abstract

Twenty-two 500 m² plots (two for each *ejido*) were selected in 11 *ejidos* of La Frailesca region of Chiapas in order to estimate the biomass and accumulated carbon in pine (*Pinus maximinoii*), oak (*Quercus robur*), holm oak (*Quercus rugosa*) and Mexican weeping pine (*Pinus patula*). The height (H), age (years) and normalized diameter (ND) of 358 trees were determined in these plots. Regression equations between the accumulated biomass (BM_t) and the age of each tree were adjusted. The adjustments were statistically significant for the exponential model $y=b \cdot e^{cx}$. This study proves that the total accumulated biomass can be estimated based on the age of the tree, and that the largest accumulation of both biomass and carbon occurred in the pine forests, and the lowest, in the oak forests; this is due to their physiological status, as the latter trees are younger. Pine trees had a storage of 158 Mg ha⁻¹, followed by holm oaks, with 117 Mg ha⁻¹; the species with the lowest value was oak, with 5.9 Mg ha⁻¹. Of all the studied sites, the forests of the "24 de Febrero" *ejido* had the highest potential for carbon capture.

Key words: Biomass accumulation, aboveground biomass, root biomass, community forests, carbon capture, allometric relationships.

Fecha de recepción/ Reception date: 19 de septiembre de 2016; Fecha de aceptación/Acceptance date: 30 de septiembre de 2016.

¹ Facultad de Ingeniería. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. Sede Villacorzo. México.

² Facultad de Ciencias Agronómicas. Universidad Autónoma de Chiapas. Correo-e: francisco.guevara@unach.mx

³ Campo Experimental Pabellón. CIR-Norte Centro. INIFAP. México.

⁴ Red de Estudios para el Desarrollo Rural, A. C. México.

⁵ Departamento de Agroecología. El Colegio de la Frontera Sur. México.

Introducción

En México, los bosques de coníferas y latifolias ocupan 15.4 % del territorio nacional; los manejados cubren 7.3 millones de hectáreas, en tanto que los protegidos 7.1 millones de hectáreas (SARH-SFF, 1994). Por otro lado, cerca de 80 % de las áreas forestales son de propiedad comunal y 95 % de los aprovechamientos forestales provienen principalmente, de bosques templados nativos (Masera *et al.*, 2001).

En el estado de Chiapas, los bosques latifolios, y de coníferas, abarcan 1 117 248 ha y las selvas 2 175 948 ha (SARH-SFF, 1994), por lo que a la entidad le corresponde el segundo lugar nacional en cuanto a superficie forestal y extracción maderable de pino, ciprés, liquidámbar, encino, macules, amate, cedro y caoba. Adicionalmente, su vasta cubierta boscosa, le confiere un gran potencial para la captura y almacenamiento de CO₂.

Los ecosistemas forestales pueden capturar cantidades significativas de Gases de Efecto Invernadero (GEI), en particular, CO₂. Por tal motivo, en las últimas décadas existe un interés considerable por incrementar el contenido de carbono en la vegetación, mediante la conservación forestal, reforestación, creación de granjas forestales y otros métodos de manejo del suelo. Gran número de estudios han demostrado la capacidad de las especies forestales para almacenar carbono en su biomasa (Pimienta *et al.*, 2007; Alberto y Elvir, 2005; Roncal *et al.*, 2008; Nájera y Hernández, 2009).

Cada año, esas áreas forestales almacenan cantidades importantes de biomasa que contribuyen a reducir los niveles de carbono en la atmósfera (Melillo *et al.*, 1993; Dixon *et al.*, 1994), lo cual cobra mayor significado, si se considera que el contenido de CO₂ en la atmósfera se ha incrementado desde la revolución industrial, y las estimaciones indican que para el siglo XXI esta tendencia de aumento será mayor (Petit *et al.*, 1999; Crowley, 2000; UNEP, 2001). Todo ello, apunta a que las actividades antrópicas han provocado disturbios que coadyuvan al deterioro de los ecosistemas (Dhillon y Von Wuehlich, 2013).

Diversos estudios realizados en México han demostrado el potencial de los bosques para capturar el carbono atmosférico. Masera *et al.* (2001) generaron un modelo para simular la captura de carbono en el período 2000-2030, en el que se dividió el uso del suelo en bosques, selvas, zonas áridas y usos no forestales. Estos autores usaron dos escenarios: el primero, denominado de "referencia" y el segundo, de "políticas". De adoptarse las opciones propuestas derivadas de sus resultados, México tendría la posibilidad de capturar aproximadamente 46 millones de toneladas de carbono durante el periodo 2000-2030. Una parte de esa mitigación se lograría a través de: a) evitar la deforestación, b) manejar sustentablemente los bosques naturales, y c) restaurar las áreas forestales degradadas.

Introduction

In Mexico, conifer and broadleaf forests occupy 15.4 % of the national territory; managed forests cover 7.3 million hectares, while protected forests cover 7.1 million hectares (SARH-SFF, 1994). On the other hand, nearly 80 % of the forest areas are communal property, and 95 % of the forest exploitations originate mainly from native temperate forests (Masera *et al.*, 2001).

In the state of *Chiapas*, these forests cover 1 117 248 ha, and rain forests occupy 2 175 948 ha (SARH-SFF, 1994); therefore, the entity has the second place nationally for forest surface area and timber extraction from pine, cypress, sweetgum, holm oak, rosy trumpet, amate, cedar and mahogany trees. In addition, its vast forest cover confers it a great potential for CO₂ sequestration.

Forest ecosystems can capture significant amounts of Greenhouse Gases (GHG), particularly CO₂. For this reason, in recent decades there is considerable interest in increasing the carbon content of the vegetation through the preservation of forests, reforestation, the creation of forest farms and other land management methods. A great number of studies have demonstrated the ability of forest species to store carbon in their biomass (Pimienta *et al.*, 2007; Alberto and Elvir, 2005; Roncal *et al.*, 2008; Nájera and Hernández, 2009).

Each year, these forest areas store significant amounts of biomass that contribute to reduce carbon levels in the atmosphere (Melillo *et al.*, 1993; Dixon *et al.*, 1994), which acquire greater significance if we consider that the CO₂ content in the atmosphere has augmented since the industrial revolution, and estimations indicate that in the XXIst century this tendency will increase further (Petit *et al.*, 1999; Crowley, 2000; UNEP, 2001). All this indicates that anthropic activities have caused disturbances that contribute to the deterioration of the ecosystems (Dhillon and Von Wuehlich, 2013).

Various studies performed in Mexico have proven the potential of forests to capture atmospheric carbon. Masera *et al.* (2001) created a model simulating carbon capture during the 2000-2030 period, which divided land use into forests, rain forests, arid zones and non-forest uses. These authors used two scenarios: the first, referred to as "baseline", and the second, as "policies". If the proposed options derived from their results were to be adopted, Mexico would be able to capture approximately 46 million tons of carbon during the 2000-2030 period. Part of this mitigation would be achieved as follows: a) by preventing deforestation, b) through sustainable management of the natural forests, and c) by restoring the degraded forest areas.



El CO₂ es uno de los componentes más importantes de los GEI y es producido por las actividades humanas, cuando se utilizan combustibles fósiles en la generación de energía y satisfacción de otras demandas de la sociedad. Los procesos de deforestación, los cambios de uso del suelo y las concentraciones de metano que resultan de las actividades agropecuarias, también propician el cambio climático (UNEP, 2001).

El aumento de la concentración de GEI en la atmósfera ha provocado el fenómeno de "efecto invernadero", origen de cambios en las escalas climáticas de la Tierra (IPCC, 2007). Como consecuencia del incremento de CO₂ en la atmósfera ocurren eventos climáticos extremos, tales como inundaciones por huracanes, con lamentables pérdidas humanas y económicas (IPCC, 2005).

De acuerdo con Alberto y Elvir (2005), el secuestro de carbono ha sido objeto de estudio de investigaciones forestales en diferentes países. Montero y Kaninnen (2002) señalan que en el sur de Costa Rica, la acumulación de biomasa aérea y el secuestro de carbono en plantaciones manejadas de *Terminalia amazonia* (J.F. Gmel.) Exell a los 10 años fue de 97.03 Mg ha⁻¹ y 45.30 Mg ha⁻¹, respectivamente. En la zona central de Honduras, la acumulación de biomasa fue de 80.53 Mg ha⁻¹ en bosques naturales de *Pinus oocarpa* (Ramos, 2000). La acumulación de carbono en biomasa aérea de bosques de pino en el ejido La Majada en Michoacán, México, tuvo un valor de 28.85 Mg ha⁻¹ (Zamora, 2003), mientras que en bosques de coníferas de Tancitaro, en Michoacán, la acumulación y captura de carbono anual en biomasa aérea fue de 19.00 Mg ha⁻¹ y 1.65 Mg ha⁻¹, respectivamente (Fragoso, 2003). Con base en la contribución potencial de los bosques de Chiapas para mitigar los efectos del cambio climático, el objetivo de la presente investigación fue estimar producción de biomasa y la captura de carbono en los bosques de pino, encino, ocote y roble en áreas forestales de la región Frailesca, así como conocer la relación existente entre la producción de biomasa y la edad de los árboles.

Materiales y Métodos

Localización

La investigación se llevó en el municipio Villacorzo, al sureste del estado de Chiapas, en áreas boscosas de 11 ejidos de la región Frailesca (Cuadro 1, Figura 1), ubicado entre los 16° 11' 05" N y 93° 16' 03" O, a una altitud promedio de 584 msnm (CEIEG, 2011).

CO₂ is one of the main components of GHGs and is produced by human activities when fossil fuels are utilized to generate energy and to meet other demands of society. Deforestation processes, land-use changes and methane concentrations resulting from agricultural and stockbreeding activities also promote climate change (UNEP, 2001).

The increase in GHG concentrations in the atmosphere has caused the "greenhouse effect" phenomenon, which has resulted in changes in the climatic scales of the Earth (IPCC, 2007). The increase of CO₂ in the atmosphere produces extreme climatic events such as floods caused by hurricanes, which result in regrettable losses of human lives as well as economic losses (IPCC, 2005).

According to Alberto and Elvir (2005), carbon sequestration has been the object of study of forest research in various countries. Montero and Kaninnen (2002) point out that, in southern *Costa Rica*, the accumulation of aboveground biomass and carbon sequestration in managed *Terminalia amazonia* (J. F. Gmel.) Exell plantations after 10 years was of 97.03 Mg ha⁻¹ and 45.30 Mg ha⁻¹, respectively. In central Honduras, the accumulation of aboveground biomass was of 80.53 Mg ha⁻¹ in natural *Pinus oocarpa* forests (Ramos, 2000). Carbon accumulation in the aboveground biomass of the pine forests of the *La Majada ejido* in *Michoacán*, Mexico, amounted to 28.85 Mg ha⁻¹ (Zamora, 2003), while in the conifer forests of *Tancitaro*, *Michoacán*, Mexico, the annual accumulation and capture of carbon in the aboveground biomass added up to 19.00 Mg ha⁻¹ and 1.65 Mg ha⁻¹, respectively (Fragoso, 2003). Based on the potential contribution of the forests of *Chiapas* to the mitigation of the effects of climate change, the purpose of the present research was to estimate the production of biomass and the capture of carbon in pine, holm oak, Mexican weeping pine and oak forests in the forest areas of *La Frailesca* region, as well as to determine the relationship between the age of trees and biomass production.

Materials and Methods

Location

The research was carried out in *Villacorzo* municipality, in southeastern *Chiapas*, in forest areas of 11 *ejidos* of *La Frailesca* region (Table 1, Figure 1), located between the coordinates 16° 11' 05" N and 93° 16' 03" W, at a mean altitude of 584 masl (CEIEG, 2011).



Cuadro 1. Distribución de las parcelas por ejidos y especies forestales seleccionadas.

Ejidos	Parcelas de 500 m ²			
	Pino	Encino	Roble	Ocote
24 de Febrero	+	+		
Monterrey			+	
Patria Chica			+	
La Frailesca				+
Juan Sabinés Gutiérrez	+			
Bonanza		+		
La Libertad			+	
Tierra Santa	+			
La Unión	+			
Nuevo Refugio				+
Unión del Carmen			+	

Table 1. Distribution of the plots by ejidos and by selected forest species.

Ejidos	500 m ² plots			
	Pine	Holm oak	Oak	Mexican weeping pine
<i>24 de Febrero</i>	+	+		
<i>Monterrey</i>			+	
<i>Patria Chica</i>			+	
<i>La Frailesca</i>				+
<i>Juan Sabinés Gutiérrez</i>	+			
<i>Bonanza</i>		+		
<i>La Libertad</i>			+	
<i>Tierra Santa</i>	+			
<i>La Unión</i>	+			
<i>Nuevo Refugio</i>				+
<i>Unión del Carmen</i>			+	

En la zona de estudio predomina el clima cálido subhúmedo con lluvias abundantes en verano. La precipitación mínima anual es de 1 200 mm y la máxima 3 000 mm, distribuida entre 100 y 200 días al año. Los suelos son afectados por la erosión o de los limos precipitados por acción eólica y por las avenidas de los ríos; su fertilidad es variable, con uso agrícola condicionado a su profundidad y pedregosidad (CEIEG, 2011).

Las localidades presentan una cobertura vegetal compuesta, principalmente, por vegetación secundaria de bosque de coníferas, mesófilo de montaña y de encino; de selva caducifolia, subcaducifolia y perennifolia.

A subhumid warm climate with abundant summer rains prevails in the study area. The minimum annual precipitation is 1 200 mm, and the maximum is 3 000 mm, distributed among 100 and 200 days a year. The soils are affected by silt erosion precipitated by the action of the wind and by river floods; its fertility is variable, with its agricultural use conditioned by its depth and stoniness (CEIEG, 2011).

The localities have a vegetal cover that consists mainly of conifer forest secondary vegetation, montane cloud and holm oak forests, and deciduous, sub-deciduous and evergreen rainforests.

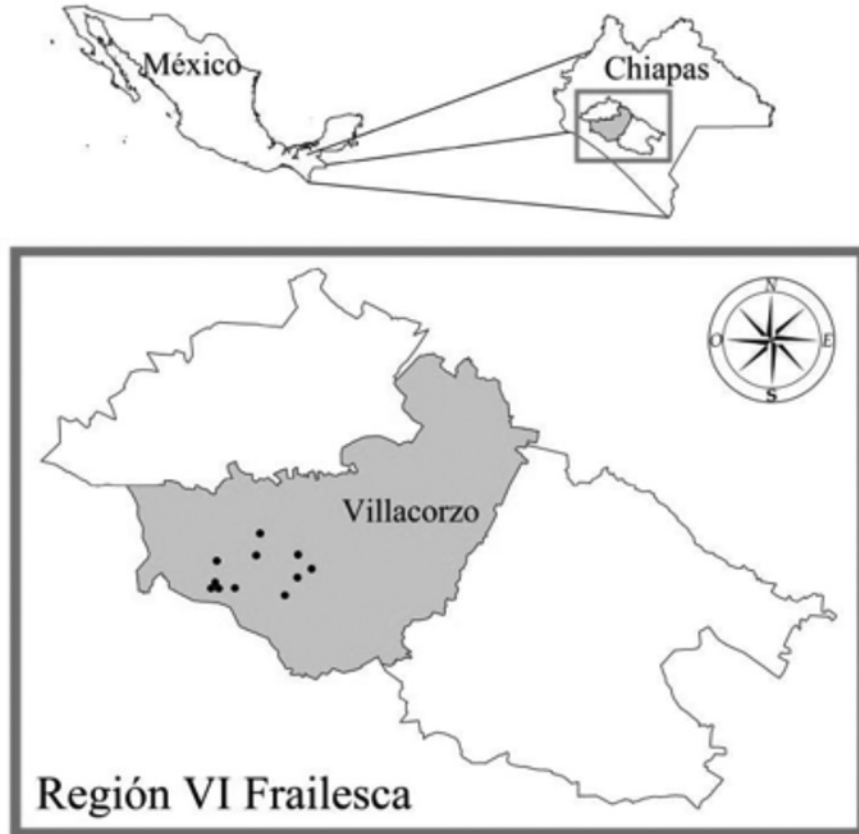


Figura 1. Localización de los ejidos donde se seleccionaron las parcelas para la investigación en la región Frailesca, Chiapas, México. Elaborado por Red AC.
 Figure 1. Location of the *ejidos* where the plots were selected for research purposes in *La Frailesca* region of *Chiapas*, Mexico. Created by Red AC (Network of Studies for Rural Development).

Selección de parcelas y estimación de biomasa acumulada y secuestro de carbono

Los datos dasométricos se registraron en 22 parcelas de muestreo (dos por ejido), de 500 m². La información se organizó en una base de datos provenientes de 358 individuos de las especies: *Pinus maximinoii* H. E. Moore (pino), *Quercus rugosa* Neé (encino), *Quercus robur* L. (roble) y *Pinus patula* Schiede ex Schtdl. et Cham. (pino ocote) (Cuadro 1). La edad de los árboles se determinó con una barrena Pressler y con información suministrada por los ejidatarios; el diámetro normalizado (DN) con una cinta diamétrica y la altura del tallo principal (H), con un Clinómetro (Gómez-Castro *et al.*, 2010).

El cálculo del volumen del tallo (V) se realizó con la siguiente ecuación:

$$V = \frac{\pi}{4} \cdot H \cdot DN^2 \cdot CF \dots\dots\dots(1)$$

Plot selection and estimation of the accumulated biomass and carbon sequestration

Mensuration data were recorded for twenty-two 500 m² sampling plots (two in each *ejido*). This information was entered into a database which included data of 358 individuals of the following species: *Pinus maximinoii* H. E. Moore (pine), *Quercus robur* L. (oak), *Quercus rugosa* Neé (holm oak), and *Pinus patula* Schiede ex Schtdl. & et Cham. (Mexican weeping pine) (Table 1). The age of the trees was determined using a Pressler drill, as well as based on information provided by the common land holders; the normalized diameter (ND) was measured with a diameter measuring tape, and the height (H) of the main stem, with a clinometer (Gómez-Castro *et al.*, 2010).

The stem volume (V) was calculated using the following equation:

$$V = \frac{\pi}{4} \cdot H \cdot DN^2 \cdot CF \dots\dots\dots(1)$$

Donde:

- H* = Altura del árbol
- CF* = Coeficiente de forma de cada especie.
- DN* = Diámetro normalizado

Para estimar la biomasa del tallo, se multiplicó el volumen total por la densidad de cada una de las especies (Cuadro 2) (González, 2008). Una vez calculados los valores de biomasa, se procedió a estimar el carbono acumulado, multiplicando la biomasa por 0.50 que representa la concentración de carbono promedio para coníferas (Hamburg, 2000); valor citado en los Inventarios de Gases de Efecto Invernadero, sector forestal para México (IPCC, 2005).

El valor de la acumulación de biomasa en las diferentes partes del árbol se obtuvo mediante factores de expansión de la biomasa (FEM) y los coeficientes de forma (CF) publicados por González (2008) (Cuadro 2), con las siguientes expresiones:

Biomasa del fuste (BM_f)
 $BM_f = V \cdot \rho$(2)

Donde:

- BM_f = Biomasa del fuste
- V = Volumen del fuste
- ρ = Densidad de la madera (Cuadro 2)

Biomasa de la parte aérea del árbol (BM_o)
 $BM_o = BM_f \cdot FEB$(3)

Donde:

- BM_o = Biomasa de la parte aérea del árbol
- BM_f = Biomasa del fuste
- FEB = Factor de Expansión de la biomasa

Biomasa de las raíces (BM_r)
 $BM_r = BM_o \cdot 0.30$(4)

Donde:

- BM_r = Biomasa de las raíces
- BM_o = Biomasa de la parte aérea del árbol

Where:

- H* = Tree height
- SC* = Shape coefficient of each species.
- ND* = Normalized diameter

In order to estimate the stem biomass, the total volume was multiplied by the density of each of the species (Table 2) (González, 2008). Once the values of the biomass were determined, the accumulated carbon was estimated by multiplying the biomass by 0.50, a value that represents the mean concentration of carbon for conifers (Hamburg, 2000); a value cited in the Green House Gas Inventories of the forestry sector for Mexico (IPCC, 2005).

The value of the biomass accumulation in the various parts of the tree was determined based on the biomass expansion factors (BEFs) and shape coefficients (SCs) published by González (2008) (Table 2), with the following expressions:

Stem biomass (SBM)
 $SBM = V \cdot \rho$(2)

Where:

- SBM = Stem biomass
- V = Stem volume
- ρ = Wood density (Table 2)

Tree aboveground biomass ($AGBM$)
 $AGBM = SBM \cdot BEF$(3)

Where:

- $AGBM$ = Tree aboveground biomass
- SBM = Stem biomass
- BEF = Biomass expansion factor

Root biomass (RBM)
 $RBM = AGBM \cdot 0.30$(4)

Where:

- RBM = Root biomass
- $AGBM$ = Tree aboveground biomass

Cuadro 2. Factores de expansión de la biomasa (FEB), coeficientes de forma (CF) y densidad, de las especies estudiadas.

Especie	Factores de Expansión de la Biomasa (FEB)	Coeficientes de forma (CF)	Densidad (kg m ⁻³)
<i>Pinus maximinoii</i> H. E. Moore	1.25	0.52	507
<i>Quercus rugosa</i> Neé	1.27	0.39	650
<i>Quercus robur</i> L.	1.27	0.39	650
<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. et Cham.	0.25	0.52	507

Table 2. Biomass expansion factors (BEF), shape coefficients (SCs) and density of the studied species.

Species	Biomass expansión factors (BEF)	Shape coefficients (SCs)	Density (kg m ⁻³)
<i>Pinus maximinoii</i> H. E. Moore	1.25	0.52	507
<i>Quercus rugosa</i> Neé	1.27	0.39	650
<i>Quercus robur</i> L.	1.27	0.39	650
<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. et Cham.	0.25	0.52	507

Análisis estadísticos

Las diferencias entre la biomasa acumulada por especies y entre ejidos, se determinaron procesando los datos a través de un ANOVA. Se elaboraron histogramas de frecuencias para la edad y el diámetro normalizado (DN) y se realizaron análisis de regresión no lineales entre las variables altura del árbol y diámetro normalizado (DN), así como entre biomasa total (BMT) y la edad del árbol por especie. La comparación de medias se hizo con la prueba de Tukey para $p \leq 0.05$ (Steel y Torrie, 1980). Previo a todos los análisis estadísticos, se llevaron a cabo las comprobaciones de los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza, con el programa STATISTICA®, versión 8.0 (StatSoft, 2007).

Resultados y Discusión

El histograma de la edad de los árboles por especie muestra que las parcelas de pino reflejaron una distribución bastante heterogénea, con 12 % de los árboles en edades dentro del intervalo de 40-50 años (Figura 2), seguido de 10 % entre 90-100 años de edad. La de los encinos varió de 20 a 70 años, con 10 % de los individuos en el intervalo de 30-50 años. Los bosques de roble tuvieron 95 árboles con edades entre 20 y 40 años, mientras que los de ocote tuvieron 18 % con edades de 30-60 años (Figura 2).

La mayor cantidad de árboles con valores de DN de 0.1-0.4 m correspondió al roble, seguido del pino y el ocote (Figura 3). En todos los casos, al igual que para edad, la mayor heterogeneidad de las muestras correspondió a las parcelas de pino, con valores de DN entre 0.13-1.02 m (Figura 3). El intervalo de máximos, mínimos, así como el del DN (Cuadro 3) permitió definir que las especies con más variabilidad fueron pino, encino, roble y ocote, en ese orden (Cuadro 3).

Statistical analyses

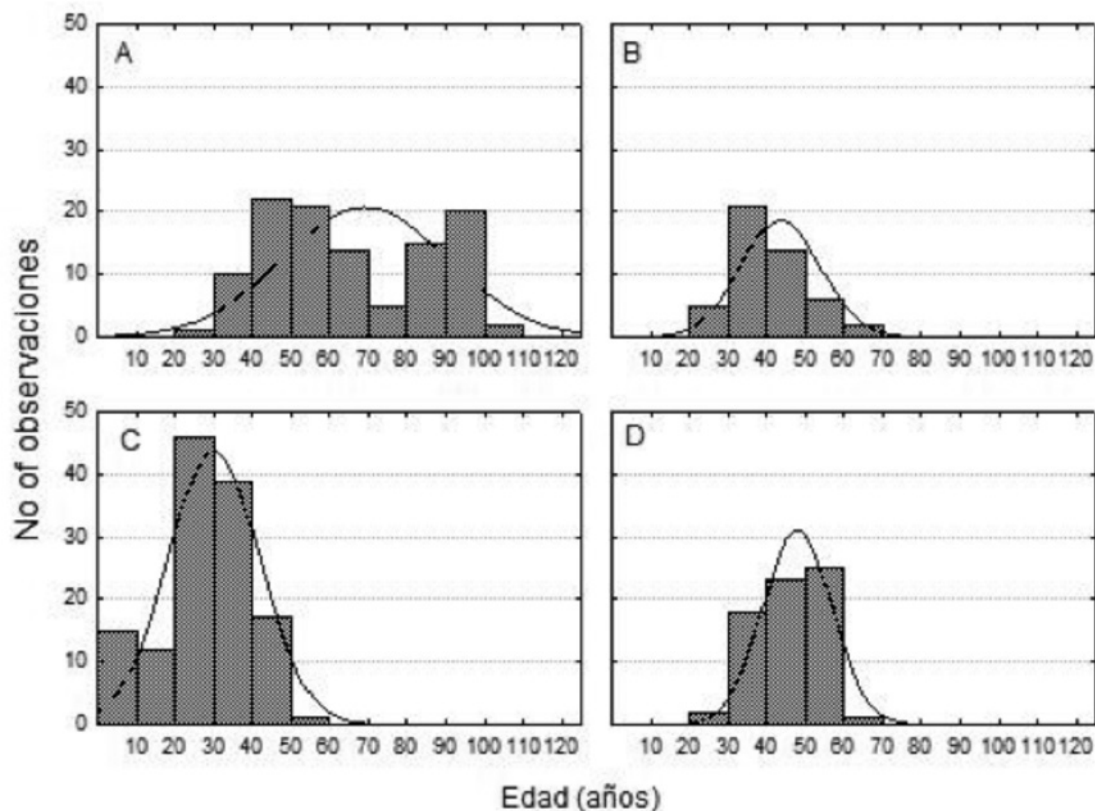
The differences in the biomass accumulated between species and between tissues were determined by processing the data through an ANOVA. Frequency histograms were created for the age and the normalized diameter (ND), and non-linear regression analyses were carried out between the tree height and normalized diameter (ND) variables, as well as between the total biomass (TBM) and the tree's age by species. The mean comparison was carried out using Tukey's test for $p \leq 0.05$ (Steel and Torrie, 1980). Previously to all the statistical analysis, the assumptions or normality and of variance homogeneity were verified using the STATISTICA®, version 8.0 software (StatSoft, 2007).

Results and Discussion

The histogram of tree age by species shows that the pine plots reflected a rather heterogeneous distribution, with 12 % of the trees aged 40-50 years (Figure 2), followed by 10 % of trees aged 90-100. The age of holm oaks ranged between 20 and 70 years, with 10 % of the individuals in an age interval of 30-50 years. The oak forests had 95 trees aged 20 to 40 years, while 18 % of the trees of Mexican weeping pine forests were aged 30-60 years (Figure 2).

The largest number of trees with ND values of 0.1-0.4 m were oaks, followed by pines and Mexican weeping pines (Figure 3). In every case, like for the tree age, the highest degree of heterogeneity was found in the pine plots, with ND values ranging between 0.13 and 1.02 m (Figure 3). The interval between maximums, minimums and NDs (Table 3) made it possible to determine that the species with the highest variability were pine, holm oak, oak and Mexican weeping pine, in this order (Table 3).





A = Pino; B = Encino; C = Roble; D = Ocote.

A = Pine; B = Holm oak; C = Oak; D = Mexican weeping pine.

Figura 2. Histogramas de frecuencia de edades de los árboles muestreados por especie en la región Frailesca, Chiapas, México.

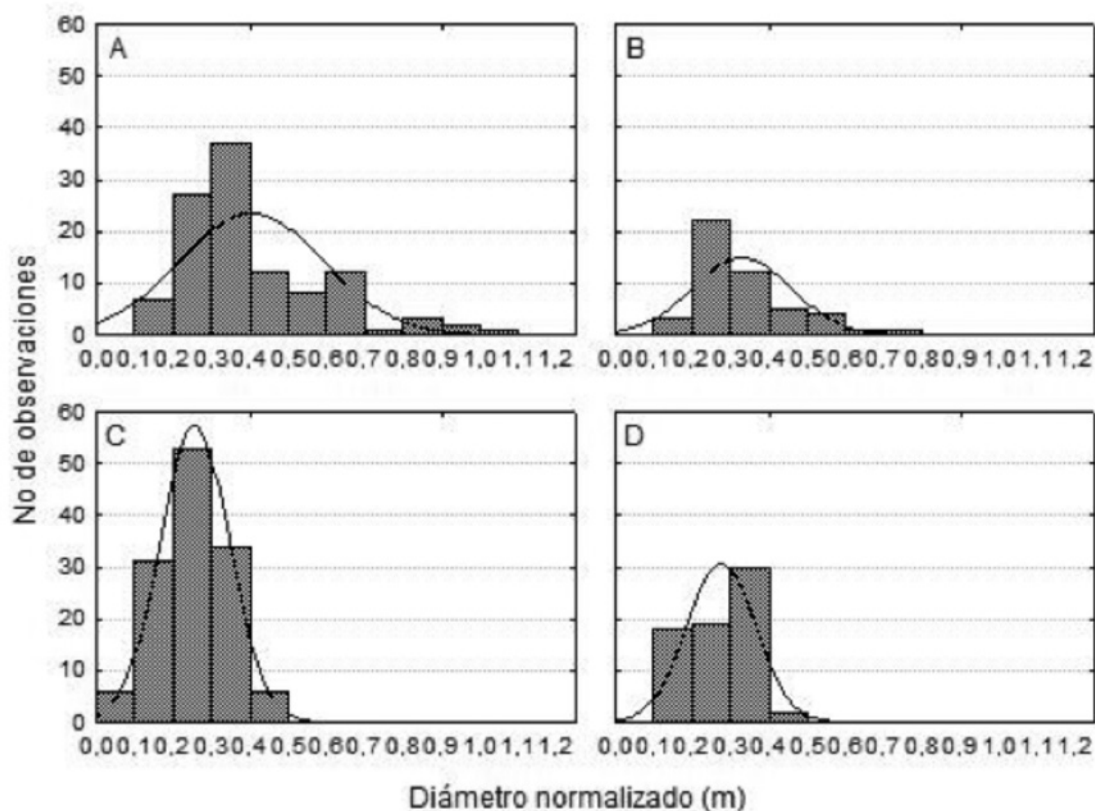
Figure 2. Frequency histograms of tree ages sampled by species in La Frailesca region of Chiapas, Mexico.

Cuadro 3. Valores máximos, mínimo e intervalo del diámetro normalizado (DN) de las especies estudiadas.

Especies	Media (m)	Máximo (m)	Mínimo (m)	Rango (m)
<i>Pinus maximinoii</i> H. E. Moore	0.40	1.02	0.13	0.89
<i>Quercus rugosa</i> Neé	0.33	0.75	0.15	0.60
<i>Quercus robur</i> L.	0.26	0.46	0.05	0.41
<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. et Cham.	0.27	0.40	0.10	0.30

Table 3. Intervals between the maximums, the minimums and the normalized diameters (NDs) of the studied species.

Species	Mean (m)	Maximum (m)	Minimum (m)	Range (m)
<i>Pinus maximinoii</i> H. E. Moore	0.40	1.02	0.13	0.89
<i>Quercus rugosa</i> Neé	0.33	0.75	0.15	0.60
<i>Quercus robur</i> L.	0.26	0.46	0.05	0.41
<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. et Cham.	0.27	0.40	0.10	0.30



A = Pino; B = Encino; C = Roble; D = Ocote.

A = Pine; B = Holm oak; C = Oak; D = Mexican weeping pine.

Figura 3. Histogramas de frecuencia del DN de los árboles muestreados por cada especie en la región Frailesca, Chiapas, México.

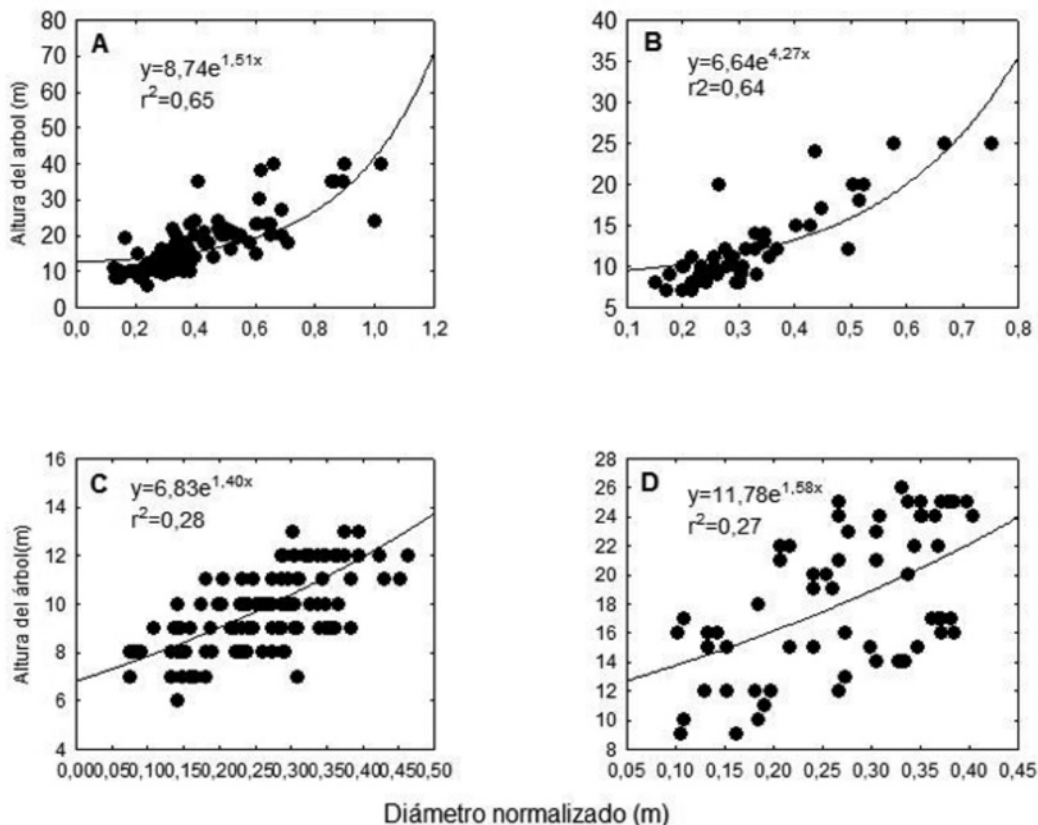
Figure 3. Frequency histograms of the ND of the sampled trees by species in *La Frailesca* region, *Chiapas*, *Mexico*.

Dada la estrecha relación que se ha observado entre el DN, la edad de los árboles y la acumulación de biomasa y captura de carbono en diferentes especies forestales (Fonseca *et al.*, 2008; Gómez-Castro *et al.*, 2010), es factible comprender la capacidad de dichos bosques para la captura de carbono atmosférico, máxime si se demuestra que la biomasa acumulada y el carbono capturado se incrementan con la edad.

La relación entre la altura y el DN en las especies se ajustó a un modelo exponencial (Figura 4), denominado alométrico y citado anteriormente, por Acosta *et al.* (2002) y Gómez-Castro *et al.* (2010). Los coeficientes más altos de determinación (r^2) se observaron en pino y encino, que además tuvieron la mayor amplitud de intervalo de edades y DN. Para todas las especies, el ajuste matemático arrojó significación estadística de los parámetros del modelo, de acuerdo con la prueba de *t* de Student (Cuadro 4), lo cual corrobora la selección del modelo exponencial para estimar la altura de los árboles a través del diámetro normalizado, aunque se sugiere que hay que profundizar en el efecto del intervalo del diámetro normalizado, para el que se obtienen las mejores estimaciones.

Given the close relationship observed between the ND, the age of the trees and biomass accumulation and carbon capture in various forest species (Fonseca *et al.*, 2008; Gómez-Castro *et al.*, 2010), it is possible to understand the capacity of these forests to capture carbon from the atmosphere, particularly if it can be proven that the accumulated biomass and the captured carbon increase with the age of the trees.

The relationship between the height and the ND of the species was adjusted to an exponential model (Figure 4) called allometric, previously cited by Acosta *et al.* (2002) and Gómez-Castro *et al.* (2010). The highest determination coefficients (r^2) were observed in pines and holm oaks, which also had the broadest interval between tree ages and NDs. For all the species, the mathematical adjustment produced a statistical significance of the model parameters, according to the Student's *t*-test (Table 4), a fact that corroborates the selection of the exponential model to estimate tree heights through the normalized diameter, although it suggests the need to delve into the effect of the normalized diameter interval, for which the best estimates were obtained.



A = Pino; B = Encino; C = Roble; D = Ocote.
 A = Pine; B = Holm oak; C = Oak; D = Mexican weeping pine.

Figura 4. Ajustes de modelos de regresión exponencial entre la altura y el DN de las especies estudiadas de la región Frailesca, Chiapas, México.

Figure 4. Exponential regression models of adjustment between the height and the ND of the studied species of La Frailesca region of Chiapas, Mexico.

Cuadro 4. Parámetros y significación estadística del modelo de ajuste matemático entre la altura y el diámetro normalizado.

Especies	Parámetros del modelo	Estimado	Error Estándar	t	p	Límites de confianza (95 %)	
						Mín.	Máx.
<i>Pinus maximinoii</i> H. E. Moore	a	8,74	0,524	16,701	0,01	7,707	9,782
	b	1,51	0,099	15,193	0,01	1,313	1,706
<i>Quercus rugosa</i> Neé	a	6,64	0,314	21,146	0,01	6,018	7,261
	b	4,27	0,270	15,779	0,01	3,732	4,802
<i>Quercus robur</i> L.	a	6,83	0,414	16,475	0,01	6,008	7,647
	b	1,40	0,206	6,785	0,01	0,992	1,808
<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. et Cham.	a	11,78	1,251	9,417	0,01	9,283	14,277
	b	1,58	0,344	4,598	0,01	0,894	2,265

t = t de student; p = Probabilidad de error.



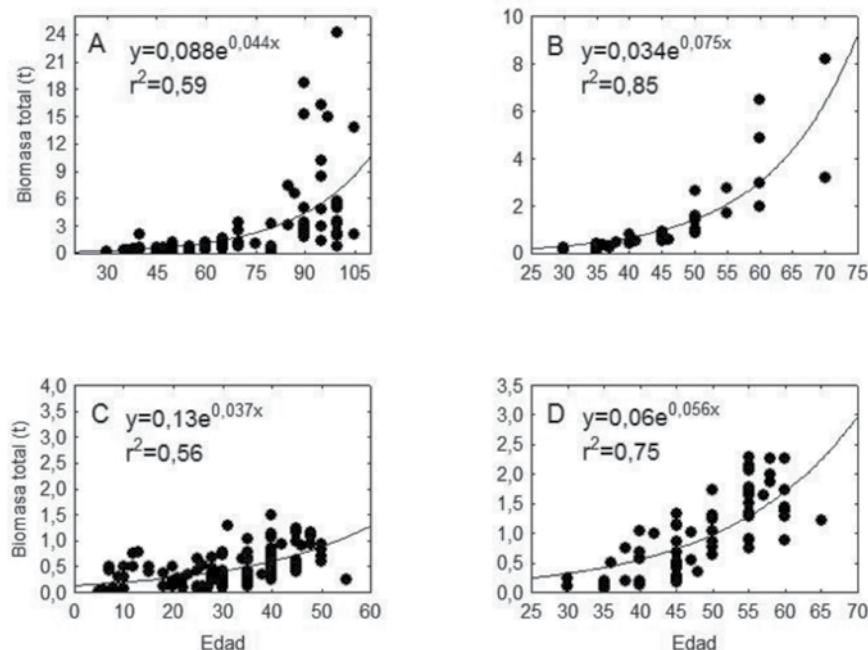
Table 4. Parameters and statistical significance of the model of mathematical fit between the height and the normalized diameter.

Species	Model parameters	Estimate	Standard error	t	p	Confidence limits	
						(95 %)	
						Min.	Max.
<i>Pinus maximinoii</i> H. E. Moore	a	8.74	0.524	16.701	0.01	7.707	9.782
	b	1.51	0.099	15.193	0.01	1.313	1.706
<i>Quercus rugosa</i> Neé	a	6.64	0.314	21.146	0.01	6.018	7.261
	b	4.27	0.270	15.779	0.01	3.732	4.802
<i>Quercus robur</i> L.	a	6.83	0.414	16.475	0.01	6.008	7.647
	b	1.40	0.206	6.785	0.01	0.992	1.808
<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. et Cham.	a	11.78	1.251	9.417	0.01	9.283	14.277
	b	1.58	0.344	4.598	0.01	0.894	2.265

t = Student's t; p = Probability of error.

Para todas las especies, la relación entre la biomasa total del árbol (BM_t) y la edad se ajustó significativamente un modelo exponencial (Figura 5, Cuadro 5), con coeficientes de determinación que van de 0.56 a 0.85. Resultados similares obtuvieron Rodríguez *et al.* (2004) para las relaciones alométricas entre la producción de biomasa y la edad de árboles de pino. Este resultado corrobora los estudios de estimación de biomasa y carbono a través del DN, y ratifica la relación entre la edad del árbol con los procesos fotosintéticos que desencadenan la acumulación de biomasa y carbono (Pacheco *et al.*, 2007).

For all species, the ratio of the total biomass of the tree (BM_t) and the age was significantly fitted according to an exponential model (Figure 5, Table 5), with determination coefficients ranging between 0.56 and 0.85. Similar results were obtained by Rodríguez *et al.* (2004) for the allometric relationships between the biomass production and the age of the pine trees. This result corroborates the biomass and carbon estimation studies based on the ND and ratifies the relationship between tree age and the photosynthetic processes that trigger biomass and carbon accumulation (Pacheco *et al.*, 2007).



A = Pino; B = Encino; C = Roble; D = Ocote.

A = Pine; B = Holm oak; C = Oak; D = Mexican weeping pine.

Figura 5. Ajustes de curvas de regresión entre la biomasa total acumulada (BM_t) y la edad de las diferentes especies de árboles.

Figure 5. Regression curves of fit between the total accumulated biomass (BM_t) and the age of the trees of the various species.

Fonseca *et al.* (2008) documentan que la biomasa aérea y la biomasa de raíces aumentan con la edad, en bosques secundarios y plantaciones forestales. Hughes *et al.* (1999) consignan una biomasa promedio de 272.1 Mg ha⁻¹, a los 16 años de edad. Corrales (1998) registra 162.1 Mg ha⁻¹ de biomasa en bosques secundarios de 15 años y 324.1 Mg ha⁻¹ en bosques primarios en climas húmedos y muy húmedos de Costa Rica.

According to Fonseca *et al.* (2008), both the aboveground biomass and the root biomass increase with the age in secondary forests and forest plantations. Hughes *et al.* (1999) register an average biomass of 272.1 Mg ha⁻¹ at 16 years of age. Corrales (1998) registers a biomass of 162.1 Mg ha⁻¹ in secondary forests aged 15 years, and of 324.1 Mg ha⁻¹ in primary forests in humid and very humid climates in Costa Rica.

Cuadro 5. Parámetros y significación estadística del modelo de ajuste matemático entre la biomasa y la edad de los árboles.

Especies	Parámetros del modelo	Estimado	Error Estándar	t	p	Límites de confianza	
						(95 %)	
						Mín.	Máx.
<i>Pinus maximinoii</i> H. E. Moore	a	0.09	0.07	1.22	0.23	-0.055	0.23
	b	0.04	0.009	5.06	0.01	0.027	0.06
<i>Quercus rugosa</i> Neé	a	0.034	0.016	2.18	0.05	0.002	0.07
	b	0.075	0.007	10.28	0.01	0.059	0.09
<i>Quercus robur</i> L.	a	0.13	0.036	3.72	0.01	0.063	0.21
	b	0.04	0.007	5.55	0.01	0.024	0.05
<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. et Cham.	a	0.06	0.024	2.48	0.01	0.012	0.1
	b	0.06	0.007	7.59	0.01	0.041	0.07

t = t de student; p = Probabilidad de error.

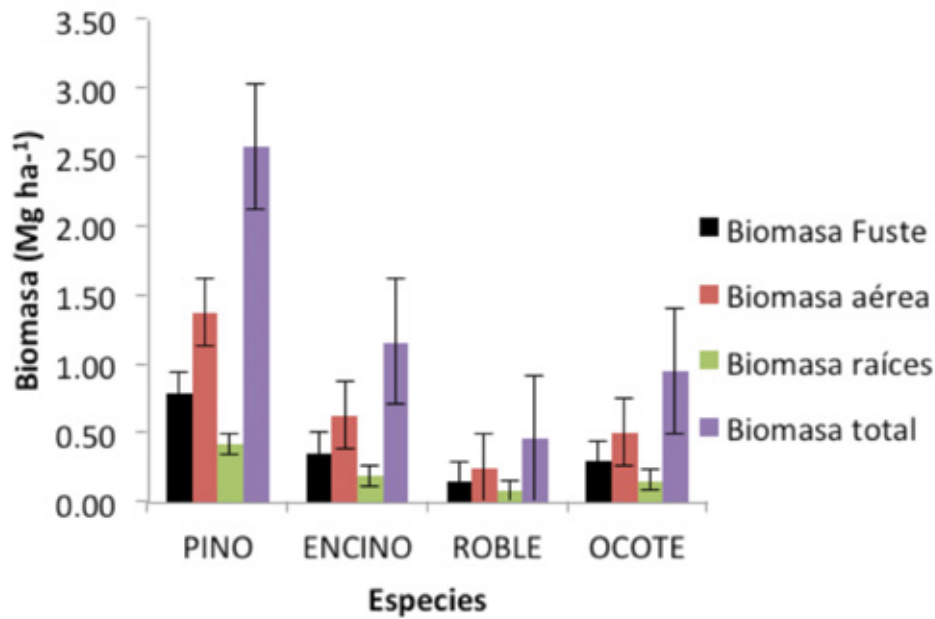
Table 5. Parameters and statistical significance of the model of mathematical fit between the biomass and the age of the trees.

Species	Model parameters	Estimate	Standard Error	t	p	Confidence limits	
						(95 %)	
						Min.	Max.
<i>Pinus maximinoii</i> H. E. Moore	a	0.09	0.07	1.22	0.23	-0.055	0.23
	b	0.04	0.009	5.06	0.01	0.027	0.06
<i>Quercus rugosa</i> Neé	a	0.034	0.016	2.18	0.05	0.002	0.07
	b	0.075	0.007	10.28	0.01	0.059	0.09
<i>Quercus robur</i> L.	a	0.13	0.036	3.72	0.01	0.063	0.21
	b	0.04	0.007	5.55	0.01	0.024	0.05
<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. et Cham.	a	0.06	0.024	2.48	0.01	0.012	0.1
	b	0.06	0.007	7.59	0.01	0.041	0.07

t = Student's t; p = Probability of error.

Los árboles que mayor cantidad de biomasa acumularon, tanto en el fuste como en la parte aérea y las raíces fueron los de pino, con valores que superaron las 0.79, 1.37, 0.42 Mg ha⁻¹, respectivamente (Figura 6). El roble acumuló menor biomasa. Monroy y Navar (2004) citan resultados similares para *Hevea brasiliensis* (Willd.) ex A. Juss.) Müll. Arg., con valores de 73.9 % de biomasa en el fuste y 27.1 % en las ramas, los cuales se incrementaron con la edad de los árboles.

The trees that accumulated the largest amount of biomass in the stem and other aboveground parts and in the roots were pines, with values above 0.79, 1.37 and 0.42 Mg ha⁻¹, respectively (Figure 6). Oak trees accumulated the least biomass. Monroy and Navar (2004) cite similar results for *Hevea brasiliensis* (Willd.) ex A. Juss.) Müll. Arg., with values of 73.9 % stem biomass and 27.1 % branch biomass, both of which increased with the age of the trees.



Las líneas verticales en las columnas representan el error estándar de la media.

The vertical lines in the columns represent the mean standard error.

Figura 6. Acumulación de biomasa en el fuste, ramas y raíces de árboles de pino, encino, roble y ocote en comunidades de la región Frailesca, Chiapas, México

Figure 6. Biomass accumulation in the stem, branches and roots of pine, oak, holm oak and Mexican weeping pine trees in communities of *La Frailesca* region of Chiapas, Mexico.

En cuanto a la relación entre el contenido de carbono y la biomasa acumulada en los distintos componentes de la planta, los resultados sugieren que las altas tasas de crecimiento y fijación de carbono aéreo registradas en los pinares, como lo demostraron Pacheco *et al.* (2007), se pudiera deber a una buena combinación entre la producción de madera y celulosa, en comparación con otras especies, lo anterior es útil para la implementación de proyectos de reforestación y secuestro de CO₂ (Gamara, 2001). Sin embargo, existen otros factores como el sitio y la masa arbolada que determinan la acumulación de biomasa y la captura del carbono. Este autor, también refiere que tanto la biomasa acumulada, como el carbono secuestrado se relacionan directamente con el crecimiento, en diámetro (DN) y en altura total del árbol (Ugalde, 1997).

Al analizar la información en los diferentes ejidos, se comprobó que la biomasa total acumulada en árboles de pino fue superior en "24 de Febrero" y "Juan Sabinés" (Figura 7), con valores que superaron los 8 y 6 Mg ha⁻¹, respectivamente. Como consecuencia, los mayores valores de captura de carbono correspondieron a esas comunidades.

As for the relationship between the carbon content and the accumulated biomass in the various components of the plant, the results suggest that the high rates registered in pine forests for both growth and aboveground carbon fixation may be due, as Pacheco *et al.* (2007) proved, to a good combination between the production of wood and cellulose compared to other species; this is helpful for the implementation of reforestation and CO₂ sequestration projects (Gamara, 2001). However, other factors, such as the site and the tree mass, also determine biomass accumulation and carbon capture. Furthermore, this author cites a direct relationship between the sequestered carbon and growth, in both the normal diameter (ND) and the total height of the trees (Ugalde, 1997).

Analysis of the information from the various *ejidos* proved that the total biomass accumulated in pine trees was highest at "24 de Febrero" and "Juan Sabinés" (Figure 7), with values above 8 and 6 Mg ha⁻¹, respectively. Therefore, these communities also had the highest values for carbon capture.



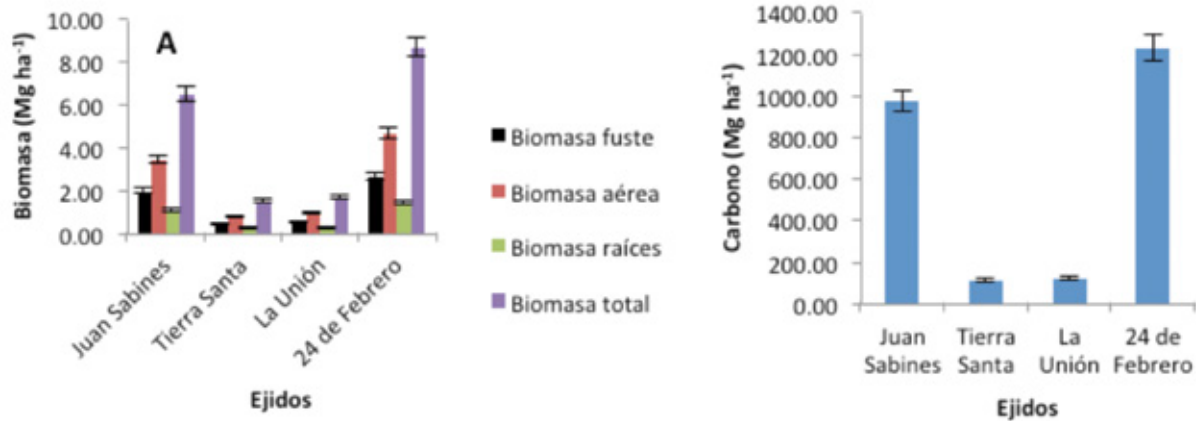
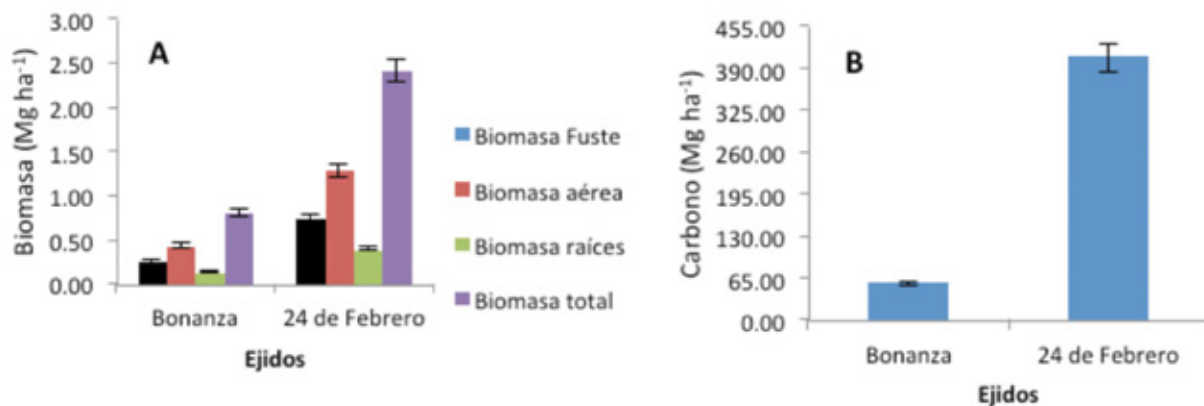


Figura 7. Acumulación de biomasa (A) y carbono (B) en bosques de *Pinus maximinoii* H. E. Moore de las comunidades Juan Sabines, Tierra Santa, La Unión y 24 de Febrero de la región Frailesca de Chiapas.

Figure 7. Biomass (A) and carbon (B) accumulation in *Pinus maximinoii* H. E. Moore forests of the Juan Sabines, Tierra Santa, La Unión and 24 de Febrero communities of La Frailesca region of Chiapas.

Los bosques de encino, predominantes en las comunidades “Bonanza” y “24 de Febrero”, acumularon hasta 0.8 y 2.5 ha⁻¹Mg de biomasa total, respectivamente (Figura 8); mientras que el carbono acumulado fue superior en “24 de Febrero”, con 390 Mg de C ha⁻¹, lo cual demuestra el potencial que tiene este ejido para la captura de CO₂ y su contribución a la mitigación de Gases de Efecto Invernadero (GEI).

Holm oak forests, which are prevalent in the “Bonanza” and “24 de Febrero” communities, accumulated up to 0.8 and 2.5 ha⁻¹Mg of total biomass, respectively (Figure 8), whereas the accumulated carbon was higher at “24 de Febrero”, with 390 Mg of C ha⁻¹, which proves the potential of this ejido for CO₂ capture and its contribution to the abatement of Greenhouse Gases (GHGs).



Las líneas verticales en las barras indican el error estándar de la media.
The vertical lines in the columns represent the mean standard error.

Figura 8. Acumulación de biomasa (A) y carbono (B) en bosques de *Quercus rugosa* Neé de las comunidades Juan Sabines, Tierra Santa, La Unión y 24 de Febrero de la región Frailesca de Chiapas, México.

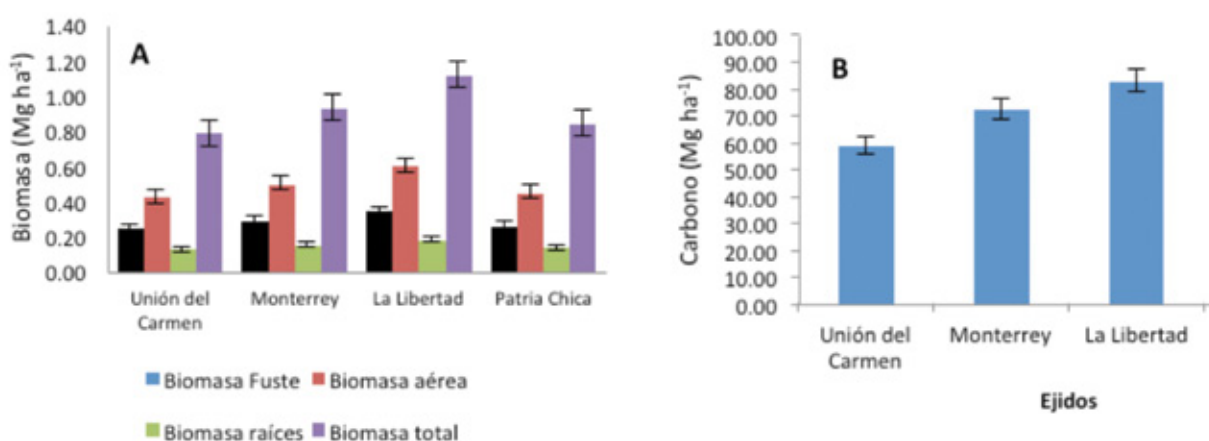
Figure 8. Biomass (A) and carbon (B) accumulation in *Quercus rugosa* Neé forests in the Juan Sabines, Tierra Santa, La Unión and 24 de Febrero communities of La Frailesca region of Chiapas, Mexico.

La acumulación total de biomasa en árboles de roble fue de 0.79 a 1.12 Mg ha⁻¹, el mayor registro en las áreas boscosas del ejido “La Libertad”, seguido de “Monterrey” (Figura 9). El menor valor se registró en “Patria Chica”. En cuanto al carbono capturado, en todos los ejidos estuvo por encima de 50 Mg ha⁻¹; el más alto se obtuvo en los bosques del ejido “La Libertad”, con 82 Mg de C ha⁻¹ (Figura 9).

The total biomass accumulation in oak trees was 0.79 to 1.12 Mg ha⁻¹, the highest record in the forest areas of the “La Libertad” ejido, followed by “Monterrey” (Figure 9). The lowest value was found at “Patria Chica”. As for carbon capture, in all the ejidos it was above 50 Mg ha⁻¹; the highest was obtained in the forests of the “La Libertad” ejido, with 82 Mg of C ha⁻¹ (Figure 9).

Pimienta *et al.* (2007) estimaron un valor promedio de carbono acumulado para fuste limpio de *Pinus cooperi* C. E. Blanco en Durango, México, de 51.12 Mg ha⁻¹, valor superior al presentado por Domínguez *et al.* (2007) en bosques mixtos de *Pinus teocote* Schiede ex Schltdl. & Cham. y *Pinus pseudostrabus* Lindl. del sur de Nuevo León, México, con 45.18 Mg ha⁻¹. En trabajos sobre la cuantificación de biomasa y el carbono fijado en bosques templados lluviosos de la región centro-sur de Chile, en 269 derribados y pertenecientes a árboles apeados de 12 especies arbóreas, estimaron la biomasa y carbono en raíces, sotobosque, necromasa y hojarasca. La cantidad de carbono almacenado en los sitios de la pre-cordillera de Los Andes, acumularon 662.06 Mg ha⁻¹, mayor que los de la Cordillera de la Costa, con 423.83 Mg ha⁻¹.

For the clear trunks of *Pinus cooperi* C. E. Blanco in Durango, Mexico, Pimienta *et al.* (2007) estimated an average value of accumulated carbon of 51.12 Mg ha⁻¹, a higher value than estimated by Domínguez *et al.* (2007) for the mixed *Pinus teocote* Schiede ex Schltdl. & Cham. and *Pinus pseudostrabus* Lindl. forests in southern Nuevo León, Mexico, which was 45.18 Mg ha⁻¹. Studies of biomass and fixed carbon quantification in 269 felled and harvested trees belonging to 12 species in temperate rainforests of the central-southern region of Chile estimated the biomass and the carbon accumulated in the roots, undergrowth, necromass and dead leaves. Carbon accumulation in the sites of the pre-Andes mountains was 662.06 Mg ha⁻¹, i.e., higher than in the Cordillera de la Costa (Coast Mountain Range), where it was 423.83 Mg ha⁻¹.



Las líneas verticales en las barras indican el error estándar de la media.
The vertical lines in the columns represent the mean standard error.

Figura 9. Acumulación de biomasa (A) y carbono (B) en bosques de *Quercus robur* L. de las comunidades Juan Sabinés, Tierra Santa, La Unión y 24 de Febrero de la región Frailesca de Chiapas, México.

Figure 9. Biomass (A) and carbon (B) accumulation in *Quercus robur* L. forests of the Juan Sabinés, Tierra Santa, La Unión and 24 de Febrero communities of La Frailesca region of Chiapas, Mexico.

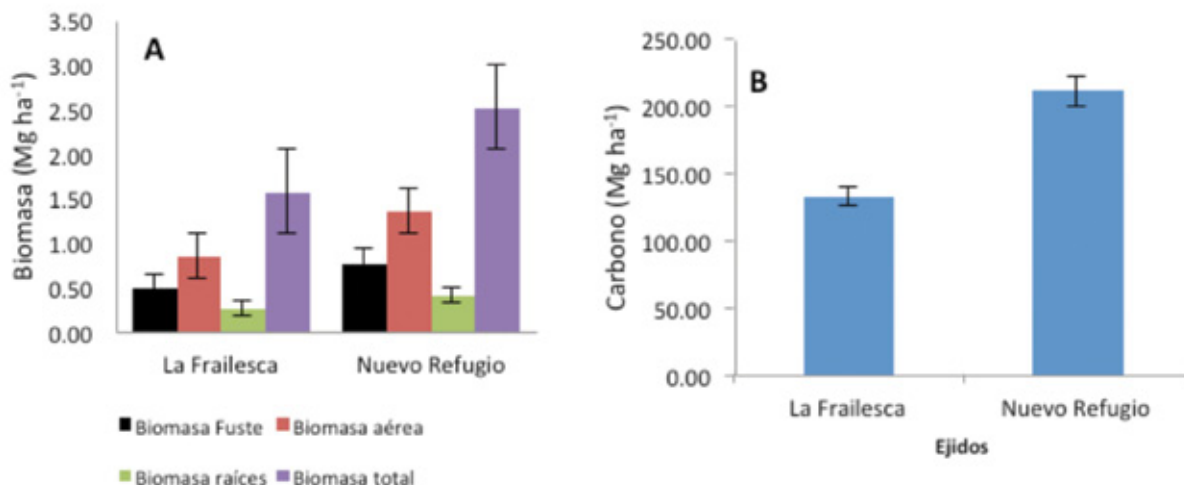
La biomasa total acumulada por árboles de ocote (*Pinus oocarpa* Schiede) osciló entre 1.57 y 2.51 Mg ha⁻¹ (Figura 10). Esta especie, solamente, se registró en los ejidos "La Frailesca" y "Nuevo Refugio", los bosques de este último contribuyeron más a dicha acumulación. Los valores de carbono acumulado más altos se presentaron en los bosques de "Nuevo Refugio", con 212 Mg de C ha⁻¹, mientras que en el ejido "La Frailesca", la captura se redujo a 132 Mg ha⁻¹.

The total biomass accumulated by Mexican weeping pines (*Pinus oocarpa* Schiede) ranged between 1.57 and 2.51 Mg ha⁻¹ (Figure 10). This species occurred only in the "La Frailesca" and "Nuevo Refugio" ejidos; the forests of the latter contributed a larger amount to this accumulation. The highest values for accumulated carbon 212 Mg of C ha⁻¹, were found in the forests of "Nuevo Refugio", while the "La Frailesca" ejido accumulated only 132 Mg ha⁻¹.

En cuanto a la acumulación de biomasa por componentes del árbol (figuras 6, 7, 8, 9 y 10), en todos los taxa y localidades, la mayor acumulación se produjo en la biomasa aérea, lo cual coincide con Gower *et al.* (1993), quienes demostraron que aproximadamente 75 % de la biomasa de un árbol corresponde a la biomasa aérea y 25 % se acumula en las raíces.

As for the accumulation of biomass per tree components (figures 6, 7, 8, 9 and 10), in all the taxa and localities, the highest accumulation occurred in the aboveground biomass, as indicated by Gower *et al.* (1993), who proved that approximately 75% of the biomass of a tree is accumulated in the aboveground parts, while only 25% is accumulated in the roots.





Las líneas verticales en las barras indican el error estándar de la media.
The vertical lines in the columns represent the mean standard error.

Figura 10. Acumulación de biomasa (izquierda) y carbono (derecha) en bosques de *Pinus oocarpa* Schiede de las comunidades La Frailesca y Nuevo Refugio de la región Frailesca de Chiapas, México.

Figure 10. Biomass (left) and carbon (right) accumulation in *Pinus oocarpa* Schiede forests of the La Frailesca and Nuevo Refugio in La Frailesca region of Chiapas, Mexico.

La comparación de la acumulación de biomasa y captura de carbono por especies evidenció que *Pinus* spp. y *Quercus* spp. tuvieron los registros más altos y *Quercus robur* los menores (Cuadro 6), que coincide con los resultados publicados por González (2008), quien al comparar tres especies arbóreas determinó una acumulación de biomasa superior en *P. maximinoi*, seguido por *Quercus* sp. En cuanto al carbono, las especies de pino y encino muestran un potencial de captura de 380.113 a 173.852 Mg de C ha⁻¹ (Cuadro 6).

Comparison between biomass accumulation and carbon capture by species showed that *Pinus* spp. and *Quercus* spp. had the highest values, while *Quercus robur* had the lowest (Table 6). This agrees with the findings of González (2008), who, after comparing three tree species, determined that *P. maximinoi* had the highest biomass accumulation, followed by *Quercus* spp. In regard to carbon, pine and holm oak had a capture potential of 380.113 to 173.852 Mg of C ha⁻¹ (Table 6).

Cuadro 6. Biomasa y carbono acumulados en bosques de pino, encino, roble y ocote de la región Frailesca, Chiapas.

Especie	Biomasa Total (Mg ha ⁻¹)		Carbono acumulado (Mg ha ⁻¹)	
	Media	Error Estándar	Media	Error Estándar
<i>Pinus maximinoii</i> H. E. Moore	2.606 ^a	1.112	380.113 ^a	158.117
<i>Quercus rugosa</i> Neé	1.070 ^b	0.671	173.852 ^b	117.217
<i>Quercus robur</i> L.	0.459 ^c	0.040	70.516 ^c	5.968
<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. et Cham.	1.019 ^b	0.144	172.091 ^b	23.543
General	1.327	0.397	201.583	57.122

Letras diferentes en los superíndices (^a, ^b y ^c) indican diferencias estadísticas significativas para p ≤ 0.05.



Table 6. Accumulated biomass and carbon in pine, holm oak, oak and Mexican weeping pine forests of *La Frailesca* region, *Chiapas*.

Specie	Total Biomass		Accumulated carbon	
	(Mg ha ⁻¹)		(Mg ha ⁻¹)	
	Mean	Standard Error	Mean	Standard Error
<i>Pinus maximinoii</i> H. E. Moore	2.606 ^a	1.112	380.113 ^a	158.117
<i>Quercus rugosa</i> Neé	1.070 ^b	0.671	173.852 ^b	117.217
<i>Quercus robur</i> L.	0.459 ^c	0.040	70.516 ^c	5.968
<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. et Cham.	1.019 ^b	0.144	172.091 ^b	23.543
General	1.327	0.397	201.583	57.122

Different letters in the superscripts (^a, ^b and ^c) indicate significant statistical differences of $p \leq 0.05$.

Conclusiones

La acumulación de biomasa se ajustó a un modelo exponencial con la edad de los árboles de las cuatro especies evaluadas. Los bosques del ejido "24 de Febrero" registran mayor crecimiento mostraron, a juzgar por la altura y el diámetro del fuste, así como por la biomasa acumulada, lo cual coloca a este ejido entre una de las localidades con más potencialidad para la captura de carbono de los sitios estudiados.

Los árboles de pino, encino, roble y ocote de las comunidades de la región Frailesca de Chiapas, México acumulan entre 0.459 y 2.606 Mg ha⁻¹ de biomasa vegetal, por lo que se les considera con un gran potencial para la captura de carbono. Para el caso del pino alcanza una cifra de 380.113 Mg⁻¹ ha⁻¹ de C, que la ubica con el potencial más alto de captura, debido su mayor desarrollo.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución por autor

Luis Alfredo Rodríguez-Larramendi: coordinó e integró la elaboración del artículo y analizó datos de campo; Francisco Guevara-Hernández: coordinó el equipo de investigación así como el trabajo de campo y gabinete, coordinó el proyecto que dio origen a este documento y redactó gran parte del artículo; Luis Reyes-Muro: colaboró en el trabajo de campo y en la elaboración y análisis de resultados del artículo; Jesús Ovando-Cruz: elaboró la cartografía del artículo así como información de las instituciones involucradas en el presente artículo; José Nahed-Toral: aportó el enfoque y las conceptualizaciones teórica y metodológica para la elaboración del artículo; Miguel Prado-López: aportó la información sobre las áreas naturales protegidas y revisó los borradores; Rady Alejandra Campos Saldaña: contribuyó en el trabajo de campo, en la información metodológica y revisiones de los borradores del artículo.

Conclusions

Biomass accumulation was adjusted to an exponential model with the age of the trees of the four evaluated species. The forests of the "24 de Febrero" ejido registered the highest growth, based on their height and stem diameter, as well as on the accumulated biomass, rendering this ejido one of the localities with the highest potential for carbon capture of all the studied sites.

Pine, holm oak, oak and Mexican weeping pine trees of the communities of *Frailesca* region in *Chiapas*, Mexico, accumulate between 0.459 and 2.606 Mg ha⁻¹ of vegetal biomass; therefore, they are considered to have a high potential for carbon capture. Pine trees reached a value of 380.113 Mg⁻¹ ha⁻¹ of C; due to its high degree of development, this species has the highest capture potential of all.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest.

Contribution by author

Luis Alfredo Rodríguez Larramendi: coordination and integration of the article and analysis of field data; Francisco Guevara Hernández: coordination of the research team, as well as of field work, logistics, and of the project which supported the actual paper and review of great part of it; Luis Reyes Muro: help in field work and in the making and analysis of results; Jesús Ovando Cruz: maps and help in the information of the institutions involved in the actual paper; José Nahed Toral: contribution with the focus and theoretical and methodological concept to prepare this paper; Miguel Prado López: information about natural protected areas and review of previous versions of the manuscript; Rady Alejandra Campos Saldaña: help in field work, in methodology and review of the previous versions of the document.

End of the English version



Referencias

- Acosta M., M., J. Vargas H., A. Velázquez M. y J. Etchevers B. 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia* 36(6): 725-736.
- Alberto, D. M. y J. A. Elvir. 2005. Acumulación y fijación de carbono en biomasa aérea de *Pinus oocarpa* en bosques naturales de Cabañas, La Paz. *Tatascán* 17(2):1-12.
- Comité Estatal de Información Estadística y Geográfica. Gobierno del Estado de Chiapas (CEIEG). 2011. Comité Estatal de Información Estadística y Geográfica. Gobierno del Estado de Chiapas. <http://www.ceieg.chiapas.gob.mx/perfiles/PHistoricoIndex.php?region=107&option=1> (10 de agosto de 2011).
- Corrales, L. 1998. Estimación de la cantidad de carbono almacenado y captado (masa aérea) en el Corredor Biológico Mesoamericano de Costa Rica. PROARCA/CAPAS/CCAD/USAID. San José, Costa Rica. 15 p.
- Crowley, T. J. 2000. Causes of climate change over the past 1000 years. *Science* 289(5477): 270-277.
- Dhillon, R. S. and G. Von Wuehlich. 2013. Mitigation of global warming through renewable biomass. *Biomass Bioenergy* 48: 75-89.
- Dixon, R. K., S. Brown, R. A. Houghton, A. M. Solomon, M. C. Trexler and J. Wisniewski. 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science* 263: 185-190.
- Domínguez C., G., A. Aguirre O., P. Jiménez y M. Villalón H. 2007. Evaluación del contenido de carbono en bosques del sur de Nuevo León. *Madera y Bosques* 13(1) 35 - 46.
- Fonseca, G., W., A. Federico E., J. Montero, H. Toruño y H. Leblanc. 2008. Acumulación de biomasa y carbono en bosques secundarios y plantaciones forestales de *Vochysia guatemalensis* e *Hieronyma alchorneoides* en el Caribe de Costa Rica. *Agroforestería en Las Américas* 46: 47-64.
- Fragoso, P. 2003. Estimación del contenido y captura de carbono en biomasa aérea del predio Cerro Grande municipio de Tancitaro Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Mich., México. 66 p.
- Gamara, J. 2001. Estimación de carbono en plantaciones de *Eucalyptus globulus* LABILL, en Junin, Perú. In: Galloso, J. y R. Jandl. (eds.). Simposio Internacional "Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales". 18-20 de octubre de 2001. Valdivia, Chile. 21 p.
- Gómez C., H., R. Pinto R., F. Guevara H. y A. González R. 2010. Estimaciones de biomasa aérea y carbono almacenado en *Gliricidia sepium* (lam.) y *Leucaena leucocephala* (Jacq.) y su aplicación en sistemas silvopastoriles. *ITEA* 106 (4): 256-270.
- González M., Z. 2008. Estimación de la biomasa aérea y la captura de carbono en regeneración natural de *Pinus maximinoi* H. E. Moore, *Pinus oocarpa* var. *ochoterenai* Mtz. y *Quercus* sp. en el norte del Estado de Chiapas, México. Tesis de Maestría. Manejo y Conservación de Bosques Naturales y Biodiversidad. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 97 p.
- Gower, S., B. Reich and Y. Son. 1993. Canopy dynamics and aboveground production for five tree species with different leaf longevities. *Tree Physiology* 12(4):327-45.
- Hamburg, S. P. 2000. Simple rules for measuring changes in ecosystem carbon in forestry-offset projects. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 5(1): 25-37.
- Hughes, R. F., J. B. Kauffman and V. J. Jaramillo. 1999. Biomass, carbon and nutrient dynamics of secondary forest in a humid tropical region of Mexico. *Ecology* 80(6):1882-1907.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2005. Special report on Carbon Dioxide Capture and Storage (Prepared by working group III of the Intergovernmental Panel On Climate Change - IPCC). Cambridge University Press. Cambridge, UK and New York, USA. 442 p.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2007. Resumen Técnico en Cambio Climático 2007: Mitigación. In: Metz, B., O. R. Davidson, P. R. Bosch, R. Dave y L. A. Meyer (eds). Contribución del Grupo de Trabajo III al Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático. Cambridge University Press. Cambridge, UK y New York, USA. 72 p.
- Masera, O., A. Cerón and A. Ordóñez. 2001. Forestry mitigation options for Mexico: Finding synergies between national sustainable development priorities and global concerns. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 6(3): 291-312.
- Meilillo, J. M., A. D. McGuire, D. W. Kicklighter, B. Moore, C. J. Vorosmarty and A. L. Schloss. 1993. Global climate change and terrestrial net primary production. *Nature* 363:234-240.
- Monroy R., C. y J. J. Navar C. 2004. Ecuaciones de aditividad para estimar componentes de biomasa de *Hevea brasiliensis* Mull. Arg. en Veracruz México. *Madera y Bosques* 10(2): 29-43.
- Montero, M. y M. Kanninen. 2002. Biomasa y Carbono en plantaciones de *Terminalia amazonia* (Gmel.) Exell en la zona Sur de Costa Rica. *Revista Forestal Centroamericana* 39-40: 50-55.
- Nájera L., J. A. y H. Hernández H. 2009. Acumulación de biomasa aérea en un bosque coetáneo de la región de El Salto, Durango. *Ra Ximhai* 52(2):225-230.
- Pacheco E., F. C., A. Alderete, A. Gómez G., A. Fierros G., V. M. Cetina A. y H. Vaquera H. 2007. Almacenamiento de carbono en la biomasa aérea de una plantación joven de *Pinus greggii* Engelm. *Revista Fitotecnia Mexicana* 30 (3): 251-254.
- Petit, J. R., J. Jouzel, D. Raynaud, N. I. Barkov, J. M. Barnola, I. Basile, M. Benders, J. Chappellaz, M. Davis, G. Delayque, M. Delmotte, V. M. Kotlyakov, M. Legrand, V. Y. Lipenkov, C. Lorius, L. Pépin, C. Ritz, E. Saltzman and M. Stievenard. 1999. Climate and atmospheric history of the past 420 000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature* 399: 429-436.
- Pimienta T., D. J., G. Domínguez C., J. O. Aguirre C., F. J. Hernández y J. Jiménez P. 2007. Estimación de biomasa y contenido de carbono de *Pinus cooperi* Blanco, en Pueblo Nuevo, Durango. *Madera y Bosques* 13(1): 35-46.
- Rodríguez F., F. J., J. A. Prieto R. y J. J. Navar C. 2004. Producción de biomasa en plantaciones forestales del norte de México. *Revista Ciencia Forestal en México* 29(96):67-90.
- Roncal-García S., L. Soto-Pinto, J. Castellanos-Albores, N. Ramírez-Marcial y B. De Jong. (2008). Sistemas agroforestales y almacenamiento de carbono en comunidades indígenas de Chiapas, México. *Interciencia* 33(3):200-206.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hídricos- Subsecretaría Forestal y Fauna (SARH-SFF). 1994. Inventario Nacional Forestal Periódico 1992-1994. México, D.F., México. 122 p.
- StatSoft. 2007. STATISTICA. Data analysis software system. Version 8.0. Tulsa, OK, USA. n/p.
- Steel, R. G. and J. H. Torrie. 1980. Principles and procedures of statistics: A biometrical approach. 2nd Ed. McGraw-Hill Book. New York, NY, USA. 672 p.
- Ugalde A., L. A. 1997. Resultados de 10 años de investigación silvicultural del proyecto MADELEÑA en Costa Rica. CATIE. Turrialba, Costa Rica. Serie Técnica, Informe Técnico Núm. 287. 162 p.
- United Nations Environment (UNEP). 2001. Climate Change. INFORMATION SHEETS Switzerland, UNEP, UNFCCC. Information Kit. Geneva. Switzerland. 30 p.



Artículo / Article

Ecuaciones para predecir el diámetro normal en función del diámetro del tocón para *Abies religiosa* (Kunth) Schltld. et Cham.

Equations to predict the normal diameter based on the stump diameter of *Abies religiosa* (Kunth) Schltld. et Cham.

Xavier García-Cuevas¹, Victorino Herrera-Ávila², Jonathan Hernández-Ramos¹,
José de Jesús García-Magaña² y Adrián Hernández Ramos³

Resumen

En las zonas forestales bajo aprovechamiento se requiere del diámetro normal (dn) para calcular los volúmenes removidos. El dn se estima en función del diámetro del tocón (dt), mediante una ecuación de regresión. A partir de una ecuación que dependa del dn o del dt y una tarifa de volúmenes se estima el volumen (v). El objetivo fue desarrollar ecuaciones predictivas del diámetro normal en función del diámetro del tocón para *Abies religiosa*, en Tancítaro, Michoacán. Se tomaron 1 083 pares de datos de dn - dt , de diferentes categorías diamétricas. Para el ajuste se usó PROC MODEL y la selección de la mejor ecuación se hizo con base en el Cuadrado Medio del Error (CME), la Raíz del Cuadrado Medio del Error (RCME), nivel de significancia de los estimadores ($Pr > |t|$) y el Coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}), además se analizó la distribución de residuales. El cumplimiento de los supuestos de la regresión, se verificó con la prueba de Shapiro Wilk y para la precisión de las predicciones se estimó el sesgo (\bar{E}). Las ecuaciones obtenidas son: $d = 1.11149 + 0.92267 dt$, $d = 0.173763 dt \left(\frac{1.3}{dt}\right)^{1.048363}$, y $d = 1.11149 + 0.92267 (0.92267 dt)$. Los estadísticos CME=2.216, 2.093 y 2.216, la R^2_{adj} =0.9938, 0.9942 y 0.9938, la significancia de los parámetros $Pr > |t| < 0.0001$, la prueba de normalidad de Shapiro Wilk, así como su capacidad predictiva, permite inferir que las ecuaciones son válidas para predecir el dn en función del dt . Las expresiones que se ajustaron indican una tendencia lineal entre las variables dn y dt .

Palabras clave: *Abies religiosa* (Kunth) Schltld. et Cham., alometría, manejo, predicción, regresión, volumen.

Abstract

In forest areas under exploitation, we require the normal diameter (DBH) to estimate the removed volume. The DBH is estimated based on the stump diameter (SD) by regression and a volume equation. With support from an equation that depends on the ND or the SD, the volume (V) is estimated. The aim was to develop predictive equations of the normal diameter depending on the diameter of the stump for *Abies religiosa* in Tancítaro, Michoacán. 1 083 pairs of data of SD-ND of different diameter categories were taken. For setting PROC MODEL was used and the selection of the best equation was based on the Mean Square Error (MSE), the Root Mean Square Error (RMSE), significance level of estimators ($Pr > |t|$) and the fitted coefficient of determination (R^2_{adj}) and the residual distribution. To verify compliance with the assumptions of regression, Shapiro Wilk test was used and for the prediction, accuracy was estimated bias (\bar{E}). The equations obtained are: $d = 1.11149 + 0.92267 dt$, $d = 0.173763 dt \left(\frac{1.3}{dt}\right)^{1.048363}$, and $d = 1.11149 + 0.92267 (0.92267 dt)$. Based on the SME = 2.216, 2.093 and 2.216, the R^2_{adj} = 0.9938, 0.9942 and 0.9938, the significance of the parameters $Pr > |t| < 0.0001$, normality test of Shapiro Wilk and its predictive capacity, it follows that the equations are valid for predicting the function of ND-SD. The fitted models indicate a linear trend between DBH and SD.

Key words: *Abies religiosa* (Kunth) Schltld. et Cham., allometry, management, regression, prediction, volume.

Fecha de recepción/Reception date: 23 de noviembre de 2015; Fecha de aceptación/Acceptance date: 15 de julio de 2016.

¹ INIFAP. Centro de Investigación Sureste. Campo Experimental Chetumal. México. Correo-e: xavier_garciacuevas@yahoo.com.mx

² Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México.

³ Posgrado Forestal. Colegio de Postgraduados. México.

Introducción

El diámetro normal (dn) es indispensable para caracterizar la estructura de la masa arbórea original y a partir de ella, estimar los volúmenes extraídos (v) después de realizar las cortas (López *et al.*, 2003; Pompa-García *et al.*, 2011) e incluso la biomasa (B), o la cantidad de carbono secuestrado (C) (Hernández, 2016).

Lo anterior, se logra a través de modelos alométricos que estimen el diámetro normal (dn), en función del diámetro del tocón (dt) y una tarifa de volumen que dependa del diámetro normal (Diéguez *et al.*, 2003), o del diámetro del tocón.

La estimación del diámetro normal (dn) en función del diámetro del tocón (dt), mediante procesos de regresión puede usarse para calcular los volúmenes (Bava y López, 2006; Pompa-García *et al.*, 2011).

Ejemplo son el cálculo de diámetro normal (dn), con respecto al volumen (v), biomasa (B), índice de área foliar (IAF) o carbono (C) (Martin *et al.*, 1998); de las relaciones de dn con la altura total (h) (Zeide y Vanderschaaf, 2002); las funciones de dn-h para los estudios de crecimiento (Delgado *et al.*, 2005), o la relación funcional entre el diámetro de tocón (dt) con el dn, h y v (Bava y López, 2006; Martínez-López y Acosta-Ramos, 2014).

Conocer la relación entre dt y dn puede ser referencia de predicciones en variables como h (Martínez-López y Acosta-Ramos, 2014), que posteriormente se toman como base para realizar estimaciones de volumen (Aigbe *et al.*, 2012).

Dado que no siempre se cuenta con las dimensiones del dn, para realizar cálculos de volumen, por ejemplo; cuando ocurren talas o desmontes ilegales, en la cuantificación de los aprovechamientos en grandes extensiones, en la evaluación de las prácticas silvícolas aplicadas en el bosque después del aprovechamiento o simplemente por extravío de la información del inventario; conocer la relación entre dn y el dt es de gran utilidad para cuantificar el volumen removido (Benítez-Naranjo *et al.*, 2004).

La relación alométrica entre el diámetro del tocón y el diámetro normal es una herramienta para los administradores de los recursos forestales y evaluadores de las prácticas de aprovechamientos aplicadas en los bosques; por lo cual, se planteó el objetivo de desarrollar ecuaciones predictivas del diámetro normal en función del diámetro del tocón para *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham., en Tancítaro, Michoacán.

Introduction

The normal diameter (DN) is essential for characterizing the structure of the original mass and, based on it, for estimating the extracted volumes (V) after prunings are performed in the forest masses (López *et al.*, 2001; Pompa-García *et al.*, 2011), and even the biomass (B) or the amount of sequestered carbon (C), (Hernández, 2016).

This is achieved through allometric models estimating the normal diameter (ND) in relation to the stump diameter (SD) and the volume rate based on the normal diameter (Diéguez *et al.*, 2003) or on the stump diameter.

The estimation of the normal diameter (DN) with regard to the stump diameter (SD) can be carried out through regression processes and thus be used to calculate the volumes (Bava and López, 2006; Pompa-García *et al.*, 2011).

Examples of these studies are the estimations of the normal diameter (ND) with regard to the volume (V), biomass (B), leaf area index (LAI) or carbon (C) (Martin *et al.*, 1998), the ratio of the ND to the total height (H) (Zeide and Vanderschaaf, 2002), the functions of ND-H for growth studies (Delgado *et al.*, 2005) or the functional relationship between the stump diameter (SD) and the ND, H and V (Bava and López, 2006; Martínez-López and Acosta-Ramos, 2014).

Knowledge of the ratio of the SD to the ND can be reference for predictions of such variables as H (Martínez-López and Acosta, 2014) on which volume estimations can subsequently be based (Aigbe *et al.*, 2012).

Because the ND size is not always available to estimate the volume, for example, when illegal loggings or clearings occur, in the quantification of exploitations in large areas, in the evaluation of the silvicultural practices applied in the forest after harvesting, or simply due to loss of inventory information, knowledge of the ratio of the ND to the SD is very helpful for quantifying the removed volume (Benítez-Naranjo *et al.*, 2004).

The allometric relationship between the stump diameter and the normal diameter is a useful tool for the managers of forest resources and the evaluators of the land-use practices applied in forests. This fact has led to proposing the development of predictive equations of the normal diameter based on the stump diameter of *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham. trees in Tancítaro, Michoacán, as an objective.



Materiales y Métodos

Área de estudio

El área de investigación se encuentra dentro de la zona de Protección de Flora y Fauna (APFF) Pico de Tancítaro, en el estado de Michoacán de Ocampo; se ubica en los municipios Tancítaro, Peribán, Uruapan y Nuevo Parangaricutiro; en un intervalo altitudinal de 2 200 a 3 850 m, y cuenta con una superficie de 23405-92-09.55 ha, según su decreto de creación. Las coordenadas extremas del APFF son 19°31'09.83"-19°20'30.61" N. y 102°13'14.34" a 102°24'07.42" O.

Particularmente, el predio se ubica en la Provincia Eje Neovolcánico, de la Subprovincia Neovolcánica Tarasca (X9) y Estrato Volcán (S1) (Inegi, 1985).

El clima predominante es del tipo C(m)(w), templado subhúmedo, con un verano cálido subhúmedo, y abundantes lluvias. Precipitación media anual de 1 000-1 200 mm y temperatura media anual de 10-12 °C (García, 1983). La unidad dominante de suelo es Andosol ócrico, y con textura gruesa (To+1), son suelos de áreas con actividad volcánica reciente, sustentan vegetación de bosque de pino, abeto y encino, principalmente (Inegi, 1985).

Datos

En una superficie de 110 ha (Figura 1), se recolectó una muestra de 1 083 pares de datos de diámetro normal-diámetro del tocón en árboles completamente sanos, completos, con un solo fuste, lo más recto posible, y que no estuvieron aislados, ni a las orillas del rodal; en el cual se midió arbolado de 2.5 a 80 cm de diámetro normal (d); la medida se consideró a la altura de 1.30 m así como la altura total mediante un clinómetro marca *Suunto* en 107 sitios de muestreo de forma circular (500 m²), distribuidos en forma sistemática a 100 m entre sitios y 100 m entre líneas de muestreo, que se delimitaron mediante cuerda compensada de pendiente.

Variables

Se registraron las siguientes variables: especie, número de árbol, diámetro normal (d), altura total (h), condición, daños y dominancia. En cada sitio se determinó la edad y tiempo de paso a tres árboles. Mediante la medición directa de 1 083 pares de datos de d, medido a 1.3 m; y de dt medido a 0.3 m, se obtuvieron datos de diferentes categorías diamétricas y condiciones de crecimiento.

Materials and Methods

Study area

The research area is located within the *Zona de Protección de Flora y Fauna Pico de Tancítaro* (*Tancítaro Peak Flora and Fauna Protection Area*) (FFPA), in the state of *Michoacán de Ocampo*, specifically in *Tancítaro, Peribán, Uruapan* and *Nuevo Parangaricutiro* municipalities. It has an altitudinal range between 2 200 and 3 850 masl and a surface of 23405-92-09.55 ha according to its creation decree. The extreme coordinates of the FFPA are 19°31'09.83" to 19°20'30.61" N and 102°13'14.34" to 102°24'07.42" W.

Specifically, the plot is located in *Provincia Eje Neovolcánico* (the Neovolcanic Axis Province), of the *Subprovincia Neovolcánica Tarasca* (Tarascan Subprovince) (X9) and the *Estrato Volcán* (Volcano Stratum) (S1) (Inegi, 1985).

The prevailing climate is temperate sub-humid C(m)(w), with a sub-humid warm summer with abundant rains, a mean annual precipitation of 1 000-1 200 mm and a mean annual temperature of 10-12 °C (García, 1983). The predominant soil unit is ochric andosol, with a coarse texture (To+1); this type of soils are found in areas where volcanic activity has recently occurred, and they hold primarily pine, spruce and holm oak forest vegetations (Inegi, 1985).

Data

A sample of 1 083 normal diameter-stump diameter data pairs was collected in a surface area of 110 ha (Figure 1), from complete, totally healthy trees with a single stem as straight as possible, that are neither isolated nor located at the edges of the stand, in which trees with a normal diameter (ND) of 2.5 to 80 cm were measured; the measure was taken at a height of 1.30 m as well as the total height with a *Suunto* clinometer in 107 sampling sites of circular shape (500 m²) distributed in a systematic way, at a distance of 100 m between sites and of 100 m between sampling lines, which were marked with a slope compensated rope.

Variables

The following variables were recorded: species, tree number, normal diameter (D), total height (H), condition, damage and predominance. The age and the passage of time were measured in three trees per site. 1 083 pairs of data of D measured at a height of 1.3 m and SD measured at 0.3 m were obtained for different diametric categories and growth conditions through the direct measurement.



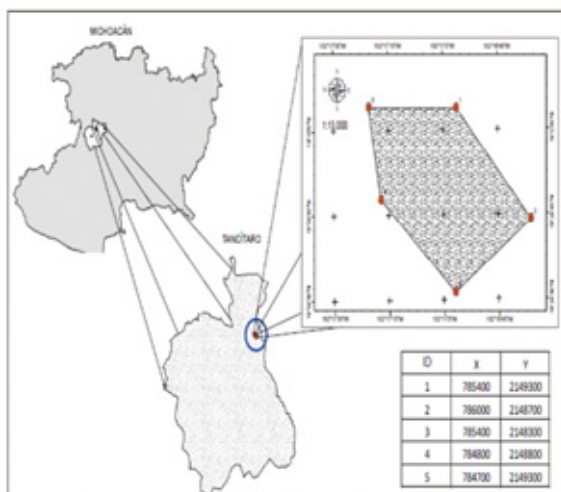


Figura 1. Ubicación del área de estudio en la zona de Protección de Flora y Fauna Pico de Tancitaro, Michoacán.

Figure 1. Location of the study area in the Zona de Protección de Flora y Fauna Pico de Tancitaro (Tancitaro Peak Flora and Fauna Protection Area) in Michoacán.

Modelos utilizados

Los modelos utilizados fueron los propuesto por Quiñonez *et al.* (2012) y Pompa-García *et al.* (2011) para la estimación del d_t a partir del d_n , debido a que esta sección tiene una forma de tipo neiloide truncado (Cuadro 1).

Análisis estadístico

Se graficaron los datos y para detectar datos atípicos en el diagrama de dispersión, se hizo una corrida preliminar de los modelos con PROG REG y la opción R-INFLUENCE para obtener los residuales estudentizados; cuando estos fueron mayores de 2 (absoluto) se consideraron atípicos, por lo que se procedió a eliminar la observación. Para el ajuste final, se usó el procedimiento PROC MODEL (SAS, 2003).

Utilized models

The models utilized were those proposed by Quiñonez *et al.* (2012) and Pompa-García *et al.* (2011) for the estimation of the d_t from the d_n , given that this section has the shape of a truncated neiloid (Table 1).

Statistical Analysis

The information was graphed in order to detect atypical data in the scatter plot, and a preliminary run of the PROG REG models and of the R-INFLUENCE option was carried out to obtain the studentized residuals; when the value of the latter was above 2 (absolute), they were considered to be atypical, and therefore the observation was deleted. The PROC MODEL procedure was used for the final adjustment (SAS, 2003).

Cuadro 1. Modelos usados para predecir el diámetro normal (d_n) a partir del diámetro del tocón (d_t).

Autor	Modelos	Expresión matemática
Pompa-García <i>et al.</i> (2011)	M1	$d_n = b_0 + b_1 (d_t) + \epsilon$
Pompa-García <i>et al.</i> (2011)	M2	$d_n = b_0 d_t (\frac{1.3}{h_t})^{b_1} + \epsilon$
Quiñonez <i>et al.</i> (2012)	M3	$d_n = b_0 + b_1 (b_1 d_t) + \epsilon$
Quiñonez <i>et al.</i> (2012)	M4	$d_n = b_0 + b_1 (d_t)^2 + \epsilon$
Quiñonez <i>et al.</i> (2012)	M5	$d_n = b_0 + b_1 (d_t) + (b_2 (d_t)^2) + \epsilon$

Table 1. Models used to predict the normal diameter (ND) from the stump diameter (SD).

Author	Models	Mathematical expression
Pompa-García <i>et al.</i> (2011)	M1	$d_n = b_0 + b_1 (d_s) + \epsilon$
Pompa-García <i>et al.</i> (2011)	M2	$d_n = b_0 d_s \left(\frac{1.3}{h_s}\right)^{b_1} + \epsilon$
Quiñonez <i>et al.</i> (2012)	M3	$d_n = b_0 + b_1 (b_1 d_s) + \epsilon$
Quiñonez <i>et al.</i> (2012)	M4	$d_n = b_0 + b_1 (d_s)^2 + \epsilon$
Quiñonez <i>et al.</i> (2012)	M5	$d_n = b_0 + b_1 (d_s) + (b_2 (d_s)^2) + \epsilon$

La selección de la mejor ecuación se hizo con base en el Cuadrado Medio del Error (CME), la Raíz del Cuadrado Medio del Error (RCME), nivel de significancia de los estimadores ($P < |t|$) y el Coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}), además se verificó la distribución de residuales. Para verificar el cumplimiento de los supuestos de la regresión, se usó la prueba de Shapiro - Wilk (SAS, 2003). Por otra parte, se graficaron las frecuencias relativas y acumuladas de los residuales para observar si se asemejaban a una línea recta, respecto de la probabilidad de la distribución normal, y si sus porcentajes también se parecían a una campana de Gauss (SAS, 2003).

La capacidad de ajuste se analizó a partir de los residuos y de los estadísticos: el Sesgo (\bar{E}), la Raíz del Error Medio Cuadrático (REMC) y el R^2_{adj} , el cual se refiere al porcentaje que explica la variable de respuesta y que tienen en cuenta el número total de los parámetros estimados (Barrio *et al.*, 2004, Trincado y Leal, 2006).

Resultados y Discusión

En el Cuadro 2, se resume del análisis de varianza para cada uno de las ecuaciones ajustadas. Se observan los estimadores estadísticos de los cinco modelos analizados, así como los indicadores de bondad de ajuste.

Los modelos de menor CME fueron M2 y M5, pero el segundo tiene un parámetro no significativo, los modelos M1 y M3 registraron valores iguales (Cuadro 2). Este es uno de los indicadores más importantes para decidir sobre el mejor modelo; por lo que, de acuerdo a su valor, en el presente estudio fueron M2, M1 y M3.

The selection of the best equation was based on the Mean Square Error (MSE), the Root of Square Means of Error (RMSE), the level of significance of the estimators ($P < |t|$) and the fitted coefficient of determination (R^2_{adj}); the distribution of the residuals was also verified. Compliance with the regression assumptions was verified using the Shapiro-Wilk test (SAS, 2003). On the other hand, the relative and accumulated frequencies of the residuals were graphed in order to determine any similarities with a straight line in relation to the probability of the normal distribution, as well as between their percentages and a Gauss bell curve (SAS, 2003).

The capacity of fit was analyzed based on the residuals and on three statistics, namely the Bias (\bar{E}), the Root of the Mean Square Error (RMSE) and the R^2_{adj} ; the latter refers to the percentage to which the response variable is explained and is taken into account in the total number of the estimated parameters (Barrio *et al.*, 2004; Trincado and Leal, 2006).

Results and Discussion

Table 2 presents a summary of the variance analysis for each of the fitted equations and shows the statistical estimators for the five models analyzed, as well as the indicators of goodness of fit.

The models with the least MSE were M2 and M5; however, the latter includes a non-significant parameter. Models M1 and M3 yielded equal values (Table 2). This is one of the most important indicators for deciding on the best model; its value shows models M2, M1 and M3 to be the best.



Cuadro 2. Valores de los parámetros y estadísticos de bondad de ajuste para los modelos utilizados.

Modelo	CME	Raíz CME	R ² _{adj}	Coefficiente	Estimador	Error std aprox.	Valor T	Aprox Pr> t	S.W.	Pr<W	Sesgo \bar{E}
M1	2.216	1.489	0.9938	β_0	-1.11149	0.0858	-12.96	<.0001	0.97335	<.0001	1.089
				β_1	0.922678	0.00158	584.04	<.0001			
M2	2.093	1.447	0.9942	β_0	0.173763	0.00149	116.54	<.0001	0.9608	<.0001	1.683
				β_1	1.048363	0.00233	450.82	<.0001			
M3	2.216	1.489	0.9938	β_0	-1.11149	0.0858	-12.96	<.0001	0.97335	<.0001	1.089
				β_1	0.960564	0.000822	1168.06	<.0001			
M4	23.599	4.858	0.9343	β_0	12.33252	0.1488	82.91	<.0001	0.95344	<.0001	3.2364
				β_1	0.011132	0.000042	262.5	<.0001			
M5	2.0861	1.444	0.9942	β_0	-0.24795	0.1605	-1.54	0.1226	0.96059	<.0001	1.192
				β_1	0.858087	0.00714	120.23	<.0001			
				β_2	2.89E-02	1.25E-03	23.18	<.0001			

Table 2. Values of the parameters and statistics of goodness of fit for the models used.

Model	MSE	MSE Root	R ² _{adj}	Coefficient	Estimator	Approx Std Error.	T Value	Approx Pr> t	S.W.	Pr<W	\bar{E} bias
M1	2.216	1.489	0.9938	β_0	-1.11149	0.0858	-12.96	<.0001	0.97335	<.0001	1.089
				β_1	0.922678	0.00158	584.04	<.0001			
M2	2.093	1.447	0.9942	β_0	0.173763	0.00149	116.54	<.0001	0.9608	<.0001	1.683
				β_1	1.048363	0.00233	450.82	<.0001			
M3	2.216	1.489	0.9938	β_0	-1.11149	0.0858	-12.96	<.0001	0.97335	<.0001	1.089
				β_1	0.960564	0.000822	1168.06	<.0001			
M4	23.599	4.858	0.9343	β_0	12.33252	0.1488	82.91	<.0001	0.95344	<.0001	3.2364
				β_1	0.011132	0.000042	262.5	<.0001			
M5	2.0861	1.444	0.9942	β_0	-0.24795	0.1605	-1.54	0.1226	0.96059	<.0001	1.192
				β_1	0.858087	0.00714	120.23	<.0001			
				β_2	2.89E-02	1.25E-03	23.18	<.0001			

Los coeficientes R² ajustada explican el ajuste de la ecuación a los datos y toma en cuenta el número de coeficientes utilizados (Pompa-García *et al.*, 2011). Los modelos M2 y M5 lograron los valores más cercanos a la unidad, seguidos de M1 y M3, con valor igual en ambos. Los resultados que se obtuvieron son superiores a los documentados por Alder y Cailliez (1980), quienes expresan que las mejores funciones pueden tener coeficientes por arriba de 0.7 y 0.8; Gujarati (2004) plantea que un modelo es satisfactorio, si su valor es alrededor de 0.8. Lo anterior indica que con los modelos se obtienen buenas estimaciones. El M2 sigue siendo el mejor, ya que M5 tiene el parámetro β_0 no significativo; y coincide con el registrado por Pompa-García *et al.* (2011), quien cita 0.96 para *Pinus durangensis* Martínez.

Los coeficientes β_0 y β_1 de los modelos M1, M2 y M3 son significativos ($p \leq 0.0001$), no así el coeficiente β_0 del M5 ($p=0.1226$), que tuvo el más alto error estándar en el coeficiente

The values of the fitted R² coefficient explain the fit of the model to the data and take into account the number of coefficients used (Pompa-García *et al.*, 2011). Models M2 and M5 yielded the closest values to the unit, followed by models M1 and M3, both with an equal value. These results are higher than those reported by Alder and Cailliez (1980), who state that the best features may have coefficients above 0.7 and 0.8, and by Gujarati (2004), according to whom a model is satisfactory when the value of this coefficient is approximately 0.8. This is an indication that the models yield satisfactory estimates. In this case, model M2 remains the best, since M5 includes the non-significant parameter β_0 . This model coincides with the one obtained by Pompa-García *et al.* (2011), who estimated values of 0.96 for *Pinus durangensis* Martínez.

Coefficients β_0 and β_1 of models M1, M2 and M3 are significant ($p < 0.0001$), but not so the coefficient β_0 of model M5 ($p=0.1226$), which shows the highest value for the standard

de regresión. El parámetro β_0 caracteriza la forma de la relación del diámetro de tocón - diámetro normal, por lo que es importante maximizar la precisión de su estimación, por lo tanto, se descarta el empleo de modelo M5.

La RCME permite evaluar la precisión de las estimaciones realizadas (Benítez-Naranjo *et al.*, 2004). El modelo M2 presentó el menor valor de RCME, mientras que en M1 y M3 el índice fue igual. El mejor modelo resultó ser el M2.

El uso de los criterios anteriores tiende a seleccionar los modelos más sencillos, debido a que penalizan el valor de acuerdo al principio de parsimonia (Gómez-Aparicio *et al.*, 2013).

Con base en la prueba de Shapiro Wilk, en ningún caso se violó el supuesto de normalidad, ya que los valores fueron cercanos a 1, y el nivel de significancia ($Pr < W$) fue alto (< 0.0001) (Velazco *et al.*, 2006). Como se trabajó con una muestra suficientemente grande, de acuerdo al teorema central del límite, estas muestras tienden a aproximarse a la normalidad (Martínez-González *et al.*, 2006); por lo que se asume que la distribución de los residuales se aproxima suficientemente a la normal (Augusto *et al.*, 2009).

En el Cuadro 2 se presentan como medidas de precisión en las estimaciones realizadas: la desviación de los modelos M1 y M3, respecto a los datos observados contra los predichos (\bar{E}) que es baja, y en ese orden le sigue el modelo M2.

Estos tres modelos tuvieron buena capacidad predictiva, de acuerdo a los valores pequeños de la raíz del error medio cuadrático, sesgo, y mayor R^2_{adj} (Cuadro 2). Para los sesgos positivos, indica en cuantas unidades se subestima la predicción a nivel de árbol individual. Lo anterior, mejora lo señalado por Pompa-García *et al.* (2011), cuyos valores son superiores a RCME de mayores de 5.7, sesgo mayor a 2.39 y R^2_{adj} de 0.96, para *Pinus durangensis*.

En la Figura 2 se muestra la fidelidad de los datos predichos, en relación a los observados con los modelos que alcanzaron los mejores ajustes; y no hay mayor sesgo en las predicciones. Con cualquiera de las tres ecuaciones se predice, en forma confiable, el diámetro normal en función de las dimensiones del tocón.

error of the regression coefficient. The parameter β_0 is the one that characterizes the form of the ratio of the stump diameter to the normal diameter; for this reason, it is important to maximize the accuracy of its estimation, and therefore model M5 should not be used.

The RMSE makes it possible to evaluate the accuracy of the estimations carried out (Benítez-Naranjo *et al.*, 2004). Model M2 produced the lowest value of RMSE, and M1 and M3 both yielded the same index. In this case, the best model is M2.

These criteria lead to select the simplest models because they penalize the value according to the principle of parsimony (Gómez-Aparicio *et al.*, 2013).

According to the Shapiro-Wilk test, the assumption of normality is not violated in any case, since values close to 1 are obtained and the level of significance ($Pr < W$) is high (< 0.0001) (Velazco *et al.*, 2006). Given that the study sample was sufficiently large according to the central limit theorem, these samples tend to be closer to normality (Martínez-González, *et al.*, 2006), and consequently it may be assumed that the distribution of the residuals is close enough to normal (Augusto *et al.*, 2009).

Table 2 shows the deviation of models M1 and M3 with respect to the observed values versus the predicted values (\bar{E}) as measures of accuracy of the estimations; such deviation is low, and therefore these models are followed in order by model M2.

These three models have good predictive capacity in accordance with the low values of the root of the mean square error and bias, and the higher value of R^2_{adj} (Table 2). A positive bias indicates by how many units the prediction is underestimated at the individual tree level. This is an improvement over the results obtained by Pompa-García *et al.* (2011), who obtained values above 5.7 for the RMSE, a bias of over 2.39, and an R^2_{adj} of 0.96 for *Pinus durangensis*.

Figure 2 shows the fidelity of the predicted data in relation to those obtained with models that had the best fits; no significant bias was observed in the predictions. It is possible to obtain a reliable prediction of the normal diameter with any of the three equations, depending on the dimensions of the stump.



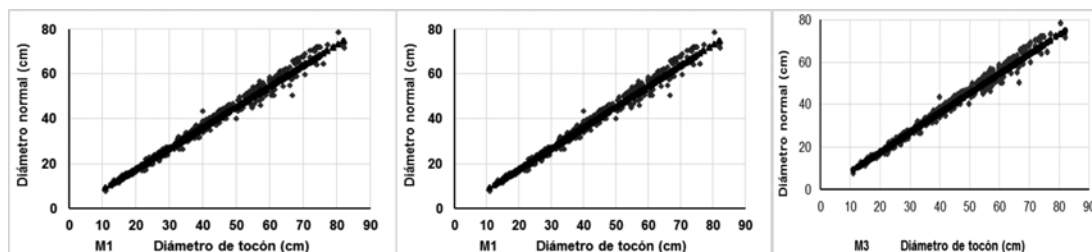


Figura 2. Estimaciones del dn a partir del dt con los modelos M1, M2 y M3 mejor ajustados para *Abies religiosa* (Kunth) Schtdl. et Cham. en Tancítaro, Michoacán.

Figure 2. Estimates of the ND based on the SD using the models M1, M2 and M3 best adjusted for *Abies religiosa* (Kunth) Schtdl. et Cham. in Tancítaro, Michoacán.

Para ilustrar el uso de las ecuaciones, se considerará un tocón de 50 cm de diámetro, que fue cortado a una altura de 30 cm. Los diámetros estimados con las tres ecuaciones son los siguientes:

$$\begin{aligned} M1: & \quad dn = -1.11149 + 0.922678(50) = 45.0224 \text{ cm} \\ M2: & \quad dn = 0.173763(50) \left(\frac{1.3}{45}\right)^{1.048863} = 43.5864 \text{ cm} \\ M3: & \quad dn = 1.11149 + 0.922678(0.922678*50) = 45.0227 \text{ cm} \end{aligned}$$

Los valores calculados del diámetro normal en centímetros son muy semejantes en los modelos M1 y M3; pero, debido a la parsimonia o simplicidad se recomienda usar el modelo M1, tal como lo sugieren Martínez-López y Acosta-Ramos (2014), y Corral-Rivas *et al.* (2007). Con la estimación del diámetro normal a partir del diámetro de tocón, es posible realizar la cuantificación y evaluación de talas clandestinas, desastres naturales, reconstrucción de la estructura del bosque y la evaluación de las prácticas de aprovechamiento aplicadas.

Conclusiones

El ajuste de los modelos indica que existe una tendencia lineal entre las variables diámetro del tocón y el diámetro normal, por lo que la estimación del diámetro normal a partir del diámetro del tocón puede hacer de forma confiable con una regresión lineal simple.

Los modelos M1 y M3 presentan estadísticos con buenos ajustes y el menor sesgo, por lo que es factible para emplearlos en la predicción del diámetro normal, en función del diámetro del tocón.

El modelo M1, por ser el más sencillo y fácil de usar, es el que se recomienda para estimar el diámetro normal en función del diámetro del tocón, y en combinación de una tarifa de cubicación, estimar el volumen del fuste para *Abies religiosa* en la región de estudio.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses

In order to illustrate the use of the equations, we will assume that we have a stump with a 50 cm diameter cut at a height of 30 cm. The following diameters were obtained with the three equations:

$$\begin{aligned} M1: & \quad dn = -1.11149 + 0.922678(50) = 45.0224 \text{ cm} \\ M2: & \quad dn = 0.173763(50) \left(\frac{1.3}{45}\right)^{1.048863} = 43.5864 \text{ cm} \\ M3: & \quad dn = 1.11149 + 0.922678(0.922678*50) = 45.0227 \text{ cm} \end{aligned}$$

The estimated values of the normal diameter in cm are very similar in models M1 and M3—although, due to the parsimony or simplicity, model M1 is recommended by Martínez-López and Acosta-Ramos (2014)—and closely resemble the results reported by Corral-Rivas *et al.* (2007) for the *Pinus* species of northern Mexico. The estimation of the normal diameter based on the stump diameter makes it possible to quantify and assess clandestine loggings, natural disasters, the reconstruction of the structure of the forest and the exploitation practices applied.

Conclusions

The fit of the models indicates that there is a linear trend between the stump diameter and the normal diameter variables; therefore, a reliable estimate of the normal diameter can be obtained based on the stump diameter using a simple linear regression.

Models M1 and M3 present statistics with good fits and with the least bias; for this reason, they can be used in the prediction of the normal diameter based on the stump diameter.

Because model M1 is the most simple and easy to use, it is recommended for estimating the normal diameter based on the stump diameter and, in combination with a cubication rate, for estimating the stem volume of *Abies religiosa* in the study region.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interests.

Contribución por autor

Xavier García-Cuevas: análisis de datos, escrito y corrección del documento; Jonathan Hernández-Ramos: análisis de datos y escrito del documento; José de Jesús García Magaña: coordinación de toma de datos de campo y revisión del documento; Victorino Herrera Ávila: toma de datos de campo y captura de información; Adrián Hernández Ramos: toma de datos de campo y captura de información

Referencias

- Aigbe, H. I., W. W. Modogu and B. A. Oyebade. 2012. Modeling volume from stump diameter of *Terminalia ivorensis* (A. Chev) in Sokponba Forest Reserve, Edo State, Nigeria. ARPN Journal of Agricultural and Biological Science 7(3):146-151.
- Augusto C., T., J. O. Vargas M. y M. Escalier H., 2009. Ajuste y selección de modelos de regresión para estimar el volumen total de árboles. Escuela de Ciencia Forestales de la Universidad Mayor de San Simón. Documento Técnico Núm. 5. Cochabamba, Bolivia. 27 p.
- Alder, D. y F. Cailliez. 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento, con referencia especial a los trópicos. Estudios FAO Montes 22/2. Vol. 2. Roma, Italia. 91 p.
- Barrio A., M., J. G. Álvarez G., I. J. Díaz M. H. y C. A. López S. 2004. Relación altura diámetro generalizada para *Quercus robur* L. en Galicia. Cuadernos de la Sociedad Española de las Ciencias Forestales 18: 141-146.
- Bava, J. O. y P. M. López B. 2006. Predicción del diámetro a la altura de pecho en función de las dimensiones del tocón de árboles de lenga (*Nothofagus pumilio*) en Tierra del Fuego, Argentina. Quebracho 13:87-92.
- Benítez-Naranjo, J. Y., M. Rivero-Vega, A. Vidal-Corona, J. Rodríguez-Rodríguez y R. C. Álvarez-Rivera. 2004. Estimación del diámetro normal a partir del diámetro del tocón en plantaciones de *Casuarina equisetifolia* Forst. en la provincia Camaquëy, Cuba. Revista Chapingo Serie de Ciencias Forestales y del Ambiente 10(1):25-30.
- Corral-Rivas, J. J., M. Barrio-Anta, O. A. Aguirre-Calderón and U. Diéguez-Aranda. 2007. Use of stump diameter to estimate diameter at breast height and tree volumen for major pine species in El Salto, Durango (México). Forestry 80 (1): 29-40.
- Delgado, L. A., M. F. Acevedo, H. Castellanos, H. Ramírez y J. Serrano. 2005. Relaciones alométricas y patrones de crecimiento para especies de árboles de la Reserva Forestal Imataca, Venezuela. Interciencia 30(5):275-283.
- Diéguez, A. U., M. Barrio A., M., F. Castedo D. y M. Balboa M. 2003. Estimación del diámetro normal y del volumen del tronco a partir de las dimensiones del tocón para seis especies forestales comerciales de Galicia. Investigación Agraria Sistemas y Recursos Forestales 12(2): 131-139.
- García, E. 1983. 1964. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köepen (para adaptarlas a las condiciones de la República Mexicana). Universidad Autónoma de México. Instituto de Geografía. México, D. F., México. 252 p.
- Gómez-Aparicio, L., J. M. Ávila y L. Cayuela. 2013. Métodos de máxima verosimilitud en ecología y su aplicación en modelos de vecindad. Ecosistemas 22(3):12-20.

Contribution by author

Xavier García-Cuevas: data analysis, writing and correction of the manuscript; Jonathan Hernández-Ramos: data analysis and writing of the manuscript; José de Jesús García Magaña: coordination of data taking at the field and review of the manuscript; Victorino Herrera Ávila: data taking at the field and data collection; Adrián Hernández Ramos: data taking at the field and data collection.

End of the English version

- Gujarati D., N. 2004. Econometría. 4a ed. McGraw-Hill Interamericana Editores. México, D.F., México. 972 p.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (Inegi). 1985. Cartas topográficas y edafológicas. Inegi. SPP. México, D.F., México. s/p.
- Hernández R., J. 2016. Estimación de biomasa aérea y volume en plantaciones forestales de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake en Huimanguillo, Tabasco. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo. de Méx., México. 104 p.
- López S. C. A., J. Gorgoso V., F. Castedo D., A. Rojo A., R. Rodríguez S., J. G. Álvarez G. y F. Sánchez R. 2003. A height-diameter model for *Pinus radiata* D. Don in Galicia (Northwest Spain). Annals of Forest Science 60: 237-245. DOI: 10.1051/forest: 2003015.
- Martin, J. G., B. D. Kloeppel, T. L. Schaefer, D. L. Kimbler and S. G. Manuly. 1998. Aboveground biomass and nitrogen allocation of ten deciduous southern Appalachian tree species. Canadian Journal of Forest Research 28: 1648-1659.
- Martínez-González, M. A., A. Sánchez-Villegas y J. Faulin-Fajardo. 2006. Bioestadística amigable. 2ª. Ed. Ediciones Díaz Santo. Madrid, España. 919 p.
- Martínez-López, L. y A. Acosta-Ramos. 2014. Estimación del diámetro, altura y volumen a partir del diámetro del tocón para *Quercus laurina* en Ixtlán, Oaxaca, México. Madera y Bosques 20 (1):59-70.
- Pompa-García, M., H. M. De los Santos-Posadas, M. E. Zepeda-Bautista y J. J. Corral-Rivas. 2011. Un modelo dendrométrico para estimación del diámetro normal a partir de las dimensiones del tocón. Agrociencia 45(3): 379-387.
- Quiñonez, B. G., F. Cruz C., B. Vargas L. y F. J. Hernández. 2012. Diámetro, altura y volumen a partir del tocón para especies forestales de Durango. Revista Mexicana de Ciencias Forestales 3(9): 23-39.
- Statistical Analysis System Institute (SAS) 2003. SAS/STATM User's guide. Release 9.1 Edition. Statistical Analysis System Institute. Cary, NC, USA. 409 p.
- Trincado, G. y C. Leal D. 2006. Ecuaciones locales y generalizadas de altura-diámetro para pino radiata (*Pinus radiata*). Bosque 27(1): 23-34.
- Velasco B., E., S. Madrigal H., I. Vázquez C., A. González H. y F. Moreno S. 2006. Manual para la elaboración de tablas de volumen fustal en pinos. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. México, D. F., México. Libro técnico Núm. 1. 34 p.
- Zeide, B. and C. Vanderschaaf. 2002. The effect of density on the height-diameter relationship. In: Outcalt, K. W. (ed.). Proceedings of the eleventh biennial southern silvicultural research conference. Gen. Tech. Rep. SRS-48. USDA. Ashville, NC, USA. pp. 463-466.





CONSEJO ARBITRAL

Argentina

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.- M.Sc. Leonel Harrand
Museo Argentino de Ciencias Naturales.- Dra. Ana María Faggi
Instituto Argentino de Investigaciones de las Zonas Áridas (IADIZA).- Dr. Eduardo Martínez Carretero

Canadá

Université Laval, Québec.- Ph. D. Roger Hernández

Cuba

Instituto de Investigaciones Fundamentales en Agricultura Tropical.- Dra. Amelia Capote Rodríguez
Unión Nacional de Escritores y Artistas de Cuba.- Dra. Raquel Carreras Rivery

Chile

Universidad del Bío Bío.- Dr. Rubén Andrés Ananías Abuter

España

CIFOR-INIA.- Dr. Eduardo López Senespleda, Dr. Gregorio Montero González, Dr. Sven Mutke Regneri
Fundación CEAM.- Dra. María José Sáenz Sánchez
Universidad de Oviedo.- Dr. Elías Afif Khouri
Universidad Politécnica de Madrid.- Dr. Alfredo Blanco Andray, Dr. Luis Gil Sánchez, Dr. Alfonso San Miguel-Ayanz,
Dr. Eduardo Tolosana, Dr. Santiago Vignote Peña

Estados Unidos de América

New Mexico State University.- Ph.D. John G. Mexal
Northern Arizona University .- Ph.D. Peter Z. Fulé
University of Colorado at Denver.- Ph.D. Rafael Moreno Sánchez
University of Florida.- Ph.D. Francisco Javier Escobedo Montoya
United States Department of Agriculture, Forest Service.- Dr. Mark E. Fenn, Dr. Carlos Rodriguez Franco

Italia

International Plant Genetic Resources Institute.- Dra. Laura K. Snook

México

Asociación Mexicana de Arboricultura.- Dr. Daniel Rivas Torres
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.- Dr. José F. Conrado Parraguirre Lezama
Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. Dra. Luz María del Carmen Calvo Irabién
Ph.D. José Luis Hernández Stefanoni
Centro de Investigación y Docencia Económicas.- Dr. Alejandro José López-Feldman
CENTROGEO / CONACYT.- Dra. Alejandra López Caloca
Colegio de la Frontera Sur.- Dr. Bernardus H. J. de Jong, Dr. Mario González Espinosa, Ph.D. Jorge E. Macías Sámano,
Dr. Neptalí Ramírez Marcial, Dr. Cristian Tovilla Hernández, Dr. Henricus Franciscus M. Vester
Colegio de Postgraduados.- Dr. Arnulfo Aldrete, Dr. Dionicio Alvarado Rosales, Dr. Víctor M. Cetina Alcalá,
Dra. Ma. de Lourdes de la Isla de Bauer, Dr. Héctor M. de los Santos Posadas, Dr. Armando Equihua Martínez,
Dr. Ronald Ferrara-Cerrato, Dr. Edmundo García Moya, Dr. Manuel de Jesús González Guillén, Dr. Jesús Jasso Mata,
Dr. Lauro López Mata, Dr. Javier López Upton, Dr. Martín Alfonso Mendoza Briseño, Dr. Antonio Trinidad Santos,
Dr. Juan Ignacio Valdés Hernández, Dr. José René Valdez Lazalde, Dr. J. Jesús Vargas Hernández,
Dra. Heike Dora M. Vibrans Lindemann
El Colegio de México.- Dra. María Perevochtchikova

El Colegio de Tlaxcala, A.C.- M.C. Noé Santacruz García

Instituto de Ecología, A. C.- Dr. Pedro Guillermo Ángeles Álvarez, Dr. Ismael Raúl López Moreno

Instituto Politécnico Nacional.- Dr. Alejandro Daniel Camacho Vera, Ph.D. José de Jesús Nívar Cháidez, M.C. D. Leonor Quiroz García, Ph.D. Sadoth Sandoval Torres

PRONATURA.- Dr. José A. Benjamín Ordoñez Díaz

Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.- Dr. Eladio Heriberto Cornejo Oviedo, M.C. Salvador Valencia Manzo

Universidad Autónoma Chapingo.- M.C. Beatriz Cecilia Aguilar Valdez, M.C. Baldemar Arteaga Martínez, Dra. Emma Estrada Martínez, M.C. Mario Fuentes Salinas, M.C. Enrique Guízar Nolazco, Dra. María Isabel Palacios Rangel, Dr. Hugo Ramírez Maldonado, Dr. Dante Arturo Rodríguez Trejo, Dr. Leonardo Sánchez Rojas, Dr. Enrique Serrano Gálvez, Dra. Ernestina Valadez Moctezuma

Universidad Autónoma de Baja California Sur.- Dr. José Antonio Martínez de la Torre

Universidad Autónoma de Chihuahua.- Ph.D. Concepción Luján Álvarez, Ph.D. Jesús Miguel Olivas García

Universidad Autónoma de Guadalajara.- Dr. Mauricio Alcocer Ruthling

Universidad Autónoma de Nuevo León .- Dr. Glafiro J. Alanís Flores, Dr. Enrique Jurado Ybarra, Dr. José Guadalupe Marmolejo Monsiváis, Dr. Eduardo Javier Treviño Garza

Universidad Autónoma de Querétaro.- Dr. Luis Gerardo Hernández Sandoval

Universidad Autónoma de San Luis Potosí.- M.C. Carlos Arturo Aguirre Salado

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.- Dra. Ana Laura López Escamilla, Dr. Ángel Moreno Fuentes

Universidad Autónoma del Estado de México.- Dr. Darío Ibarra Zavala, Dr. Armando Burgos-Solorio

Universidad Autónoma Indígena de México.- Dra. Hilda Susana Azpiroz Rivero

Universidad Autónoma Metropolitana.- Dr. Héctor Castillo Juárez, Dra. Carmen de la Paz Pérez Olvera

Universidad de Guadalajara.- Dr. Luis Ramón Bravo García, Dr. Ezequiel Delgado Fourné, M.C. Francisco Javier Fuentes Talavera, M.C. María Guadalupe Lomelí Ramírez, M.C. Roberto Novelo González, Dr. Rubén Sanjuán Dueñas

Universidad del Mar.- M.C. Verónica Ortega Baranda

Universidad Juárez del Estado de Durango.-Dr. Javier Leonardo Bretado Velázquez, Dr. Hermes Alejandro Castellanos Bocaz, Dr. José Javier Corral Rivas, Ph.D. José Ciro Hernández Díaz, Dr. Marín Pompa García, Dr. José Ángel Prieto Ruíz

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.- Dr. José Cruz de León, M.C. Marco Antonio Herrera Ferreyra, Dr. Alejandro Martínez Palacios, Dr. José Guadalupe Rutiaga Quiñones, Dr. David Zavala Zavala

Universidad Nacional Autónoma de México.- Dra. María del Consuelo Bonfil Sanders, Dr. Humberto Bravo Álvarez, Dra. Eliane Ceccón, Dr. Joaquín Cifuentes Blanco, Dr. Abisai Josué García Mendoza, Dr. Roberto Garibay Orijel, Dr. Julio Alberto Lemos Espinal, Dr. Daniel Piñero Dalmáu, Dr. Américo Saldívar Valdés, Dra. Teresa Terrazas Salgado, M. C. Verónica del Pilar Reyer Hernández, Dra. Ana Laura Wegier Briuolo

Universidad Veracruzana.- Dr. Lázaro Rafael Sánchez Velásquez

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.- Dr. Miguel Acosta Mireles, Dr. Juan de Dios Benavides Solorio, Dr. Fernando Carrillo Anzures, Dr. Carlos Román Castillo Martínez, Dr. José Gilberto Chávez León, Dr. José Germán Flores Garnica, M.C. Antonio González Hernández, Dr. Vidal Guerra de la Cruz, Dr. José Amador Honorato Salazar, Dr. Fabián Islas Gutiérrez, Dr. Emiliano Loeza Kuk, M.C. José Francisco López Toledo, Dr. Martín Martínez Salvador, Dra. Aixchel Maya Martínez, Dr. José Isidro Melchor Marroquín, M.C. Carlos Mallén Rivera, Dr. Ramiro Pérez Miranda, Dr. Guillermo Sánchez Martínez, Dr. Erasto Domingo Sotelo Ruiz, Dr. Arturo Gerardo Valles Gándara, Dr. José Villanueva Díaz, M.C. Eulalia Edith Villavicencio Gutiérrez, Dr. Fernando Carrillo Anzures, Dr. Francisco Becerra Luna, M.C. Georgette Moctezuma López, M.C. Francisco Moreno Sánchez, M.C. Martín Enrique Romero Sánchez, Dr. Juan Carlos Tamarit Urias, M.C. Efraín Velasco Bautista

Consultores Privados.- Dr. Gustavo Cruz Bello, M.C. Juan Islas Gutiérrez, M.Sc. Rosalía A. Cuevas Rangel, Dra. Teresita del Niño Jesús Marín Hernández



El envío de artículos, ensayos y notas técnicas; así como, las instrucciones y fuente tipográfica para su presentación las puede consultar en la página www.cienciasforestales.inifap.gob.mx

Para su recepción se deberá cubrir una cuota de \$ 750.00 (Setecientos cincuenta pesos 00/100 M.N.) y para su publicación de \$ 350.00 (Trescientos cincuenta pesos 00/100 M.N.) por página completa publicada (traducción y gastos de edición).

El pago de suscripciones y publicación de artículos se realizará por medio de un depósito a nombre del INIFAP/CENID-COMEF, en la cuenta No. 0657617851, Clabe Interbancaria 072 180 00657617851 2, del Grupo Financiero BANORTE, Sucursal No. 2037. En el caso de suscripciones internacionales, la Clave SWIFTT correspondiente es: MENOMXMT. Se deberá enviar copia del depósito por correo electrónico. Si el pago es con cheque, se requiere expedirlo a nombre del INIFAP/CENID-COMEF.

Precios de suscripción (incluye envío)			
Nacional:	\$	600.00	Institucional / Individual
Extranjero	\$	90.00 USD	Institucional / Individual

Toda correspondencia relacionada con la revista, favor de dirigirla a:

Editor en Jefe de la Revista Mexicana de Ciencias Forestales
Av. Progreso No. 5
Barrio de Santa Catarina
delegación Coyoacán
C.P. 04010 Ciudad de México, México.
Correo-e: cienciasforestales@inifap.gob.mx
Teléfono: (+52-55) 3626-8697
Conmutador: (+52-55) 3626-8700 ext. 112

Producción: Marisela C. Zamora Martínez
Cuidado de la Edición: Marisela C. Zamora Martínez
Diseño y formación: Silvia Onodera Hamano
Asistencia técnica: Miguel Ángel Cruz Reyes
Asistencia editorial: Laura Gabriela Herrerías Mier
Asistencia administrativa: Rosalía Cano Santamaría
Impresión, encuadernación y terminado:
Graphx, S.A. de C.V.

El

Volumen 7,
Número 37 de la
*Revista Mexicana de Ciencias
Forestales*, es una versión íntegra
y fiel de la impresa en septiembre
de 2016 por: Graphx, S.A. de C.V.
Tacuba 40 - 205, Col. Centro
C.P. 06010, deleg. Cuauhtémoc,
Ciudad de México. Tiraje:
1,000 ejemplares.

Vol. 7 Núm. 37 2016

Modelo de crecimiento en altura dominante para *Pinus pseudostrabus* Lindl. en el estado de Guerrero
Dominant height growth model for *Pinus pseudostrabus* Lindl. in Guerrero state

Aprovechamiento de productos forestales no maderables en los bosques de montaña alta, centro de México
Utilization of non-timber forest products in the high mountain forests of central Mexico

Cambio climático y predicción de incendios al 2050 en el Bosque La Primavera, Jalisco
Climate change and prediction of fires for the year 2050 at the La Primavera Forest, Jalisco

Selección de árboles sobresalientes de caoba (*Swietenia macrophylla* King.) en un rodal natural mediante métodos multivariados
Selection of outstanding mahogany (*Swietenia macrophylla* King.) trees in a natural stand based on multivariate methods

Intercepción de lluvia en bosques de montaña en la cuenca del río Texcoco, México
Rainfall interception in mountain forests in the Texcoco river basin, Mexico

Estimación de biomasa y carbono almacenado en bosques comunitarios de la región Frailesca de Chiapas, México
Estimation of the biomass and stored carbon in community forest of La Frailesca region of Chiapas, Mexico

Ecuaciones para predecir el diámetro normal en función del diámetro del tocón para *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham.
Equations to predict the normal diameter based on the stump diameter of *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham.