

AP AGRO PRODUCTIVIDAD

ISSN-0188-7394



ÍNDICE DE REVISTAS MEXICANAS
DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

PRODUCCIÓN DE **Primavera**

(*Roseodendron donell-smithii* syn *Tabebuia donell-smithii*),

MADERA FINA DEL TRÓPICO

pág. 42

Año 9 • Volumen 9 • Número 2 • febrero, 2016

DENSIDAD DE LONGITUD DE RAÍCES DE *Acacia mangium* Willd EN UN SUELO DE SABANA 3

EVALUACION DE PLANTACIONES FORESTALES EN TRES COMUNIDADES DE LA MIXTECA ALTA OAXAQUEÑA 12

CONSERVACIÓN *In vitro* POR CRECIMIENTO MÍNIMO DE *Swietenia macrophylla* King, y *Tectona grandis* L. 20

BIOFERTILIZANTE MICORRÍZICO Y FERTILIZANTE MINERAL EN EL CRECIMIENTO DE *Elaeis guineensis* Jacq. EN VIVERO 26

EVOLUCIÓN Y SITUACIÓN ACTUAL DE PLANTACIONES PARA BIOCOMBUSTIBLES: PERSPECTIVAS Y RETOS PARA MÉXICO 33

USO DE RECURSOS FORESTALES MADERABLES Y NO MADERABLES DEL SISTEMA AGROFORESTAL CACAO (*Theobroma cacao* L.) 50

y más artículos de interés...

PRECIO AL PÚBLICO \$75.00 PESOS



Estructura

Agroproductividad es una revista de divulgación científica y tecnológica, auspiciada por el Colegio de Postgraduados de forma mensual para entregar los resultados obtenidos por los investigadores en ciencias agrícolas y afines. En ella se publica información original y relevante para el desarrollo agropecuario, social y otras disciplinas relacionadas, en formato de artículo, nota o ensayo. Las contribuciones son arbitradas y la publicación final se hace en idioma español. La contribución debe tener una extensión máxima de 15 cuartillas, incluyendo las ilustraciones. Deberá estar escrita en Word a doble espacio empleando el tipo Arial a 12 puntos y márgenes de 2.5 cm. Debe evitarse el uso de sangría al inicio de los párrafos. Las ilustraciones serán de calidad suficiente para su impresión en offset a colores, y con una resolución de 300 dpi en formato JPEG, TIFF o RAW.

La estructura de la contribución será la siguiente:

1) Artículos: una estructura clásica definida por los capítulos: Introducción, Resumen, abstract, objetivos, Materiales y Métodos, Resultados y Discusión, Conclusiones y Literatura Citada; 2) Notas, Ensayos y Relatorías: deben tener una secuencia lógica de las ideas, exponiendo claramente las técnicas o metodologías que se transmiten o proponen.

Formato

Título. Debe ser breve y reflejar claramente el contenido. Cuando se incluyan nombres científicos deben escribirse en itálicas.

Autor o Autores. Se escribirán él o los nombres completos, separados por comas, con un índice progresivo en su caso. Al pie de la primera página se indicará el nombre de la institución a la que pertenece el autor y la dirección oficial, incluyendo el correo electrónico.

Cuadros. Deben ser claros, simples y concisos. Se ubicarán inmediatamente después del primer párrafo en el que se mencionen o al inicio de la siguiente cuartilla. Los cuadros deben numerarse progresivamente, indicando después de la referencia numérica el título del mismo (Cuadro 1. Título), y se colocarán en la parte superior. Al pie del cuadro se incluirán las aclaraciones a las que se hace mención mediante un índice en el texto incluido en el cuadro.

Figuras. Corresponden a dibujos, gráficas, diagramas y fotografías. Las fotografías deben ser de preferencia a colores y con una resolución de 300 dpi en formato JPEG, TIFF o RAW.

Unidades. Las unidades de pesos y medidas usadas serán las aceptadas en el Sistema Internacional.

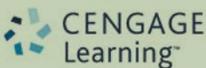
Citas libros y Revistas:

- Bozzola J. J., Russell L. D. 1992. Electron Microscopy: Principles and Techniques for Biologists. Ed. Jones and Bartlett. Boston. 542 p.
- Calvo P., Avilés P. 2013. A new potential nano-oncological therapy based on polyamino acid nanocapsules. *Journal of Controlled Release* 169: 10-16.
- Gardea-Torresdey J. L., Peralta-Videa J. R., Rosa G., Parsons J. G. 2005. Phytoremediation of heavy metals and study of the metal coordination by X-ray absorption spectroscopy. *Coordination Chemistry Reviews* 249: 1797-1810.



Contenido

- 3** DENSIDAD DE LONGITUD DE RAÍCES DE *Acacia mangium* Willd EN UN SUELO DE SABANA
- 12** EVALUACION DE PLANTACIONES FORESTALES EN TRES COMUNIDADES DE LA MIXTECA ALTA OAXAQUEÑA
- 20** CONSERVACIÓN *In vitro* POR CRECIMIENTO MÍNIMO DE *Swietenia macrophylla* King, y *Tectona grandis* L.
- 26** BIOFERTILIZANTE MICORRÍZICO Y FERTILIZANTE MINERAL EN EL CRECIMIENTO DE *Elaeis guineensis* Jacq. EN VIVERO
- 33** EVOLUCIÓN Y SITUACIÓN ACTUAL DE PLANTACIONES PARA BIOCOMBUSTIBLES: PERSPECTIVAS Y RETOS PARA MÉXICO
- 42** PRODUCCIÓN DE PRIMAVERA (*Roseodendron donell-smithii* syn *Tabebuia donell-smithii*), MADERA FINA DEL TRÓPICO
- 50** USO DE RECURSOS FORESTALES MADERABLES Y NO MADERABLES DEL SISTEMA AGROFORESTAL CACAO (*Theobroma cacao* L.)
- 56** ÁREAS POTENCIALES PARA EL CULTIVO DEL AGAVE (*Agave americana* L.) EN LA MESETA COMITECA, CHIAPAS
- 62** EFECTO DEL MEDIO DE CULTIVO EN LA PROPAGACIÓN *in vitro* DE GENOTIPOS DE *Cedrela odorata* L.
- 70** APLICACIÓN DE SECUENCIACIÓN MASIVA PARA EL ESTUDIO Y EXPLORACIÓN DE DIVERSIDAD MICROBIANA Y SU APROVECHAMIENTO BIOTECNOLÓGICO
- Caso de éxito**
- 84** SISTEMA DE BIOSEGURIDAD PARA REDUCIR EL VIVIPARISMO (SIBIOREVI)



Master Journal List
THOMSON REUTERS

Corrección de estilo: Hannah Infante Lagarda

Maquetación: Alejandro Rojas Sánchez

Suscripciones, ventas, publicidad, contribuciones de autores:

Guerrero 9, esquina Avenida Hidalgo, C.P. 56220, San Luis Huexotla, Texcoco, Estado de México.

Teléfono: 01 (595) 928 4703 jocadena@colpos.mx; jocadena@gmail.com

Impresión 3000 ejemplares.

©Agroproductividad, publicación mensual respaldada por el Colegio de Postgraduados. Derechos Reservados. Certificado de Licitud de Título Núm. 0000. Licitud de Contenido 0000 y Reserva de Derechos Exclusivos del Título Núm. 0000. Editorial del Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México, Miembro de la Cámara Nacional de la Industria Editorial Núm. 036.

Es responsabilidad del autor el uso de las ilustraciones, el material gráfico y el contenido creado para esta publicación.

Las opiniones expresadas en este documento son de exclusiva responsabilidad de los autores, y no reflejan necesariamente los puntos de vista del Colegio de Postgraduados, de la Editorial del Colegio de Postgraduados, ni de la Fundación Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas.

Impreso en México • Printed in México
PRINTING ARTS MEXICO, S. de R. L. de C. V.
Calle 14 no. 2430, Zona Industrial
Guadalajara, Jalisco, México. C.P. 44940
Fax: 3810 5567
www.tegrafik.com
RFC: PAM991118 DGO

Directorio

Said Infante Gil

Editor General del Colegio de Postgraduados

Rafael Rodríguez Montessoro[†]

Director Fundador

Jorge Cadena Iñiguez

Director de Agroproductividad

Comité Técnico-Científico

Colegio de Postgraduados—Montecillo
Ma. de Lourdes de la Isla

Dr. Ing. Agr. Catedrática Aereopollución

Ángel Lagunes T.

Dr. Ing. Agr. Catedrático Entomología

Enrique Palacios V.

Dr. Ing. Agr. Catedrático Hidrociencias

Colegio de Postgraduados—Córdoba
Fernando Carlos Gómez Merino

Dr. Ing. Agr. Biotecnología

Colegio de Postgraduados—San Luis Potosí
Fernando Clemente Sánchez

Dr. Ing. Agr. Fauna Silvestre

Luis Antonio Tarango Arámbula

Dr. Ing. Agr. Fauna Silvestre

Instituto de Investigaciones Forestales,
Agrícolas y Pecuarias
Pedro Cadena I.

Dr. Ing. Agr. Transferencia de Tecnología

Carlos Mallen Rivera

M. C. Director de Promoción y Divulgación

Instituto Interamericano de Cooperación
para la Agricultura
Victor Villalobos A.

Dr. Ing. Agr. Biotecnología

Instituto Interamericano de Cooperación
para la Agricultura
(República Dominicana)

Manuel David Sánchez Hermosillo

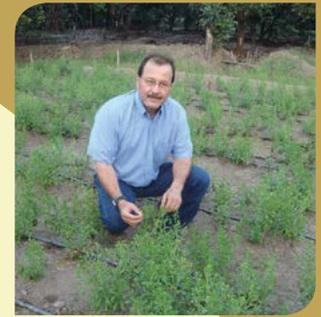
Dr. Ing. Agr. Nutrición Animal y manejo de Pastizales

Servicio Nacional de Inspección y
Certificación de Semillas
(SNICS-SAGARPA)

Manuel R. Villa Issa

Dr. Ing. Agr. Economía Agrícola.

Director General



Dr. Jorge Cadena Iñiguez

Editorial

Volumen 9 • Número 2 • febrero, 2016.

Iniciar un nuevo proceso para estimular la innovación en México y enfocarla rumbo a una economía de conocimiento, o basada en conocimiento, es una tarea fundamental para las Instituciones de Educación Superior (IES) utilizando el conocimiento autogenerado como elemento fundamental para generar valor y riqueza por medio de su transformación en segmentos de la sociedad tales como, educación, investigación y desarrollo, alta tecnología, informática, telecomunicaciones, robótica, nanotecnología, industria aeroespacial. De acuerdo a la International Standard Industrial Classification (ISIC-2), las empresas de alimentos, bebidas y tabaco (agropecuarias), se ubican de acuerdo a su intensidad tecnológica como empresas de baja tecnología ocupando el sitio 21 de 22 escaños, resaltando además bajo enfoque de creación de empresas de base tecnológica (EBT) que sientan su formación en descubrimientos científicos y cuyos desarrolladores (Profesor-investigador-estudiantes) se convierten en emprendedores, dando un salto socio científico. En realidad, la Economía del Conocimiento no genera valor y riqueza por medio de su transformación en información; sino que crea valor añadido en productos y servicios en cuyo proceso de creación o transformación participa. Citando a Eduardo Ramírez González (RIIT, Saltillo, México),

"en 2013 México obtuvo 17 patentes, Canadá 471 (casi 30 veces más), UK 1770 (100 veces más), Alemania 5465 (300 veces más), Estados Unidos 14606 (860 veces más), Japón 15970 (940 veces más). México cuenta con el 0.5% de empresas innovadoras, y el promedio de Europa es 49%, donde Alemania tiene 67% de empresas innovadoras y España 33%. México cuenta con 23 mil investigadores en el SNI, Alemania 360 mil, Japón 660 mil y los Estados Unidos un millón 265 mil. Existen más indicadores, pero aquí nos damos idea de la brecha que nos separa de una verdadera economía de conocimiento, resultado de un rezago acumulado con las décadas".

Dr. Jorge Cadena Iñiguez

Director de  AGRO
PRODUCTIVIDAD

DENSIDAD DE LONGITUD DE RAÍCES DE *Acacia mangium* Willd EN UN SUELO DE SABANA

ROOT LENGTH DENSITY OF *Acacia mangium* Willd IN SAVANNAH SOIL

Sánchez-López V.¹; Obrador Olán J.J.^{2*}; García López E.²; Carrillo-Ávila, E.³

¹Programa de Maestría del *Campus* Tabasco-Colegio de Postgraduados. Km. 3.5 Carr. Cárdenas-Huimanguillo, H. Cárdenas, Tabasco. C.P. 86500. ²Área de Ciencia Ambiental *Campus* Tabasco-Colegio de Postgraduados. Km. 3.5 Carr. Cárdenas-Huimanguillo, H. Cárdenas, Tabasco. C.P. 86500. ³Colegio de Postgraduados, *Campus* Campeche, Carretera Federal Haltunchén-Edzná Km 17.5, C.P. 24450, Sihochac, Champotón, Campeche, Mexico.

*Autor de correspondencia: obradoro@colpos.mx

RESUMEN

Para conocer la fertilidad química de un suelo de sabana en una plantación de *Acacia mangium* (Fabaceae), especie maderable de rápido crecimiento fijadora de nitrógeno y restauradora de propiedades naturales del suelo, se analizó el pH, MO, CIC, P y bases de intercambio, en tres épocas del año (seca, lluvia y nortes) a dos profundidades (0-30 y 30-60 cm); estimándose además el comportamiento vertical y horizontal de la densidad de longitud de raíces finas de los árboles. Los resultados mostraron que la acidez del suelo aumenta con la profundidad y en época de lluvias. El mayor contenido de MO se observó en la etapa de sequía, y disminuye con la profundidad. El contenido de P fue en general bajo, al igual que la CIC para ambos parámetros, los menores valores se registraron en la época lluviosa y a mayor profundidad. Todas las bases de intercambio mostraron contenidos muy bajos tendiendo a disminuir con la profundidad y en las épocas húmedas, excepto el K. La DLR vertical mostró un mayor desarrollo (51.5%) en los primeros 20 cm, la horizontal fue similar en todas las distancias al árbol.

Palabras clave: Recuperación de suelo, sistema radical, suelo ácido.

ABSTRACT

To understand the chemical fertility of a Savannah soil in an *Acacia mangium* (Fabaceae) plantation, which is a timber-yielding species of rapid growth that fixes nitrogen and restores the natural properties of the soil, the pH, MO, CIC, P and exchange bases were analyzed during three seasons of the year (dry, rainy and north wind) at two depths (0-30 and 30-60 cm); in addition, the vertical and horizontal behavior of the fine root length density of the trees was estimated. Results showed that soil acidity increases with depth and during the rainy season. The highest MO content was observed during drought season, and it decreases with depth. The P content was low in general, as was the CIC for both parameters; the lowest values were found during the rainy season and at greater depth. All the exchange bases showed very low contents that tended to increase with depth and during the moist seasons, except for K. The vertical DR showed a greater development (51.5 %) in the first 20 cm, while the horizontal one was similar at all distances from the tree.

Keywords: Soil recuperation, root system, acid soil.

INTRODUCCIÓN

Buena parte del crecimiento de las plantas y la alimentación de los seres vivos que habitan la superficie terrestre depende de las características del suelo, sin embargo, algunos como los suelos de sabana tienen bajos niveles de fertilidad natural que los hace poco aptos para el desarrollo de cultivos, dando lugar a incremento en la ganadería extensiva e intensiva en detrimento de las plantas leñosas (Bustamante *et al.*, 2006). La existencia de árboles en suelos de baja fertilidad es muy importante debido a que favorecen durante su crecimiento y desarrollo algunos procesos relacionados con el incremento de la fertilidad edáfica, acumulación de MO y nutrientes, que permite una actividad biológica importante. El uso de especies pioneras es una alternativa transcendental para mejorar la calidad de los suelos, dado que son esencialmente auto-sostenibles, no requieren insumos externos y pueden proporcionar soluciones a largo plazo para casi todos los problemas de suelos degradados (Bradshaw, 1997). Por la calidad de su madera y rápido crecimiento, la *Acacia mangium* Willd (Fabaceae), es una especie forestal con mayor índice de plantación, (Torres *et al.*, 2013), y una de sus valiosas características es la función regeneradora de suelos con alto grado de desgaste o erosión, actuando como fijadora de nitrógeno (N) y fósforo (P), que favorece la recuperación de las propiedades del suelo y ser aprovechados en diferentes actividades agrícolas (Rozo, 2014). Los requerimientos nutrimentales de las plantas puede ser muy complejos, y los nutrimentos en el suelo pueden existir en formas orgánicas, inorgánicas, en solución, superficies minerales, o bien, retenidos en intrapartículas en el marco estructural de los suelos (USDA-NRCS, 2011). En los sistemas cultivados, la comprensión de las transformaciones es esencial para mantener el balance de nutrimentos y abastecer adecuadamente las necesidades de una planta con un efecto mínimo sobre el medio ambiente. Las condiciones ambientales afectan a las transformaciones y al movimiento de nutrientes en el suelo, lo que determina su disponibilidad para las plantas que lo toman, por diferentes mecanismos, a través de las raíces, cuya proliferación está relacionada con los sitios de acumulación de nutrientes (Bassirirad, 2000). El estudio de raíces en especies leñosas es muy importante para predecir o modelar el crecimiento vegetal bajo diferentes esquemas de manejo y condiciones ambientales. Las raíces son fundamentales para la existencia de las plantas terrestres, el conocimiento sobre su biomasa, fenología, dinámica de crecimiento, costo energético de mantenimiento y renovación, es muy pobre en comparación con lo que se conoce acerca de las estructuras aéreas (Fernández *et al.*, 1988), además las raíces son de mu 788 uhy importantes en el anclaje del individuo, la fijación de carbono, absorción de agua, nutrimentos (Molist *et al.*, 2011) y su reciclamiento; extraen además nutrimentos de horizontes inferiores para ponerlos a disposición en horizontes superiores a través del aporte por descomposición de la hojarasca (Fresnillo *et al.*, 1992; Moreno *et al.*, 2005). La arquitectura de las raíces favorece cambios en la estructura del suelo, sobre todo en la conectividad de los poros, que se reordenan mejorando el drenaje e incrementando el potencial mátrico de la rizósfera, aunque cada especie vegetal afecta de manera diferente la agregación del suelo (Morales, 1997; Flores, 1999; Walley *et al.*, 2005), sin embargo, la forma y desarrollo de las raíces depende de una serie de factores relacionados con la magnitud del árbol, especie, estructura, textura, fertili-

dad del suelo, etcétera, aunque generalmente la superficie horizontal exploratoria es equivalente a la de la proyección de la copa sobre el suelo (Fresnillo *et al.*, 1992). Las raíces constituyen 33% de la productividad terrestre primaria neta de flujos de carbono (Jackson *et al.*, 1997) y de otros nutrimentos, muchas veces igualan o superan flujos provenientes de desechos de la superficie (Roderstein *et al.*, 2005), y dependiendo del tipo de vegetación, las raíces presentan diferentes impactos en el suelo que modifican parámetros físicos y químicos tales como, la densidad aparente, humedad relativa, porosidad total, porosidad interna de macroagregados y pH, entre los más importantes (Walley *et al.*, 2005). Aunque el estudio de raíces presenta dificultades técnicas debido a que los procesos ocurren en un ambiente sumamente complejo y debajo del suelo (Fernández *et al.*, 1988), ocasionando que las determinaciones sean tediosas, largas, baja exactitud, precisión, y los resultados generalmente reflejan condiciones ambientales particulares (Köpke, 1981), existe una gran diversidad de métodos para evaluar los sistemas radicales y, dependiendo del propósito de la investigación, pueden adaptarse a distintas condiciones agroecológicas (Böhm, 1979; Morales, 1997; Coutts *et al.*, 1999; Gill y Jackson, 2000). Con base en lo anterior, se estimó la fertilidad química del suelo (pH, MO, CIC, P y bases de intercambio) en tres épocas del año y dos profundidades; con base en el comportamiento vertical y horizontal de la densidad de longitud de raíces finas de *A. mangium*.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó en el Rancho las Acacias (17° 45' 57 N y 93° 44' 40 O), del Ejido las Flores,

en Huimanguillo, Tabasco, México (Figura 1), con altitud de entre 20-50 m, temperatura y precipitación media anual de 26.2 °C y 2290 mm, respectivamente; clima Cálido húmedo con abundantes lluvias en verano (García, 2004). Las variables se evaluaron en una plantación de *Acacia mangium* de nueve años con densidad de siembra de 400 árboles ha⁻¹, la parcela consistió en un área de 50×50 m. El promedio general de la altura total (AT), altura comercial (AC) y diámetro a la altura del pecho (DAP) de los árboles fue de 27.2 m, 18.1 m y 34.7 cm respectivamente.

Para determinar la unidad de suelo, con base en la Referencial Mundial (IUSS-WRB, 2007) se describió un perfil (Cuanalo, 1990); de cuatro horizontes tomando una muestra de 1 kg⁻¹ de suelo para llevarla al laboratorio de Análisis de suelo Plantas y Aguas (LASPA) del Campus Tabasco para realizar las determinaciones físicas y químicas: Materia Orgánica (MO) por el método de Walkley y Black, pH mediante potenciómetro

en agua (relación 1-2); textura por método del hidrómetro de Bouyocous; conductividad eléctrica (CE) del extracto de saturación por medición electrolítica de Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ y Na⁺ empleando acetato de amonio 1N pH 7.0 como extractante; y fósforo (P) extractable por el método Ólsen, según la metodología de la Norma Oficial Mexicana (NOM-021-REC-NAT-2000).

El muestreo de suelos se realizó en las tres épocas del año reconocidas para el estado de Tabasco como seca, lluvia y norte (Ruiz-Álvarez *et al.*, 2012); en cada época se tomaron cuatro muestras compuestas por 15 submuestras a dos profundidades 0-30 y 30-60 cm, y en el LASPA se determinó el pH en agua relación 1:2, materia orgánica del suelo (MOs), capacidad de intercambio catiónico (CIC), fósforo Olsen (P), potasio (K), calcio (Ca) y magnesio (Mg) (Norma Oficial Mexicana, NOM-021-REC-NAT-2000). Para determinar la densidad de longitud de raíces (DLR) finas y su distribución vertical y horizontal, se aperturaron

cuatro perfiles de 1.2 m de profundidad a tres distancias del tronco del árbol (50 cm, 100 cm y 150 cm) durante la época de lluvias con un cilindro de 2000 cm³ (10×10×20) de volumen se tomaron muestras cada 20 cm (Schroth y Sinclair, 2003; Moreno *et al.*, 2005) obteniendo 72 monolitos que se colocaron en bolsas de plástico debidamente identificadas. En el laboratorio, los suelos se secaron a la sombra y se separaron las raíces finas (secundarias y terciarias) y gruesas; con la ayuda de un vernier electrónico Marca Surtek (resolución 0.01 mm) se separaron en finas (<3 mm de diámetro), medias (3-5 mm) y gruesas (>5 mm). Posteriormente se midió su longitud (Moreno *et al.*, 2005) y se calculó la DLR solo para las raíces finas (en km m⁻³ suelo) mediante la ecuación:

$$DLR = \frac{\text{Longitud de raíces}}{\text{Volumen de suelo}}$$

El análisis estadístico de los parámetros analizados se realizó con apego a un diseño completamente al azar con arreglo factorial en el que se consideraron tres épocas y dos profundidades de muestreo. Para el análisis de datos de la DLR finas se utilizó un arreglo factorial con un diseño completamente al azar, donde los factores fueron profundidad y distancia, con seis y tres niveles respectivamente, y cuatro repeticiones (perfiles). Los resultados se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA) y prueba de comparación de medias (Tukey 0.05).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización del suelo del área de estudio

El suelo evaluado se ubicó en la unidad de los Acrisoles, caracterizados

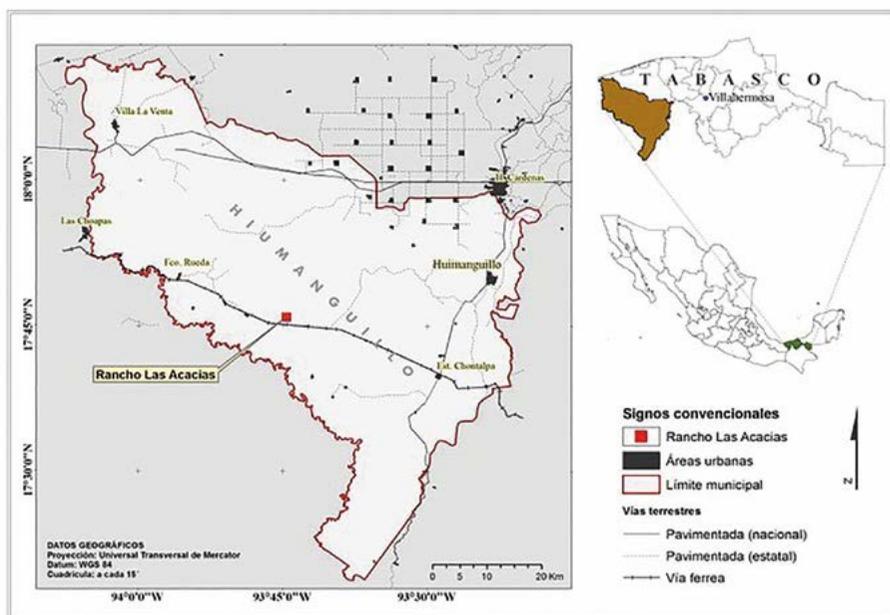


Figura 1. Localización del área de estudio en Huimanguillo, Tabasco, México.

como suelos fuertemente intemperizados, lixiviados y ácidos, con colores oscuros sobre amarillentos a rojizos, fuerte acidez y acumulación aluvial de arcilla en el horizonte B, alta fijación de fósforo y grandes cantidades de hierro y aluminio en forma de sesquióxidos, propensos a la erosión debido a que se sitúan en lomeríos con pendientes variables (Palma *et al.*, 2007). Corresponde a la subunidad Acrisol cutánico (crómico, férrico), con textura franco arcillosa en los dos primeros horizontes y color café grisáceo muy oscuro de 0-40 cm, fuertemente húmico, con tres horizontes de transición muy intemperizados, con bajos contenidos de MO y muy ácidos (Cuadro 1). Estos suelos tienen desarrollo muy avanzado, relacionado con su edad geológica, se han formado *in situ* a partir de sedimentos miocénicos (Ortiz-Solorio *et al.*, 2011) y en ellos se encuentra la mayor actividad agrícola (plantaciones de cítricos, eucalipto y hule), tienen un horizonte Ap grueso, mayor

contenido de MO y menos acidez, indicando un mejor estado de conservación aunque la acidez y la deficiencia de bases de intercambio se acentúa conforme incrementa la profundidad (Palma-López *et al.*, 2008); suelen ser deficitarios en los micronutrientes boro y zinc, tienen mayor contenido de arcilla en el subsuelo que en el suelo superficial como resultado de procesos pedogenéticos (especialmente migración de arcilla), que conllevan a la formación de un horizonte árgico en el subsuelo (IUSS-WRB, 2007).

Horizonte y descripción del perfil (Figura 2)

1-(0-40): Tenue horizontal marcado; color en húmedo café grisáceo muy oscuro (10 YR 3/2); estructura moderadamente desarrollada en bloques subangulares poliédricos, muy fina; textura franco-arenosa; consistencia en seco blando, en húmedo es friable: permeabilidad rápida; fauna lombrices, hormigas y termitas; raíces comunes finas, delgadas y medias; pH 5.

2-(41-55): Tenue horizontal; húmedo; rojo amarillento 5 YR 4/6; estructura moderadamente desarrollada en bloques angulares poliédrica finas y muy finas; textura limo arenoso; consistencia en seco ligeramente duro y en húmedo es firme; permeabilidad es rápida; cutanes por eluviación discontinuos; raíces pocas finas y delgadas; pH 5.

3-(56-79): Tenue horizontal; rojo amarillento 5YR 5/8; estructura moderadamente desarrollada poliédrica subangulares finas; textura arcillo limoso; consistencia en seco duro y en húmedo es firme; permeabilidad moderada;

Cuadro 1. Descripción de perfil de suelo y resultado de los análisis físico-químicos.

Perfil 1	Material parental: aluvión antiguo, pleistoceno
Descrito <i>in situ</i>	Flora cultivada: <i>Acacia mangium</i>
Fecha: 8/8/2014	Flora nativa: Pasto humidícola
Localización: 17° 45' 57"; 93° 44' 40"	Fauna: Venado, gavilán, Pericos, armadillos, coyotes
Elevación: 28 m	Sin presencia de grietas actuales o en alguna parte del año
Pendiente: menos de 5%	Aplicación de Abonos orgánicos o fertilizantes: No
Drenaje del sitio: Donador	Prácticas de manejo con maquinaria: Si



Figura 2. Horizonte y panorámica de la plantación de *Acacia mangium* en Huimanguillo, Tabasco, México.

Cuadro 2. Resultados del análisis físico-químico de los perfiles de suelo de una plantación de *Acacia mangium* Willd en Huimanguillo, Tabasco, México.

Ho	pH (H ₂ O)	CE	N	MO	P Olsen	K	Ca	Mg	Na	CIC	Arcilla	Limo	Arena	Clasificación textural
cm	1:2	$\mu\text{m cm}^{-1}$	%		mg kg^{-1}	$\text{Cmol}_{(c)} \text{kg}^{-1}$				%				
0-40	4,47	52,9	0,21	5,79	3,86	11,73	0,17	MLD	MLD	9,98	29	31	39	Franco arcilloso
40-55	4,32	24,62	0,07	1,43	1,43	12,90	0,23	MLD	MLD	4,49	33	27	39	Franco arcilloso
55-79	4,2	32,3	0,03	0,65	0,14	13,12	0,13	0,09	MLD	4,99	51	23	25	Arcilla
79-150	4,47	34,05	0,03	0,46	0,14	13,65	0,10	0,15	0,03	13,23	59	29	11	Arcilla

por eluviación discontinuos, raíces pocas finas y delgadas; pH 4.

4-(80-150): Horizontal tenue; pardo oscuro 7.5 YR 5/8; moderadamente desarrollada poliédrica subangular fina; textura arcillosa; consistencia en seco es duro y en húmedo es firme; permeabilidad moderada cutanes por eluviación discontinuos; raíces rara y finas; sin fauna; pH

La Figura 3 muestra los valores registrados de los parámetros del suelo estudiados en las tres épocas y dos

profundidades. El pH en la primera profundidad incrementó estadísticamente ($p < 0.05$) en las épocas seca ($\bar{X} = 4.60$) y norte ($\bar{X} = 4.52$), mientras que en la segunda profundidad en todas las épocas (seca, lluvia y norte, $\bar{X} = 4.85$, 4.42, 4.64, respectivamente), atribuido a la liberación de ácido carbónico (H₂CO₃) durante el proceso de mineralización de la MO (Mulder y Malcolm, 1994), que si bien es mayor en el primer horizonte, debido al gran aporte de hojarasca de los árboles y la mayor actividad microbiana, hay también efecto

por el movimiento del H₂CO₃ en los horizontes del suelo (Changming *et al.*, 2005; Wilson, 2008). Aunque todos los valores de pH se ubican como fuertemente ácidos (NOM-021-RECNAT-2000), la acacia puede crecer y desarrollarse plenamente a valores menores que los reportados en este estudio (Shah y Millat, 2004). La MO fue estadísticamente diferente ($p < 0.05$) en cada profundidad y época (Figura 4), los contenidos promedio variaron de 3.77% a 4.46% para la primera profundidad, considerados altos, y de

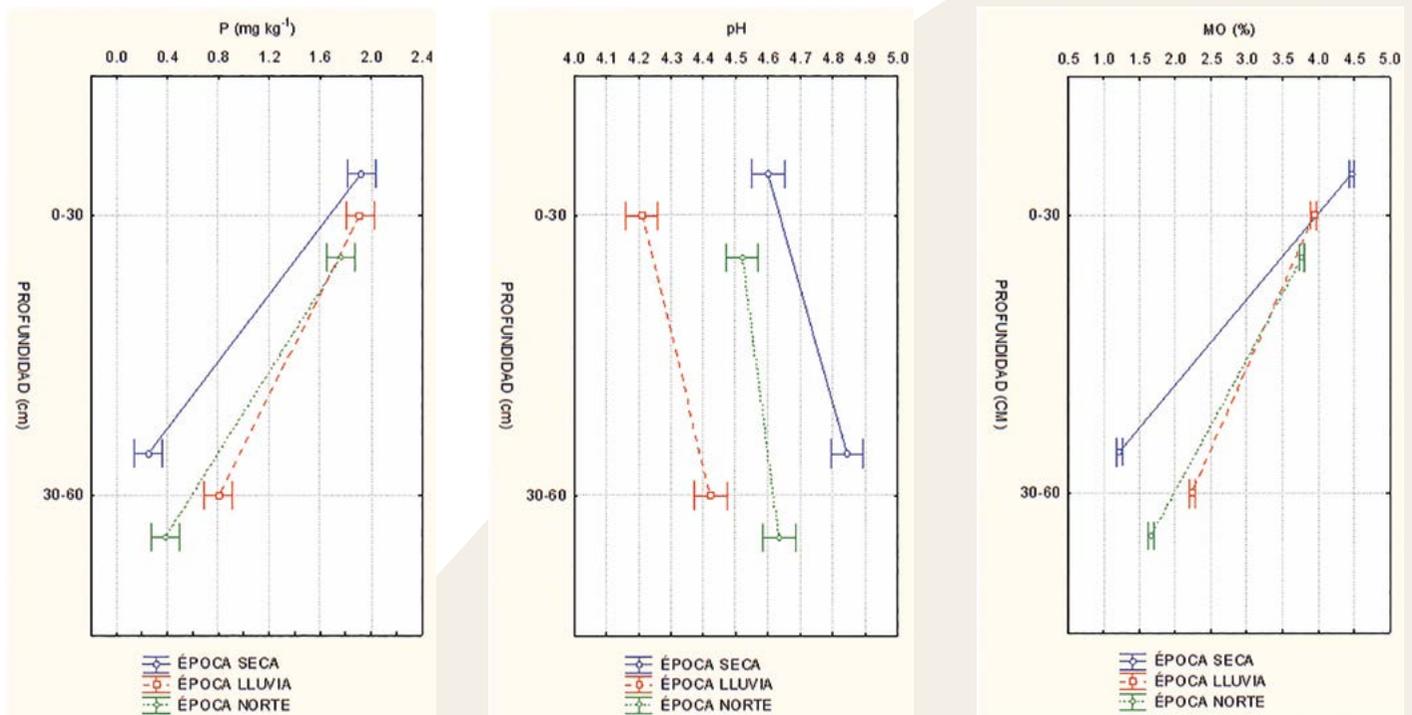


Figura 3. Tendencia estadística de variables químicas del suelo en una plantación de *A. mangium* Willd a dos profundidades y tres épocas: Fósforo, pH, Materia Orgánica.

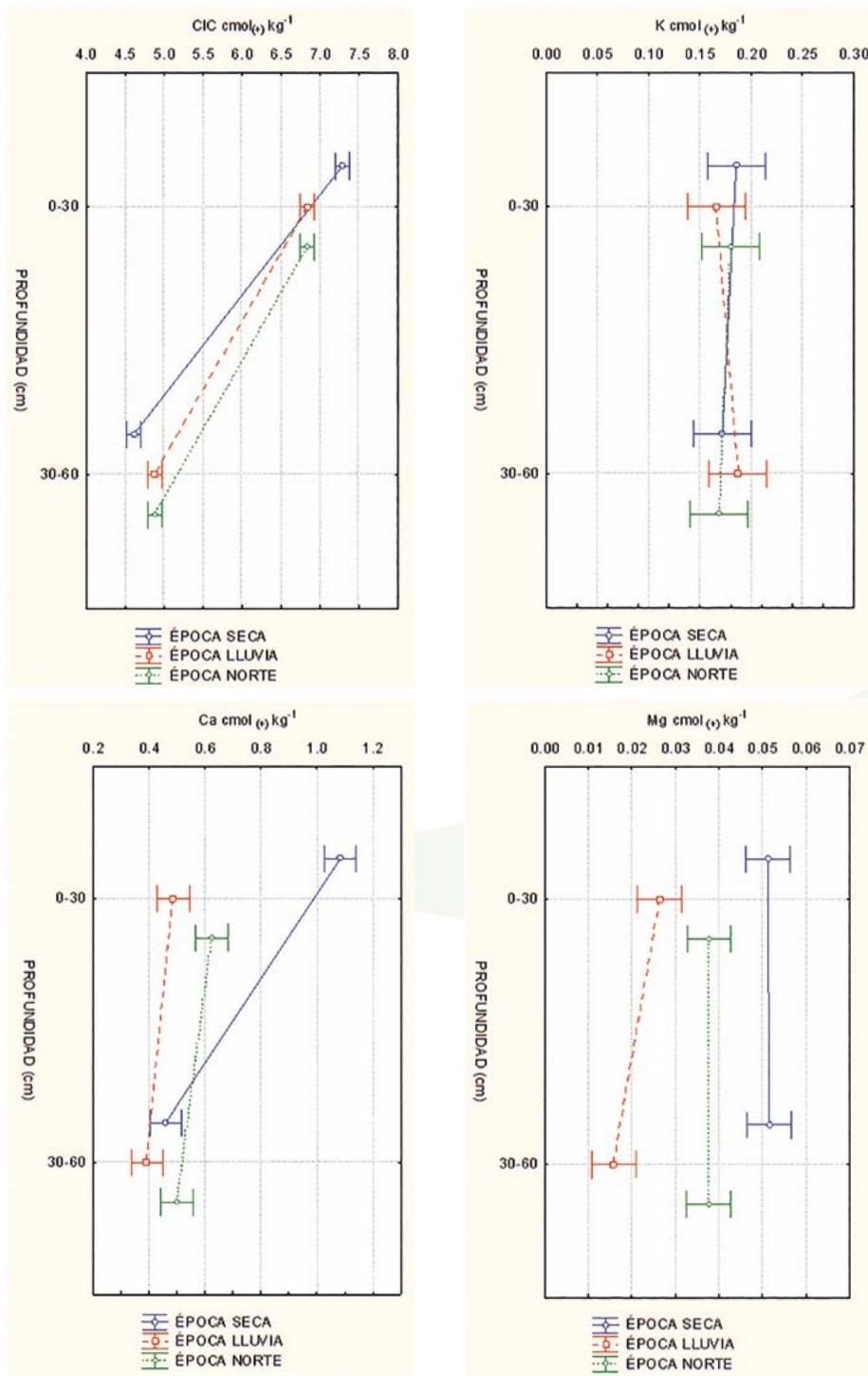


Figura 4. Tendencia estadística de variables químicas del suelo en una plantación de *A. mangium* Willd a dos profundidades y tres épocas: CIC, K, Ca, Mg.

1.22% a 2.24% para la segunda, clasificados como bajos a medios (NOM-021-RECNAT-2000).

La MO es el indicador mayormente utilizado para evaluar la calidad del suelo (Maicelo, 2012), valores altos favorecen el incremento de su fertilidad física, química y biológica, y por ende, la calidad de sitio para las especies que realizan sucesión secundaria; algunas de las cuales llegan a ser componentes ecológicos relevantes (Russell, 1977; Hynynen et al., 2010). *A. mangium*

es considerada una planta pionera y restauradora de suelos degradados, tiene elevada producción de biomasa con significativo aporte de hojas ($\pm 8000 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) y nitrógeno al suelo ($\pm 100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) (Días et al., 1995; Long et al., 2009). Los valores de P a 0-30 cm en las tres épocas fueron estadísticamente semejantes, y diferentes a 30-60 cm, que a su vez fueron diferentes entre sí. Todos los contenidos de P del suelo ($< 5.5 \text{ mg kg}^{-1}$) fueron bajos (NOM-021-RECNAT-2000), atribuido a que el P se reporta como deficitario en suelos ácidos de la sabana de Huimanguillo (Ventura et al., 2012; Ramos, 2013). El P es el nutriente más importante al momento de establecer dosis de fertilización en suelos ácidos, es muy reactivo con aluminio intercambiable abundante en estos suelos (Gamboa, 2013) favoreciendo la fijación del P y Molibdeno, generando toxicidad a las plantas, interfiere en la movilización del Ca en el tejido vegetal, y en más del 80% de los suelos ácidos de los trópicos su toxicidad limita el crecimiento de las plantas (Marschner et al., 1991).

La Figura 4 muestra la tendencia de la CIC y las bases de intercambio; registrando que todos los valores de la primera se ubicaron en el intervalo de muy bajos a bajos (NOM-021-RECNAT-2000), debido a que en estos suelos están condicionados por la intemperización y el tipo de arcilla (Palma et al. 2007; Pérez, 2009). En las épocas húmedas, lluvia y norte en ambas profundidades evaluadas, la CIC presentó valores estadísticamente similares ($\bar{X}=6.83$, 4.88 y 6.84 y 4.89, respectivamente) pero diferentes a los de época seca que, en la primera profundidad fue mayor ($\bar{X}=7.29$) que en la segunda ($\bar{X}=4.61$). El clima, sobre todo

la humedad y temperatura, condiciona los contenidos de nutrientes (Sharma *et al.*, 2012), y excesivas precipitaciones en suelos francos tienden a lixiviar bases de intercambio e incluso, las arcillas, que va en detrimento de la CIC (Nurudin *et al.*, 2013). Los contenidos de K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} en las diferentes épocas y profundidades en el suelo estudiado fueron muy bajos (NOM-021-REC-NAT-2000). Los valores de K^+ fueron iguales estadísticamente en todas las épocas y profundidades. El Ca^{2+} tuvo un contenido estadísticamente mayor sólo en la época seca. El Mg^{2+} mostró diferencias entre épocas pero no en profundidad, al igual que el Ca^{2+} , donde los valores fueron estadísticamente mayores en la época seca.

Un suelo ácido tiene bajo contenido de cationes, que han sido removidos por los cultivos, el clima, fertilizantes nitrogenados y la génesis misma del suelo (Pandey *et al.*, 1992), y se caracteriza por frecuente toxicidad por Al y Mn, deficiencias de Ca, Mg, P, Fe y Mo (Sharma *et al.*, 2005). Lo anterior puede ser corregido parcialmente mediante encalado ($<2000 \text{ kg ha}^{-1}$) (Watanabe y Osaki, 2002), en suelos ácidos orgánicos esta enmienda favorece la mineralización de MO y el aporte de nutrimentos, mejorando el crecimiento y desarrollo de las plantas (Ramos, 2013). Los fertilizantes químicos son muy eficaces para atenuar selectivamente las deficiencias de nutrimentos que limitan el crecimiento y rendimiento de los cultivos pero, contrario a la MO, contribuyen poco

a la mejora de las condiciones físicas y la capacidad de retención de humedad de los suelos (Tegene, 1998).

Densidad de longitud de raíces finas (DLR)

La Figura 5 muestra el desarrollo horizontal y vertical de las raíces finas de *A. mangium*; en la vertical la mayor cantidad de DLR finas, 2.73 km m^{-3} (51.46% del total) se ubicó en los primeros 20 cm, profundidad estadísticamente diferente. Lo anterior coincide con lo reportado por Moreno *et al.* (2005), Soethe *et al.* (2006) y Ramos (2013), quienes encontraron más de 50% de DLR de los árboles en el primer horizonte. De igual forma, Fabiao *et al.* (1994) analizando dos rodales de *Eucalyptus globulus* de 12 y 18 años cuantificaron 71.9 y 57.9% (respectivamente) de biomasa radical en los primeros 20 cm de profundidad. En un suelo similar al del presente estudio, la DLR en los primeros 20 cm para caoba de más de un año fue de 3.31 y 1.30 km m^{-3} , para suelos encalados y no, respectivamente, el encalado favoreció una mayor distribución de raíces en los primeros 60 cm, lo cual permitió mayor toma de nutrimentos y mayor crecimiento y desarrollo de la plantación (Ramos, 2013).

Además de ser muy eficientes en la absorción de nutrimentos y agua, las raíces finas son fuente importante de carbono orgánico bajo tierra, y tienen efectos importantes sobre procesos físico-químicos y propiedades biológicas del suelo (Jackson *et al.*, 1997; Godbold *et al.*, 2006; Kivlin *et al.*, 2013). Flores (1999), indica que los tejidos primarios de las raíces finas tienen muy baja resistencia mecánica y se les dificulta crecer adecuadamente en horizontes profundos, debido a mayor densidad aparente y menor disponibilidad de oxígeno. El patrón de distribución del sistema radical de las plantas en un suelo depende en gran medida de su profundidad, la cual está relacionada con su estructura, densidad aparente, altura del manto freático y presencia de elementos tóxicos. En suelos ácidos la toxicidad de Al^{3+} es una barrera química para el óptimo crecimiento de las raíces finas (Duque-Vargas *et al.*, 1994; Lehmann, 2003). Resalta que la distribución horizontal de *A. mangium* mostró patrones similares en los primeros horizontes,

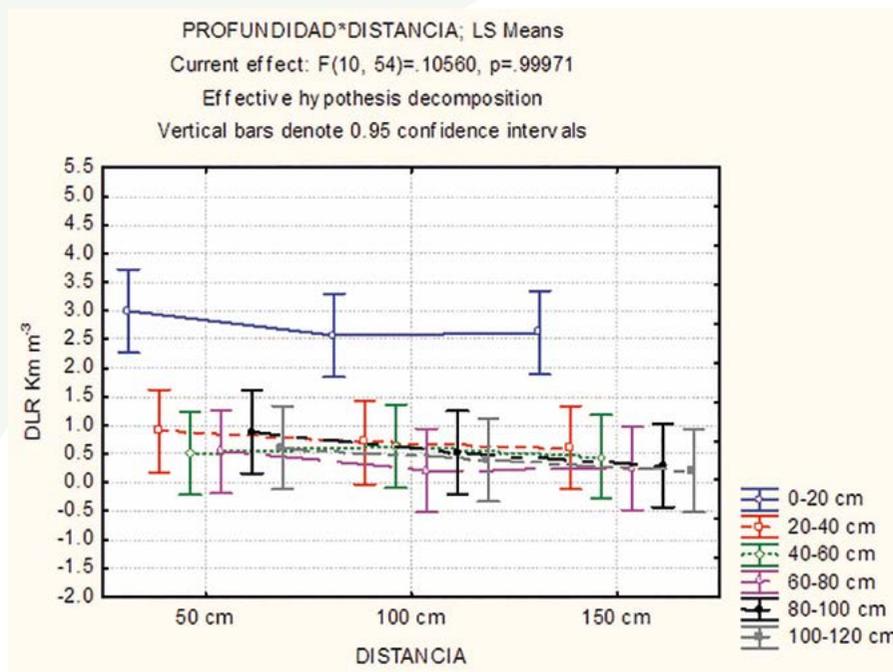


Figura 5. Densidad de longitud de raíces finas (DLR) de *Acacia mangium* Willd en Huimanguillo, Tabasco, México.

sin importar la distancia al tronco, lo que significa que el árbol realiza gran exploración en la capa superficial, que disminuye conforme aumenta la profundidad, sin embargo, cuando crece junto a otras especies arbóreas, tiende a explorar con mayor intensidad el suelo cercano a su tronco (vástago) (Kilawe, 2011). El incremento o decremento de raíces se relaciona con la función de los tejidos que la conforman, tales como, el sostén, conducción de agua; mientras que la mayor parte de fijación del carbono debajo del suelo está a cargo de raíces gruesas, y la absorción de nutrientes y reciclaje de nutrimentos están relacionadas con raíces finas y delgadas, las cuales se caracterizan por ser estructuras muy dinámicas y activas de la planta (Flores, 1999) y se desarrollan en sitios con mayor fertilidad edáfica.

CONCLUSIONES

El suelo cultivado con *A. mangium* en la sabana de Huimanguillo, mostró variación en cuanto a fertilidad química entre épocas y profundidades. El pH correspondió a un suelo ácido, problema que se acentúa con la profundidad y en la época de lluvias. Se registró mayor cantidad de MO en la época seca, variando de alta en el horizonte superficial, a media y baja en la profundidad, mientras que el contenido de P fue bajo. Aunque todos los valores de CIC fueron bajos, los menores valores se registraron en épocas lluviosas y a más profundidad. Respecto a las bases de intercambio, registraron en general contenidos muy bajos y, con excepción del K, tendieron a disminuir con la profundidad y en las épocas húmedas. La distribución vertical de la densidad de longitud de raíces finas mostró mayor desarrollo (51.5%) a 0-20 cm, y la horizontal fue similar, independientemente de la distancias al árbol.

LITERATURA CITADA

- Basirirad H. 2000. Kinetics of nutrient uptake by roots: responses to global change. *New Phytologist* 147(1):155-169.
- Bradshaw A. 1997. Restoration of mined lands-using natural processes. *Ecological Engineering* 8: 255-269.
- Böhm W. 1979. Methods of studying root systems. *Ecological Studies* 33. Ed. Springer- Verlag, Berlin, Germany. 188 p.
- Bustamante M.M., Medina E., Asner G.P., Nardoto G.B., García-Montiel D.C. 2006. Nitrogen cycling in tropical and temperate savannas. *Biogeochemistry* 79: 209-237.
- Changming Y., Linzhang Y., Zhu O. 2005. Organic carbon and its fractions in paddy soil as affected by different nutrient and water regimes. *Geoderma* 124: 133-142.
- Coutts M.P., Nielsen C.C.N., Nicoll B.C. 1999. The development of symmetry, rigidity and anchorage in the structural root systems of conifers. *Plant and soil* 217: 1-15.
- Cuanalo de la C.H. 1990. Manual para la descripción de perfiles de suelo en el campo. 3era. ed. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México. 40 p.
- Dias L.E., Franco A.A., Campello E., De Faria S.M., Da Silva E.M. 1995. Leguminosas forestales: Aspectos relacionados con su nutrición y uso en la recuperación de suelos degradados. *Bosques* 16(1): 121-127.
- Duque-Vargas J., Pandey S., Granados G., Ceballos H., Knapp E. 1994. Inheritance of tolerance to soil acidity in tropical maize. *Crop Science* 34: 50-54.
- Fabiao A., Madeira M.V., Steen E., Katterer T., Ribeiro C. 1994. Growth dynamics and spatial distribution of root mass in *Eucalyptus globulus* plantations in Portugal. In: *Eucalyptus for biomass production*. Pereira J.S. and Pereira H. (Editors). Commission of the European Communities. pp. 60-76.
- Fernández O., Montani T., Distel R. 1988. El sistema radical de especies de zonas áridas y semiáridas. Algunas estrategias de supervivencia. *Interciencia* 13 (1): 25-30.
- Flores E. 1999. La planta, estructura y función. Cartago, C. R. LUR. 884 p.
- Fresnillo F.D., Fernández O., Busso C. 1992. Seasonal dynamics of root growth and decomposition in *Medicago minima* and *Erodium cicutarium*, two annual forages in semiarid Argentina. *Acta Oecológica* 13 (1): 119-126.
- Gamboa-Zúñiga J.P. 2013. Demanda nutrimental en plantaciones jóvenes de *Eucalyptus pellita* F. Muell en Acrisoles de la Sabana de Huimanguillo, Tabasco. Tesis de Maestría Tecnológica, Colegio de Postgraduados-Campus Tabasco. 33 pp.
- García E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Quinta Edición. Instituto de Geografía de la UNAM. 90 p.
- Gill R.A., Jackson R.B. 2000. Global patterns of root turnover for terrestrial ecosystems. *New Phytologist* 147:13-31.
- Godbold D.L., Hoosbeek M.R., Lukac M., Cortrufo F., Janssens I.A., Ceulemans R., Polle A., Velthorst E.J., Scarascia-Mugnozza G., De Angelis P., Miglietta F., Peressotti A. 2006. Mycorrhizal hyphal turnover as a dominant process for carbon input into soil organic matter. *Plant and Soil* 281: 15-24.
- Hynynen J., Niemistö P., Viherä-Aarnio A., Brunner A., Hein S., Velling P. 2010. Silviculture of birch (*Betula pendula* Roth and *Betula pubescens* Ehrh.) in northern Europe. *Forestry* 83(1): 103-119.
- IUSS-WRB. 2007. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007. Informe sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO, Roma.
- Jackson R.B., Mooney H.A., Schulze E.D. 1997. A global budget for fine root biomass, surface area and nutrient roots. *Proc. Nat. Acad. Sc.* 94:7362-7366.
- Kilawe C.J. 2011. Rooting pattern of *Acacia mangium* in pure and mixed stands of *Eucalyptus camaldulensis*, *Tectona grandis* and *Casuarina montana* in the coastal Tanzania. Thesis of Master Degree of European Forestry. 72 pp. Vienna, Austria.
- Kivlin N.S., Waring G.B., Averill C., Hawkes V.C.C. 2013. Tradeoffs in microbial carbon allocation may mediate soil carbon storage in future climates. *Frontiers in microbiology* 4 (261): 1-3.
- Köpke U. 1981. A comparison of methods for measuring root growth of field crops. *J. Agronomy & Crop Science* 150: 39-49.
- Lehmann J. 2003. Subsoil root activity in tree-based cropping systems. *Plant and soil* 255: 319-331.

- Long Y., Nan L., Hai R., Wang J. 2009. Facilitation by two exotic *Acacia*: *Acacia auriculiformis* and *Acacia mangium* as nurse plants in South China. *Forest Ecology and Management* 257: 1786-1793.
- Maicelo Q.J.L. 2012. Indicadores de sustentabilidad en función del suelo y retención de carbono en la biomasa de *Ceroxylon peruvianum* Galeano, Sanin & Mejía, en la cuenca media del río Utcubamba, Amazonas, Perú. *Ecología Aplicada*, 11(1): 33-38.
- Marschner H., Hxüssling M., George E. 1991. Ammonium and nitrate uptake rates and rhizosphere pH in non- mycorrhizal roots of Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.). *Trees* 5: 14-21.
- Molist P., Pombal M.A., Megias M. 2011. Atlas de Histología Vegetal y Animal. Órganos Vegetales. 1. Raíz. <http://webs.uvigo.es/mmegias/descargas/o-v-raiz.pdf>.
- Morales A. 1997. Apuntes metodológicos para el estudio de raíces en plantaciones forestales y bosques naturales. *In: Simposio Internacional sobre Posibilidades del Manejo Forestal Sostenible en América Tropical*. Bolfor, Cifor, IUFRO. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia. CATIE. 11 p.
- Moreno G., Obrador J.J., Cubera E., Dupraz C. 2005. Fine Root distribution in dehesas of Central-Western Spain. *Plant and soil* 277 (1): 153-162.
- Mulder J., Malcolm S.C. 1994. Soil and Soil Solution Chemistry *In: Biogeochemistry of Small Catchments: A Tool for Environmental Research*. Moldan B. and Cerny J. Editors. SCOPE Published by John Wiley & Sons Ltd.
- NOM-021-RECNAT-2000. Norma oficial mexicana. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudio, muestreo y análisis. SEMARNAT. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, D.F.
- Nurudin M., Ohta S., Bhakti H.E., Mendham D., Wicaksono A., Heriyanto J., Watanabe M. 2013. Relationships between soil characteristics and productivity of *Acacia mangium* in South Sumatra. *Tropics* 22(1): 1-12.
- Ortiz-Solorio C.A., Gutiérrez-Castorena M.C., Sánchez-Guzmán P., Gutiérrez-Castorena E.V. 2011. Cartografía de la degradación de suelos en la República Mexicana: evolución y perspectivas. En: Krasilnikov P., Jiménez-Nava F.J., Reyna-Trujillo T., García-Calderón N.E. (eds) Geografía de suelos de México. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias, Distrito Federal. 462 p.
- Palma-López D.J., Cisneros D.J., Moreno C.E., Rincón-Ramírez J.A. 2007. Suelos de Tabasco: su uso y manejo sustentable. Colegio de Postgraduados-ISPOTAB-FUPROTAB. Villahermosa, Tabasco, México.
- Palma-López D.J., Moreno C.E., Rincón R.J.A. y Shirma T.E.D. 2008. Degradación y conservación de los suelos del estado de Tabasco. Colegio de Postgraduados, CONACYT, CCYTET. Villahermosa, México. 74 p.
- Pandey R., Lepak P., Jaffe J.E. 1992. Electronic structure of alkaline-earth selenides. *Phys. Rev.* 46: 4976-4977.
- Pérez C.P. 2009. Fertilización NPK y demanda nutrimental de cuatro especies forestales en fases temprana de crecimiento. Tesis de Maestría en Ciencias, Colegio de Postgraduados-Campus Tabasco. 88 pp.
- Ramos A.C. 2013. Encalado en un Sistema Agroforestal (SAF) Caoba (*Swietenia macrophylla* King)-Limón Persa (*Citrus latifolia* T.) en un Acrisol de la Sabana de Huimanguillo, Tabasco. Tesis de Maestría en Ciencias, Colegio de Postgraduados-Campus Tabasco. 60 pp.
- Ruiz-Álvarez O., Arteaga-Ramírez R., Vázquez-Peña M.A., Ontiveros C.R.E., López-López R. 2012. Balance hídrico y clasificación climática del estado de Tabasco, México. *Universidad y Ciencia* 28(1): 1-14.
- Russell E.W.1977. The Role of Organic Matter in Soil Fertility. *Phil. trans.R.Soc. Lond. B.* 281: 209-219. Great Britain.
- Schroth G., Sinclair. F.L. 2003. *Trees, crops and soil fertility: concepts and research methods*. Wallingford, UK. CAB International.
- Shah N.M., Millat E.M.M. 2004. Growth and yield prediction models for *Acacia mangium* grown in the plantations of the central region of Bangladesh. *New Forests* 27: 81-88. Kluwer Academic Publishers, Netherlands.
- Sharma K.L., Mandal U.K., Srinivas K., Vittal K.P.R., Mandal B., Grace J.K., Ramesh V. (2005). Long-term soil management effects on crop yields and soil quality in a dryland Alfisol. *Soil and Tillage Research* 83(2), 246-259.
- Sharma K.L. Biswapati M., Venkateswarlu B. 2012. Soil quality and productivity improvement under rainfed conditions-Indian perspectives. *In: Resource Management for Sustainable Agriculture*. Abrol V. and Sharma P. editors. *Agricultural and Biological Sciences*. InTech. pp: 203-233.
- Soethe N., Lehmann J., Engels C. 2006. The vertical pattern of rooting and nutrient uptake at different altitudes of a south Ecuadorian montane forest. *Plant and Soil* 286:287-299.
- Tegene B. 1998. Indigenous soil knowledge and fertility management practices of the South Wällo Highlands. *Journal of Ethiopian Studies* 31 (1): 123-158.
- Torres L.A., Suarez I.E., Gatti K. 2013. Propagación *in vitro* de *Acacia mangium* Willd. *Biotechnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial* (ISSN 1692-3561). *Rev.Bio.Agro* 11(1): 81-87.
- Ventura U.F., Salgado G.S., Castelán E.M., Palma L.D.J., Rivera C.M.C., Sánchez G.P. 2012. Métodos de Interpretación del análisis nutrimental en naranja valencia (*Citrus sinensis* L. Osbeck). *Terra Latinoamericana* 30 (2): 139-145.
- Wilson B.Y.V. 2008. Dinámica nutrimental y crecimiento de cedro (*Cedrela odorata* L.) y teca (*Tectona grandis* L. f) en un suelo Fluvisol del estado de Tabasco. Tesis de Maestría en Ciencias, Colegio de Postgraduados. H. Cárdenas Tabasco. 99 pp.
- Watanabe T., Osaki M. 2002. Mechanisms of adaptation to high aluminum condition in native plant species growing in acid soils: a review. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 33: 1247-1260.
- USDA-NRCS. 2011. National Soil Survey Handbook, title 430-VI.

EVALUACION DE PLANTACIONES FORESTALES EN TRES COMUNIDADES DE LA MIXTECA ALTA OAXAQUEÑA

ASSESSMENT OF FOREST PLANTATIONS IN THREE COMMUNITIES OF THE MIXTECA ALTA OAXAQUEÑA REGION

Vásquez-García, I.¹; Cetina-Alcalá, V.M.¹; Campos-Bolaños, R.²; Casal-Ángeles, L.F.³

¹ Postgrado en Ciencias Forestales *Campus* Montecillo Colegio de Postgraduados, km 36.5 Carretera México-Texcoco, Montecillo, Estado de México. ² División de Ciencias Forestales Universidad Autónoma de Chapingo, km 38.5 carretera México-Texcoco, Chapingo, Estado de México. ³ Ferrero de México.

*Autor de correspondencia: vgarcia@colpos.mx

RESUMEN

Se evaluó el porcentaje de supervivencia y crecimiento de plantaciones forestales en tres comunidades de la Mixteca Alta Oaxaqueña, México, con un total de 1158 sitios en las áreas reforestadas, los sitios fueron circulares de 80 m² (radio 5.04 m) y una intensidad de muestreo del 10%, recopilando los datos en los meses de julio a octubre del año 2013. Para la estimación de supervivencia y densidad, en las tres comunidades, se consideraron los factores de plantación, superficie establecida y edad. Para la estimación del crecimiento se consideraron: promedios de edad, altura, diámetro de copa y diámetro de la base de los árboles seleccionados, calculando el diámetro cuadrático promedio. Se obtuvo la curva del comportamiento de crecimiento en altura en la comunidad de Tlacotepec Plumas empleando el modelo de Shumacher y alturas totales promedio de los árboles muestreados; las curvas de Incremento Medio Anual (IMA) e Incremento Corriente Anual (ICA). La edad en que se cruzan el incremento medio anual (IMA) e incremento corriente anual (ICA) en la curva de comportamiento calculada fue a los ocho años, recomendándose un primer pre aclareo a los cuatro años (edad del incremento medio anual máximo).

Palabras clave: Dasometría, sobrevivencia, crecimiento, reforestación, densidad.

ABSTRACT

The percentage of survival and growth of forest plantations was assessed in three communities of the Mixteca Alta Oaxaqueña region, México, in 1158 sites throughout the forest areas, with circular sites of 80 m² (radius 5.04 m) and an intensity of 10%; data was gathered during the months of July to October, 2013. In order to estimate survival and density in the three communities, the factors of plantation, established surface and age were taken into account. To estimate the growth, the following were considered: age average, height, crown diameter and base diameter of the trees selected, calculating the average quadratic diameter. The curve of the growth behavior in height was obtained in the community of Tlacotepec Plumas, using the Shumacher model and total average heights of the trees sampled; also, the curves of the Mean Annual Increment (MAI) and the Current Annual Increment (CAI). The age at which the mean annual increment (MAI) and the current annual increment (CAI) cross on the behavior curve calculated was eight years, so the first pre-clearing is recommended at four years (age of the maximum mean annual increment).

Key words: Dasometry, survival, growth, reforestation, density.

Agroproductividad: Vol. 9, Núm. 2, febrero. 2016. pp: 12-19.

Recibido: octubre 2015. **Aceptado:** enero 2016.



INTRODUCCIÓN

En México se estiman 4,934.87 km² de suelos en grado extremo de erosión que representan 0.25% de la superficie del territorio (INEGI, 2014) una de las regiones más afectadas es la Mixteca Alta del estado de Oaxaca, donde se calcula que 70% de los suelos presenta diversos grados de erosión. A través de plantaciones forestales se están recuperando tierras degradadas e incorporando de éstas, nuevas áreas a la producción y capitalización. La evaluación de una plantación, es la aplicación de una técnica para recopilar información y tener elementos de juicio en la toma de decisiones referente a la adaptación de las especies al sitio, así como, su incremento anual, valor económico y uso en futuras plantaciones que muestren condiciones análogas (Muñoz *et al.*, 2009). En materia ambiental, las plantaciones forestales permiten restaurar y recuperar la biodiversidad al disminuir la presión sobre el uso de los recursos forestales naturales, regulan el ciclo hidrológico, la recarga de los acuíferos, calidad del agua y restablecen el hábitat para fauna silvestre, y por ello se consideran buena estrategia para recuperación de áreas perturbadas o degradadas (Rodríguez, 2011; Ruiz *et al.*, 2006). La construcción de curvas de incremento se utiliza ampliamente ya que representa la tendencia del crecimiento en altura de un conjunto de árboles conforme aumente la edad. Los modelos mayormente usados para curvas de crecimiento han sido los modelos de Schumacher y Chapman-Richards, ampliamente recomendados por muchos autores por la calidad del ajuste al que se acerca cada modelo (Arreortua, 2002). El incremento medio anual (IMA), es el promedio anual de crecimiento de un árbol o de una masa durante toda su vida, obtenido por el resultado de dividir las dimensiones de un árbol o de una masa entre su edad. El incremento corriente anual (ICA) es el crecimiento que logra un árbol o una masa forestal en el curso de un año, y se calcula obteniendo la diferencia de las alturas alcanzadas en dos décadas consecutivas dividido entre diez, o bien, derivando la curva del crecimiento en altura (Arteaga, 2003; Vega, 2013). Es por ello que el objetivo general de este estudio fue evaluar el porcentaje de supervivencia y crecimiento de árboles en plantaciones forestales ubicadas en tres comunidades de la Mixteca Alta Oaxaqueña, México, con especial énfasis en determinar la problemática de las plantaciones forestales y calcular el crecimiento en altura, longitud de copa y diámetro de árboles.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en la Mixteca Alta de Oaxaca, México, que comprende el noroeste de Guerrero y el oeste de Oaxaca. Esta en un sistema montañoso en el que convergen la Sierra Madre del Sur y Sierra Madre Oriental de Oaxaca; se le conoce como Complejo Oaxaqueño o Nudo Mixteco. La vegetación natural está determinada por la altitud y precipitación, con bosques de pinos, pinos-encinos en tierras altas (altitudes superiores a 2000 m) y precipitación anual de entre 700-1000 mm

(González-Leyva, 2007; Guerrero *et al.*, 2010). La investigación se realizó en plantaciones de las comunidades Magdalena Yodocono de Porfirio Díaz, San Francisco Teopan y Tlacotepec Plumas de la misma región. En las tres comunidades se establecieron 1158 sitios en áreas reforestadas, con una intensidad de muestreo de 10% en sitios circulares de 80 m² (radio de 5.04 m²) a 50 m de distancia entre cada unidad.

Descripción general de las plantaciones

La comunidad de Magdalena Yodocono cuenta con 8.8 ha de reforestación y se evaluó una plantación de un año de *Pinus greggii* Englem. En San Francisco Teopan con 30.7 ha reforestadas se evaluaron dos plantaciones de uno y tres años de *Pinus Oaxacana* Mirov, mientras que en Tlacotepec Plumas con un total de 46 ha reforestadas se evaluaron seis plantaciones de las cuales fueron de uno, dos, ocho y diez años de *Pinus oaxacana* Mirov y dos plantaciones de 4 y 6 años de *Pinus greggii* Englem. El muestreo se realizó de julio a octubre del 2013.

Cálculo del porcentaje de supervivencia y densidad

Se determinaron los modelos para estimar el comportamiento de variables de interés tales como, diámetro de copa, número de árboles muertos, altura, número de árboles, longitud de copa y diámetro a la base. El cálculo de la supervivencia se extrapoló a una hectárea y a la superficie del área de plantación de acuerdo con la edad, utilizando los datos de árboles vivos, árboles muertos y total de árboles en el sitio. Se calculó la densidad graficando los valores de número de árboles vivos y muertos por hectárea, y por área de plantación versus edad.

Determinación del comportamiento altura

Para obtener la curva del comportamiento de altura, se tomaron sus valores promedio totales de árboles muestreados y analizaron utilizando el modelo de Schumacher:

$$Y = \beta_0 * e^{[-\beta_1*(1/E)]}$$

Dónde: Y =altura; E =edad; $e=2.71828$; β_0 y β_1 son parámetros de regresión.

Elaboración de las curvas ICA e IMA

Para obtener la Curva de Incremento Medio Anual (IMA), la función de crecimiento se dividió entre la edad del mismo; con esta ecuación fue posible construir las curvas de incremento para cada curva de altura respecto a la edad. Dado que el IMA es la suma de los incrementos anuales, fue posible elaborar la Curva del Incremento Corriente Anual (ICA) a través de la derivación por cálculo diferencial de la ecuación del crecimiento (Cruz *et al.*, 2010) mediante el siguiente Modelo:

$$ICA = B_0 e^{[-B_1*(1/E)]} * B_1 (1/E^2)$$

e

$$IMA = B_0 e^{[-B_1*(1/E)]} * E^{-1}$$

Dónde: ICA = incremento corriente anual; IMA = incremento medio anual; E =edad; $e=2.71828$; B_0 y B_1 son parámetros de regresión.

Para evaluar el comportamiento de altura, diámetro de copa, diámetro de base (Cuadro 2), curvas de incremento medio anual (IMA) e incremento Corriente anual (ICA) (Figura 1) se consideraron únicamente las plantaciones de Tlacotepec Plumas por contar con áreas de edades diversas (1, 2, 4, 5, 8, y 10 años) y facilitan los análisis, mientras que para la construcción de las curvas de crecimiento se consideró el modelo más adecuado ya probado para determinar el comportamiento de la altura que fue el de Schumacher el cual ya fue probado por Arreortua (2002):

$$Y = B_0 * e^{[-B_1*(1/E)]}$$

Dónde: Y =altura; E =edad.

Este modelo se corrió en SAS (Statyscal Análisis System), (2004) para calcular los estimadores obteniendo los resultados por edad y por plantación

Comportamiento del diámetro de copa y determinación de diámetro a la base del arbolado

Con los datos de crecimiento inicial y diámetro a la base se derivaron otras variables a considerar, para las cuales se eligió el siguiente modelo:

$$DB = B_0 e^{-B_1(1/E)}$$

Dónde: DB =diámetro de base; B_0 y B_1 =son parámetros de regresión; E =Edad.

Con el dato del diámetro a la base se calculó el comportamiento del diámetro de copa, por lo que fue necesario calcular el promedio del diámetro de copa en cada comunidad y graficar el diámetro de copa respecto al diámetro a la base para obtener un valor más preciso mediante el modelo:

$$DC = B_0 + B_1(\overline{DQB})$$

Dónde: DC =Diámetro Cuadrático Promedio; B_0 y B_1 =Son parámetros de regresión.

Comportamiento de la longitud de copa viva

Para estimar el comportamiento de la longitud de copa se eligió el modelo:

$$LC = B_0 + B_1(Alt)$$

Dónde: LC =diámetro de base; Alt =altura; B_0 y B_1 =son parámetros de regresión.

El cálculo de los estimadores y modelos se realizó con el paquete estadístico SAS (Statistical Analysis System).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El Cuadro 1 muestra los promedios de densidades de plantación, porcentajes de supervivencia y mortandad en plantaciones forestales de las tres comunidades evaluadas en la región de estudio.

Autores como, Torres y Magaña (2001) indican que 60% de supervivencia es aceptable para plantaciones de protección. Por lo anterior se puede considerar que en

Cuadro 1. Promedios de densidades de plantación, porcentajes de supervivencia y mortandad en plantaciones de las tres comunidades evaluadas en la región de la Mixteca Alta de Oaxaca, México.

Edad (años)	Sitio	Árbol vivo por sitio	Árbol muerto por sitio	Total	Árboles ha ⁻¹			Supervivencia (%)	Mortandad (%)
				árboles/sitio	Densidad actual	Árboles muertos	Densidad inicial		
Magdalena Yodocono									
1	229	4.49	6.54	10.99	562.22	817.68	1379.91	40.75	59.64
San Francisco Teopan									
1	354	6.74	4.26	11.00	842.51	532.83	1375.35	61.26	38.75
3	17	9.76	1.35	11.11	1220.58	169.11	1389.70	87.70	12.29
Tlacotepec Plumas									
1	294	5.02	6.10	10.97	625.85	763.60	1389.4	45.40	54.59
2	13	9	2	11	1125	250	1375	81.81	18.18
4	26	9.5	1.5	11	1187.5	187.5	1375	86.36	13.63
5	8	6.5	4.25	10.75	812.5	531.25	1343.75	60.56	39.43
8	188	7.96	3.03	11.005	996.01	378.98	1375	72.35	27.59
10	29	8.72	2.13	10.96	1090.51	267.24	1357.75	79.52	19.52

las plantaciones de las comunidades de San Francisco Teopan y Tlacotepec Plumas con 74.48% y 71% de supervivencia promedio respectivamente un buen nivel de supervivencia y adaptación entre individuos de las plantaciones evaluadas.

La alta supervivencia fue atribuido a la adecuada selección de especies (*Pinus Oaxacana* Mirov y *Pinus greggii* Engelm) ya que están adaptadas a condiciones adversas del medio ambiente, como lo mencionan Ruiz *et al.* (2003), quienes probaron estas mismas especies en la mixteca alta oaxaqueña y en la sierra Norte de Oaxaca, aunque estos mismos autores, registraron mayor supervivencia en Ixtlán de Juárez con *Pinus oaxacana*, debido a que en Ixtlán de Juárez las condiciones ambientales y calidad de suelos son mejores, que en la Mixteca Alta Oaxaqueña.

Problemática de las plantaciones durante su establecimiento

Dentro de los problemas principales identificados en las plantaciones, se registró que en Tlacotepec Plumas, las hormigas arrieras fueron identificadas como plaga común e importante en todas áreas reforestadas. Estas hormigas acababan con el follaje, provocando la muerte de las plantas. Lo anterior también fue encontrado por Flores *et al.* (2009) en plantaciones forestales de teca (*Tectona grandis* L.f), coincidiendo también con lo reportado por Gara y Onore (1989) y el CATIE (1991) que-

nes manifiestan que este insecto es una plaga de importancia en árboles de Teca en Ecuador y Centro América. Otros problemas identificados fue falta de espacio y podas mal aplicadas, lo cual afecto el desarrollo y crecimiento como también lo reporta Benítez *et al.* (2002), en su estudio de plantas producidas en viveros que al registrarse falta de espacio para crecimiento entre árboles, se afectó directamente el desarrollo y crecimiento, y según Cuesta y Cuenca (1995) la falta de tratamientos silvícolas o un tratamiento silvícola mal aplicado, causan daños a la planta, como por ejemplo, ubican a la poda como la actividad más dañina. En las tres comunidades estudiadas un problema común fue la falta de cercado en las plantaciones lo que facilitó la invasión de animales domésticos que mordisquean y consumen las puntas y brotes de las plantas. Para evitar lo anterior es necesario cercar ya que se evitan los daños por animales domésticos además de facilitar el control y monitoreo. Smith-Ramírez *et al.* (2015), reportaron que cercando un área natural no solo se protege la plantación de daños causados por animales domésticos si no también se protege la diversidad de especies locales. En Yodocono se observó que los árboles no tenían un cajete para la retención de humedad lo que afecta su desarrollo y supervivencia a largo plazo (Cuadro 1), como lo apuntan Ramírez *et al.* (2011) que mencionan que estas obras permiten penetración de las raíces al subsuelo, promoviendo el almacenamiento de humedad y favore el rápido crecimiento y desarrollo de las plantas.

Comportamiento de las variables de crecimiento en Tlacotepec Plumas

Para evaluar el comportamiento de altura, diámetro de copa, diámetro de base (Cuadro 2), curvas de incremento medio anual (IMA) e incremento Corriente anual (ICA) (Figura 1) se consideraron únicamente las plantaciones de Tlacotepec Plumas por contar con áreas de edades diversas (1, 2, 4, 5, 8, y 10 años).

El modelo propuesto fue un buen predictor por su R² de 0.97, lo que nos indica que los datos obtenidos para estas variables fueron adecuadas para evaluar el desarrollo y crecimiento de las plantaciones bajo estudio.

Curva de incremento corriente anual (ICA) e incremento medio anual (IMA) en altura

Se analizaron los datos de las plantaciones de pino de la comunidad de Tlacotepec Plumas por tener información de plantaciones con diferentes edades. Las ecuaciones utilizadas fueron:

$$IMA = 4.68e^{[-7.77*(1/E)]} * E^1$$

$$ICA = 4.68e^{[-7.77*(1/E)]} * -7.77(1/E^2)$$

y con los valores generados se definió la edad en que se cruzan las curvas (Figura 1).

Cuadro 2. Indicadores estadísticos para la gráfica del comportamiento de altura, diámetro de copa y diámetro a la base.

Indicadores estadísticos			
Modelo	Cuadrado medio	F Calculada	Pseudo R ²
Y=4.68e ^[-7.77*(1/E)]	31899	192.76	0.9797

Dónde: CME=Cuadrado Medio del Error; F cal=Valor de F calculada; R²=Coeficiente de determinación.

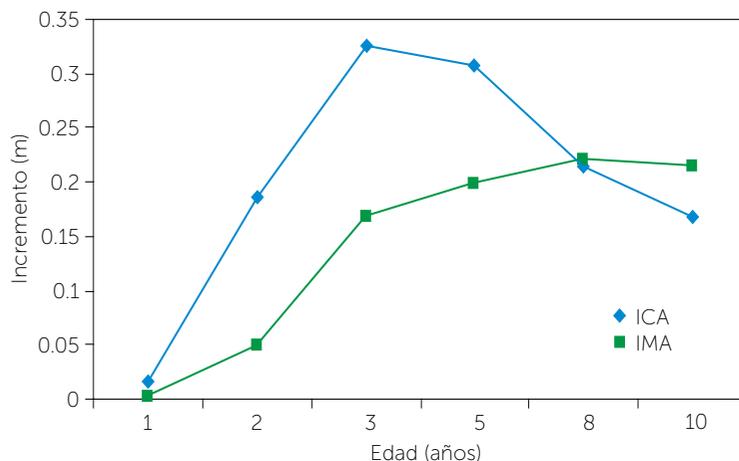


Figura 1. Curvas de incremento medio anual (IMA) e incremento corriente anual (ICA) en altura en las plantaciones de Tlacotepec Plumas.

Observando las curvas de IMA e ICA, el incremento medio anual (IMA) se presentó a la edad de ocho años (punto de intersección entre curvas) mientras que el ICA máximo ocurrió a los cuatro años para *Pinus oaxacana* y *greggii*. En otro estudio Mendez-Gonzalez (2011), reporta el ICA máximo para *Pinus devoniana* en 9 años y para *Pinus pseudostrobus* a los 8 años en Guanajuato, México. Esto puede deberse a que las especies utilizadas en este estudio son nativas de la región, por lo tanto tienen un mejor desarrollo. La edad a la que se debe realizar el primer pre aclareo es cuatro años, ya que en este tiempo ocurre un incremento corriente anual máximo. Lo cual es importante, ya que según Muñoz *et al.* (2005) el pre aclareo incrementa la tasa de crecimiento en diámetro de los árboles. Además si se retrasa el pre aclareo según Vásquez *et al.* (2015) el efecto del crecimiento en diámetro es lento y la competencia por agua y nutrimentos es alta provocando una plantación de mala calidad.

Comportamiento de altura, diámetro de copa y diámetro a la base del arbolado

El comportamiento de las variables de crecimiento se modifica conforme aumenta la edad de la plantación. Se calcularon los promedios de las variables de crecimiento para cada comunidad (Cuadro 3).

En Magdalena Yodocono, la altura promedio de las plantaciones evaluadas fue de 14.15 cm; y en San Francisco Teopan de 30 cm en la plantación de un año y de 78 cm en la plantación de 3 años. Dichos valores se consideran buenos de acuerdo con la edad de las plantaciones evaluadas. En Tlacotepec Plumas, en plantaciones de un año,

Cuadro 3. Comportamiento de las variables de crecimiento con respecto a la edad en las plantaciones evaluadas de la Mixteca Alta de Oaxaca.

Edad (años)	Dq Promedio	Altura promedio	Dc promedio	Lc promedio	Db Promedio
Magdalena Yodocono					
1	0.65	14.15	7.34	9.33	0.35
San Francisco Teopan					
1	2.02	30.98	18.12	22.98	0.92
3	9.62	78.55	64.91	61.65	2.75
Tlacotepec Plumas					
1	0.91	0.16	0.06	0.11	0.35
2	1.01	0.36	0.21	0.23	0.81
4	2.31	0.72	0.57	0.54	1.94
5	3.41	0.91	0.57	0.67	1.51
8	4.48	1.56	1.05	1.26	3.42
10	6.29	2.32	1.57	2.087	5.22

Dq: diámetro cuadrático; Dc: diámetro de copa; Lc: Longitud de copa; Db: Diámetro de base.

la altura promedio fue de 0.91 m, mientras que para plantaciones de diez años fue de 6.29 m, lo que indicó una relación adecuada entre altura y edad de la plantación. La altura promedio de las plantaciones fue similar a las alturas reportadas por Domínguez *et al.* (2001) en plantaciones de *P. halapensis*, *P. Brutia* y *P. pseudostrobus*. Otro estudio realizado con *Pinus greggii* en Michoacán por Muñoz *et al.* (2012) reportaron valores menores a los registrados en este trabajo en cuanto a altura, diámetro a la base, diámetro de copa y supervivencia. Aunque esta especie no es endémica de Michoacán ni de la Mixteca Oaxaqueña la diferencia de los resultados encontrados quizás se debió a que la elección de la especie no fue la adecuada para la región de Michoacán, sin embargo, se adaptó bien a las condiciones climáticas y edáficas de

la Mixteca Oaxaqueña. La altura y el diámetro de la base de las plantaciones evaluadas en este estudio (Cuadro 3) son similares a las encontradas por De Los Rios *et al.*, (2003) en plantaciones de *P. pinceana*, *P. cembroides* y *P. nelsonii* en el nordeste de México. Lo que indica que las plantaciones evaluadas de acuerdo a su edad, tienen un adecuado crecimiento y desarrollo (Figura 2, 3).

CONCLUSIONES

En Magdalena Yodocono la supervivencia en la plantación de un año fue de 40.75% con densidad de 562

árboles, lo que indicó una supervivencia aceptable. En San Francisco Teopan la supervivencia fue de 74.48% con densidad de 1031 árboles en promedio, y buena supervivencia, mientras que en Tlacotepec Plumas, la supervivencia promedio general fue de 71% con densidad de 973 árboles y baja mortalidad en los primeros años de establecimiento. El comportamiento en altura mostró una tendencia positiva relacionada directamente con el factor edad en los primeros años de establecimiento de la plantación. La edad en que se cruza el incremento medio anual (IMA) e incremento corriente anual (ICA), en la curva de comportamiento en altura fue a los ocho años, recomendándose un primer pre aclareo a los cuatro años (edad del incremento medio anual máximo).



Figura 2. Plantación forestal de un año de edad en San Francisco Teopan, Oaxaca, México.



Figura 3. Plantaciones forestales en Tlacotepec plumas, Oaxaca, México. A-D: Plantaciones de 3, 5, 8 y 10 años respectivamente.

LITERATURA CITADA

- Arteaga M., B. 2003. Evaluación dasométrica de una plantación de *Pinus* spp., en Perote, Veracruz, México. *Foresta Veracruzana* 5(1):27-32
- Arreortua G.C. 2002. Evaluación del comportamiento de la regeneración de *Pinus Patula* Schl et Cham, en masas forestales de Calpulalpan de Méndez, Ixtlán, Oaxaca. Memoria de Residencia Profesional. Oaxaca. p. 118.
- CATIE (Centro Agronómico de Investigación y Enseñanza). 1991. Plagas y enfermedades forestales en América Central. Manual de consulta. Turrialba, Costa Rica. 187 p.
- Cruz L.I.A., Valdez L.J.R., Ángeles P.G. y H. M. Santos P. 2010. Modelación espacial de área basal y volumen de madera en bosques manejados de *Pinus patula* y *P. teocote* en el ejido Atopixco, Hidalgo Madera y Bosques 16(3):75-97.
- Cuesta A.M.J., Cuenca A.D. 1995. Aproximación a las afecciones (plagas y enfermedades) del olivo cultivado, *Olea europea sativa*, en el Subbético. *Bol. San. Veg. Plagas* 21:239-550.
- De los Ríos E., De Hoogh R., Domínguez P.A., Nívar J. 2003. Ensayos de procedencias con pinos piñoneros en el nordeste de México. Congreso forestal mundial XII, ciudad de Québec, Canadá. 6 p.
- Domínguez C.P.A., Nívar Ch.J. de J., Loera O.J.A. 2001. Comparación en el rendimiento de pinos en la reforestación de sitios marginales en Nuevo Leon.
- Durán R.F. 2008. Manual práctico de reforestación. Editorial, Grupo Latino. Colombia. 950 p.
- Flores V.F., Crespo G.R., Cabezas G.F. 2009. Plagas y enfermedades en plantaciones de teca (*Tectona grandis* L.f) en la zona de Balzar, provincia del guayas. *Ciencia y Tecnología* 3(1): 15-22.
- Gara R., Onofre G. 1989. Entomología Forestal. Ministerio de Agricultura y Ganadería. Proyecto DINAFA. AID. Quito, Ecuador. 267 p.
- González-Leyva A. 2007. Geografía, lingüística, arqueología e historia de la Mixteca Alta antes de la conquista española. pp: 45-66. *In: Knauth, L. (ed.), Un saber histórico para el futuro. Anuario de Historia. Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional Autónoma de México.*
- Guerrero A.R., Jiménez H.E. y R. Santiago H. 2010. La transformación de los ecosistemas de la Mixteca Alta oaxaqueña desde el Pleistoceno Tardío hasta el Holoceno. *Ciencia y Mar* XIV (40):61-68.
- INEGI. 2014. Erosión de suelos en México. Boletín de prensa Núm. 295/14. 14 de julio de 2014 Aguascalientes, Ags. Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/inegi/contenidos/espanol/prensa/Boletines/Boletin/Comunicados/Especiales/2014/Julio/comunica1.pdf> Fecha de consulta: 30 Marzo 2015.
- Muñoz F.H.J., Coria A.V.M., García S. J.J. y M. Balam C. 2009. Evaluación de una plantación de tres especies tropicales de rápido crecimiento en Nuevo Urecho, Michoacán. *Rev. Mex. Ciencias For.* 34(106):61-87.
- Muñoz F.H.J., Coria A.V.M., García S.J.J.J., Velasco B.E., Martínez M.G. 2012. Evaluación de una plantación de *Pinus greggii* Engelm con dos espaciamientos *Rev. Mex. Ciencias For.* 3 (11): 57-70
- Méndez-González J., Luckie-Navarrete L., Capó-Arteaga M.A., Nájera-Luna A. 2011. Ecuaciones alométricas y estimación de incrementos en biomasa aérea y carbono en una plantación mixta de *Pinus devoniana* lindl y *P. pseudostrobus* lindl., en Guanajuato, México. *Agrociencia* vol.45 no.4 479 -491
- Ramírez L.A., Navarro G.H. y V. M. Cetina A. 2011. Experiencia organizativa para la reforestación con *Pinus oaxacana* mirov. En suelos degradados de la mixteca oaxaqueña. *Rev. Mex. Cien. For.* 2(7):57-70.
- Rodríguez T.D.A. 2011. Indicadores de calidad de planta forestal. Mundi-Prensa. México. 156 p.

- Ruano M.J.R. 2008. Viveros forestales. Mundi-Prensa. 2ª ed. Madrid, España. 285 p.
- Ruiz A.V., Gómez C.M., Valencia M.S., Cornejo O.E.H. 2003. Ensayo de procedencias de *Pinus oaxacana* Mirov en dos localidades de la Mixteca Alta, Oaxaca. Departamento forestal UAAAN. 435-440.
- Ruiz V.J., Bravo E.M., Loeza R.G. 2001. Cubiertas vegetales y barreras vivas: tecnologías con potencial para reducir la erosión en Oaxaca, México. Terra 19: 89-95.
- Smith-Ramírez C., González E.M., Echeverría C., Lara A. 2015. Estado actual de la Restauración ecológica en Chile, perspectivas y desafíos. Anales Instituto Patagonia (Chile). Vol. 43(1):11-21.
- Vásquez G.I., López L.M.A., Ángeles P.G., Trinidad S., Jiménez C., Aguilar B.G. 2015. Aclareo y fertilización química en la productividad primaria neta de plantaciones de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. Et Cham. Revista Mexicana de Ciencias Forestales Vol.6 (31): 82-93
- Vega A.A. 2013. Evaluación de las plantaciones forestales comerciales establecidas entre 1994 y 1996 en los Tuxtlas, Veracruz. Maestría en Ciencias. Universidad Veracruzana. Xalapa, Veracruz. 104 p.



CONSERVACIÓN *In vitro* POR CRECIMIENTO MÍNIMO DE *Swietenia macrophylla* King, y *Tectona grandis* L.

In vitro CONSERVATION FROM MINIMUM GROWTH OF *Swietenia macrophylla* King AND *Tectona grandis* L.

Montiel-Castelán, P.¹; Castillo-Martínez, C.R.^{2*}; Gómez-Reyes, L.A.²; Valle-Arizaga, M.³; Jasso-Mata, J.⁴

¹Division de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco, Km. 38.5, Texcoco Edo. de México. C. P. 56230. ²Centro Nacional de Recursos Genéticos-Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias km. 8 carretera Tepatitlan-Lagos de Moreno, Col. Rancho las Cruces, Tepatitlan de Morelos, Jalisco c.p. 47600. ³Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, Tsukuba 305-8572, Japan. ⁴Postgrado en Ciencias Forestales, Colegio de Postgraduados-Campus Montecillo. Km. 36.5 Carr. México-Texcoco, Ed. México.

*Autor de correspondencia: castillo.carlos@inifap.gob.mx

RESUMEN

Con objeto de conservar *in vitro* las especies *Tectona grandis* L. y *Swietenia macrophylla* King, mediante la técnica de crecimiento mínimo en condiciones *in vitro*, se evaluaron concentración de manitol (10 g L⁻¹, 15 g L⁻¹, 20 g L⁻¹ y 30 g L⁻¹) y aplicación de una capa de aceite mineral (2 ml) en combinación con tres temperaturas (18 °C, 24 °C, 28 °C). En *T. grandis*, el aceite mineral redujo significativamente el crecimiento, pero disminuyó el número de brotes y el vigor, mientras que en *S. macrophylla* aumentó el crecimiento y disminuyó el número de brotes y vigor del explante. Referente al uso de manitol, *T. grandis* y *S. macrophylla*, registraron que la aplicación de 15 g L⁻¹ al medio de cultivo redujo significativamente el crecimiento *in vitro*, se mantuvo el vigor y sobrevivencia, y la la temperatura de conservación de 18 °C, generó respuesta sinérgica y redujo el crecimiento *in vitro* con mayor eficiencia en ambas especies hasta quince semanas.

Palabras clave: Conservación *in vitro*, Crecimiento mínimo, caoba, teca.

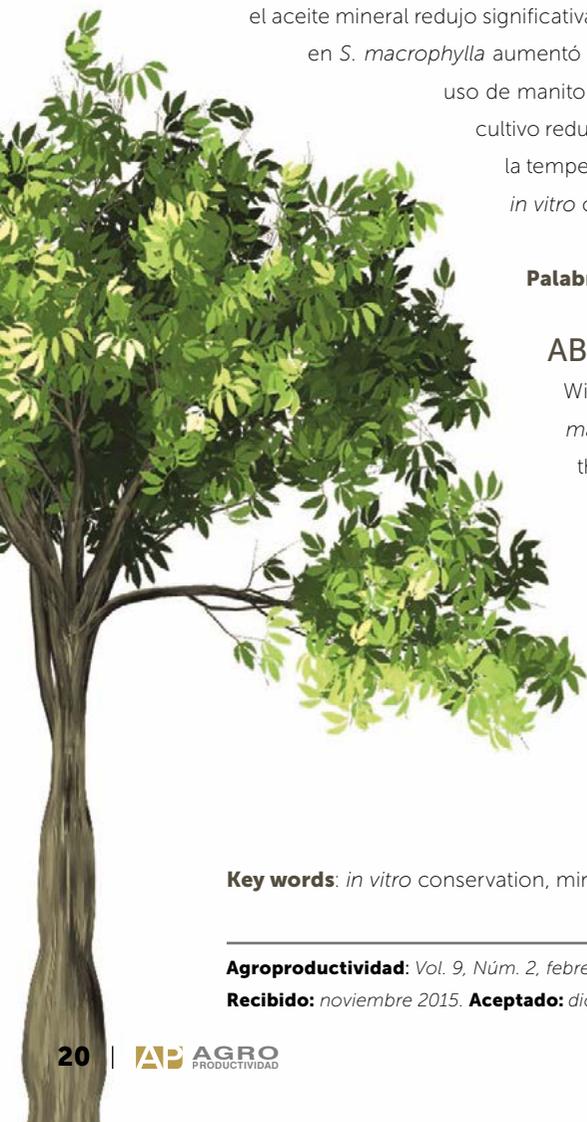
ABSTRACT

With the objective of conserving *in vitro* the species *Tectona grandis* L. and *Swietenia macrophylla* King, through the technique of minimum growth under *in vitro* conditions, the mannitol concentration was evaluated (10 g L⁻¹, 15 g L⁻¹, 20 g L⁻¹ and 30 g L⁻¹), as well as the application of a layer of mineral oil (2 ml) in combination with three temperatures (18 °C, 24 °C, 28 °C). In *T. grandis*, the mineral oil reduced growth significantly, but it decreased the number of buds and the vigor, while in *S. macrophylla*, it increased growth and decreased the number of buds and vigor of the explant. With regard to the use of mannitol, *T. grandis* and *S. macrophylla* showed that the application of 15 g L⁻¹ to the cultivation medium reduced *in vitro* growth significantly, vigor and survival were maintained, and the conservation temperature of 18 °C generated a synergetic response and reduced *in vitro* growth with greater efficiency in both species up to fifteen weeks.

Key words: *in vitro* conservation, minimal growth, *Swietenia macrophylla* King, *Tectona grandis* L., mineral oil, mannitol.

Agroproductividad: Vol. 9, Núm. 2, febrero. 2016. pp: 20-25.

Recibido: noviembre 2015. **Aceptado:** diciembre 2015.



INTRODUCCION

Caoba (*Swietenia macrophylla* King) es una especie neotropical distribuida desde el norte del Golfo de México hasta Centroamérica, y posee una de las maderas de mayor valor e importancia económica, derivado de la belleza de su veteado y calidad y por ello se le considera, madera preciosa (Mayhew y Newton, 1998; Adolfo-Basil, 2007). La Teca (*Tectona grandis* L. f.), es otra especie maderable de fuerte impulso en el mercado, y registra propiedades únicas de estabilidad ideal para exteriores, construcción y acabados (Pandey y Brown, 2000; Shargel-Moreno y Hernando, 2005). Su centro de origen es Asia, desde la India hasta Myanmar, Laos y Tailandia (Weaver, 1993), Actualmente se tienen plantaciones comerciales en Centroamérica, principalmente en Costa Rica, y en México se tienen registro de individuos que llegaron en la década de los setenta y que actualmente ya se han registrado plantaciones. Ambas especies, Caoba y Teca se consideran de importancia en lo que respecta al potencial para ser utilizadas en plantaciones comerciales, con fines de aprovechamiento, sin embargo, sus semillas necesitan condiciones especiales de almacenamiento, registrando para la Teca, pérdida de viabilidad en condiciones de almacenamiento convencional (Abdelnour *et al.*, 2007; Cardoso *et al.*, 2000; Hine-Gómez *et al.*, 2013), mientras que las de Caoba poseen aceites de reserva que con el tiempo activan algunas enzimas que afectan la viabilidad y vigor (Gómez-Terejo *et al.*, 2006). Por lo anterior, se considera importante la búsqueda de métodos de conservación que se complementen con los bancos de semilla convencionales o áreas de conservación como para el caso de caoba. La técnica del crecimiento mínimo y conservación *in vitro*, que tiene como principio la disminución de la división celular y metabolismo de la planta (Roca *et al.*, 1994, García-Águila 2007), puede facilitar el resguardo de tejido vegetal de especies



de interés, y para lograrlo se recurre a la modificación del medio de cultivo y condiciones medio ambientales (Engelmann, 2011; Cruz-Cruz *et al.*, 2013). Esta forma de conservar se ha utilizado ampliamente en especies agrícolas como papa (*Solanum tuberosum* L). Con estos precedentes y con el fin de aportar métodos para la conservación *ex situ* de estas especies forestales, se evaluaron concentraciones de manitol (medio osmótico), aceite mineral como limitante de la respiración de explantes cultivados y tres temperaturas (18 °C, 24 °C, 28 °C); para diseñar protocolo de conservación *in vitro*.

MATERIALES Y METODOS

El desarrollo y procesos de investigación se realizaron en el Centro Nacional de Recursos genéticos (CNRG) en Tepatitlán, Jalisco, México, con material *in vitro* previamente establecido procedente del campo experimental de San Felipe Bacalar, Quintana Roo, México. El material vegetativo se conservó en medio Murashigie y Skoog (1962), adicionado con carbón activado. Se prepararon medios de cultivo en 200 ml de volumen por tratamiento, los cuales consistieron de un medio con base en sales minerales y vitaminas de MS (Murasigie y Skoog, 1962), adicionado con varias combinaciones de sacarosa/manitol 30/0, 20/10, 15/15, 10/20 y 30/0 gr L⁻¹. De cada tratamiento se realizó una réplica que además se adicionó con 2 ml de aceite mineral J.T. Baker® (previamente esterilizado en seco a 180 °C por 2 h) a una profundidad de 5 mm del medio. En campana de flujo laminar se disectaron los explantes previamente multiplicados *in vitro*, en segmentos de 1.5 mm los cuales se colocaron en el medio correspondiente a cada tratamiento y se sellaron con Parafilm®; cada tratamiento se replicó en tres temperaturas (18 °C, 24 °C y 28 °C) y conservaron durante tres meses. Cada cuatro semanas se evaluó el crecimiento, número de brotes, vigor y oxidación. Se empleó un diseño completamente al azar multifactorial. Para el análisis de datos se empleó el paquete estadístico SAS (Statistics Analysis Software) V. 9.1. y análisis de componentes principales usando la varianza y comparación de medias de Tukey, $\alpha=0.05$.

RESULTADOS

Efecto del Aceite mineral

El aceite mineral estimuló el crecimiento de *Swietenia macrophylla* King, a 18 °C y 24 °C, registrando para la primera temperatura disminución del número de brotes, aumento de oxidación y disminución del vigor (Cuadro 1).

El aceite mineral tuvo efecto en la disminución del crecimiento *in vitro* de *Tectona grandis* L. (Cuadro 2), sin embargo, el número de brotes fue menor y hubo más presencia de oxidación, además de que se desarrollaron tejidos hiperhídricos y necróticos.

Efecto del manitol

La temperatura y las concentraciones de manitol, tuvieron efecto en el crecimiento *in vitro* de *Swietenia macrophylla* King; a 18 °C con 15 g L⁻¹ de manitol (T3) y 30 g L⁻¹ de manitol (T5), disminuyeron significativamente su crecimiento. Ambos tratamientos son adecuados para la conservación *in vitro* hasta tres meses, el tratamiento T3 presentó menor número de brotes, mientras que T5, registró más oxidación y menor vigor, sin embargo T3 mostró mayor sobrevivencia de explantes que T5.

El efecto de la temperatura y la concentración de manitol en el vigor *in vitro* de *Tectona grandis* L., a 30 g L⁻¹ a temperatura de 18 °C y 24 °C presentaron vigor regular o medio, sin embargo, si la concentración de manitol disminuye a temperatura de 24 °C el vigor mejoró; y a 28 °C y 20 g L⁻¹ de manitol el vigor de los explantes disminuyó significativamente. El mayor daño de tejidos (obscurecimiento) fue registrado a 18 °C de conservación, atribuido a concentración osmótica alta (Cuadro 3). Las concentraciones de manitol produjeron un efecto significativo en el crecimiento de los explantes, ya que a medida que su concentración aumentó, el crecimiento disminuyó partiendo de 20 g L⁻¹ (tratamientos T4, T9, T14), registrando que el número de brotes y vigor disminuyeran significativamente. La concentración de 15 g L⁻¹ (tratamientos T3, T8, T13) de manitol disminuyó significativamente el crecimiento, mostrando buen vigor, número de brotes y bajo nivel de oxidación de explantes. Los tratamientos T3 y T8 presentaron mayor sobrevivencia respecto al tratamiento T13. El tratamiento T3 (15 g L⁻¹ a 18 °C) y T8 (15 g L⁻¹ a 24 °C) resultaron ser los tratamientos más adecuados en la conservación *in vitro* de *Tectona grandis* L., con adición de azúcares difíciles de metabolizar en este caso manitol (Cuadro 4).

Dentro de las técnicas de conservación *in vitro* se encuentra la de crecimiento mínimo, que tiene como principio la disminución de la división celular y el metabolismo de la planta (Roca *et al.*, 1994; García-Águila, 2007). Una reducción en el crecimiento de los tejidos *in vitro* se puede lograr mediante la disminución de los niveles de oxígeno disponibles, con el uso de una capa de aceite mineral o atmósferas controladas (Dorion *et al.*, 1994). *Tectona grandis* L. disminuyó su crecimiento cuando fue tratada con una capa de aceite mineral, lo cual se atribuyó a que las plantas pueden restringir la respiración y disminuir su consumo de ATP (trifosfato de adenosina), como respues-

Cuadro 1. Efecto del aceite mineral y temperatura en explantes de *Swietenia macrophylla* King, durante su conservación por 15 semanas en condiciones *in vitro*.

Temperatura (°C)	Aceite mineral	Media				Sobrevivencia (%)
		Longitud	Número de Brotes	Oxidación	Vigor	
18	T ₁	11.9 c	11 a	1.9 a	2.9 a	80
	T ₂	16.8 b	6 b	1.5 b	2.3 b	40
24	T ₃	16.5 b	10 a	2.0 a	3.3 a	100
	T ₄	25.7 a	11 a	1.9 a	3.1 a	100
28	T ₅	24.0 a	12 a	2.0 a	3.0 a	60
	T ₆	24.7 a	10 a	2.0 a	3.0 a	100

Cuadro 2. Efecto del aceite mineral y temperatura en explantes de *Tectona grandis* L. durante su conservación por 15 semanas en condiciones *in vitro*.

Temperatura (°C)	Aceite mineral	Media				Sobrevivencia (%)
		Longitud	Numero de Brotes	Oxidación	Vigor	
18	T ₁	19.5 a	9.6 ab	2.0 a	3.3 a	100
	T ₂	8.5 b	4.2 bc	2.0 a	2.0 b	40
24	T ₃	25.4 ab	12.5 a	2.0 a	3.8 a	80
	T ₄	9.7 b	4.2 bc	1.7 a	2.3 b	80
28	T ₅	15.2 ab	10.4 ab	2.0 a	3.4 a	60
	T ₆	9.3 b	3.7 c	1.8 a	1.7 b	100

ta adaptativa a niveles bajos de oxígeno (Geingenberger, 2003). Ensayos en la conservación *in vitro* de *Daucus carota*, *Vitis vinifera*, *Catharanthus*, *Valeriana Wallichii* (Johnson, 2002) y *Bacopa monieri* L. (Sharma *et al.*, 2012) coinciden en la eficiencia del aceite mineral como técnica de conservación, sin embargo en este caso el vigor y sobrevivencia *in vitro* disminuyó significativamente, y se presentaron tejidos hiperhidricos. Gaspar *et al.* (2002) señala que el estado canceroso de las células y la hiperhidricidad son estados adaptativos inducidos por estrés *in vitro*.

Swietenia macrophylla King, contrario a lo documentado en la conservación con aceite mineral aumento su crecimiento; cada especie responde de diferente forma ante una situación de estrés; y el nivel de tolerancia de cada especie se relaciona directamente con las tensiones a las que se vio sometida a lo largo de su vida y

que se han fijado genéticamente (Gaspar *et al.*, 2002), desarrollando mecanismos propios de adaptación (Şen, 2012). Respuestas similares a la obtenida con *Swietenia macrophylla* King con aceite mineral, fueron reportadas por Dorian *et al.* (1994), aplicando atmosferas controladas y disminución en el nivel de oxígeno *in vitro* de

melocotón y melocotón x híbrido almendro (GF 677) (*Prunus* spp.), contrario a lo esperado los explantes con menos oxígeno crecieron más, presentando más yemas e incrementando su peso seco.

Cada especie posee diferentes niveles de tolerancia ante niveles bajos de oxígeno, que se relaciona con la capacidad de poder eliminar el etanol por difusión, el aumento en la síntesis de las enzimas para eliminar los radicales libres (por ejemplo, superóxido dismutasa) y enzimas asociadas con la producción de compuestos antioxidantes (por ejemplo, ácido ascórbico,

Cuadro 3. Efecto de las concentraciones de manitol y temperatura en la conservación *in vitro* de *Swietenia macrophylla* King durante 15 semanas.

Temperatura (°C)	Manitol	Media				Sobrevivencia (%)
		Longitud	Brotes (No.)	Oxidación	Vigor	
18	T ₁	11.9 cd	11 ab	0.1 ab	2.9 abc	87
	T ₂	14.9 cbd	9 abc	0.2 ab	2.8 bcde	87
	T ₃	12.7 cd	6 c	0.4 ab	2.6 abcde	93
	T ₄	13.2 cbd	8 abc	0.3 ab	2.7 cdef	80
	T ₅	12.7 cd	8 abc	0.2 ab	2.8 edf	80
24	T ₆	16.5 bc	10 abc	0.0 b	3.3 a	100
	T ₇	16.2 bc	10 abc	0.1ab	3.2 ab	100
	T ₈	17.4 b	9 abc	0.1 ab	2.8 abcd	100
	T ₉	15.3 cbd	9 abc	0.1 ab	3.1 bcde	100
	T ₁₀	13.4 a	9 abc	0.1 ab	2.5 eg	100
28	T ₁₁	24.0 a	13 a	0.0 b	3.0 ab	60
	T ₁₂	22.0 a	11 ab	0.1 ab	3.5 bcde	73
	T ₁₃	15.4 cbd	9 abc	0.5 a	2.5 bcde	93
	T ₁₄	14.5 cbd	8 bc	0.2 ab	2.7 g	100
	T ₁₅	15.0 cbd	6 c	0.4 ab	2.2 efg	87

Cuadro 4. Efecto de las diferentes concentraciones de manitol y temperatura, durante la conservación *in vitro* de explantes de *Tectona grandis* L., durante 15 semanas.

Temperatura (°C)	Tratamiento	Media				Sobrevivencia (%)
		Manitol	Longitud	Brotes (No.)	Oxidación	
18	T ₁	19.5 ab	9.6 abc	2.0 a	3.3 abc	100
	T ₂	9.8 cd	6.1 bcdef	1.8 a	2.7 bcde	40
	T ₃	6.5 cd	4.8 def	2.0 a	2.9 abcde	100
	T ₄	6.2 d	3.0 ef	1.3 bc	2.4 cdef	80
	T ₅	6.2 d	3.4 ef	1.0 c	2.0 efg	60
24	T ₆	25.4 a	12.5 a	2.0 a	3.8 a	80
	T ₇	14.1 bcd	9.6 abc	2.0 a	3.3 ab	100
	T ₈	8.1 cd	8.2 abcd	2.0 a	2.9 abcd	80
	T ₉	6.4 d	5.3 cdef	1.6 ab	2.6 bcde	100
	T ₁₀	7.0 cd	3.0 ef	1.7 ab	1.6 gf	100
28	T ₁₁	15.2 bc	10.4 ab	2.0 a	3.4 ab	60
	T ₁₂	7.5 cd	7.1 bcde	1.8 a	2.8 bcde	100
	T ₁₃	8.1 cd	6.1 bcdef	1.8 a	2.8 bcde	60
	T ₁₄	6.1 d	3.0 f	1.8 a	1.2 g	80
	T ₁₅	6.2 d	3.8 def	1.8 a	2.3 def	100

OL- tocoferol, y glutatión (Kozłowski y Pallardy, 2002). Pudieron ser muchos los factores que pudieron influir en el aumento del crecimiento de *Swietenia macrophylla* King, y por ello, se sugiere realizar más ensayos con diferentes genotipos sometidos a tratamientos con aceite mineral para poder estandarizar la respuesta.

La adición de manitol aunado con la reducción de temperatura se ha utilizado para reducir la tasa de crecimiento para la conservación de genotipos valiosos *in vitro* de *Solanum tuberosum*, *Dioscorea alata* (Thorpe, 2008) y *Sechium edule* (Alvarenga-Venutolo, 2010), ya que las plantas no tienen una ruta nativa para la biosíntesis de los alcoholes de azúcar (manitol y sorbitol) por lo que es difícil asimilarlos. Sin embargo una vez trasladados, pueden ser metabolizados y utilizados (Thorpe *et al.*, 2008), reduciendo el metabolismo y crecimiento de la planta *in vitro*. El uso de manitol y temperatura para la reducción del crecimiento de *Swietenia macrophylla* King y *Tectona grandis* L., fue significativa. A este respecto, Holobiuc *et al.* (2009), señalan que la adición de manitol disminuyó el potencial osmótico del medio de cultivo, y redujo la absorción de nutrientes, afectando el crecimiento, sin embargo, altas concentraciones de manitol puede tener consecuencias desfavorables para el desarrollo del explante, como se observó con los tratamientos a 25 g L⁻¹ y 30 g L⁻¹, que redujeron el vigor, número de brotes y sobrevivencia del explante, contrario a la adición de 15 g L⁻¹ de manitol a 18 °C, que redujo el crecimiento, presentó buen vigor, menos oxidación y buen número de brotes respecto al testigo. En general la temperatura controla el crecimiento y desarrollo de la planta debido a su efecto directo en el metabolismo del explante, específicamente en la actividad enzimática, y combinada con otros factores puede reducir el crecimiento (Alvarenga *et al.*, 2007). La velocidad a la que el material vegetal crece *in vitro* generalmente disminuye lentamente a medida que la temperatura se reduce (Thorpe *et al.*, 2008). Considerando que *Swietenia macrophylla* King y *Tectona grandis* L., son especies tropicales que de acuerdo con Whitters (1985), su temperatura de almacenamiento

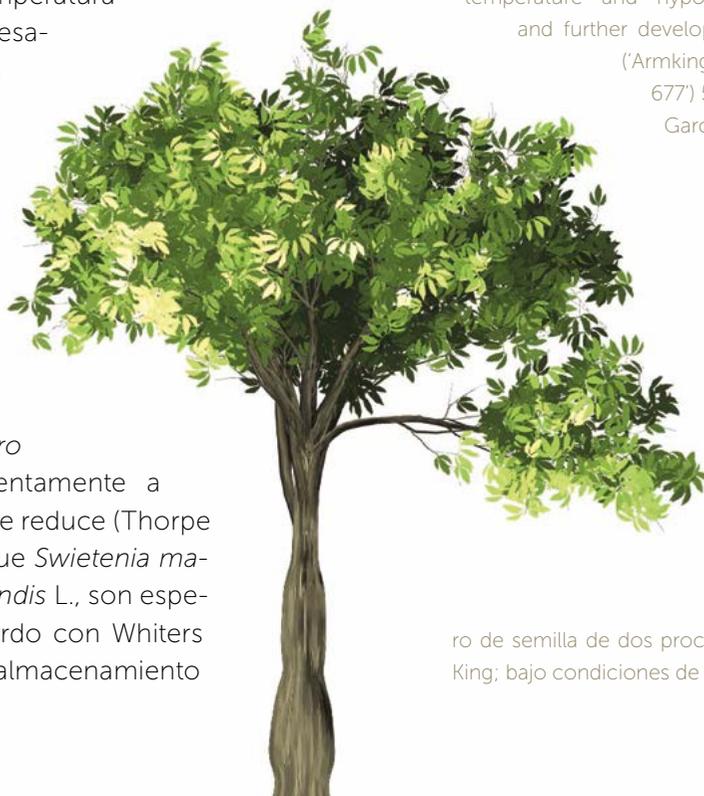
debe estar entre 15-20 °C, en esta investigación tanto los tratamientos con aceite mineral como los de manitol, presentaron menor crecimiento a 18 °C, y de acuerdo con Whitters *et al.* (1990), disminuir la temperatura es una estrategia de conservación para reducir el crecimiento de cultivos *in vitro*.

CONCLUSIONES

El aceite mineral no resultó ser adecuado en la conservación de germoplasma *in vitro* de *Swietenia macrophylla* King y *Tectona grandis* L., aun cuando la tasa de crecimiento aumentó en la primera, y en teca disminuyó, sin embargo, no registró buen vigor y la sobrevivencia de los explantes fue baja. El uso de manitol en la limitación del crecimiento *in vitro*, representa una alternativa de conservación para teca y caoba (15 g L⁻¹ a 18 °C).

LITERATURA CITADA

- Adolfo-Basil J.G. 2007. Diversidad genética en poblaciones de *Swietenia macrophylla* King (meliaceae) en Costa Rica y Bolivia. Centro Agronómico Tropical de Investigación y enseñanza (CATIE). pp. 1-88.
- Alvarenga-Venutolo S., Abdetnour-Esquivel A., Villalobos-Aránbula, V. 2007. Conservación *in vitro* de chayote (*Sechium edule*). Agronomía Mesoamericana 18: 65-73.
- Cardoso F., Pita J.M., Palmeira J. 2000. Efecto de la crioconservación sobre la germinación de semillas de leguminosas. Campaña Grande. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais. 2:67-71.
- Cruz-Cruz A.C., González-Arnao M.T., Engelmann F. 2013. Biotechnology and conservation of plant biodiversity. Journal Resources. 2: 73-95.
- Dorion N., Regnard J.L., Serpete I., Bigot C. 1994. Effects of temperature and hypoxic atmosphere on preservation and further development of *in vitro* shoots of peach ('Armking') and peach x almond hybrid ('GF 677') 57(3):201-213
- García-Águila L., de Feria M., Acosta K. 2007. Aspectos básicos de la conservación *in vitro* de germoplasma vegetal. Biotecnología Vegetal. 7(2): 67-79.
- Gaspar T., Franck T., Bisbis B., Kevers C., Jouve L., Hausman J.F., Dommes J. 2002. Concepts in plant stress physiology. Application to plant tissue cultures. Plant Growth Regulation. 37 (3): 263-285.
- Gómez-Terejo J., Jasso-Mata J., Vargas-Hernández J.J., Soto-Hernandez M.R. 2006. Revista Ra Ximhai. Deterioro de semilla de dos procedencias de *Swietenia macrophylla* King; bajo condiciones de almacenamiento. 2 (1): pp. 223-239.



- Hine-Gómez A., Vargas-Castillo P., Abdelnour-Esquivel A. 2013. Crioconservación de semillas de teca (*Tectona grandis* L.f). *Agronomía Costarricense*. 37(1): 51-60.
- Holobiuc M., Blindu R., Mitoi M., Helepciuc F., Cristae V. 2009. The establishment of an *in vitro* gene bank in *Dianthus spiculifolius* Schur and *D. glacialis* ssp. *Gelidus* (Shhott Nym. et otschy) Tutin: I. The initiation of a tissue collection and the characterization of the cultures in minimal growth conditions. *Annals of forest research*. 52: 117-128
- Johnson D., Hodgkinson M.C., Joyce D. 2002. Potential effects of petroleum-derived spray oils on abscission, senescence and stress physiology of citrus. (*In:*) Beattie, G.A.C; Watson, D.M; Steven, M.L; Rae D. J; Spooner-Hart, R.N. (eds). *Spray oils beyond 2000*. Sydney: University of Western Sydney, 185-192.
- Kozłowski T.T., Pallardy S.G. 2002. Acclimation and adaptative responses of woody plants to environmental stresses. *The Botanical Review*. 68(2): 270-334
- Mayhew J.E., Newton A.C. 1998. *The silviculture of mahogany*. Edinburgh, UK, University of Edinburgh, CABI Publishing. 226 pp.
- Pandey D., Brown C. 2000. La teca una visión global. *Unasylyva* 51: 3-13.
- Roca W.M., Escobar R., Mafla G. 1994. Conservación de germoplasma de yuca *in vitro*. Principios y técnicas. CIAT, Cali.
- Şen A. 2012. Oxidative Stress Studies in Plant Tissue Culture. Chapter 3.
- Shargel-Moreno I., Hernando G. 2005. Sistemas agroforestales como alternativas en las explotaciones pecuarias. IX Seminario de Pastos y Forrajes. pp. 137-130.
- Sharma N., Satsangi R., Pandey R., Singh R., Kaushik N., Tyagi R.K. 2012. *In vitro* concervation of *Bacopa monnieri* (L.) using mineral oil. *Plant Cell Tiss Organ. Cult*. 111:291-301.
- Thorpe T., Stasolla C., Yeung E.C., de Klerk G-J., Roberts A., George E.F. 2008. The Components of Plant Tissue Culture Media II: Organic Additions, Osmotic and pH Effects, and Support Systems. *In: Plant Propagation by Tissue Culture*. Ed: George, E.G; M. A. Hall, Geert-Jan De Klerk. S 3rd Edition, volumen 1, ed: 115 -175
- Weaver P.L. *Tectona grandis* L.f. Teak. New Orleans: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station, 1993. 18 p.
- Whiters L.A. 1985. Cryopreservation and storage of germplans. *In: Plant Cell Culture a practical approach* (Ed. R. A. Dixon). IRL Press. Oxford-Washington D.C. 169 p.



BIOFERTILIZANTE MICORRÍZICO Y FERTILIZANTE MINERAL EN EL CRECIMIENTO DE *Elaeis guineensis* Jacq. EN VIVERO

MYCORRHIZIC BIOFERTILIZER AND MINERAL FERTILIZER ON *Elaeis guineensis* Jacq. GROWTH IN NURSERY

Garza-Hernández, J.M.^{1,2}; Marroquín-Agreda, F.J.^{1,2}; Lerma-Molina, J.N.^{1,2}; Ley de-Coss, A.^{1,2}; Toledo-Toledo, E.^{1,2}; Martínez-Solís, M.^{1,2}; Villalobos-Villalobos, V.¹; Aguirre-Medina J.F.^{1*}

¹ Universidad Autónoma de Chiapas. Facultad de Ciencias Agrícolas. Entronque carretera costera y Estación Huehuetán. CP 30660. Fax (964)6270439. Huehuetan, Chiapas, México. ²Cuerpo Académico de Productividad de Agroecosistemas Tropicales.

***Autor de correspondencia:** juanf56@prodigy.net.mx

RESUMEN

Se evaluó la influencia de *Rhizophagus intraradices* en interacción con la fertilización mineral en el crecimiento de dos híbridos de palma de aceite Deli×Ghana y Deli×Nigeria en Huehuetán, Chiapas. Para el desarrollo de la investigación se estableció el experimento en un diseño bloques al azar con ocho tratamientos y 16 repeticiones. Los tratamientos en ambos híbridos fueron, 1) *Rhizophagus intraradices*, 2) 80_N-60_P-80_K-10_{Ca}-10_{Mg}+B, 3) *R. intraradices* + 80_N-60_P-80_K-10_{Ca}-10_{Mg}+B, y 4) Testigo regional 18_N-46_P-00_K y 17_N-17_P-17_K. Las variables de estudio fueron: longitud de tallo, diámetro de tallo, número de hojas, biomasa aérea y radical, y sanidad de follaje. Los datos fueron analizados estadísticamente aplicando el paquete estadístico STATGRAPHICS Centurión XVI y se utilizó la prueba de rango múltiple de Tukey ($P \leq 0.05$) para la comparación de medias. Los resultados indican que el híbrido Deli×Ghana presenta mayor desarrollo vegetal en comparación a Deli×Nigeria. El tratamiento *R. intraradices* más fertilización mineral fue superior en las variables de crecimiento y biomasa aérea y disminución de biomasa radical, así mismo presentó menor daño por plagas y enfermedades.

Palabras clave: Palma de aceite, *Rhizophagus intraradices*, fertilización.

ABSTRACT

The influence of *Rhizophagus intraradices* in interaction with mineral fertilization on the growth of two oil palm hybrids, Deli×Ghana and Deli×Nigeria, was evaluated in Huehuetán, Chiapas. To develop the research, the experiment was established in a random block design with eight treatments and 16 repetitions. The treatments used with both hybrids were: 1) *Rhizophagus intraradices*, 2) 80_N-60_P-80_K-10_{Ca}-10_{Mg}+B, 3) *R. intraradices* + 80_N-60_P-80_K-10_{Ca}-10_{Mg} + B, and 4) Regional control 18_N-46_P-00_K and 17_N-17_P-17_K. The study variables were: length of stem, diameter of stem, number of leaves, aerial and root biomass, and foliage health. The data were analyzed statistically by applying the STATGRAPHICS Centurion XVI package, and the multiple-range Tukey test ($P \leq 0.05$) was used to compare means. Results indicate that the Deli×Ghana hybrid presents greater plant development in comparison to Deli×Nigeria. The treatment with *R. intraradices* plus mineral fertilization was better for the growth variables and aerial biomass, and decrease of root biomass, and it presented less damage from pests and disease.

Keywords: Oil palm, *Rhizophagus intraradices*, fertilization.

Agroproductividad: Vol. 9, Núm. 2, enero, 2016. pp: 26-32.

Recibido: julio 2015. **Aceptado:** enero 2016.

INTRODUCCIÓN

La palma africana (o palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.)) es una oleaginosa originaria de regiones tropicales de África y se encuentra actualmente en varios países de Asia y América. En el mundo es la segunda fuente más importante de aceite vegetal después de la soya (*Glycine max*). En México existe déficit de aceites y grasas de origen vegetal y la industria aceitera mexicana y el gobierno federal están promoviendo su cultivo en Chiapas y regiones del sureste como una alternativa para impulsar el desarrollo regional. La palma de aceite requiere de cuidados intensivos en las etapas de pre vivero y vivero y la nutrición en estas primeras etapas de su desarrollo va a influir en su establecimiento en campo, y en consecuencia, favorecerá la capacidad productiva del cultivo. Existen evidencias que las plantas de mejor crecimiento y desarrollo en vivero producen racimos de mayor tamaño y calidad (Chinchilla y Durán, 1997). Para el caso de la palma de aceite, el limitado desarrollo que tiene su sistema radical favorece la asociación con los hongos endomicorrízicos, y en vivero, se han observado altos niveles de colonización micorrízica natural (Blal *et al.*, 1990; Corley y Tinker, 2003; Motta y Munévar, 2005), y se ha demostrado además, que la biofertilización con micorriza de la palma en etapas tempranas del crecimiento favorece la nutrición y vigor de las plántulas (Corley y Tinker, 2003; Galindo-Castañeda y Romero, 2013). Tradicionalmente los nutrientes a la palma en vivero se han suplementado por la vía química (León, 2004), sin embargo, los altos costos del fertilizante, representa un gasto fuerte para la agroindustria (Motta y Munévar, 2005) y ante ésta situación, últimamente se ha abordado otras alternativas, como la incorporación de compostas (Torres *et al.*, 2004), o bien, la inclusión de microorganismos a la semilla o al sustrato, como hongos endomicorrízicos (Motta y Munévar, 2005; Galindo-Castañeda y Romero, 2013). Los biofertilizantes micorrízicos son productos a base de un microorganismo no patógeno que al inocularse puede vivir asociado o en simbiosis con la planta y ayuda a incrementar el suministro, disponibilidad y acceso físico de nutrimentos mediante diversos mecanismos de acción, e induce mayor crecimiento en la planta huésped (Aguirre-Medina *et al.*, 2014) mediante el transporte de nutrimentos y agua, con preferencia por el fósforo (P) que se ha encontrado en mayor concentración en palmas micorrizadas en comparación con las no micorrizadas en Malasia y Costa de Marfil (Azizah, 2004). Este mismo hecho se ha descrito en Chiapas, México en otros cultivos perennes en vivero, como en *Coffea arabica* L. (Aguirre-Medina *et al.*, 2011), *Tabebuia donnell-smithii* Rose (Aguirre-Medina *et al.*, 2012), *Theobroma cacao* L. (Aguirre-Medina *et al.*, 2007) y en campo en *Jatropha curcas* L. (Díaz-Hernández *et al.*, 2013). La asociación de las plantas con hongos endomicorrízicos tiene efecto positivo en condiciones de estrés por sequía (Auge, 2004), y protege a las plantas contra diversos patógenos (Elsen *et al.*, 2003), además de alterar la disponibilidad de los recursos utilizados por las plantas para la fabricación de las defensas contra las plagas y compensar daños de la misma (Vannette y Hunter, 2009). El objetivo de la presente investigación fue evaluar el efecto morfológico y fisiológico al inocular (biofertilizar) con *Rhizophagus intraradices* en interacción con fertilización mineral plántulas en dos híbridos de *Elaeis guineensis* Jacq., en condiciones de vivero.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo se realizó en el Campo Experimental de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma de Chiapas, localizado en el Municipio de Huehuetán, Chiapas (15° 00' y 15° 30' N; 92° 30' O) a 44 m, con clima Am (w") i g, (García, 1973), cálido subhúmedo con lluvias en verano. La precipitación se distribuye de junio a octubre con 2200 mm en promedio al año. La temperatura media es de 28 °C, con evaporación superior a 1900 mm durante el año. El suelo utilizado como sustrato presento las siguientes características físico-químicas: textura migajón arenosa, pH 6.5, 2.6% de materia orgánica, 0.10% de nitrógeno, 16.5 mg kg⁻¹ de fósforo, 32.4 mg kg⁻¹ de K⁺, 178 mg kg⁻¹ de Ca⁺⁺, 16.4 mg kg⁻¹ de Mg⁺⁺, 15.90 mg kg⁻¹ de Na⁺, 60.2 mg kg⁻¹ de Fe, 6.6 mg kg⁻¹ de Mn, 3.35 mg kg⁻¹ de Zn, 2.01 mg kg⁻¹ de Cu y 0.33 mg kg⁻¹ de B. En general el suelo es considerado de baja fertilidad con deficiencias de K⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺ y B. Con este suelo se llenaron bolsas de plástico (30×30 cm) con capacidad de 25 kg. Las semillas utilizadas de los híbridos Deli×Ghana y Deli×Nigeria de palma de aceite se obtuvieron de la empresa ASD de Costa Rica, C.A., y fueron pre germinadas antes de inocular. El inoculo fue *Rhizophagus intraradices* (Schenck *et Sm.*) Walker & Schüßler desarrollado en el Campo Experimental Rosario Izapa, Chiapas-INIFAP con al menos 40 esporas por g⁻¹ de suelo, mediante propágulos y raicillas con 95% de colonización radical en la planta huésped de *Brachiaria decumbens* L.

Se tuvieron cuatro tratamientos con los híbridos Deli×Nigeria y Deli×Ghana: 1) *Rhizophagus*

intraradices (40 g planta⁻¹ aplicado a la siembra), 2) Fertilización mineral 80_N-60_P-80_K-10_{Ca}-10_{Mg} (14 g planta⁻¹)+B (0.75 g planta⁻¹) aplicado cada mes, 3) *R. intraradices*+Fertilización mineral, y 4) Testigo regional 18_N-46_P-00_K y 17_N-17_P-17_K (Cada tres semanas 5 g⁻¹ y 10 g⁻¹ de 18_N-46_P-00_K), siguiendo con 12, 16, 18, 20, 20, 20, 23, 23 g⁻¹ de 17_N-17_P-17_K. Se tuvieron 16 repeticiones, considerando una planta como unidad experimental. El fertilizante mineral se agregó en el suelo distribuido en bandas alrededor de la planta a 5 cm de profundidad. La micorriza se aplicó a la siembra en el fondo del hoyo. El periodo de estudio fue de nueve meses, (octubre 2013 a junio 2014). Se mantuvo el control manual de maleza y para el combate de plagas, se aplicó metalaxil 70 y cipermetrina en dosis de 1.5 g⁻¹ y 1.5 ml L⁻¹ de agua, cada ocho días a toda la planta, misma s que fueron regadas por aspersión cada tres días.

Variables respuesta

Longitud y diámetro del tallo

La longitud se midió con regla graduada desde el suelo hasta el punto de formación de la última hoja. El diámetro con vernier electrónico a cinco cm de la base del tallo sobre la superficie del suelo. En ambas variables la frecuencia de medición fue mensual.

Número de hojas y biomasa aérea y radical

Se cuantificaron las hojas por planta de cada tratamiento y repetición. La biomasa seca se obtuvo mediante el peso de los componentes fisiológicos en una báscula digital de 4 kg (OHAUS modelo Scout Pro) después de secarse en estufa de aire forzado (VWR-SHEL LAB 1390 FMy) a 55 °C hasta el peso constante.

Sanidad de Follaje. Se realizaron inspecciones diarias en las plantas para identificar la presencia y/o el daño por plagas o enfermedades. Los resultados se analizaron con el programa (STATGRAPHICS Centurión XVI), con base a un análisis completamente al azar y las diferencias estadísticas

mediante prueba de comparación de medias de Tukey (P≤0.05).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Longitud y diámetro del tallo

El crecimiento de las plantas durante los dos primeros meses de estudio, mostraron valores muy semejantes tanto en longitud como en el diámetro del tallo y sin diferencia estadística (P≤0.05) (Figura 1). A partir del tercer mes de evaluación, ambas variables presentaron incrementos desiguales a través del tiempo y con diferencias estadísticas (P≤0.05). El mayor incremento en ambos híbridos se registró con el tratamiento *R. intraradices*

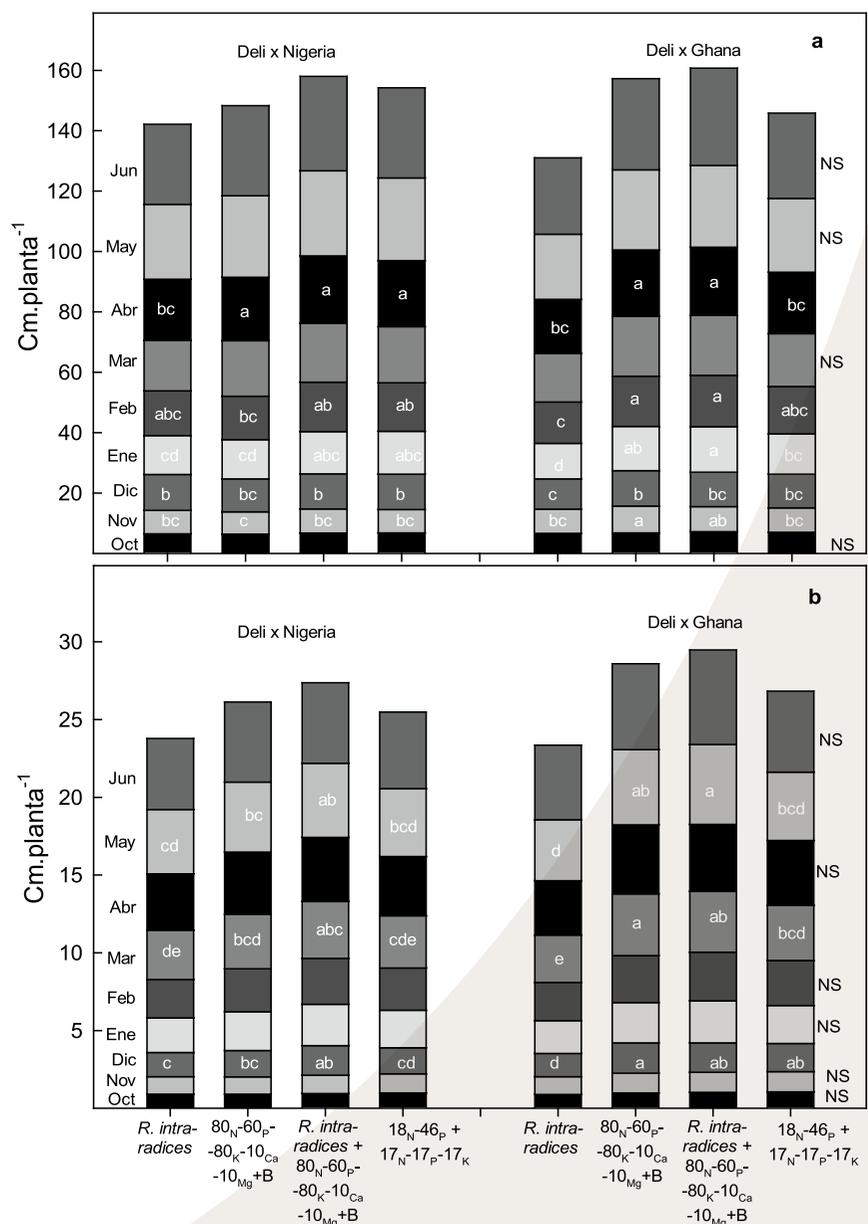


Figura 1. Longitud (a) y Diámetro (b) del tallo de *Elaeis guineensis* Jacq. biofertilizada con *R. intraradices* y diferentes dosis de fertilización. Los valores son promedios de 16 repeticiones. Letras diferentes entre columnas indican diferencia estadística Tukey (P≤0.05).

más fertilización mineral, y el menor, con biofertilización solo del hongo endomicorrizico. En plántulas de palma de aceite tipo Ténera (material «Dami Las Flores») que habían cumplido la etapa de pre vivero inoculadas con propágulos de *Gigaspora* sp y *Glomus* sp., sin fertilización química, Motta y Munévar (2005) reportaron diferencias estadísticas en altura de la planta a partir de 480 días. En cambio en la Costa de Chiapas, México, la respuesta con otros cultivos perennes inoculados con *Rhizophagus intraradices* en vivero se ha identificado a partir de 90 días después de la biofertilización (Aguirre-Medina et al., 2012). La respuesta diferencial en la inducción del crecimiento puede estar relacionada con la preferencia del hospedero (Daniell et al., 2001). En general, la asociación micorrízica arbuscular ha sido definida como no específica con la planta huésped, pero se ha determinado que el comportamiento de las poblaciones es modulado por diversos factores ambientales y existe evidencia de que estas asociaciones presentan especificidad ecológica (Serralde y Ramírez, 2004). El mantenimiento y el desarrollo de la planta dependen de la disponibilidad nutrimental en el suelo y la demanda del cultivo. Una vez que se introducen los fertilizantes químicos se ha demostrado que el micelio de los hongos endomicorrizicos los transporta a la planta (Schweiger y Jakobsen, 2000). Sin embargo, cuando se presenta un sustrato deficiente en algunos nutrientes, tales como, en sustrato evaluado, el transporte debe disminuir, y en consecuencia, registrar menor crecimiento de la planta. Para la nutrición de los cultivos, con excepción del nitrógeno que se fija de la atmosfera por diversos

microorganismos y se introduce a los sistemas radicales, los otros nutrientes deben estar presentes en el suelo para abastecer a la planta. Si alguno de ellos no está disponible, se deberá introducir, y ello puede ser a través de inoculación con hongos micorrizicos (Frontera, 2009). El resultado anterior sugiere, que el crecimiento de las plantas está muy relacionado con el nivel de nutrición en el suelo que crece. Esta apreciación ha sido consignada por León (2004) en palma de aceite.

Cuando la simbiosis entre la planta huésped y los hongos endomicorrizicos es efectiva, vía la biofertilización en la semilla, como sucedió en esta investigación, se mejora el suministro, disponibilidad y acceso físico de nutrientes que favorecen mayor crecimiento, sobre todo en la etapa inicial (Barea et al., 2002), además, aumenta la supervivencia en condiciones ambientales adversas (Andrade et al., 2009).

El número de hojas registró un desarrollo semejante en velocidad e incremento con las variables anteriores de longitud y diámetro del tallo en ambos híbridos de la palma de aceite. En este caso, los valores no fueron estadísticamente diferentes en ninguno de los muestreos (Figura 2). Motta y Munévar (2005) señalan diferencias en número de hojas con otro híbrido del tipo Ténera, pero a partir de los 480 días después de siembra (dds) en Colombia, en un sustrato sin agregar fertilizantes químicos y otras especies de hongos endomicorrizicos.

Se registró una hoja más en el híbrido Deli×Ghana en el muestreo realizado en el mes de marzo y fue en los tratamientos donde se aplicó alguna dosis de fertilización, con o sin hongo micorrizico. En el caso del híbrido Deli×Nigeria, aumento una hoja un mes después en el muestreo de abril, y al mismo tiempo sin cambio en el número de hojas, en el híbrido Deli×Ghana.

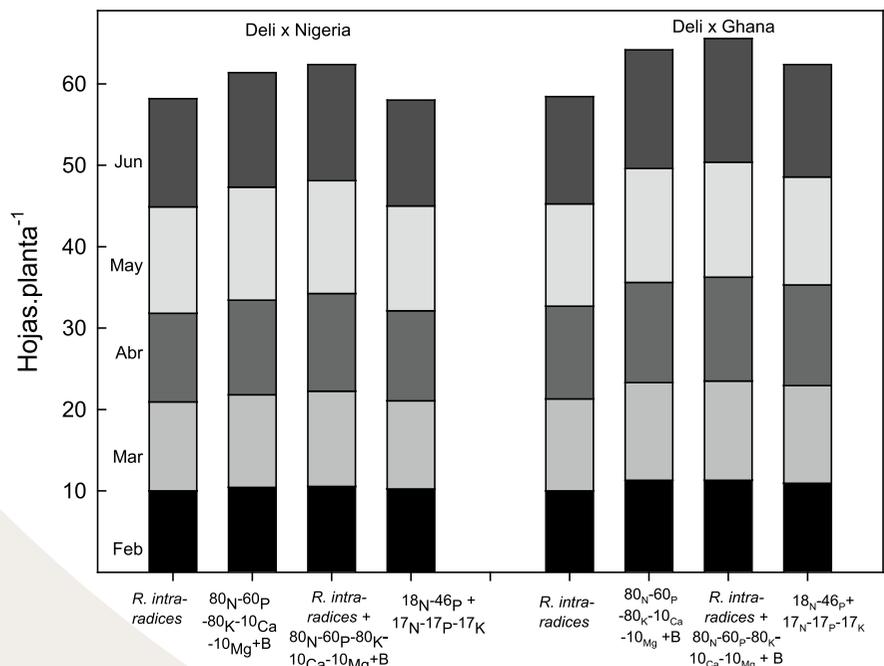


Figura 2. Número de hojas de *Elaeis guineensis* Jacq. biofertilizada con *R. intraradices* y diferentes dosis de fertilización. Valores promedio de 16 repeticiones sin diferencias estadísticas.

En ambos híbridos se incrementó a dos hojas durante el mes de mayo y fue más notable en tratamientos con *R. intraradices* más la dosis de fertilización mineral completa. El número de hojas representa la fuente de fotosintatos para el crecimiento del cultivo y cuando se asocian con hongos micorrízicos, la actividad fotosintética se incrementa después de la colonización (Sylvia, 2005).

En cultivos perennes como el cacao (Aguirre-Medina et al., 2007) y cafeto (Aguirre-Medina et al., 2011) se ha registrado mayor número de hojas con la inoculación de microorganismos. Este hecho sugiere que el incremento en el desarrollo de la planta hospedera, puede deberse a mayor capacidad de absorción de nutrientes.

Biomasa aérea y radical

Se registró mayor peso seco del sistema radical en Deli x Nigeria en el tratamiento con fertilización mineral y cuando se incluyó *R. intraradices*. En cambio en Deli x Ghana la mayor cantidad de biomasa radical también se registró con la fertilización mineral y la menor asignación de materia seca radical fue con los tratamientos biofertilizados con *R. intraradices* (Figura 3).

Al parecer en ambos híbridos, la hifa del hongo sustituye los pelos de la raíz y la planta transporta más foto-

sintatos a la parte aérea para la producción de biomasa, respuesta que se aprecia en la Figura 3. Esta disminución de biomasa radical e incremento en los componentes del rendimiento de la parte aérea han sido citados en otros cultivos, como en frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), (Aguirre-Medina y Kohashi-Shibata 2002) y en maíz (*Zea mays* L.), (Irizar et al., 2003). En el caso del híbrido Deli x Nigeria, se incrementó la biomasa radical más que el testigo y cuando se incluyó únicamente *R. intraradices*. Se ha identificado que el crecimiento de las plantas micorrizadas se mejora por la nutrición del fósforo cuando la simbiosis es efectiva (Grant et al., 2005). Aun cuando se ha indicado que la simbiosis micorrízica arbuscular carece de especificidad taxonómica (Cuenca et al., 2007) parece suceder que se presenta cierta compatibilidad funcional entre la planta, el sustrato y los microorganismos introducidos, y existen combinaciones de microorganismos que funcionan mejor en determinada planta huésped.

Sanidad de Follaje

La menor presencia de minadores *Coelaenomenodera elaeidis*, *Hispolepis elaeidis*, *Alurunus humeralis* en Deli x Nigeria se presentó durante toda la evaluación cuando se biofertilizó la semilla con *R. intraradices*. Este mismo hecho se presentó con la disminución del daño por defoliadores *Spodoptera* sp, y *Atta cephalotes* en las plantas micorrizadas. La colonización por micorrizas puede afectar las defensas directas e indirectas, así como la tolerancia de las plantas a la herbivoría, por cambios en su nutrición, o mediante alteración de la expresión de genes de las plantas independientemente de su nutrición (Vannette y Hunter, 2009). Aun cuando se ha establecido por décadas que la expresión de la defensa de la planta varía con la disponibilidad de recursos en los suelos (Bryant et al., 1983; Herms y Mattson, 1992), los estudios más recientes han puesto de relieve la importancia de la biota del suelo en la mediación de resistencia de las plantas y la tolerancia al ataque de insectos (Wardle et al., 2004; Bezemer y van Dam, 2005). Además, se han sugerido diversos mecanismos para explicar la protección de los hongos endomicorrízicos contra

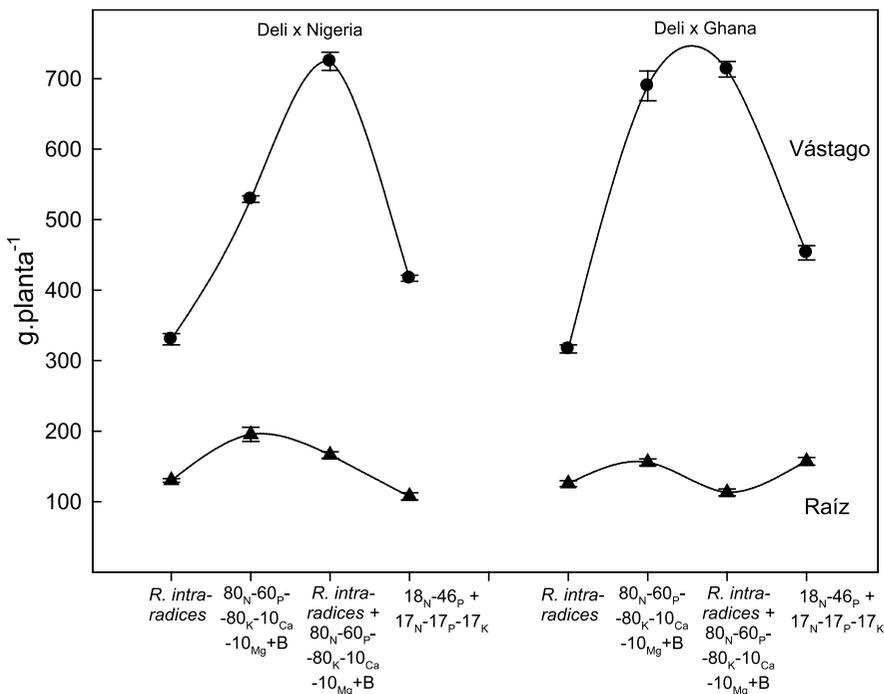


Figura 3. Biomasa aérea y radical de *Elaeis guineensis* Jacq. Biofertilizada con *R. intraradices* y diferentes dosis de fertilización. Valores promedio de 16 repeticiones. Letras diferentes entre columnas indican diferencia estadística Tukey ($p \leq 0.05$).

ciertos patógenos que incluyen producción de compuestos fenólicos y la inducción para la activación de los mecanismos de defensa de las plantas (Gianinazzi-Pearson *et al.*, 1996). En las plantas testigo y cuando se aplicó la fórmula de fertilización 18-46-00 + 17-17-17 la mayor incidencia de plagas se presentó en el mes de mayo y diciembre y defoliadores en octubre. En los meses de noviembre de 2013 a mayo, 2014 se presentó Pestalotiopsis, enfermedad causada por el hongo *Pestalotiopsis* spp., en ambos híbridos. La mayor presencia fue en hojas viejas. En el testigo del híbrido DelixNigeria se presentó la mancha curvularia causada por el hongo *Curvularia* spp. en diciembre. Los niveles de asociación con hongos micorrízicos debe aumentar o disminuir los niveles de defensa de la planta al considerar que ésta proporciona el carbono al hongo micorrízico y el hongo transporta fósforo y nitrógeno a las plantas, como costos de producción para la defensa enzimática (Gershenzon, 1994) (Figura 4).

CONCLUSIONES

La biofertilización de *Elaeis guineensis* Jacq en vivero con *Rhizophagus intraradices* más la fertilización química favoreció el crecimiento de ambos híbridos en la asignación de materia seca de los componentes morfológicos y fisiológicos del rendimiento. La inoculación con hongos endomicorrízicos son una alternativa viable para la producción en vivero al disminuir el uso de agroquímicos para el control de plagas y enfermedades y producir plantas más vigorosas.

LITERATURA CITADA

Aguirre-Medina J.F., Kohashi-Shibata J. 2002. Dinámica de la colonización

micorrízica y su efecto sobre los componentes del rendimiento y el contenido de fósforo en frijol común. *Agric. Téc. Méx.* 28 (1): 23-33.

- Aguirre-Medina J.F., A Mendoza-López., Cadena-Iñiguez J., Avendaño-Arrazate C.H. 2007. La Biofertilización del cacao (*Theobroma cacao* L.) en vivero con *Azospirillum brasilense* Tarrand, Krieg et Döbereiner y *Glomus intraradices* Schenk et Smith. *Interciencia* 32 (8): 1-6.
- Aguirre-Medina J.F., Moroyoqui-Ovilla D.M., Mendoza-López A., Cadena-Iñiguez J., Avendaño-Arrazate C.H., Aguirre-Cadena J.F. 2011. Aplicación de *A. brasilense* y *G. intraradices* a *Coffea arabica* en vivero. *Agron. Mesoam.* 22 (1): 1-10.
- Aguirre-Medina J.F., Aguirre-Cadena J.F., Cadena-Iñiguez J., Avendaño-Arrazate C.H. 2012. Biofertilización en plantas de la selva húmeda tropical. Colegio de Postgraduados.
- Aguirre Medina J.F., Culebro-Cifuentes F., Cadena Iñiguez J., Aguirre Cadena J.F. 2014. Crecimiento de *Tabebuia Donnell-Smithii* (Rose) Inoculada con Hongos Micorrizicos y *Azospirillum brasilense*. *Agrociencia.* 48 (3):331-345.
- Andrade S.A.L., Mazzafera P., Schivinato M.A., Silveira A.P.D. 2009. Arbuscular mycorrhizal association in coffee. *Review. J. Agric. Sci.* 147: 105-115.
- Augé R.M. 2004. Arbuscular mycorrhizae and soil/plant water relations. *Canadian Journal of Soil Science* 84(4): 373-381. doi: 10.4141/S04-002
- Azizah H. 2004. *Ganoderma* versus micorriza. *Palmas (Colombia).* 25 (4):75-83.
- Barea J.M., Azcon R., Azcon-Aguilar C. 2002. Mycorrhizosphere interactions to improve plant fitness and soil quality. *Antonie Van Leeuwenhoek International Journal of General and Molecular Microbiology*, 81(1-4):343-351.
- Bezemer T.M., van Dam N.M. 2005 Linking aboveground and belowground interactions via induced plant defenses. *Trends in Ecology and Evolution*, 20, 617-624.
- Blal B.C., Morel V., Gianinazzi-Pearson J.C., Fardeau S., Gianinazzi S. 1990. Influence of vesicular-arbuscular mycorrhizae on phosphate fertilizer efficiency in two tropical acid soils planted with micropropagated oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.). *Biol Fertil Soils* 9:43-48.
- Bryant J.P., Chapin F.S., Klein D.R. 1983. Carbon nutrient balance of boreal plants in relation to vertebrate herbivory. *Oikos*, 40, 357-368.
- Chinchilla C., Durán N. 1997. Manejo de problemas fitosanitarios en palma aceitera. Una perspectiva agronómica. *Palmas (Colombia).* 19 (número especial): 242-256.
- Corley R.H.V., Tinker P. 2003. The oil palm. Chapter 11: Mineral Nutrition of Oil palm. 4ta ed. Iowa USA: Blackwell Science, 327-360
- Cuenca G., Cáceres A., Oirdobro G., Hasmy Z., Urdaneta C. 2007. Las micorrizas arbusculares como alternativa para una agricultura sustentable en áreas tropicales. *Interciencia* 32(1): 23-29.



Figura 4. Palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) Biofertilizada con *R. intraradices* y diferentes dosis de fertilización.

- Daniell T., Husband J.R., Fitter A.H., Young J.P.W. 2001. Molecular diversity of arbuscular mycorrhizal fungi colonizing arable crops. *FEMS Microbiology Ecology* 36(2-3): 203-209. doi: 10.1111/j.1574-6941.2001.tb00841.x
- Díaz-Hernández B.G., Aguirre-Medina J.F., Díaz-Fuentes V.H. 2013. Rendimiento de *Jatropha curcas* L. Inoculada Con Micorriza Y Aplicación De Composta De Caña. *Rev. Méx. De Ciencias Agrícolas*. 4 (4): 599-610.
- Elsen A., Baimey H., Swennen R., De Waele D. 2003. Relative mycorrhizal dependency and mycorrhiza-nematode interaction in banana cultivars (*Musa* spp.) differing in nematode susceptibility. *Plant and Soil* 256, 303-313.
- Frontera G.M. 2009. Biofertilización: Aspectos productivos y consecuencias en el manejo y conservación de la fertilidad del suelo. [http:// www.e-campo.com](http://www.e-campo.com). Agricultura y cultivos. 17/07/2009.
- Galindo-Castañeda T., Romero H.M. 2013. Micorrización en palma de aceite (*Elaeis guineensis* y *E. oleifera* × *E. guineensis*) en etapa de previvero. *Agronomía Colombiana* 31(1), 95-102.
- García E. 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). Instituto de Geografía. Universidad Autónoma de México. 2ª Edición corregida y aumentada. México D. F. 246 p.
- Gershenson J. 1994. Metabolic costs of terpenoid accumulation in higher-plants. *Journal of Chemical Ecology*, 20, 1281-1328.
- Gianinazzi-Pearson V., Dumas-Gaudot E., Gallotte A., Ahiri-Alaoui A.T., Gianinazzi S. 1996. Cellular and molecular defence-related root responses to invasion by arbuscular mycorrhizal fungi. *New Phytologist* 133, 45-57.
- Grant C., Bittman S., Montreal M., Plenchette C., Morel C. 2005. Soil and fertilizer phosphorus: Effects on plant P supply and mycorrhizal development. *Canadian Journal of Plant Science*, 85:3-14.
- Hermis D.A., Mattson W.J. 1992. The dilemma of plants-to grow or defend. *Quarterly Review of Biology*, 67, 283-335.
- Irizar-Garza M.B.G., Vargas-Vázquez P., Garza-García D., Tut y Couoh C., Rojas-Martínez I., Trujillo-Campos A., García-Silva R., Aguirre-Montoya D., Martínez-González J.C., Alvarado-Mendoza S., Grajeda-Cabrera O., Valero-Garza J., Aguirre-Medina J.F. 2003. Respuesta de cultivos agrícolas a los biofertilizantes en la región central de México. *Agr. Téc. Méx.* 29(2): 213-225.
- León S.I. 2004. Características, uso y manejo de fertilizantes para palma de aceite Palmas (Colombia). 25 (No. Especial, Tomo II): 105-114.
- Motta D., Munévar F. 2005. Respuesta de plántulas de palma de aceite a la micorrización. *Palmas*, 26(3): 11-20.
- Ramlah Ali A.S., Mohd Tayeb D. 1991. Status of Mycorrhizal Research in Oil Palm. *Porim Bulletin* (Malasia) 23: 4-14.
- Schweiger P., Jakobsen I. 2000. Laboratory and field methods for measurement of hyphal uptake of nutrients in soil. *Plant and Soil* 226, 237-244.
- Serralde O.A.M., Ramírez G.M.M. 2004. Análisis de poblaciones de micorrizas en maíz *Zea mays* cultivado en suelos ácidos bajo diferentes tratamientos agronómicos. *Revista Corpoica* 5(1): 31-40.
- Sylvia M.D. 2005. Mycorrhizal symbioses. In: M. D. Sylvia, J. J. Fuhrmann, G. P. Harte, & A. D. Zuberer (Eds.). *Principles and Applications of Soil Microbiology*. (pp. 263-282) Second Edition., New Jersey, USA. Pearson Prentice Hall.
- Torres R., Acosta A., Chinchilla C. 2004. Proyecto comercial de compostaje de los desechos agroindustriales de la palma aceitera. *Palmas* (Colombia). 25(2): 377-387.
- Vannette R.L., D. Hunter M.D. 2009. Mycorrhizal fungi as mediators of defence against insect pests in agricultural systems. *Agricultural and Forest Entomology*, 11, 351-358.
- Wardle D.A., Bardgett R.D., Klironomos J.N., Setälä H., van der Putten W.H., Wall D.H. 2004. Ecological linkages between aboveground and belowground biota. *Science*, 304, 1629-1633.



EVOLUCIÓN Y SITUACIÓN ACTUAL DE PLANTACIONES PARA BIOCOMBUSTIBLES: PERSPECTIVAS Y RETOS PARA MÉXICO

EVOLUTION AND CURRENT SITUATION OF PLANTATIONS FOR BIOFUEL: PERSPECTIVES AND CHALLENGES FOR MÉXICO

Valdés-Rodríguez, O.A.¹; Palacios-Wassenaar, O.M.¹

¹ El Colegio de Veracruz. Carrillo Puerto 26. Xalapa, Veracruz. CP 91000.

***Autoras para correspondencia:** andrea.valdes@gmail.com; olivia.palacios@gmail.com

RESUMEN

El establecimiento de plantaciones con fines de producción de biocombustibles se popularizó por su consideración como estrategia energética sostenible y limpia respecto al uso de combustibles fósiles, sin embargo, estas plantaciones han tenido diversos efectos adversos, tales como, incremento en el precio de algunos alimentos y la deforestación de grandes extensiones de selvas primarias. En el presente documento se revisa el origen de los biocombustibles, los motivos de su uso y desuso, causas de su resurgimiento actual y perspectivas futuras en un contexto internacional y nacional, con el objetivo de analizar sus fortalezas y debilidades con fines de biocombustibles. Se resalta que las experiencias con grandes plantaciones para biocombustibles han sido desalentadoras y han causado más efectos ambientales negativos que positivos, por lo que las expectativas actuales deben orientarse hacia alternativas de segunda y tercera generación, que empleen como materia prima componentes considerados desechos o cultivos que no requieran grandes extensiones ni compitan con el sector alimenticio.

Palabras clave: Bioenergéticos, biodiesel, bioetanol, biocombustibles.

ABSTRACT

Establishing plantations with the objective of biofuel production has become popular because of their consideration as a sustainable and clean energetic strategy compared to the use of fossil fuels; however, these plantations have had various adverse effects, such as an increase in the price of some foods and the deforestation of large extensions of primary forest. In this study we revise the origin of biofuels, the causes for their use and disuse, the cause for their current resurgence and future perspectives within an international and national context, with the aim of analyzing their strengths and weaknesses for the objective of biofuel production. Experiences with large plantations for biofuels have been discouraging and have caused more negative environmental effects than positive, so that the current expectations must be directed towards second and third generation alternatives that use as prime materials components considered as waste or crops that do not require large extensions or compete with the food sector.

Keywords: Bioenergetics, biodiesel, bioethanol, biofuels.

INTRODUCCIÓN

El establecimiento de plantaciones para producción de biocombustibles se popularizó a partir de que fueron consideradas como una estrategia energética más sustentables que la quema de combustibles fósiles, la cual genera emisiones de gases de efecto invernadero y contribuye al cambio climático (Sorda *et al.*, 2010). Sin embargo, cuando estos bioenergéticos provienen de cultivos tales como maíz (*Zea mays* L.), caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) o palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) se ocasiona un aumento en el precio de estos alimentos y sus derivados, desencadenando un daño social. Adicionalmente, cuando se talan extensiones de selvas o bosques para su implementación, también se generan graves impactos ambientales sobre ecosistemas únicos que difícilmente se recuperarán. Ante esta situación, el reciente Acuerdo de París celebrado el 12 de diciembre del 2015 (ONU 2015) en su artículo 2, punto b establece que se debe **“Aumentar la capacidad de adaptación a los efectos adversos del cambio climático y promover la resiliencia al clima y un desarrollo con bajas emisiones de gases de efecto invernadero, de un modo que no comprometa la producción de alimentos”**. Por lo que es muy importante realizar un análisis profundo sobre las ventajas y desventajas de las plantaciones biocombustibles en diversos contextos, para determinar dónde y cuándo son viables, antes de emitir cualquier tipo de juicio sobre las mismas. En el presente documento se realizó una revisión considerando el origen de los biocombustibles, motivos de su uso y desuso, causas de su resurgimiento actual y perspectivas futuras en un contexto internacional y nacional, así como, estudios de caso nacionales, con el fin de analizar fortalezas y debilidades de las plantaciones con fines biocombustibles, a fin de comprender su panorama actual en el contexto del desarrollo sostenible y su mejor futuro.

La materia prima para un biocombustible

Se considera como biocombustible a todo aquel carburante sólido, líquido o gaseoso que se obtiene a partir de materia orgánica. Esta materia prima pue-

de estar conformada por un cultivo oleaginoso (rico en aceite), fibroso (fibras de plantas secas o madera) o algas; pero también puede estar integrado por residuos de cosechas (cáscaras de frutos, pulpas y cáscaras de semillas) o residuos animales (grasa, pelo y estiércol). En este documento sólo se consideraron los cultivos oleaginosos o fibrosos cuyo único uso sea la producción de aceites industriales, gases o la destilación para aplicaciones biocombustibles. La Figura 1 presenta los dos principales biocombustibles comerciales, sus materias primas de primera generación y los usos más destacados.

Historia de los biocombustibles

El uso de fibras y aceites vegetales con fines biocombustibles se remonta a más de 1.8 millones de años, cuando el *Homo erectus* usaba leña y fibras secas para encender hogueras (Adler, 2013). Sin embargo, el inicio comercial de los biocombustibles más bien se podría asociar a la siembra de oleaginosas para extraer aceite y usarlo como carburante. En este caso, se ha documentado la domesticación de higuierilla (*Ricinus communis* L.) y uso de su aceite como carburante en el antiguo Egipto unos 4000 años a.C.; así como, del olivo (*Olea europaea*) y ajonjolí (*Sesamum indicum*) cuyos aceites se usaban para los mismos fines en medio oriente y mediterráneo 2500 años a.C. (DiLaura 2008; Grieve 2014; Hirst 2015). Aunque es importante recalcar que los aceites de estas plantas también eran utilizados con fines medicinales, cosméticos y alimenticios, por lo que su siembra tenía múltiples propósitos y no es posible afirmar que estas plantaciones tuviesen como finalidad principal la obtención de biocombustibles.

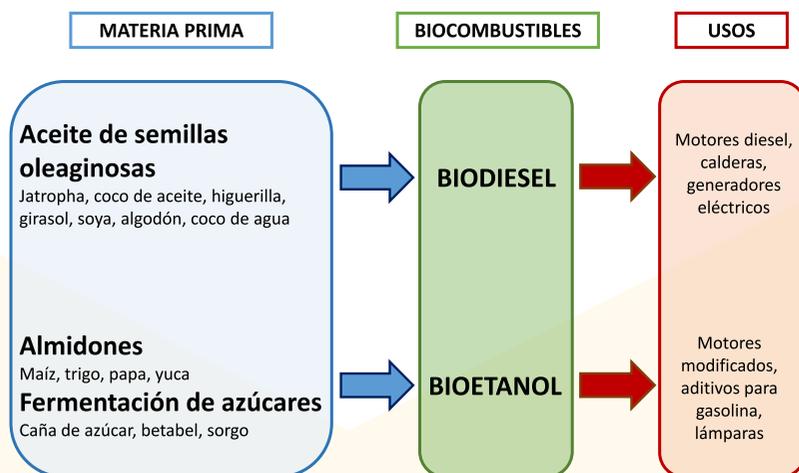


Figura 1. Principales biocombustibles de primera generación: sus principales materias primas y aplicaciones.

Cuando las energías no renovables casi desplazaron a los biocombustibles

Desde la edad antigua hasta el siglo XIX los aceites vegetales y la madera continuaron utilizándose ampliamente como combustibles; la madera principalmente para generar calor y cocción de alimentos, y los aceites para iluminación; aunque el uso de grasas animales, en especial el aceite de ballena, era más común para este fin (DiLaura 2008). Desafortunadamente no existían métodos sostenibles que moderasen la extracción de la madera ni del aceite de ballena, lo que llevó a la tala inmoderada de grandes extensiones de bosques y casi desaparición de las ballenas (Webb y Coates, 2012). Posteriormente, con el advenimiento de la era industrial a partir del siglo XIX, se encontró que el carbón mineral y el petróleo poseían mayor capacidad para satisfacer el incremento de la demanda energética ocasionado por máquinas de vapor, los sistemas públicos de alumbrado y calefacción en los cada vez más grandes y abundantes edificios (DiLaura, 2008; Webb y Coates, 2012). Esto redujo considerablemente la presión sobre las fuentes animales y vegetales, y se puede decir que a partir de allí se inició una nueva era, la del uso de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas) como principales fuentes de energía. Aunque el carbón y el petróleo ya eran ampliamente utilizados a principios de 1900, los biocombustibles aún jugaban un papel importante por aquella época, pues todavía se consideraban viables para ser usados en los sistemas de transporte. Fue así que el primer motor diesel se probó con aceite de cacahuete (*Archis hipogea* L.) durante la feria internacional de París en 1900; y el modelo T de Henry Ford, presentado en Estados

Unidos en 1908, fue diseñado para usar etanol (Webb y Coates, 2012). Sin embargo, el empuje de la creciente industria petrolera y elección final de los fabricantes de motores de combustión interna por el diesel y gasolina derivados de petróleo, desplazó los biocombustibles como fuentes energéticas dominantes a nivel mundial (Luna, 2014).

El origen de las plantaciones biocombustibles: inicios del bioetanol y biodiesel

Durante la primera mitad del siglo XX numerosos conflictos nacionales y las dos guerras mundiales causaron escasez de combustibles fósiles, especialmente en los países que no tenían reservas petroleras, lo cual orilló a repensar la conveniencia del uso de biocombustibles. De esta manera durante la segunda guerra mundial se realizaron múltiples trabajos de investigación, tanto en Sudamérica como en las colonias europeas de África y Asia, así como, en China y Japón, sobre mezclas de gasolina con etanol, uso de otros complementos y sustitutos de la gasolina y diesel mediante diversos aceites, tales como, los de palma, algodón (*Gossypium* sp.) y soya (*Glycine max*). Un artículo de 1942 sobre el uso de aceite de palma trans-esterificado como combustible para un autobús en Bruselas, Bélgica, podría ser el primer reporte científico sobre biodiesel comercial (Knothe, 2001), sin embargo, con el regreso de la disponibilidad y normalización de los precios del petróleo estas investigaciones perdieron impulso (Abdulkareem *et al.*, 2012; Webb y Coates, 2012).

Posteriormente la crisis por el embargo petrolero de 1973, la revolución iraní de 1979 y la guerra del Golfo Pérsico en 1990, tuvieron un fuerte impacto sobre los precios del petróleo, que se elevaron debido a la escasez del producto. La reacción de algunos países como Brasil y Estados Unidos ante estas crisis condujo al establecimiento de nuevas políticas para garantizar sus propias fuentes de energía, a fin de reducir o de ser posible eliminar la dependencia hacia un producto importado (Webb y Coates, 2012). Ante estos acontecimientos y teniendo disponibilidad de excedentes en la producción de ciertas semillas, para 1983 en Sudáfrica se perfeccionó el uso del aceite trans-esterificado de girasol (*Helianthus annuus* L.) como biodiesel de alta calidad y en 1989, una compañía austriaca instaló en ese país la primera planta industrial de biodiesel a base de semillas de canola o colza (*Brassica napus* L.), con una capacidad de procesamiento de 30 mil t año⁻¹ (Sorda *et al.*, 2010; Abdulkareem *et al.*, 2012).

Algunas experiencias internacionales: el caso de Brasil

Tras la primera crisis petrolera, Brasil, un país importador de petróleo, inició en 1975 el programa gubernamental PROÁLCOOL, con el objeto de promover mediante subsidios el uso de una mezcla de gasolina con etanol anhidro obtenido de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) como combustible para los automotores. Esto fue posible gracias a los excedentes de la producción de caña de azúcar en el país, cuyo clima tropical le permite alta productividad sin inversiones en riego, lo que reduce considerablemente los costos del etanol en comparación con la gasolina. Para 1980 el gobierno de Brasil, además de continuar con su apoyo a la expansión del cultivo de la caña e industria destiladora, inició y promovió el uso de vehículos con etanol

como único combustible, los cuales fueron desarrollados mediante investigaciones financiadas con fondos públicos (Sorda *et al.*, 2010; Webb y Coates, 2012). Estas medidas incrementaron fuertemente la superficie dedicada a la producción cañera, que pasó de 1.4 millones de hectáreas en 1960 a siete millones en 2007 (Martinelli y Filoso, 2008). Entre los años 2008 a 2013, la superficie sembrada se incrementó a 8.5 millones de hectáreas, actualmente gran parte de las plantaciones de caña de azúcar en Brasil tienen como finalidad la producción comercial de etanol (Pitta *et al.*, 2014). Aunque un efecto negativo del incremento en la superficie cultivada de caña de azúcar ha sido que los cultivos de soya se han desplazado hacia regiones selváticas, lo cual ha incrementado de manera importante la deforestación y pérdida de fracciones de selva amazónica; misma que a su vez ha generado problemas de desplazamiento de diversos grupos indígenas. Por otra parte, el financiamiento y subsidio al monocultivo han estimulado la especulación financiera con las tierras y la expansión de la frontera agrícola con monocultivos que contribuye a agravar la crisis alimentaria en la población indígena y rural, que depende de cultivos de subsistencia (Martinelli y Filoso, 2008; Pitta *et al.*, 2014).

El caso de Estados Unidos

En 1974, después de la primera crisis petrolera, Estados Unidos promovió la primera legislación para el uso del etanol y otros materiales orgánicos como combustibles. Para 1978 se inició el subsidio de 40 centavos por galón a las mezclas de gasolina con al menos 10% de alcohol vegetal, llegando a 54 centavos en 1990 con subsidios adicionales a los empresarios de la industria etanolera. Para el año 2004 se crea otro incentivo de 50 centavos por galón para el uso de biodiesel. Aunque siendo Estados Unidos un país productor de petróleo, los bajos precios de éste no fueron muy favorables para el desarrollo de la industria del etanol; por lo que fueron las regulaciones ambientalistas las que mayormente contribuyeron al impulso de los biocombustibles. Entre estas regulaciones destacan las que en 1992 y 1995 ordenaron el uso de oxigenantes para gasolina a base de etanol, con la finalidad de controlar las emisiones de monóxido de carbono en ciudades con alta contaminación. A diferencia de Brasil y por sus características climáticas, las materias primas para la producción de biocombustibles en Estados Unidos fueron maíz y soya, para el bioetanol y biodiesel respectivamente. Se estima que actualmente entre 30% y 40% de la producción de maíz es utilizada con este fin (Sorda *et al.*, 2010; BirdLife-EEB, 2015), situa-

ción que ha causado polémica, debido a que el precio de este recurso alimentario ha aumentado como consecuencia de estas aplicaciones, generando importantes impactos en los costos de la producción de alimentos a nivel mundial (Webb y Coates, 2012).

El caso de la India

En este país importador de petróleo y con altas tasas de crecimiento se presentó un aumento considerable en la demanda de combustibles, principalmente para la transportación, lo que llevó al gobierno en 2002 a tratar de satisfacerla con una mezcla de etanol de caña y gasolina al 5%. Sin embargo, desde sus inicios la industria química se opuso, ante el temor de un incremento en esta materia prima, dado que la producción nacional de caña no fue capaz de satisfacer el incremento de la demanda alimenticia y energética. A partir de estas experiencias y debido a que la demanda nacional de biodiesel era mayor que la de gasolina, se consideró la obtención de este combustible a partir de semillas no comestibles, como la *Jatropha* (*Jatropha curcas* L.), y para estos fines el gobierno indio fijó una meta de siembra de *Jatropha* de hasta 13.4 millones de hectáreas para el año 2012 (Gmünder *et al.*, 2012). Sin embargo, al 2014 ya se había determinado que la baja productividad e inesperados requerimientos agronómicos de este cultivo generaban altos costos de producción; por lo que muchos productores decepcionados abandonaron su cultivo y han enfocado la investigación a otras especies nativas como el neem (*Azadirachta indica*), mahua (*Madhuca longifolia*) o las pongamias; no obstante aún no se ha logrado determinar si estos cultivos son mejores (Aradhey, 2015). En la actualidad, y a pesar de la baja en los precios del petróleo, debido a las grandes y crecientes demandas energéticas de este país, la India estableció un plan para reemplazar hasta 20% de sus combustibles mediante bioenergéticos (bioetanol y biodiesel) para el 2017. El cultivo más destacado al momento es la caña de azúcar, y mediante la importación y un sistema de reducción de impuestos que permiten a los ingenios la venta de etanol para mezclar con gasolina esperan lograr disponer de 850 millones de litros para mezclar con gasolinas a una tasa del 2.8% (Aradhey, 2015).

La Unión Europea

La introducción de los biocombustibles comerciales en la Unión Europea se inició en 1992, con Francia al liderazgo. Las razones oficiales se relacionaron con la adopción de fuentes energéticas renovables, aunque también fueron los excedentes de producción agrícola

que requerían nuevos mercados los que impulsaron estas directivas. Desde el año 2000, Alemania ha dominado el consumo con 80% de biocombustibles que requiere la Unión (Sorda *et al.*, 2010). Por sus características climáticas la producción local utiliza principalmente el biodiesel fabricado a base de canola. Las directivas sobre biocombustibles del 2003 catalizaron los mercados, al promover unas metas de uso de 2% en 2005 y 5.75% para el año 2010, además de ofrecer subsidios a productores; lo que promovió un rápido incremento en su producción. No obstante, en la Unión Europea también se establecieron regulaciones que limitan el uso de la tierra para cultivos no alimenticios; y aunque para 2007 ya existían alrededor de cuatro millones de hectáreas de cultivos bioenergéticos y el 40% de los aceites estaban destinados a fines biocombustibles, el aumento de la demanda llevó a la Unión a pasar de ser exportadora a importadora de aceites (FE, 2015). Esta situación provocó que a partir del año 2004 algunos países asiáticos como Indonesia y Malasia vieran una oportunidad de mercado y dedicaran grandes extensiones de sus tierras a la siembra de plantaciones de palma de aceite con fines de exportación, causando graves deterioros ambientales al deforestar sus bosques, así como, problemas sociales al incrementarse los precios de las oleaginosas comestibles, puesto que 60% de los aceites para biodiesel que consume la Unión Europea proviene de la canola (USAID-IRG, 2009; FE, 2015). Por lo tanto, a pesar de que las políticas oficiales que impulsaron el uso de los biocombustibles se relacionaron con la protección ambiental mediante una reducción de la emisión de los gases de efecto invernadero y uso de energías renovables, el resultado de la demanda europea resultó catastrófico para muchos ecosistemas en los países productores de materia prima para los biocombustibles. Debido a esto y a las crecientes presiones económicas y ambientalistas, en el año 2015 se establecieron nuevas normas con mayores restricciones para la adquisición de biocombustibles locales o importados (Comission, 2015). De acuerdo con estas normas, para ser considerados como tales, los biocombustibles deben producir al menos 35% menos gases de efecto invernadero que los combustibles fósiles y deben provenir de sitios donde no se atente contra la biodiversidad, que no sean depósitos de carbono y que se hayan sembrado bajo criterios sustentables (Webb y Coates, 2012; Comission, 2015). El Cuadro 1 resume las experiencias con biocombustibles de primera generación reportadas en algunos países.

México ante los biocombustibles

Al ser un país productor y exportador de petróleo, durante décadas México no pareció prestar mucha atención al desarrollo de otras fuentes energéticas. El interés público se dio a conocer a partir de un informe coordinado por la Secretaría de Energía (SENER) y el Banco Interamericano de Desarrollo en el año 2006, en el cual se proponía el desarrollo de energías alternativas como el bioetanol a partir de caña de azúcar, sorgo dulce (*Sorghum spp.*) o yuca (*Manihot esculenta* Crantz), así como el biodiesel a partir de canola, soya y *Jatropha* (Macera *et al.*, 2006). La iniciativa proponía criterios similares a los ya implementados en Estados Unidos y la Unión Europea sobre el uso de biocombustibles como aditivos para gasolinas y diesel que permitieran reducir las emisiones de carbono a la atmósfera. En esta misma dirección, el Congreso de la República aprobó en el año 2008 la "Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos" y la "Ley para el Aprovechamiento Sustenta-

ble de la Energía". Aunque son bastante simples si se comparan con otras legislaciones internacionales sobre biocombustibles, es importante destacar que estas regulaciones contemplan restricciones al desarrollo de los bioenergéticos si se compromete la seguridad alimentaria. Sin experiencia ni infraestructura nacional desarrollada para este fin, es posible que el verdadero interés en impulsar los biocombustibles en el país haya sido más bien un intento por rescatar el campo mexicano en crisis desde 1980, al apoyar mediante incentivos estatales el establecimiento de cultivos bioenergéticos en sitios degradados (Valero *et al.*, 2011), con miras a aprovechar la creciente demanda bioenergética de la comunidad Europea y los Estados Unidos, lo que permitiría a México convertirse en un exportador importante de biocombustibles para estos mercados (Juárez, 2007); o bien, seguir el ejemplo de estos países en cuanto al impulso de un desarrollo tecnológico energético alternativo que permitiera a México salir adelante cuando las reservas petroleras ya no fuesen suficientes.

Las primeras experiencias con plantaciones para biocombustibles en México

En el año 2007 se asignaron los primeros apoyos para inversionistas y productores de biocombustibles otorgados por la SENER y la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) (Conafor, 2007). En este inicio, el uso del etanol no se promovió, dado que proviene de la caña de azúcar y este cultivo entra en la categoría de alimento, por lo que su utilización va en contra de la Ley de los Bioenergéticos. A cambio se otorgó promoción principalmente al cultivo de *Jatropha*



Cuadro 1. Principales experiencias reportadas por la comunidad internacional con plantaciones biocombustibles de primera generación.			
Región o país	Cultivos utilizados	Experiencias negativas	Experiencias Positivas
América			
Argentina (1)	Soja (biodiesel) y caña de azúcar (bioetanol)	<p><u>Socioeconómicas</u> 85% de la producción del biodiesel está en manos de grandes empresas, por lo que hay baja participación de pequeños y medianos productores. La Orden Ministerial Española de 2012 frena la entrada de biodiesel argentino a Europa.</p> <p><u>Ambientales</u> Se fomenta la agricultura de grandes extensiones de monocultivos intensivos y transgénicos.</p>	<p><u>Socioeconómicas</u> La exportación de biodiesel de soja genera fuertes divisas al país. Se ha desarrollado una buena cadena productiva para bioetanol y biodiesel vinculada con empresas petroleras para la mezcla con derivados del petróleo, con control por parte del Estado para garantizar precios.</p> <p><u>Ambientales</u> Con fines ambientales la legislación establece que naftas y diesel contengan al menos 5% de biocombustibles (bioetanol o biodiesel).</p>
Brasil (2, 3)	Caña de azúcar (bioetanol) Jatropha y Ricino (biodiesel)	<p><u>Socioeconómicas</u> En caña de azúcar los grandes extensionistas abusaron de la mano de obra indígena, femenina e infantil. En el cultivo de higuera hay inestabilidad de precios y falta de inversión privada.</p> <p><u>Ambientales</u> La producción a gran escala de la caña genera impactos adversos por uso de agroquímicos y quema. Deforestación de grandes áreas boscosas.</p>	<p><u>Socioeconómicas</u> Políticas de apoyo a los biocombustibles que promovieron también la inclusión y desarrollo regional. Mayor diversificación productiva e incremento de las exportaciones agrícolas.</p> <p><u>Ambientales</u> Se ha generado una mayor conciencia de los servicios ambientales de las selvas y se han creado nuevas leyes para protegerlas.</p>
Estados Unidos (4, 5)	Maíz, sorgo, soya	<p><u>Socioeconómicas</u> Incremento de precios en productos alimenticios a base de maíz y soya.</p> <p><u>Ambientales</u> Mayor consumo hídrico para riego. Pérdida de biodiversidad. Aumento de cultivos transgénicos.</p>	<p><u>Socioeconómicas</u> Mayores ingresos para los productores de los cultivos. Generación de empleos por nuevas industrias.</p> <p><u>Ambientales</u> Menor emisión de contaminantes en las ciudades.</p>
Unión Europea			
Francia y Alemania (4, 5, 6)	Betabel, granos diversos, Canola	<p><u>Socioeconómicas</u> Encarecimiento de los granos comestibles destinados a biodiesel. Encarecimiento de las tierras</p> <p><u>Ambientales</u> Pérdida de tierras y de biodiversidad por el cultivo de biocombustibles.</p>	<p><u>Socioeconómicas</u> Se estimuló la producción agrícola, se lograron mayores ingresos para los productores.</p> <p><u>Ambientales</u> Surgieron nuevas regulaciones para proteger los ecosistemas dentro y fuera de la Unión.</p>
Asia			
India (5, 7)	Caña de azúcar, Jatropha	<p><u>Socioeconómicas</u> Fuertes pérdidas para los campesinos que invirtieron en nuevos cultivos biocombustibles</p> <p><u>Ambientales</u> Pérdida de selvas y biodiversidad para sembrar biocombustibles.</p>	<p><u>Socioeconómicas</u> Se fomentó una menor dependencia económica de hidrocarburos Se estimuló el desarrollo rural sustentable</p> <p><u>Ambientales</u> Se creó un programa para monitorear la salud de los ecosistemas afectados.</p>
Indonesia y Malasia (8, 9)	Palma de aceite	<p><u>Socioeconómicas</u> Comunidades pequeñas han perdido sus tierras ante grandes agro-empresarios</p> <p><u>Ambientales</u> Pérdida de selvas, biodiversidad y especies únicas por siembra de biocombustibles.</p>	<p><u>Socioeconómicas</u> Subsidios estatales a los productores estimularon la agroindustria.</p> <p><u>Ambientales</u> Bajo criterios sustentables en algunos casos podría haber reducción de emisiones de carbono al ambiente.</p>

Fuentes: (1) (Viana Leite, 2013), (2) (Viana Leite, 2013), (3) (Ferrari Putti et al., 2014), (4) (Sorda et al., 2010), (5) (Webb y Coates, 2012), (6) (Comisión, 2015), (7) (Gmünder et al., 2012), (8) (Mukherjee y Sovacool, 2014), (9) (USAID-IRG, 2009).

(Veracruzanos, 2010), que no era conocida por sus usos alimenticios. Desafortunadamente no se previeron otros aspectos igualmente importantes, como la falta de experiencia agronómica en el cultivo de esta especie, la baja productividad de los materiales sembrados y la ausencia de una infraestructura local para la conversión energética; por lo que los costos de producción de estos primeros biocombustibles se elevaron considerablemente, aunado al hecho de que no existían mercados nacionales para estos nuevos productos, puesto que la paraestatal Petróleos Mexicanos (PEMEX) nunca utilizó los biocombustibles como aditivos en sus productos, tal como se había planteado en un inicio, lo que generó una falta de mercado y terminó decepcionando tanto a inversionistas privados como a los gobiernos estatales que decidieron apostar por ellos (Valdés-Rodríguez *et al.*, 2014). En cuestiones ambientales, aunque las siembras no fueron en gran escala, los incentivos económicos otorgados al cultivo de biocombustibles provocaron que algunas tierras asignadas a cultivos prioritarios como el maíz fueran empleadas para la siembra de *Jatropha*, y en otros casos, terrenos con vegetación primaria fueron deforestados, resultando que no se cumplieran los propósitos de sustentabilidad alimentaria y ambiental esperados (Skutsch *et al.*, 2011).

El recuento y la situación actual

Es reconocido que el incremento en la demanda de biocombustibles ha ocasionado que algunos países hayan deforestado grandes extensiones de selvas, pastizales y humedales para su cultivo (Martinelli y Filoso, 2008; Webb y Coates, 2012). Investigaciones financiadas por la Comunidad Europea indican que 37 millones de hectáreas de tierras han sido dedicadas a estos cultivos, con una pérdida de biodiversidad estimada en 85%; además de esto, a nivel mundial, 20% de la caña de azúcar y 9% de los granos cultivados se destinan a la producción de biocombustibles, lo que ha ocasionado un aumento sustancial en los precios de estos productos; tan solo Brasil y Estados Unidos utilizan 50% de su producción de caña y 40% de la de maíz respectivamente para la fabricación de etanol, mientras que la Unión Europea utiliza más de 60% de su producción de aceite vegetal para la fabricación de biodiesel (BirdLife-EEB, 2015). Ante esta situación, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y el

Banco Mundial han tenido que recomendar redirigir las políticas que subsidian a los biocombustibles para evitar mayores incrementos en los precios de los alimentos. Por ello la Unión Europea ya modificó sus políticas, a fin de considerar estos aspectos durante la producción y la importación de biocombustibles y ha vetado la importación de aceite de palma de Asia, por sus efectos ambientales adversos (USAID-IRG, 2009; FE, 2015).

Perspectivas futuras: segunda y tercera generación de biocombustibles

De lo expuesto en los puntos anteriores se puede afirmar que las experiencias con grandes plantaciones de biocombustibles han sido desalentadoras y han causado más efectos ambientales negativos que positivos, por lo que los principales demandantes de biocombustibles, como Estados Unidos y la Comunidad Europea, han puesto sus expectativas en los llamados biocombustibles de segunda y tercera generación (Figura 2), los cuales emplean como materia prima componentes orgánicos diversos, que se caracterizan por no competir con el sector alimenticio y la mayoría constituye material actualmente considerado de desecho; por lo cual esta opción abre nuevas perspectivas y posibilidades para el desarrollo de tecnologías basadas en biocombustibles con múltiples beneficios ambientales.

La perspectiva mexicana

Aunque los resultados de las primeras experiencias con los biocombustibles no fueron las esperadas para el campo mexicano, los centros de investigación sí se han beneficiado de los apoyos otorgados por el gobierno,

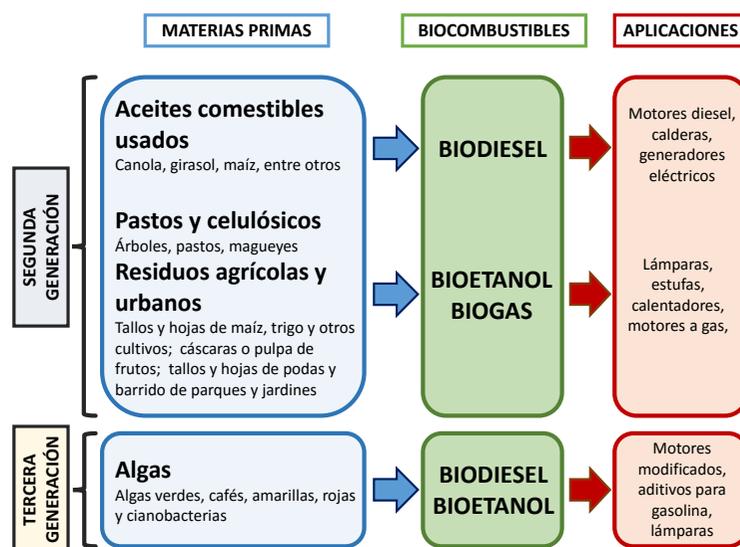


Figura 2. Biocombustibles de segunda y tercera generación y sus aplicaciones. Adaptado de (USAID-IRG, 2009; Naik *et al.*, 2010).

ya que a partir de esta época se iniciaron muchas investigaciones en diferentes vertientes de los biocombustibles. En el caso de la caña de azúcar, la reducción en la demanda de azúcar a nivel industrial por las nuevas imposiciones fiscales podría abrir una brecha hacia el uso de este cultivo para la producción de etanol. Sin embargo, esta situación no resuelve los efectos adversos de su cultivo y producción industrial, tales como, la quema previa a la cosecha, uso de agroquímicos y generación de efluentes contaminantes sólidos, líquidos y gaseosos durante el proceso productivo, por lo que aun se requiere mejorar la Ley de Promoción de los Bioenergéticos, para considerar todas las externalidades que éstos provocan. El cultivo de otras especies para la producción de biodiesel, como *Jatropha curcas* y *Ricinus communis* sigue estando bajo estudio, pero esto debe hacerse con una visión de uso ampliada, más orientada a satisfacer necesidades locales de diversificación productiva que contribuyan a incrementar los ingresos económicos, considerando también las opciones alimenticias, medicinales y culturales que estas plantas tienen, en especial para la *Jatropha*, ya que actualmente se evalúan biotipos no tóxicos o con bajos contenidos de ésteres de forbol, que se utilizan de manera tradicional en la zona del Totonacapan (Veracruz y Puebla) y que podrían ser fuente de alimento (Valdés Rodríguez et al., 2013).

CONCLUSIONES

De acuerdo con la evolución en el uso de biocombustibles y sus consecuencias a nivel mundial, y especialmente en el caso mexicano, es evidente que urge una reconsideración en las políticas y acciones aplicadas por quienes dirigen los planes de desarrollo económico del país. El análisis de los aspectos benéficos y adversos del uso de cultivos con fines biocombustibles tiende a estar inclinado hacia estos últimos, principalmente por la competencia con el uso de tierras para la producción de alimentos, que han genera-

do incremento en los precios de los básicos para el consumo humano, tales como, maíz y azúcar. Los efectos ambientales negativos ocasionados durante el proceso de cultivo y producción superan los beneficios de la reducción de emisiones contaminantes. La opción económica, social y ambiental más apropiada, sería la utilización de materiales de desecho o el cultivo intensivo de algas (biocombustibles de segunda y tercera generación), ya que éstos resuelven un problema ambiental, además de generar un producto útil (USAID-IRG, 2009); también, el uso de especies oleaginosas como *Jatropha curcas* y *Ricinus communis*, sólo se recomienda en forma de cercos vivos o asociados con otras especies, donde no sean la fuente principal de los ingresos, sino que, contribuyan a incrementar las ganancias de los productores rurales, quienes además deberán de contar con tecnologías de bajo costo que permitan realizar extracción de aceites y su aprovechamiento para

Cuadro 2. Retos y potenciales de biocombustibles de primera generación para México.

Combustible	Retos	Potencialidades
Bioetanol	<p>Implementar una legislación para promover el uso del bioetanol en el país.</p> <p>Proteger los suelos con alto valor agrícola contra la siembra de biocombustibles,</p> <p>Mejorar los procesos agrícolas para evitar el exceso de agroquímicos y riego que resultan en costos ambientales mayores a los de las energías no renovables</p>	<p>La huella hídrica del bioetanol es menor que la del biodiesel, por tener una conversión energética más eficiente.</p> <p>La gran diversidad climática, altas horas de luz y prácticas culturales con policultivos brindan mayores oportunidades de diversificación productiva que podrían aprovecharse para establecer cultivos asociados con menores impactos ambientales.</p>
Especies potenciales	<p>Baja eficiencia de conversión hídrica y energética</p> <p>Sorgo dulce</p>	<p>Alta eficiencia de conversión hídrica y energética</p> <p>Betabel, papa y caña de azúcar</p>
Biodiesel	<p>Se requiere implementar una legislación para promover el uso del biodiesel en el país.</p> <p>Mejorar procesos agrícolas y de conversión de energía para reducir costos energéticos del biodiesel.</p>	<p>Las emisiones del biodiesel son menos contaminantes que las del diésel derivado de hidrocarburos.</p> <p>Cuando el aceite proviene de plantas perennes, éstas pueden funcionar también como depósitos de carbono y conservar suelos.</p>
Especies potenciales	<p>Baja eficiencia de conversión hídrica y energética</p> <p><i>Jatropha</i>, maíz</p>	<p>Alta eficiencia de conversión hídrica y energética</p> <p>Soja, canola y palma de aceite.</p>

Fuentes: (Gerberns-leenes et al., 2009; Nolte et al., 2014).

satisfacer demandas energéticas locales. Lo que finalmente sería una estrategia más acorde con el enfoque de la sustentabilidad energética verdadera.

LITERATURA CITADA

- Abdulkareem A.S., Jimoh A., Afolabi A.S., Odigire J.O., Patience D. 2012. Production and characterization of biofuel from non-edible oils: An alternative energy sources to petrol diesel. Pages ISBN 978-953-51-0829-0 in A. Azni Zain, editor. Energy Conversion.
- Adler J. 2013. Why Fire Makes Us Human. <http://www.smithsonianmag.com/science-nature/why-fire-makes-us-human-72989884/?page=1>.
- Aradhey A. 2015. India Biofuels Annual Aug 2013. New Delhi.
- BirdLife EEB, F. y T. 2015. Drivers & Impacts of Europe ' S Biofuel Policy. Bruselas.
- Comission E. 2015. Sustainability criteria. <http://ec.europa.eu/energy/node/73>.
- Conafor. 2007. REGLAS de Operación del Programa Pro Árbol 2008.
- DiLaura D. 2008. A Brief History of Lighting | Optics & Photonics News. http://www.osa-opn.org/home/articles/volume_19/issue_9/features/a_brief_history_of_lighting/#.VfM0L9J_Oko.
- FE (Friends of the Earth). 2015. Europe slams the brakes on biofuels. http://www.foeeurope.org/sites/default/files/agrofuels/2015/briefing_-_the_end_game_on_biofuels.pdf.
- Ferrari Putti, F., N. Macini, and R. Ludwig. 2014. Análisis de la cadena de ricino para la producción de biodiesel. Rev. Cienc. Tecnol.:53-57.
- Gerberns-leenes, W., Y. A. Hoekstra, and T. H. Van der Meer. 2009. The water footprint of bioenergy. PNAS 106:10219-102233.
- Gmünder S., Singh R., Pfister S., Adheloia A., Zah R. 2012. Environmental impacts of *Jatropha curcas* biodiesel in India. Journal of Biomedicine and Biotechnology 2012.
- Grieve M. 2014. A Modern Herbal | Castor Oil Plant. <http://www.botanical.com/botanical/mgmh/c/casoil32.html>.
- Hirst K. 2015. Olive Oil. <http://archaeology.about.com/od/oterms/qt/Olive-History.htm>.
- Juárez S.L. 2007. ¿Cómo llega México a la era de los agrocombustibles? Revista Trabajadores 62:2-9.
- Knothe G. 2001. Historical perspectives on vegetable oil based diesel fuels. Industrial oOls 12:1103-1107.
- Luna R.R. 2014. Una Breve Historia del Petroleo y la sociedad que Decidió explotarlo. <http://masciencia.org/blog/una-breve-historia-del-petroleo-y-la-sociedad-que-decidio-explotarlo>.
- Macera C.O., Rodríguez M.N., Lazcano M.I., Horta N.L., Macedo I. C., Trindade S.C., Thrän D., Probst O., Weber M., Müller-Langer F. 2006. Potenciales y viabilidad del uso del bioetanol y biodiesel para el transporte en México. México.
- Martinelli L.A., Filoso S. 2008. Expansion of sugarcane ethanol production in Brazil: Environmental and social challenges. Ecological Applications 18:885-898.
- Mukherjee I., Sovacool B.K. 2014. Palm oil-based biofuels and sustainability in southeast Asia: A review of Indonesia, Malaysia, and Thailand. Renewable and Sustainable Energy Reviews 37:1-12.
- Naik S.N., Goud V.V., Rout P.K., Dalai A.K. 2010. Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 14:578-597.
- Nolte K., Ostermeier M., Schultze K. 2014. Food or Fuel – The Role of Agrofuels in the Rush for Land. German Institute of Global and Area Studies:1-7.
- ONU. 2015. Convención Marco sobre el Cambio Climático. Naciones Unidas, París.
- Pitta F.T., Vinicius C.X., Navarro C., Mendonça M.L. 2014. Empresas Transnacionais e Produção de Agrocombustíveis no Brasil. First edition. Outras Expressões, Sao Paulo.
- Skutsch M., de los Rios E., Solis S., Riegelhaupt E., Hinojosa D., Gerfer S., Gao Y., Masera O. 2011. *Jatropha* in Mexico: Environmental and Social Impacts of an Incipient Biofuel Program. Ecology ad Society 16:11.
- Sorda G., Banse M., Kemfert C. 2010. An overview of biofuel policies across the world. Energy Policy 38:6977-6988.
- USAID-IRG. 2009. Biofuels in asia: An analysis of sustainability options. Bangkok.
- Valdés Rodríguez O. A., Sánchez O.S., Pérez Vázquez A., Caplan J. 2013. The Mexican non-toxic *Jatropha*, food resource or biofuel? Ethnobotany Research & Applications 11:001-007.
- Valdés-Rodríguez O.A., Pérez Vázquez A., Muñoz Gamboa C. 2014. Drivers and consequences of the first *Jatropha curcas* plantations in Mexico. Sustainability (Switzerland) 6:3732-3746.
- Valero P.J., Cortina V.S., Vela V.S. 2011. El proyecto de biocombustibles en Chiapas: experiencias de los productores de piñón (*Jatropha curcas*) en el marco de la crisis rural. Estudios Sociales 19:120-144.
- Veracruzanos. 2010. March. Biodiesel a partir de *Jatropha curcas* en México. Nextfuel. Veracruz, México.
- Viana Leite M.A. 2013. Estado del arte y novedades de la bioenergía en Brasil. Pages 25-104 La Bioenergía en América Latina y el Caribe. OFICINA RE. FAO, (Food and Agriculture Organization), Santiago.
- Webb A., Coates D. 2012. Biofuels and biodiversity 65. (S. of the C. on B. Diversity, Ed.) Secretariat of the Convention on Biological Diversity, Technical Series. Montreal.



PRODUCCIÓN DE PRIMAVERA (*Roseodendron donell-smithii* syn *Tabebuia donell-smithii*), MADERA FINA DEL TRÓPICO

PRODUCTION OF PRIMAVERA (*Roseodendron donell-smithii* syn *Tabebuia donell-smithii*), HARDWOOD FROM THE TROPICS

**Espinosa-Zaragoza, S.^{1*}; Escobar-Sandoval, M.C.²; Meza-Sandoval, B.E.²; Avendaño Arrazate, C.H.³;
Ramírez-González, S.I.¹; López-Báez, O.¹**

¹ Cuerpo Académico de Agricultura Tropical Ecológica. Universidad Autónoma de Chiapas. Facultad de Ciencias Agrícolas. Carretera Costera entronque Huehuetán Pueblo, Huehuetán, Chiapas, México. CP 30660; ² Red de Recursos Genéticos de México REDGENMEX AC. Tapachula, Chiapas, México. ³ Insituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias-INIFAP. Campo Experimental Rosario Izapa, Tuxtla Chico, Chiapas, México.

*Autor para correspondencia: saulez1@gmail.com

RESUMEN

Se describen actividades y costos para establecer plantaciones forestales comerciales de primavera (*Roseodendron donell-smithii* syn *Tabebuia donell-smithii*) en el Soconusco, Chiapas, México, con el fin de identificar las ventajas económicas y comerciales para invertir en plantaciones considerando un análisis financiero. La información obtenida indicó que la asesoría técnica es el costo más alto, y su efecto se reduce conforme la superficie se incrementa. Las plantaciones inician con 1100 árboles ha⁻¹ y se realizan aclareos a los seis años derribando 300 árboles, y otros 400 árboles en el año 12. Durante el desarrollo de la plantación se requiere anualmente por hectárea USD \$953.60, y sólo en los años 6 y 12 se requieren USD \$3,318.40, aunque en el año 12, la venta de madera facilita el sostén financiero de la plantación; y en el año 16 se hace el aprovechamiento total de la plantación con ingresos de USD \$60,900.00 ha⁻¹, consolidando el flujo de efectivo en USD \$75,062.40. El costo de extracción por pie tablar final es de USD \$0.12.

Palabras clave: Madera tropical, Chiapas, *Tabebuia*.

RESUMEN

Activities and costs to establish commercial primavera (*Roseodendron donell-smithii* syn *Tabebuia donell-smithii*) forest plantations in Soconusco, Chiapas, México, are described, with the objective of identifying the economic and commercial advantages to invest in plantations, taking into account a financial analysis. The information obtained indicated that technical consulting has the highest cost, and its effect is reduced as the surface increases. The plantations begin with 1100 trees ha⁻¹ and clearings are performed after six years by felling 300 trees and another 400 trees on year 12. During the development of the plantation, USD \$953.60 are required annually per hectare, and just in the years 6 and 12, USD \$3,318.40 are required, although in year 12 the sale of wood allows the financial support of the plantation; and on year 16, the total exploitation of the plantation takes place, with an income of USD \$60,900.00 ha⁻¹, consolidating the cash flow to the amount of USD \$75,062.40. The extraction cost per final board foot is USD \$0.12.

Keywords: Tropical wood, Chiapas, *Tabebuia*.

Agroproductividad: Vol. 9, Núm. 2, febrero. 2016. pp: 42-49.

Recibido: octubre 2014. **Aceptado:** enero 2016.

INTRODUCCIÓN

La tendencia

mundial del mercado de la madera tiene aspectos contrapuestos en la oferta y demanda; según Vignote y Martínez (2006) la oferta tiende a crecer por el incremento de bosques aprovechables, posibilidad física de vías de comunicación y por capacidad económica (al aumentar el número de especies comerciales y mejorar los costos de aprovechamiento), aunque también colabora el incremento de producción maderera en bosques de repoblación por mejora genética y silvícola. La clonación y la mejora genética están consiguiendo producciones de hasta $90 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ anuales; es decir, multiplican varias veces la producción de hace unas décadas, sin embargo, la opinión pública respecto a la deforestación por tala inmoderada o clandestina y efectos en el cambio climático han motivado la protección de bosques y la superficie con esta condición se incrementa año con año, lo cual impulsa el establecimiento de plantaciones forestales (Vignote y Martínez, 2006). La Federación

Rusa, Brasil y Canadá tienen las mayores reservas forestales, sin embargo, los países con mayor producción son Estados Unidos, Europa y Canadá (SEMARNAT, 2010), respecto a las plantaciones forestales comerciales establecidas destaca Brasil, Venezuela y Perú sumando 6.495 millones de ha (FAO, 2005). En México a pesar de las tendencias de

transformación de los ecosistemas forestales en masas arboladas se presentan algunas limitantes, destacando la deforestación y degradación de ecosistemas que tienen causas múltiples y que responden a la gran variación de condiciones biofísicas y socioeconómicas de cada región (Merino y Segura, 2010). Aunque hay materiales alternativos, el valor de la madera siempre es favorecido y su consumo ha ampliado la demanda, haciendo con ello que las maderas tropicales tengan un auge significativo. La actividad forestal en el trópico como aprovechamientos regulados y en volúmenes significativos en México está en crecimiento sin importar que aún

se entrega como materia prima sin valor agregado que permita incremento de ingresos a los productores. Un factor en desventaja es la tala clandestina que reduce la disponibilidad de germoplasma, ya que se cortan los mejores árboles, así como, falta percepción social para entender a las plantaciones forestales como una medida para reducir la tala en bosques y selvas naturales.

Se estima que hasta 2008, las Plantaciones Forestales comerciales tropicales (PFC) cubrían una superficie de 83 mil hectáreas en México, equivalente a 83% del total de superficie plantada, sobresaliendo los géneros *Cedrela odorata*, *Swietenia macrophylla*, *Eucalyptus* sp., *Tectona grandis* y *Gmelina arborea*. Los dos primeros géneros son las dos especies nativas más importantes de México por su valor en el mercado. El género *Eucalyptus* incluye más de diez especies que se han plantado tanto en la zona tropical como en la zona templada, pero *E. urophylla* y *E. grandis* son las especies tropicales más importantes y cubren la mayor proporción de superficie plantada. *Tectona grandis* y *Gmelina arborea* son especies introducidas muy populares para el establecimiento de plantaciones forestales comerciales en México. Sin embargo, además de las especies mencionadas, existe una amplia variedad de especies tropicales (más de 40) que se han plantado en las zonas tropicales en una superficie de

alrededor del 15% del

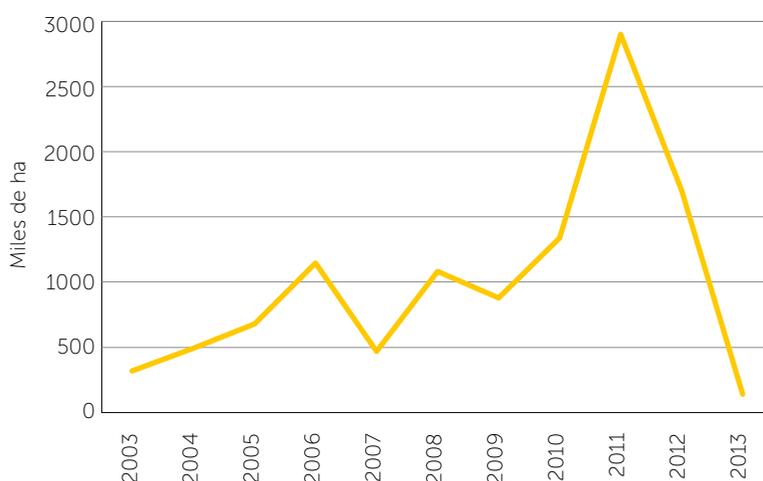


Figura 1. Distribución de la superficie plantada en Plantaciones Forestales Comerciales en Chiapas. Elaboración propia con información de CONAFOR, 2014.

total (Velázquez, 2011). Chiapas, México, ha incrementado su superficie forestada desde 2003, impulsado principalmente por los programas de la Comisión Nacional Forestal, alcanzando en 2013 11,475 ha, que representa 6.9% de las PFC de México (Figura 1) (CONAFOR, 2014a); de acuerdo a CONAFOR (2014b) las especies plantadas en Chiapas son: cedro (5967 ha), teca (1,982 ha), roble (*Tabebuia rosea*) (505 ha), gmelina (503 ha) y caoba (502 ha). Adicionalmente, Velázquez (2011) menciona que las superficies plantadas pueden ser superiores hasta 10% debido a que las PFC establecidas sin apoyos de gobierno quedan fuera de las estadísticas oficiales. La especie

Roseodendron donell-smithii syn *Tabebuia donell-smithii*, conocida como primavera, es endémica de Chiapas, y su mercado ha aumentado debido a la blancura de su madera y facilidad para hacer muebles. Con este antecedente resulta importante conocer las ventajas económicas y comerciales que representa para invertir en producirla (Gómez y Ramírez, 1998) considerando un análisis financiero, y por ello, se muestra la información financiera mínima de referencia para decidir su inversión en región Soconusco, Chiapas, México.

MATERIALES Y MÉTODOS

La información fue recolectada, integrada y analizada en tres etapas; la primera etapa fue la obtención de información en fuentes primarias, se hicieron entrevistas con cinco funcionarios del sector forestal y diez encuestas entre las personas relacionadas con la actividad forestal. Se llevaron a cabo mediciones in situ de diez plantaciones de primavera para obtener datos de productividad en Municipios de Cacahoatán, Huehuetán, Tapachula y Tuxtla Chico, Chiapas (región Soconusco) con la colaboración de la Asociación Regional de Agrosilvicultores del Estado (AGROSILVECH A.C.). Las consideraciones técnicas aplicadas fueron recolectadas a partir de prestadores de servicios técnicos forestales. La segunda etapa integró la información para describir el sistema de producción y cuantificar los costos, y para su desagregación por equipos, herramientas utilizadas se hizo la cotización de venta al menudeo y mayoreo de cada pieza, así mismo, se determinaron costos y actividades del ciclo de producción y analizaron ingresos y egresos. Con lo anterior, se determinó el flujo de efectivo e indicadores financieros

tales como, tasa Interna de retorno (TIR), valor actual neto (VAN), relación beneficio costo (RBC).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Sistemas de producción de primavera

La primavera (*R. donell-smithii* Rose) se produce principalmente en los municipios de Tapachula, Tuxtla Chico, Huehuetán y Cacahoatán en plantaciones forestales comerciales para producción de madera exclusivamente, y en sistemas agroforestales (SAF, producción de madera, sombra y humedad a cultivos agrícolas). En los SAF se produce la mayor cantidad de madera de esta especie en la región debido a su asociación con cafetales, sin embargo, en la última década se ha plantado primavera en PFC lo cual implica mayor atención a la rentabilidad, cuyo objetivo principal es producir madera. Otras condiciones de los SAF es que aunque funcionan como aportadores de bienes y servicios ambientales y representan ingresos por el cultivo agrícola asociado se incrementan los costos de aprovechamiento por las dificultades al momento del derribe, arrimo y transporte de madera.

Establecimiento y manejo de la plantación

En las plantaciones establecidas con la intención de aprovechamiento maderable los árboles son producidos en vivero utilizando semillas recolectadas de individuos sobresalientes (buen diámetro, altura, fuste limpio), en algunos casos, principalmente cuando se aprovechan programas de apoyo de gobierno para esta actividad se descuida la calidad de la planta. La recolecta de semilla se lleva a cabo durante enero a marzo, se siembran, y tres meses

después están listos los árboles para ser trasplantados. El marco de plantación es de 3x3 m, con cavado de cepas. La aplicación de fertilizante a los árboles es poco común. Se poda una vez por año tratando de asegurar la rectitud del tallo.

Una parte importante del manejo de las plantaciones es el aclareo, práctica que elimina a los individuos con formación inadecuada (árboles que crecen de lado o bifurcados), enfermos o con daños severos. Esta práctica se hace a los 6 y 12 años, aunque puede variar según el criterio del técnico a cargo considerando su tasa de crecimiento. En plantaciones con alta densidad, el crecimiento se favorece durante los primeros años por la competencia por luz favoreciendo el crecimiento recto del tallo, y posteriormente, los aclareos sirven para reducir dicha competencia y con ello incrementar el diámetro de los árboles. El control de malezas se hace dos o tres veces por año hasta los cinco o seis años para evitar que sobrepasen la altura de los árboles y reducir así la competencia por espacio y nutrimentos. A partir de 16 años de la plantación, se inicia el aprovechamiento final y se puede iniciar un nuevo proceso.

Rentabilidad de la producción de madera

A la fecha existe información escasa y poco precisa respecto a la producción forestal, y la obtenida fue contrastante. Para efectos prácticos se describen los resultados haciendo referencia a una superficie en producción de una hectárea (ha). Algunos factores que pueden ocasionar divergencias respecto a otra información reportada es la siguiente: costo de los productos y servicios (insumos, asesoría técnica, mano de obra, entre otros); actividades del

manejo identificadas y agregadas de manera diferente por autor; poco detalle de los costos de inversión y aplicación de mano de obra familiar que no se considera en el análisis financiero; y las diferencias propias de los sistemas de producción (PFC/SAF). Según Navarro (2007) para producir pino (*Pinus* sp.) en Costa Rica se requieren USD \$100 (de establecimiento hasta aprovechamiento), en contraste, en Chiapas en una PFC de primavera se requieren USD \$1,560.64. Respecto al monto total de la inversión para la primavera se requieren un total de USD \$19,338.00, y en países como Colombia, Martínez y Martínez (2005) estimaron costos para el establecimiento de producción de madera en SAF por USD \$503.00.

La información obtenida indica que uno de los costos más altos es la asesoría técnica, y su efecto se reduce conforme la superficie aumenta. Las plantaciones inician con una densidad de 1100 árboles ha^{-1} y se realizan aclareos de 300 y 400 árboles a los seis y 12 años respectivamente. Durante el desarrollo de la plantación se requieren anualmente \$ 11,920.00 por hectárea (USD \$953.60), sólo en los años 6 y 12 se requieren \$41,480.00 (USD \$3,318.40) debido al pago de los aclareos, y en año 12, la venta de madera producto del aclareo facilita el sostén financiero de la plantación. Finalmente en el año 16 se hace el aprovechamiento total de la plantación con ingresos estimados de \$761,400.00 (USD \$60,900.00) por hectárea. Consolidando el flujo de efectivo en \$930,280.00 (USD \$75,062.40). Cabe señalar que debido al poco volumen aprovechado en este aclareo el costo de extracción por pie tablar es de \$2.90 (USD \$0.23), para el año 6 de \$0.17 pesos, y para el año 12 de \$0.12 en el aprovechamiento final.

El Cuadro 1 muestra los indicadores financieros, destacando la RBC de 1.95 en turno a 16 años con tasa de actualización de 3%, y tasa de descuento de 15%. Velazquez (2011) indica que primavera tiene un turno de 12 años en Veracruz, México, cuyos indicadores económicos son la RBC de 2.01 y TIR de 21.24. Zamudio et al. (2010) en un estudio efectuado en México reportaron en el caso de bracatinga (*Mimosa scabrella* B.) reportó una RBC de 2.32, y tasa de actualización de 4.7%, más tasa

de descuento de 8.79%. La superficie cultivada como plantación comercial de primavera presentó su punto de equilibrio en 48,345.45 pies tablares a \$1.59 pesos por pie tablar (0.13 USD/pT).

Contexto de la producción de primavera en la costa de Chiapas

Red de valor. Aunque las actividades forestales en el Soconusco, Chiapas son registradas incipientemente, históricamente han tenido participación relevante como proveedoras de madera para la actividad mueblera regional; primavera (*R. donell-smithii*), cedro (*Cedrela odorata*), roble (*Tabebuia rosea*) y tepemixtle (*Nectandra* spp.) son las especies más comunes empleadas en la Región para este fin. En la Región Soconusco, se identificaron actividades prioritarias para mejorar las condiciones de la red de valor en un esquema de sistema producto conforme a sus componentes:

Logística interna: i) Elaboración de un inventario y plan de integración de la infraestructura disponible previendo su operación y administración, considerando productos, materiales y servicios para producir y manejar madera; ii) Organización para la generación de empresas integradoras para reducir

costos de materiales, equipos e insumos; iii) Gestión de recursos mediante un plan de desarrollo y mantenimiento de infraestructura; iv) Apoyo en el marco de políticas sectoriales y; v) Integración de recursos humanos con capacidades técnicas en las organizaciones de silvicultores para asesorar adecuadamente la planificación y puesta en marcha de proyectos de inversión forestal.

Las estrategias anteriores corresponden a políticas sectoriales y se puede encontrar su alineación en documentos tales como, "Integración de cadenas agroalimentarias" publicado por FAO-SAGARPA (2004) donde se destaca la importancia de ordenar las cadenas productivas en función de mercados y en asociaciones de estratos identificados como "clúster".

Operaciones: i) Gestión de recursos mediante un plan de desarrollo y mantenimiento de infraestructura para atender las actividades de manejo, elección y

Cuadro 1. Indicadores financieros de una hectárea de plantación de *Roseodendron donell-smithii* Syn *Tabebuia donell-smithii*.

Indicador financiero	Valor
Relación Beneficio Costo	1.95
Utilidad por hectárea	470,176.55
Punto de equilibrio (\$Pesos por pie tablar)	1.59
Punto de equilibrio (Pies tablares de producto)	48,345.54
Punto equilibrio (número de árboles ha^{-1})	96
Flujo de efectivo (\$, pesos mexicanos)	930,280.00
Tasa Interna de Retorno (%)	15

mantenimiento de los equipos adecuados para el manejo en función del tamaño de las plantaciones forestales; ii) Desarrollo de la cadena de suministros para actividades especializadas; iii) Seguridad laboral y social para el personal empleado en el manejo forestal; iv) Programas de vinculación con las instituciones para formar recursos humanos en áreas de interés para la cadena productiva.

Logística externa: i) Gestión para la integración del sistema producto forestal; ii) Planificación y gestión para la actualización en esquemas comerciales, tendencias de mercado y sistemas de aseguramiento de la calidad; iii) Desarrollo de servicios de logística y entrega de mercancías asociados a los canales de comercialización forestal y; iv) Uso de tecnologías de la información y rastreabilidad para atender las necesidades de los canales de comercialización forestal.

En el caso de Operaciones y Logística externa, un indicador de eficiencia está ligados a las políticas dictadas por la Secretaría de Economía y que responden a la participación hacia los mercados globales considerando los permisos de movilización y reglamentos para mercancías. La movilización de mercancías y otras políticas dependerán de las necesidades de mercado, lo cual implica la capacitación constante de los prestadores de servicios de la cadena de valor (por ejemplo, la asesoría especializada en aduanas para productos forestales). Se debe considerar en este análisis aspectos indicados por Tolosana *et al.* (2004), quienes señalan que además de los caracteres generales indicados, el mercado de aprovechamientos madereros presenta peculiaridades, entre las que destacan: a) largos turnos o edades de madurez, b) carácter no perecedero de la madera en pie, c) falta de normalización de los productos y multiplicidad de unidades de transacción, y d) existencia de volúmenes importantes ofertados con mecanismos de precios intervenidos o regulados.

Diagnóstico del valor agregado en los productos forestales

Las exigencias y estándares de calidad del mercado, obligan a optimizar los procesos productivos haciéndolos más eficientes para competir. Actualmente existen áreas de oportunidad en los servicios profesionales con especialidad en especies maderables tropicales, se debe aumentar la productividad iniciando con aspectos tecnológicos para aumentar la productividad (volumen/hectárea). Es un buen momento para iniciar programas de mejoramiento genético, producir plantas de calidad y no solo cantidad, así como, implementar métodos silvícolas: es conveniente capacitar con la visión de búsqueda de resultados exitosos y no solo metas de corto plazo. De igual manera, se debe considerar el ordenamiento de la actividad en coexistencia con áreas frutícolas, hortícolas y pecuarias conciliando el manejo de cuencas, empleando áreas por actividad según su vocación de uso.

CONCLUSIONES

Se ha citado con recurrencia la necesidad de planificación de una red de caminos forestales (para reducir el costo de extracción e impacto ambiental al improvisarlos), y desde luego al hacer rentable la actividad, facilitar el combate a la tala

ilegal. Este tipo de prácticas afecta sensiblemente el desarrollo de la actividad forestal, como señala Merino *et al.* (2008) **“Además de la pérdida de recursos económicos que generan a las comunidades dueñas de las tierras forestales, las extracciones irregulares tienen impactos negativos en las condiciones de los recursos forestales, en el capital social local (comunitario y municipal) y en la capacidad de competitividad de los productos regulares de las zonas donde la extracción ilegal alcanza un nivel suficiente para influir en los mercados regionales de madera”**. Así mismo, se debe considerar el desarrollo de la industria facilitando el establecimiento de industrias para proceso, integrando la red de valor y reducir con ello costos de transporte, permitiendo la competencia con importaciones de maderas del mercado extranjero. Las redes de valor como describe Brambila (2008) van dirigidas a consumidores específicos. La competencia actual se empieza a dar, ya no empresa contra empresa, sino red de valor contra red de valor que pretende atender al mismo segmento de mercado. Entre las oportunidades de la región de estudio, se tiene el amplio potencial arbóreo de bosques naturales así como, plantaciones comerciales y sistemas agroforestales, estos últimos de trascendencia ecológica por su aporte en la conservación de suelo, agua y biodiversidad. En este sentido es conveniente traer la reflexión planteada por Landes (2008) refiriéndose a los hombres de negocios, **“...en ocasiones cometen graves errores. Por mucho que se mediten y deliberen, no todas las inversiones son rentables. Pero esto no les ha disuadido jamás de volver a intentarlo. No es la ausencia de dinero lo que frena**

el desarrollo. El impedimento fundamental es la falta de preparación de la sociedad, cultural y tecnológicamente; la ausencia de conocimientos y la falta de pericia. Dicho de otro modo, la falta de habilidad para usar el dinero”.

AGRADECIMIENTOS

Al Sistema Institucional de Investigación de la Universidad Autónoma de Chiapas, a la asociación de Agrosilvicultores del Estado de Chiapas AC (AGROSILVECH) por su apoyo para realizar esta investigación.

LITERATURA CITADA

- Brambila P.J.J. 2008. En el umbral de una agricultura nueva. Universidad Autónoma Chapingo, México. p. 145
- CONAFOR. 2014a. Superficies de plantaciones forestales comerciales maderables. coordinación general de producción y productividad. gerencia de desarrollo de plantaciones forestales comerciales. Nota en línea. www.conafor.gob.mx. Consultado en línea: Mayo de 2014.
- CONAFOR. 2014b. Principales especies maderables establecidas en PFC 2000-2013 (ha). Nota en línea. www.conafor.gob.mx. Consultado en línea: Abril de 2014.
- FAO-SAGARPA. 2004. Proyecto Evaluación Alianza Contigo. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación y Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación FAO – SAGARPA. 2004.. Sagarpa – FAO. Análisis de Políticas Agropecuarias y Rurales, Integración de la Competitividad en Cadenas Agroalimentarias. México, Noviembre 2004.
- FAO. 2005. Informe Nacional de Venezuela. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura. Serie: Latin American Forestry Sector Outlook Study Working Paper. FAO. <http://www.fao.org/docrep/008/j5484s/j5484s00.htm>. Consultado en línea: Abril de 2014.
- Gómez M., Ramírez O. 1998. Metodología para el análisis financiero de concesiones forestales en la Reserva de la Biosfera Maya, Guatemala. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza – CATIE. Turrialba, CR. 56 pp.
- Landes S.D. 2008. La riqueza y la pobreza de las naciones. Traducción al español de Jordán S. Editorial Critica, Barcelona, España, p. 252
- Martínez R., Antonio M., Martínez G.S.S. 2005. Economic And Financial Analysis Of Systems Agroforestales Located In The Municipality Of Valencia Cordoba. Observatorio de Precios y Costos Agrarios de la Zona Noroccidental del Caribe Colombiano.
- Merino L., Segura G. 2010. El manejo de los recursos forestales en México (1992-2002) procesos, tendencias y políticas públicas. INE (Instituto Nacional de Ecología).
- Merino L., Rodríguez J., Ortiz G., García A. 2008. Estudio estratégico sobre el sector forestal mexicano. Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible, A.C. p. 72
- Navarro G.A. 2007. Distorsiones de la Teoría de la economía clásica en relación al cálculo del valor del activo forestal y la escogencia de rotaciones optimas. Economía y Manejo Forestal del Centro Agronómico Forestal de Investigación y Enseñanza (CATIE) Turrialba, Costa Rica.
- SEMARNAT. 2010. Informe de la Situación del Medio Ambiente en México y los Indicadores Básicos del Desempeño Ambiental en México. Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales – SNIARN. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. En línea: <http://www.semarnat.gob.mx/temas/estadisticas-ambientales/snia/Reportes-de-Indicadores>. Consultado en línea: Abril de 2014.
- Tolosana E.E., González G., De Linares V.M., Vignote P.S. 2004. El aprovechamiento maderero. Fundación Conde del Valle de Salazar, Ediciones Mundi-Prensa, p. 22.
- Velázquez M.A. 2011. Situación actual y perspectivas de las plantaciones forestales comerciales en México. Comisión Nacional Forestal CONAFOR. <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/ver.aspx?grupo=5&articulo=3149>. Consultado en línea: Mayo de 2014.
- Vignote P.S., Martínez R.I. 2006. Tecnología de la Madera. 3ª ed. Ediciones Mundi-prensa. Madrid. pp. 24-33, 91, 96, 97 y 99.
- Zamudio S.S.J., Romo L.J.R., Cervantes C.J.O.A. 2010. Evaluación financiera y de riesgo de una plantación forestal comercial de Zihuateutla, Puebla. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 16 (1): 69-78.



Figura 2. Flores de primavera (arriba), este árbol se distingue en los primeros meses del año por su abundante floración de color amarillo (abajo).



Figura 3. La primavera se produce principalmente en sistemas agroforestales, su función es proporcionar sombra, luego de algunos años su madera es aprovechada.

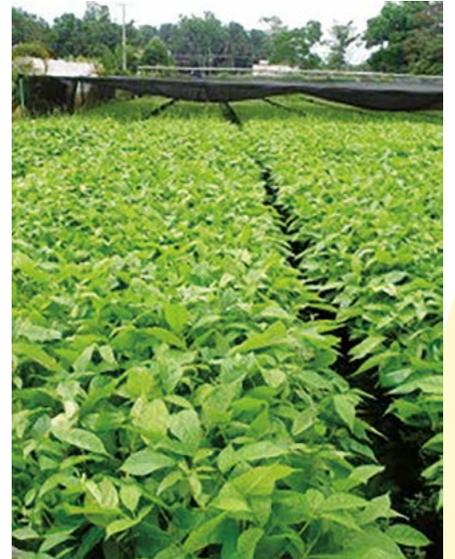


Figura 4. La producción de plantas forestales se hace con diferentes paquetes tecnológicos, en todos se recurre al uso de semillas colectadas regionalmente, un kilogramo de semilla de primavera tiene entre 220,000 y 250,000 semillas.



Figura 5. La primavera (*R. donell-smithii*) es una especie común de la Costa de Chiapas, y es ampliamente aprovechada para producción de muebles.



Figura 6. Madera de primavera (*R. donell-smithii*) preparada para embarque para "flitch" (izquierda), y en cajas secas para su traslado a la República de Guatemala (derecha).



Figura 7. Tablas de primavera dimensionadas en campo con motosierra (izquierda), secado natural de la madera de primavera en talleres (derecha).

USO DE RECURSOS FORESTALES MADERABLES Y NO MADERABLES DEL SISTEMA AGROFORESTAL CACAO (*Theobroma cacao* L.)

USE OF TIMBER AND NON-TIMBER FOREST RESOURCES IN THE CACAO (*Theobroma cacao* L.) AGROFORESTRY SYSTEM

Bautista-Mora, E.¹; Pérez-Flores, J.^{1*}; Ruiz-Rosado O.²; Valdez-Balero, A.¹

¹ Colegio de Postgraduados. *Campus* Tabasco. Periférico Carlos A. Molina, Km 3.5. Carret. Cárdenas-Huimanguillo. H. Cárdenas, Tabasco. C.P. 86500. ² Colegio de Postgraduados. *Campus* Veracruz. Km. 88.5 Carretera Xalapa – Veracruz, Predio Tepetates entre Puente Julia y Paso San Juan, Veracruz, Veracruz C.P. 91690.

*Autor responsable: julianflores@colpos.mx.

RESUMEN

El presente estudio se realizó en el sistema agroforestal cacao (SAF-cacao) en Cárdenas, Tabasco, México para cuantificar el uso de recursos forestales maderables y no maderables (RFM y RFNM) del SAF-cacao. Se establecieron 20 sitios de muestreo de 0.5 ha, cada uno en igual número de SAF-cacao, registrando en cada uno la edad y superficie total, así como las especies arbóreas presentes y las no maderables. Para los RFM se midió el diámetro a la altura de pecho (DAP_{1.3m}) y altura total (Ht). Con estas variables, se calculó el área basal (AB) y volumen con corteza (Vcc, m³ ha⁻¹). El AB y el Vcc se utilizaron para calcular el carbono almacenado en biomasa aérea (CBA, t ha⁻¹). El valor económico del CBA se comparó contra el valor económico de la producción de cacao. Para conocer la producción de cacao (*Theobroma cacao* L.) y el uso de RFNM se entrevistó a los dueños de cada plantación. Se registraron 3,239 árboles, pertenecientes a 56 especies y 27 familias sobresaliendo por su frecuencia *Erythrina americana* (Fabaceae), *Cedrela odorata* (Meliaceae) y *Colubrina arborescens* (Rhamnaceae). Como RFNM se registraron 6,308 plantas de 53 especies agrupadas en 29 familias, y se clasificaron en seis categorías de uso: ornamentales 44%, frutales 28%, hortícolas 25%, medicinales 3%, forrajes 0.01% y especias 0.01%. El 70% de las personas no le da ningún uso a los RFNM, el 20% los consume y 10% los vende. El rendimiento promedio de cacao fue de 962.5 kg ha⁻¹ con ingreso neto de \$ 5475.00 ha⁻¹. El CBA en el SAF-cacao fue de 120.35 t ha⁻¹, con ingreso calculado por venta en \$10,831.00 ha⁻¹.

Palabras clave: Agroecosistema, carbono agroforestal, Tabasco.

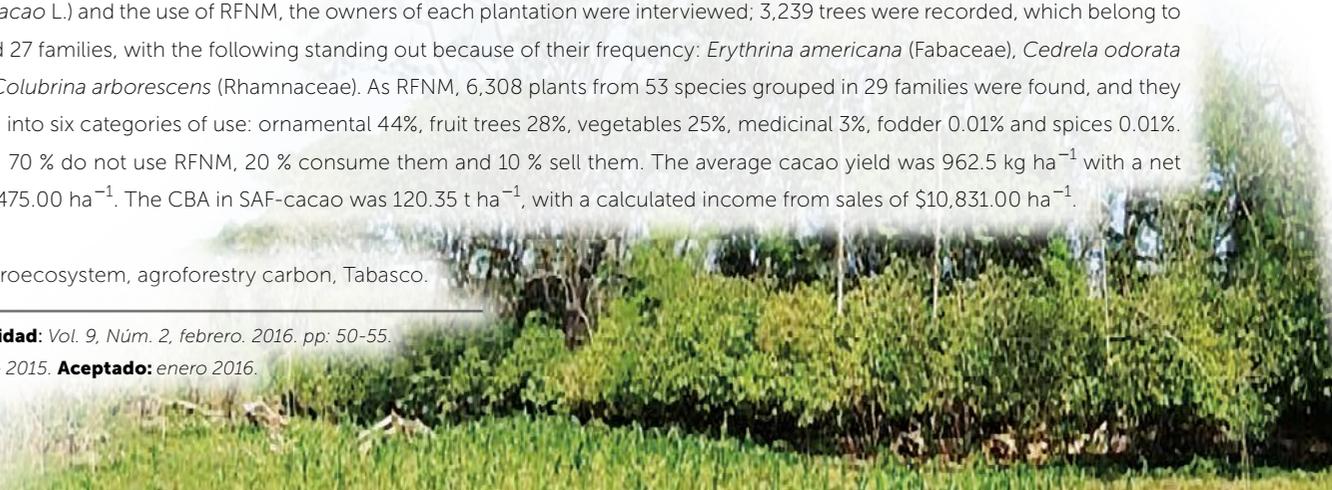
ABSTRACT

This study was carried out in the cacao agroforestry system (SAF-cacao) in Cárdenas, Tabasco, México, to quantify the use of timber and non-timber forest resources (RFM and RFNM) in the SAF-cacao. Twenty sampling sites were established, of 0.5 ha, each one with the same number of SAF-cacao, recording in each one the age and total surface, as well as the tree and non-timber species present. For the RFM, the diameter at chest height (DAP_{1.3m}) and total height (Ht) were measured. With these variables, the basal area (AB) and the volume with bark (Vcc, m³ ha⁻¹) were calculated. The AB and Vcc were used to calculate the carbon stored in aerial biomass (CBA, t ha⁻¹). The economic value of the CBA was compared with the economic value of the cacao production. To understand cacao production (*Theobroma cacao* L.) and the use of RFNM, the owners of each plantation were interviewed; 3,239 trees were recorded, which belong to 56 species and 27 families, with the following standing out because of their frequency: *Erythrina americana* (Fabaceae), *Cedrela odorata* (Meliaceae) and *Colubrina arborescens* (Rhamnaceae). As RFNM, 6,308 plants from 53 species grouped in 29 families were found, and they were classified into six categories of use: ornamental 44%, fruit trees 28%, vegetables 25%, medicinal 3%, fodder 0.01% and spices 0.01%. Of the people, 70 % do not use RFNM, 20 % consume them and 10 % sell them. The average cacao yield was 962.5 kg ha⁻¹ with a net income of \$ 5475.00 ha⁻¹. The CBA in SAF-cacao was 120.35 t ha⁻¹, with a calculated income from sales of \$10,831.00 ha⁻¹.

Keywords: Agroecosystem, agroforestry carbon, Tabasco.

Agroproductividad: Vol. 9, Núm. 2, febrero. 2016. pp: 50-55.

Recibido: mayo 2015. **Aceptado:** enero 2016.



INTRODUCCION

El cacao (*Theobroma cacao* L.) en Tabasco, México, se cultiva en sistemas agroforestales (Figura 1), manteniendo estrecha asociación con otras especies arbóreas y plantas útiles con potencial para producir beneficios a las familias rurales (Ramírez, 2009), y la diversidad en estos sistemas se ha agrupado como recursos forestales maderables y no maderables (RFM y RFNM).

Los RFM brindan servicios ambientales a la sociedad (conservación de agua, suelo y biodiversidad, fijación de carbono atmosférico, mitigación del cambio climático y del calentamiento global). Estos aspectos no se han cuantificado para gran parte de las zonas productoras de cacao en el mundo (Beer *et al.*, 1998; Salgado, 2007; Roa *et al.*, 2009). El aporte tangible de los RFM son los productos maderables empleados para la producción de tablas, tablones, vigas, materiales de empaque, papel, chapa, triplay y generación de energía, a través de la quema de leña.

Los RFNM son todos los productos y servicios vegetales y animales que se pueden obtener del bosque (Ledig, 2004), es decir, constituyen una colección de recursos biológicos que incluyen: frutales, plantas medicinales, plantas ornamentales, miel, y muchos otros (De Beer y McDermot, 1989). En muchas partes del mundo estos recursos son indispensables para los habitantes de las zonas rurales, quienes constituyen los actores principales en la extracción de dichos productos, pudiendo constituir su única fuente de ingresos financieros (FAO, 1995; Ros-Tonen, 1999). En México la mayor parte de la producción de cacao se localiza en los estados de Chiapas y Tabasco con una superficie de 61,320 ha de la cual dependen 47 mil productores. En Tabasco la superficie plantada es de 41,117 ha de donde se obtienen 16,560 t de cacao seco (Córdova, 2005; SAGARPA, 2010); el 96% se distribuye en la región de la Chontalpa y 4% en la Sierra (López *et al.*, 2005). El cultivo de cacao enfrenta problemas de baja producción y precios, que genera desinterés de los productores para mantener sus plantaciones generando reducción de superficies sembradas, favoreciendo pérdida de un sistema de pro-



Figura 1. Sistema agroforestal cacao en Cárdenas, Tabasco, México.

ducción que mantiene una cubierta arbórea y provee de RFM y RFNM que complementan el ingreso económico además de la venta de cacao. Por lo anterior, se caracterizó el uso actual y potencial de recursos forestales maderables y no maderables en un sistema agroforestal con cacao.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en 20 plantaciones (SAF-cacao) distribuidas en los poblados C-20 (Miguel Hidalgo y Costilla) y C-28 (Gregorio Méndez Magaña) del municipio de Cárdenas Tabasco, México (Figura 2). Cárdenas ubicado a

17° 15' y 17° 40' N y 90° 59' y 94° 06' O, es el segundo municipio más productivo de cacao en Tabasco (SIAP, 2014).

Cuantificación del uso actual de RFM y RFNM del SAF-cacao

En las plantaciones se establecieron 20 sitios de muestreo de 50×100 m, y en cada sitio se registró la edad y superficie de plantación y número de especies

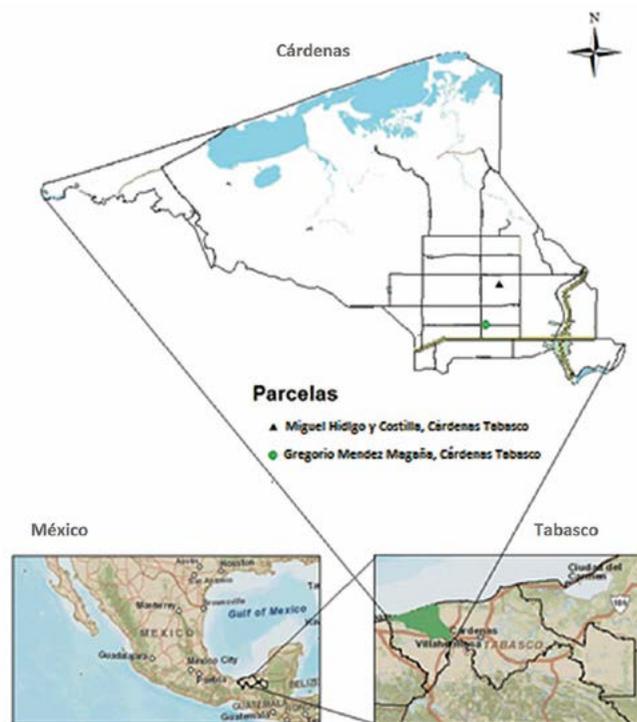


Figura 2. Ubicación del área de estudio: Poblado C-20 Miguel Hidalgo y Costilla y Poblado C-28 Gregorio Méndez Magaña, Cárdenas, Tabasco México.

vegetales tanto de RFM como de RFNM. El nombre común de las especies se registró con ayuda de las personas que dependen de los SAF-cacao, además de su identificación taxonómica. Para conocer el destino y uso de la producción de los RFM y RFNM, así como, de la producción de cacao, se aplicó un cuestionario específico a los dueños de cada plantación. Solo se consideró el uso principal de cada especie. En la parte social, el cuestionario incluyó: la composición familiar y tenencia de la tierra, en la parte económica se preguntó quién labora en las actividades productivas, cuánto se invierte en la plantación y qué rendimiento se obtiene por hectárea. Para conocer el uso y destino de la producción de RFNM del SAF-cacao, se preguntó: ¿qué productos se usan de la plantación?, ¿cómo y cuánto usa de cada uno de ellos?, y cuánto ingreso se obtiene. El ingreso promedio obtenido de los RFNM en el SAF-cacao, se obtuvo sumando el ingreso de cada una de las 20 plantaciones y dividiendo entre el número de plantaciones. El ingreso por la venta de cacao se obtuvo multiplicando el rendimiento (kg ha^{-1}) por su precio comercial y restando el costo de producción por hectárea. Los datos se analizaron mediante estadísticas descriptivas con el programa Statistical Package for the Social Sciences (SPSS versión 20).

Recursos forestales maderables (RFM) y estimación de C almacenado en la biomasa aérea (CBA)

En cada sitio de muestreo se registró la altura total (Ht) y el diámetro a la altura del pecho (DAP 1.30 m) de cada árbol. La Ht (m) se midió con una Pistola Haga. Para obtener

el DAP, se midió con cinta diamétrica la circunferencia de cada árbol y el resultado se dividió entre 3.1416 (π). Con las variables de Ht y DAP, se procedió a calcular el área basal (AB, m^2) y el volumen con corteza (vcc, m^3) por árbol. Las formulas empleadas fueron:

$$AB=(DAP/2)^2 \times \pi$$

$$vcc=AB \times ff \times Ht$$

dónde ff=factor de forma (0.70) (Dauber, 1997; FAO, 2004). Con el vcc se estimó el volumen con corteza por hectárea (Vcc, $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$). El Vcc se utilizó para calcular el inventario físico de carbono (IFC, t ha^{-1}). La fórmula empleada fue:

$$IFC=Vcc \times FEB \times FCC$$

donde: FEB es factor de expansión de biomasa (1.6) y FCC es factor de conversión de biomasa a carbono (0.05).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En los SAF-cacao muestreados, se registró un total de 3,239 árboles de 56 especies y 27 familias botánicas. La densidad promedio de

árboles por hectárea fue de 324, variando de 58 a 544. Predominaron las familias Fabaceae y Meliaceae. Las especies sobresalientes por frecuencia se citan en el Cuadro 1. Destacando *Erythrina americana* Mill con 1,678 individuos equivalente a 51.8% del total. Los RFM brindan servicios para el medio ambiente; de ellos, las familias obtienen beneficios directos como el oxígeno, madera para aserrío, postes, horcones, soleras y leña. El ingreso promedio reportado por productor por venta de estos productos fue \$1,865.00 por año. De esa cantidad, \$1,450.00 correspondieron a venta de madera para aserrío y \$415.00 por venta de leña.

Recursos Forestales no Maderables en el SAF-cacao

Se registraron 6,308 plantas de 29 familias botánicas y 53 especies. Las plantas se agruparon en seis categorías de uso (Figura 2) de acuerdo a lo indicado por las familias que dependen de los SAF-cacao. Las 10 especies con mayor frecuencia (Cuadro 2), fueron *Heliconia latispatha* Benth con 1,663 plantas (20%) consideradas como ornamentales.

Cuadro 1. Especies forestales con mayor frecuencia en un sistema agroforestal con cacao (*Theobroma cacao* L.).

Nombre común	Nombre científico	No. de árboles	%
Mote	<i>Erythrina americana</i> Mill.	1,678	51.81
Cedro	<i>Cedrela odorata</i> L.	349	10.77
Tatuan	<i>Colubrina arborescens</i> (Mill) Sarg.	300	9.26
Chipilcohite	<i>Diphysa robinoides</i> Benth	188	5.80
Naranja	<i>Citrus sinensis</i> (L.) Osb.	188	5.80
Guácimo	<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam.	87	2.69
Macuilis	<i>Tabebuia rosea</i> (Bertol) DC.	81	2.50
Cocoite	<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam.	68	2.10
Guarumo	<i>Cecropia obtusifolia</i> Bertol.	41	1.27
Cesniche	<i>Lippia myriocephala</i> Sch. y Cham.	36	1.11
46 especies restantes		223	6.88
Total		3,239	100

Cuadro 2. Especies no maderables con mayor frecuencia en un sistema agroforestal con cacao (*Theobroma cacao* L.).

Nombre común	Nombre científico	No. de plantas	%
Platanillo	<i>Heliconia latispatha</i> Benth	1,663	26.36
Hoja de thó	<i>Calathea lutea</i> G.F.W. Meyer	653	10.35
Platano Cuadrado	<i>Musa paradisiaca</i> L.	408	6.47
Platano Macho	<i>Musa balbisiana</i> L.	386	6.12
Canna	<i>Canna indica</i> L.	351	5.56
Pitahaya	<i>Hylocereus undatus</i> (Haw.)	311	4.93
Macal	<i>Xanthosoma sagittifolium</i> S.	307	4.87
Heliconia Pie gallo	<i>Heliconia psittacorum</i> L. f	292	4.63
Hierba mora	<i>Solanum tuberosum</i> L.	248	3.93
Papaya silvestre	<i>Carica mexicana</i> (A.DC.)	237	3.76
43 especies restantes		1452	23.02
Total		6,308	100

2,719, frutales con 1,776 y hortícolas con 1,578. Se encontraron más ornamentales debido a su rápido crecimiento y distribución, y porque al requerir baja radiación solar, encuentran un hábitat ideal en los SAF-cacao. Las categorías de mayor uso fueron las que ocupan las personas para autoconsumo, tales como, frutales, hortícolas y medicinales.

Rendimiento y valor económico del cacao

El rendimiento promedio de cacao registrado fue de 962 kg ha⁻¹ (± 238.8) (Cuadro 3). Con estos rendimientos, el ingreso neto promedio por su venta en baba (fresco, recién despulpado) fue de \$5,475.00 \pm \$1,685.00 ha⁻¹, lo cual no es rentable considerando que el costo de producción estimado es de \$4,150 (\pm \$1,631.11) ha⁻¹. El 70% de los productores reportó rendimientos superiores a la media.

Dos productores estuvieron en la máxima y dos en la mínima de rendimiento. Lo primero puede atribuirse a buen manejo de plantación, y como resultado de su participación en el programa ICCO-Nestlé, el cual consiste en capacitar a productores de cacao para que lleven buen manejo de sus cacaotales y asegurar buena producción que después es comercializada por el mismo programa. Los mínimos rendimientos,

Uso de las especies forestales y no forestales del SAF-cacao

De las personas que dependen de los SAF-cacao, 90% poseen el mismo nivel de vida (tienen casa propia con piso firme, techo de concreto, el número de personas que viven es de 3-6, y obtienen ingresos del cultivo de caña de azúcar). Sin embargo, el 70% de ellas no le da ningún uso a los productos que se encuentran dentro del SAF-cacao, 20% los usa para autoconsumo y 10% para venta. La producción de cacao es la razón principal del sistema. Lo que los productores obtienen de ingreso por la venta de cacao, lo complementan con ingresos de otros cultivos como caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) y de otras actividades. El 20% de las personas, usan estos productos para autoconsumo. De los RFM que utilizan para carpintería, horcones, postes, vigas para techo, así como, de los residuos para combustible de uso diario (leña) se estima un ahorro promedio anual de \$2,370.00, el cual puede considerarse como ingreso indirecto, puesto que si éstos no se obtuvieran del SAF-cacao, el productor tendría que erogar dicho gasto. Los RFNM como plátano (*Musa* spp.), hoja de plátano (*Musa* spp.), papaya silvestre (*Carica mexicana* A.DC.), hoja de thó (*Calathea lutea* Aubl Schult), hoja de momo (*Tradescantia sphatacea* Sw.), chile amashito (*Capsicum annuum* L.), yerba buena (*Mentha sativa* L.), matalí (*Xanthosoma sagittifolium* Schott), perejil (*Eryngium foetidum* L.), cundeamor (*Mormodica charantia* L.), achiote (*Bixa orellana* L.), son indispensables para el hogar porque se utilizan en la alimentación de la familia. Además, las familias ahorran por no comprar estos productos. El 10% de la población que tiene plantaciones de cacao vende sus RFNM en los mercados locales, generando ingresos promedio de \$502.5 por año. Los productores que no usan los productos del SAF-cacao, es debido a que solo les interesa la producción de cacao y no la diversidad y uso que representan o pudieran tener. Las plantas registradas como RFNM en los SAF-cacao, se clasificaron en seis categorías de uso (Figura 3): ornamentales, frutales, hortalizas, medicinales, forrajeras y especias. Las plantas predominantes fueron las ornamentales con

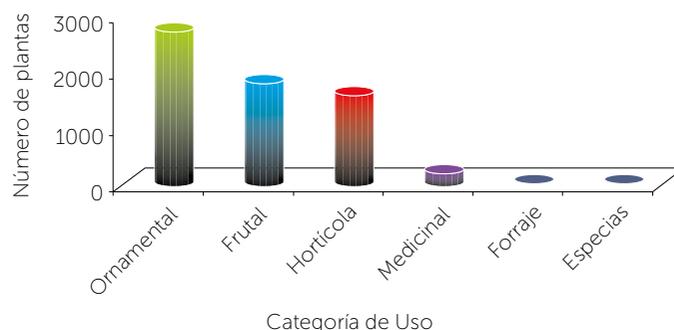


Figura 3. Número de plantas por categoría de uso, encontradas en el SAF-cacao en Cárdenas Tabasco, México.

pueden atribuirse a dos factores; a la poca importancia que los productores dan a sus plantaciones, porque dependen de otros cultivos como la caña de azúcar, y tienen como segunda opción el SAF-cacao, y a la moniliasis causada por el hongo *Moniliophthora roreri* que ataca a los frutos de cacao, y ocasiona pérdidas de entre 20% y 80% de la producción.

La moniliasis es una enfermedad que tiene en un círculo vicioso al SAF-cacao. Cuando solo se considera la producción de cacao al obtener bajos rendimientos (e ingresos), el productor ya no invierte en su plantación (disminuye el manejo de la misma). Al disminuir el cuidado de la plantación (menos poda, menos o nulo control de enfermedades, menos o nula fertilización) disminuye el rendimiento. No obstante, el rendimiento promedio en peso seco estimado en la presente investigación (289 kg ha⁻¹), fue menor comparado con el rendimiento promedio nacional (460 kg ha⁻¹) (SIAP, 2014) o con el de Costa de Marfil (538 kg ha⁻¹) como principal país productor de cacao en el mundo (ICCO, 2003).

Ingreso estimado por venta de bonos de carbono del SAF-cacao

La producción promedio de C estimado en SAF-cacao, fue de 120.35 t ha⁻¹; a un precio de USD\$7.5 por tonelada de C, se calcularon ingresos promedio de USD\$10,831 ha⁻¹. Al comparar el ingreso por la producción de cacao y el ingreso como venta por bonos de C en un sistema agroforestal, se observa una diferencia de 50% a favor de los bonos de C. Es decir, el ingreso por la venta como bonos es mejor que el ingreso por venta de cacao. Además, el pago implica la conservación de los

Cuadro 3. Ingreso por venta de cacao (*Theobroma cacao* L.) en baba y por venta calculada de carbono del SAF-cacao en Cárdenas Tabasco, México.

No. de plantación	Producción (kg ha ⁻¹)	Ingreso neto Cacao (\$ ha ⁻¹)	C en biomasa aérea (t ha ⁻¹)	Ingresos por C (\$ ha ⁻¹)*
1	1500	10000	143.29	12,896.07
2	1000	5000	87.92	7,912.89
3	700	5000	86.57	7,791.61
4	1000	8000	122.07	10,986.32
5	800	6000	111.90	10,071.24
6	600	4000	148.98	13,408.40
7	700	5000	215.75	19,417.58
8	1000	5000	165.79	14,920.92
9	600	4000	165.18	14,865.92
10	1000	5000	122.45	11,020.37
11	1500	8000	117.46	10,571.80
12	1000	5000	99.85	8,986.38
13	1000	5000	115.29	10,376.44
14	1000	6000	160.98	14,488.42
15	1100	5000	33.04	2,973.68
16	1000	7000	77.83	7,004.33
17	1000	5000	115.53	10,397.86
18	1000	4000	91.42	8,227.85
19	750	2500	105.39	9,485.48
20	1000	5000	120.27	10,824.30
Media	962.5**	5475	120.38	10,831.39
D. E.	238.8	1681.75	39.34	3,541.06
C. V	24.8	30.71	32.69	32.69

Fuente. Cuestionario aplicado a productores de cacao 2014. *Precio estimado de una tonelada de C=\$7.5 (USA); \$1 (USA)=\$12.00. **289 kg ha⁻¹ de cacao seco considerando un factor de conversión de 0.3.

árboles principalmente jóvenes, por tanto se debe considerar el no eliminar las especies arbóreas y protegerlos para aumentar la cantidad de C en los SAF-cacao. Sin embargo, debido a que el pago de bonos de C es un proceso que puede ser tardado, una opción para los productores con el fin de obtener más ingresos de los SAF-cacao, es vender los recursos forestales y recursos no forestales del sistema.

CONCLUSIONES

El SAF-cacao concentra gran cantidad de recursos maderables y no maderables, de los cuales al analizar su productividad se identificaron usos importantes tales como, ornamentales, frutales, hortícolas, medicinales y forrajeras. El 70% de las personas no le dan ningún uso a los productos que se encuentran dentro del SAF-cacao; 20% lo usa para autoconsumo y solo 10% lo destina para venta. Se identificó la importancia de complemento entre la producción de cacao con ingresos obtenidos por venta de recursos forestales maderables y no maderables. Al comparar el ingreso por la producción de cacao y el ingreso por venta de bonos de C en el sistema agroforestal cacao, se calculó una diferencia del 50% a favor de los bonos de Carbono.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por los recursos para realizar la maestría en el Colegio de Postgraduados. A la Línea Prioritaria de Investigación 2. Agroecosistemas Sustentables por el apoyo técnico y logístico para realizar esta investigación.

LITERATURA CITADA

- Córdova A.V. 2005. Organización campesina en la reconversión del cacao tradicional a orgánico en Tabasco, México. En: Aragón García A, López-Olguín J. F., Tapia-Rojas A. M. (eds). Manejo Agroecológico de Sistemas. Dirección de fomento editorial, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Puebla. 180 p.
- Beer J.W., Muschler R., Kass D., Somarriba E. 1998. Shade management in coffee and cacao plantations. *Agroforestry Systems*. 4: 175-189.
- Dauber E. 1997. Propuesta para la elaboración de tablas volumétricas y/o factores de forma. BOLFOR. USAID, Santa Cruz, Bolivia. 511- 621. 16 p.
- De Beer J.H., McDermot M.J. 1989. The economic value of Non-timber Forest Products in Southeast Asia. Netherlands Committee for the IUCN. Amsterdam. 2nd Edition.
- FAO. 1995. Memoria- consulta de expertos sobre productos forestales no madereros para América Latina y el Caribe. Serie forestal N. 1. Dirección de productos forestales, oficina regional de la FAO para América Latina y el Caribe, Santiago de Chile.
- FAO. 2004. Inventario forestal nacional. Manual de campo modelo. Programa de Evaluación de los Recursos Forestales (ERF). Guatemala. 89 p.
- ICCO (International Cocoa Organization). 2003. Cocoa production. Consultado en: <http://www.icco.org/faq/57-cocoa-production/123>. Fecha de consulta: 08/05/15
- Ledig F.T. 2004. Conservación y manejo de recursos genéticos forestales. En: Vargas H. J.J., Basilio B.V., Ledig F. T. (eds.). Manejo de recursos genéticos forestales. 2da. Ed. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Edo. de México, y Comisión Nacional Forestal, Zapopan, Jalisco. Pp. 2-18.
- López A.P.A., Delgado N.V.H., Azpeitia M.A., López A.J.I., Jiménez C.J.A., Flores R.A., Fraire S.L., Castañeda C.R. 2005. El cacao en Tabasco: manejo y producción. INIFAP; ISPROTAB. Tercera edición. (eds): Instituto para el Desarrollo de Sistemas de Producción del Trópico Húmedo de Tabasco. Villahermosa, Tabasco, México. 54 p.
- Ramírez M.A. 2009. Diversidad florística y macrofauna edáfica en plantaciones agroforestales de cacao en Cárdenas Tabasco. Tesis Maestría en Ciencias-Colegio de Postgraduado Campus Tabasco. 86 p.
- Roa R.H.A., Salgado M.M.G., Álvarez H.J. 2009. Análisis de la estructura arbórea del sistema agroforestal de cacao (*Theobroma cacao* L.) en el Soconusco, Chiapas, México. *Acta Biológica Colombiana (ABC)*. 14 (3): 1900-1649.
- Ros-Tonen M.A.F (Ed.) 1999. Seminar proceedings: NTFP Research in the Tropenbos Programme: Results and Perspectives.
- SAGARPA. 2010. Impulsa SAGARPA producción de cacao. Consultado en: <http://www.actualidadesmexico.com.mx/2010/03impulsa-sagarpa-producción-de-cacao/>. Fecha de consulta: 24/03/11.
- Salgado M.M.G., Ibarra N.G., Macías S.J.E., López B.O. 2007. Diversidad arbórea en cacaotales del Soconusco, Chiapas, México. *Interciencia*. Vol.32. (11). 763-768.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2014. Anuario estadístico de la producción agrícola. Consultado en: <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-cultivo/>. Fecha de consulta: 08/05/15.



ÁREAS POTENCIALES PARA EL CULTIVO DEL AGAVE (*Agave americana* L.) EN LA MESETA COMITECA, CHIAPAS

POTENTIAL AREAS FOR AGAVE CULTIVATION (*Agave Americana* L.) IN THE COMITECA PLATEAU, CHIAPAS

Reynoso-Santos R.^{1*}; López-Báez W.¹; López-Luna A.¹; Ruíz-Corral J.A.²; Castro-Mendoza, I.¹; Cadena-Iñiguez, P.¹; Valenzuela-Núñez, L.M.³; Camas-Gómez, R.¹

¹ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Centro de Chiapas. Km. 0.3 Carretera Ocozocoautla-Cintalapa, C.P. 29140, Ocozocoautla de Espinosa, Chiapas, Tel. 01 800 088 22 22 Ext. 86317. ² Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional del Pacífico Centro, Campo Experimental Centro Altos de Jalisco. Interior parque Los Colomos s/n Col. Providencia, C.P. 44660, Guadalajara, Jalisco. ³ Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Juárez del Estado de Durango Av. Universidad S/N Fracc. Filadelfia Gómez Palacio, Durango. C. P. 35010.

*Autor de correspondencia: reynoso.roberto@inifap.gob.mx

RESUMEN

El agave Comiteco (*Agave americana* L.) se cultiva en la Meseta Comiteca de Chiapas, México desde mediados del siglo XIX como una actividad económica en pequeña escala. Actualmente es considerado como opción para reconversión productiva en algunos municipios de la Meseta, por lo cual se evaluaron áreas geográficas para determinar zonas de mayor potencial productivo en nueve municipios del estado de Chiapas, mediante la determinación de sus requerimientos agroecológicos, caracterización agroclimática de la meseta Comiteca y zonificación de áreas con potencial agroclimático. Se identificó una superficie con potencial agroclimático de 135,869.8 ha equivalente a 17% del área total de la Meseta para ampliar la distribución de plantaciones de agave.

Palabras clave: Maguey, área potencial, agroclimático, reconversión productiva.

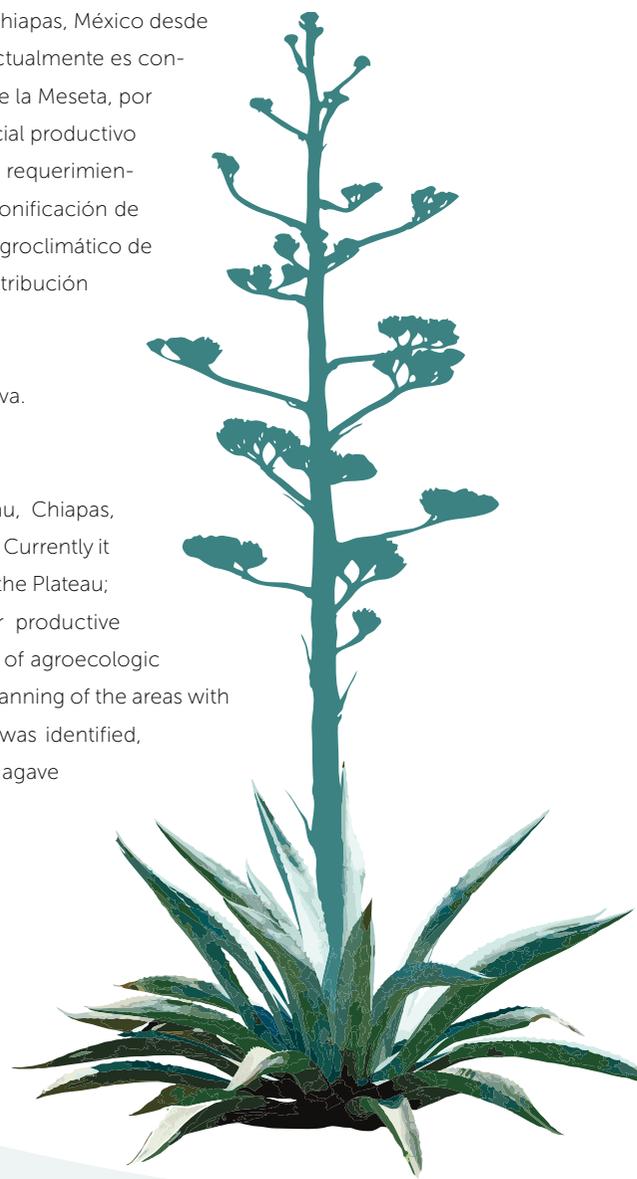
ABSTRACT

Comiteco agave (*Agave americana* L.) is cultivated in the Comiteca Plateau, Chiapas, México, since the middle of the 19th Century as a small-scale economic activity. Currently it is considered an option for productive reconversion in some municipalities of the Plateau; therefore, geographic areas were evaluated to determine zones of higher productive potential in nine municipalities of the state of Chiapas, through determination of agroecologic requirements, the agroclimate characterization of the Comiteca Plateau and planning of the areas with agroclimate potential. A surface of 135,869.8 ha with agroclimate potential was identified, equivalent to 17 % of the total area of the Plateau to broaden the distribution of agave plantations.

Key word: Agave, potential area, agroclimate, productive reconversion.

Agroproductividad: Vol. 9, Núm. 2, febrero. 2016. pp: 56-61.

Recibido: abril 2015. **Aceptado:** enero 2016.



INTRODUCCIÓN

Evaluar el grado de aptitud de los suelos permite identificar su capacidad para apoyar el uso más apropiado (Olivas *et al.*, 2007). La zonificación agroecológica es definida como la división de un área en unidades más pequeñas, que tienen características similares relacionadas con su aptitud y potencial agrícola (FAO, 1996). Los trabajos de zonificación identifican los cultivos adecuados para un área o región determinada de acuerdo a las exigencias agroecológicas de diferentes especies. El estado de Chiapas, México, se caracteriza por su relieve accidentado que influye en la diversidad y distribución de unidades edafológicas y climáticas (López *et al.*, 2009), y las principales variables que determinan las afinidades agroecológicas de los cultivos con un área son entre otras, la precipitación, temperatura, evaporación y humedad relativa, mientras que para el suelo se considera la profundidad, textura, estructura, color, densidad aparente y contenido de materia orgánica. El género *Agave* L., se encuentra distribuido entre 5° y 25° N, con régimen térmico templado, semi-cálido o cálido y temperatura promedio de entre 20 °C a 22 °C (Ruiz *et al.*, 1999). Se adapta en regiones semi-áridas y subhúmedas con un régimen de precipitación anual entre 600 mm a 1800 mm con ambientes seco a moderadamente secos la mayor parte del año (Ruiz *et al.*, 1999). Las plantaciones actuales de *Agave americana* L., se encuentran establecidas de manera dispersa, principalmente en los municipios de Comitán de Domínguez, Las Rosas y Amatenango del Valle en Chiapas, ubicados dentro de la meseta comiteca con una superficie de 27,850 km² localizada entre 16° 07'a 17° 32' N, y 91° 42' y 93° 18' O con altitudes superiores a 1,000 m. El clima es predominante templado subhúmedo con temperatura media anual de 13 °C a 17 °C, lluvias en verano (1100 a 1,600 mm anuales) y posibles heladas en áreas deforestadas ubicadas a 2000 m de altitud (Alba-López *et al.*, 2003; López, 1993). Los municipios de Comitán, La Trinitaria y Margaritas se ubican a 1000 m de altitud en adelante, temperatura media anual entre 18 °C a 22 °C, con una mínima de 6.5 °C a 12.5 °C en la época de sequía, y 9.7 °C a 14.2 °C en la época de lluvias, y los suelos son predominantes litosoles y luvisoles. En ambos periodos el régimen térmico normal no presenta limitaciones para el crecimiento y desarrollo del cultivo de agave. Desde el siglo XIX el agave comiteco (*Agave americana* L.) se cultiva a pequeña escala, y sus productos han llegado a ocupar mercados nacionales e internacionales como bebida destilada denominada "Comiteco". Actualmente el cultivo es considerado como una opción para reconversión productiva en algunos municipios de Chiapas, mediante el establecimiento de plantaciones. Con base en lo anterior, se realizó un estudio para identificar las zonas óptimas para su crecimiento, que favorezcan mayores rendimientos del cultivo y menor

tiempo a la cosecha, proyectando áreas potenciales de cultivo clasificadas como: óptimas, subóptimas y marginales en nueve municipios de la Meseta Comiteca.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los requerimientos agroecológicos de *A. americana* fueron definidos considerando los reportados para el género *Agave* L. (Ecocrop FAO, 2011; Ruiz, 2007; FAO, 1996; FAO, 1994; Gentry, 1982; Ruiz *et al.*, 1999) (Cuadro 1); y para identificar áreas potenciales para cultivar *A. americana*, se consideraron los requerimientos agroecológicos de la especie en cuanto a temperatura y precipitación (mensual), así como, altitud y pendiente.

Caracterización agroclimática de la meseta comiteca

Siguiendo la metodología de FAO (1996) y Ruiz (2007) para identificación de zonas potenciales de *A. tequilana*, además de las variables del Cuadro 1, se hicieron comparaciones de la disponibilidad ambiental (suelo, fisiografía y clima) para *A. americana*. Se utilizó la base de información de clima del sistema de información ambiental del INIFAP correspondiente al periodo 1961 a 2003 (Medina *et al.*, 2003, Serrano *et al.*, 2006, López *et al.*, 2009), el cual consta de capas temáticas «raster» (celdas) con resolución de 900×900 m, compiladas en el Sistema de Información Geográfica IDRISI32 (Eastman, 1999) y convertidas en capas "vectoriales" para su reclasificación y edición en Arcview 3.2 (ESRI, 1999). Para la estimación de la temperatura nocturna, se utilizó información de capas raster de temperaturas máximas y mínimas mensuales, y mediante álgebra de mapas se aplicaron las ecuaciones siguientes:

Cuadro 1. Requerimientos del cultivo de *A. americana* según nivel de potencial agroclimático.

Variable	Requerimientos/potencial agroecológico		
	Óptimo	Sub-óptimo	Marginal
Temperatura nocturna (°C)	11 a 21	-1 a 11 y 21 a 28	<-1 y >28
Probabilidad de heladas	<0.10		>0.10
Altitud (m)	1000- 2000	600-1000 y 2000-2500	<600 y >2500
Pendiente del terreno (%)	2 -15	1 -2 y 15-45	<1 y >45
Precipitación anual (mm)	600-1500	1500-1800	<600 y >1800

Temperatura media mensual (T_m) en °C

$$T_m = \frac{T_{xm} + T_{im}}{2} \quad (1)$$

Donde: T_{xm} =Temperatura máxima media mensual en °C, T_{im} =Temperatura mínima media mensual °C.

Temperatura nocturna media mensual (T_{nm}) en °C

$$T_{nm} = T_m - \frac{[(T_{xm} + T_{im})(11 - T_o)]}{4(12 - T_o) \text{sen} \left[\pi \frac{11 - T_o}{11 + T_o} \right]} \quad (2)$$

Donde: T_{xm} =Temperatura máxima media mensual, °C, T_{im} =Temperatura mínima media mensual, °C, $T_o=12 - 0.5N$, donde N =duración del fotoperiodo correspondiente al día 15 de cada mes, Sen =Seno expresado en radianes; $\pi=3.1416$.

Temperatura nocturna media anual (T_{na}) en °C

$$T_{na} = \frac{\sum_{i=1}^{12} T_n}{12} \quad (3)$$

Donde: T_n =Temperatura nocturna media mensual en °C i =Corresponde a los meses de enero a diciembre.

Para la variable suelo, se consideró la información digitalizada de las cartas edáficas del INEGI (1993) disponibles en la base de datos a nivel Nacional del INIFAP.

Zonificación de áreas con potencial agroclimático

Se generaron capas vectoriales con las zonas potenciales a partir del análisis comparativo de la información proveniente de la caracterización agroclimática y los requerimientos del cultivo del agave. La delimitación de áreas potenciales se realizó mediante el método de "álgebra booleana" realizados a través de Sistemas de Información Geográfica (SIG) IDRISI (Eastman, 1999). Como producto se obtuvo un mapa con las zonas donde existe potencial para cultivar el agave en las clasificaciones de óptimo, subóptimo y marginal.

Zonificación de áreas con potencial agroecológico

Consistió en excluir de las zonas potenciales agroclimáticas obtenidas en la etapa anterior, las áreas ocupadas con zonas urbanas, uso forestal, asentamientos humanos y cuerpos de agua. Con esta información, se realizó un análisis comparativo entre el mapa con las zonas potenciales agroclimáticas y la carta de uso de suelo y vegetación a escala 1: 250 000 Serie III del INEGI (2002), y se obtuvo un mapa con áreas que proyectan potencial agroecológico para sembrar agave y que no registraron otros usos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Meseta Comiteca presenta amplia potencialidad agroclimática para el cultivo de *A. americana* (Cuadro 2, Figura 1). Sin excluir las zonas ocupadas por otros usos de suelo diferentes a los agrícolas, registradas en la Carta de Uso del Suelo y la Vegetación del INEGI Serie III, el 17% de la superficie total estudiada correspondió a la categoría de óptimo potencial, equivalente a 135,869.8 ha, en el centro de los municipios Las Margaritas, Comitán de Domínguez, La Trinitaria y Las Rosas (Figura 1).

La superficie con potencial subóptimo se ubicó de manera contigua a las zonas óptimas, con un total de 323,655 ha, las cuales podrían ser consideradas para la siembra de agave, a través de tecnología que ayude al cultivo a adaptarse a algunas de las limitantes ambientales, tales como, precipitación y fertilidad de suelo. La mayor superficie en el área de estudio correspondió al nivel de potencial marginal (343,971 ha), distribuidas hacia el noreste de los municipios Las Margaritas e Independencia con 203,436 y 34,231 ha, respectivamente (Cuadro 2) limita-

Cuadro 2. Superficie estimada en categorías por potencial agroclimático para el cultivo de *Agave americana* L.

Municipio	Óptimo	Subóptimo	Marginal	Total
	(ha)			
Las Margaritas	46,827	64,986	203,436	315,249
Comitán de Domínguez	35,091	50,855	10,004	95,950
La Trinitaria	19,299	92,718	48,381	160,398
Las Rosas	12,240	11,402	437.1	24,079
La Independencia	7,299	10,117	34,231	51,647
Tzimol	6,025	25,380	7,725	39,130
Chanal	3,380	29,979	6,098	39,457
Amatenango del Valle	3,147	11,613	668.3	15,428
Socoltenango	1,228	26,638	33,752	61,618
Total	135,869	323,655	343,971	803,495

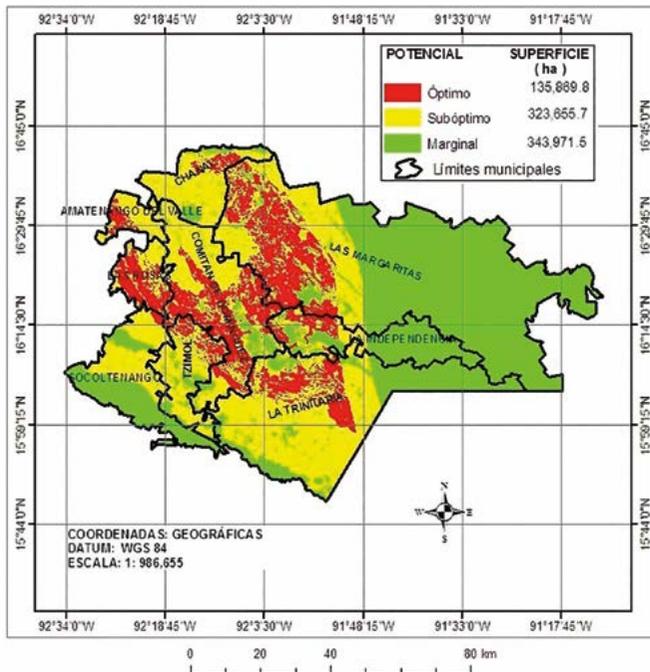


Figura 1. Distribución de áreas con potencial agroclimático para el cultivo de *Agave americana* L.

das principalmente por la pendiente del suelo, la altitud y la precipitación anual, sin embargo, la variable precipitación anual fue quien delimitó la mayor superficie de áreas subóptimas y marginales (Figura 2), ya que a medida que se avanza hacia la región Selva, la precipitación aumenta de 2000 mm, a más de 3500 mm, generando exceso de humedad para la especie.

Al excluir las superficies con asentamientos humanos y vegetación arbolada, la superficie con potencial pasó de

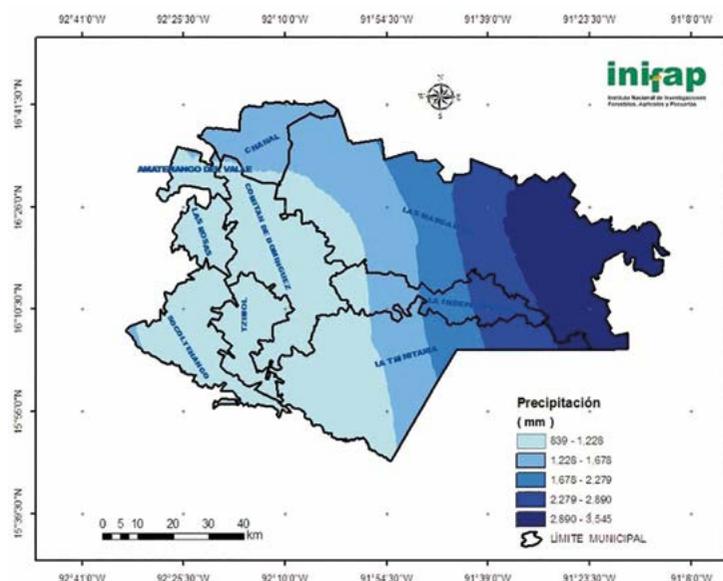


Figura 2. Mapa de precipitación media anual en la zona de estudio.

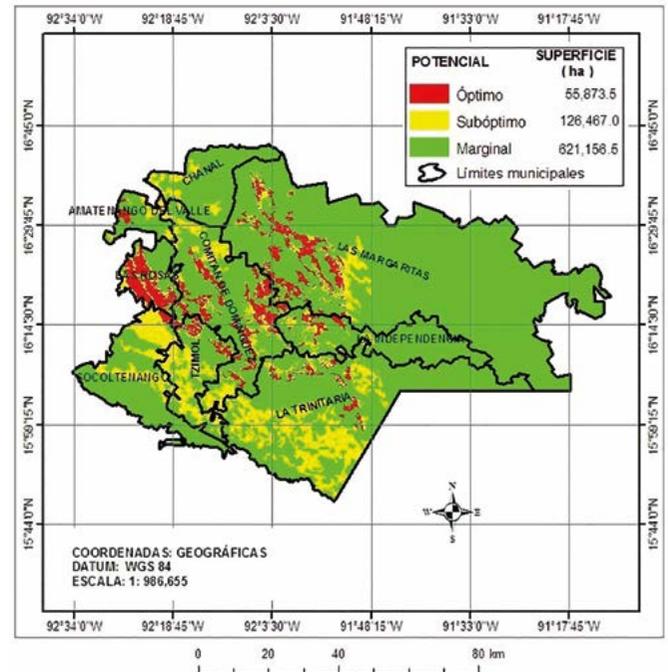


Figura 3. Distribución de áreas con potencial agroecológico para el cultivo de *Agave americana* L.

135,869.8 ha a 55,874 ha (reducción de cerca de 60%), sin embargo, la superficie que resultó de la sobreposición de ambos mapas fue la que tiene mayor probabilidad de reconversión, por ser las áreas dedicadas actualmente a la agricultura o son tierras infértiles para el cultivo de maíz y frijol (Figura 3).

El Cuadro 3 muestra los datos de las áreas con potencial agroecológico por municipio para cada una de las categorías de potencial. El 77% de la superficie con potencial se ubicó en Las Margaritas, Comitán de Domínguez y Las Rosas.

CONCLUSIONES

Las zonas con potencial óptimo para el cultivo de *A. americana*, se ubicaron en áreas de los municipios Las Margaritas, Comitán y Las Rosas; por lo que los resultados pueden ser bastante útiles en materia de planificación para reconversión productiva. Comparando las áreas determinadas con potencial agroclimático y potencial agroecológico, puede concluirse que el cultivo de *A. americana* puede cultivarse en 55,874 ha, sin embargo, se sugiere aumentar la escala de análisis donde sean incorporadas otras variables como análisis de suelos y datos productivos entre otros, con un enfoque de análisis multicriterio que permita fortalecer los presentes estudios.

Cuadro 3. Superficie (ha) estimada de las diferentes categorías de potencial agroecológico para el cultivo de *A. americana*, en el estado de Chiapas, México.

Municipio	Óptima	Subóptima	Marginal	Total
	(ha)			
Las Margaritas	16,763	14,042	284,446	315,251
Comitán de Domínguez	16,528	19,069	60,355	95,952
Las Rosas	9,918	4,117	10,045	24,080
La Trinitaria	4,215	44,119	112,065	160,399
La Independencia	3,137	3,884	45,258	52,279
Tzimol	2,894	15,145	21,093	39,132
Amatenango del Valle	1,236	3,210	10,983	15,430
Socoltenango	1,166	17,532	42,821	61,519
Chanal	17	5,349	34,090	39,456
Total	55,874	126,467	621,156	803,497



Figura 4. Áreas con potencial agroecológico para el cultivo de *Agave americana* L.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por la empresa Balun Canan S. de R. L. de C.V a través del proyecto Innovación tecnológica para la reproducción, establecimiento, producción y aprovechamiento integral del Agave Comiteco financiado por el fondo CONACYT 154047.

LITERATURA CITADA

Alba L.P.M., Gonzáles M., Ramírez N., Castillo M. 2003. Determinantes de la distribución de *Pinus* spp. En la Altiplanicie Central de

Chiapas, México. Boletín de la Sociedad Botánica de México. Número 73. Sociedad Botánica de México, A.C. México. Pp. 7-15
 Eastman J.R. 1999. IDRISI 32. Guide to GIS and image processing Vol.1, Clark Labs-Clark University. Worcester, Massachusetts, USA. 193p.
 Ecocrop FAO. 2012. <http://ecocrop.fao.org/ecocrop/srv/en/home>
 ESRI. 1999. Arc view GIS. Using Arc view GIS. Environmental Systems Research Institute Inc. Redlands, California, USA.340 p.
 FAO. 1994. ECOCROP 1. The adaptability level of the FAO crop environmental requirements database. Version 1.0. AGLS. FAO. Rome, Italy.

- FAO. 1996. Zonación Agroecológica: Guía General. Boletín de Suelos. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia.
- Gentry H.S. 1982. Agaves of continental North America. 1ra Edición. The University of Arizona Press. Tucson, Arizona. 670 pp.
- INEGI. 2002. Carta de uso actual del suelo y vegetación. Serie III. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.
- López L.A., Báez A.D., Ruiz J.A., Medina G. 2009. Caracterización climática y edáfica del área de abastecimiento del ingenio Pujilic, Chiapas. 1ra. Edición. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Centro de Chiapas. Publicación Especial Número 1. México. 48 pp.
- López S.C. 1993. LECTURAS CHIAPANECAS. 1ra. Edición. Gobierno del Estado de Chiapas. México. 791 pp.
- Medina-García G., Ruiz-Corral J.A., Martínez-Parra R.A. 1998. Los climas de México. una estratificación ambiental basada en el componente climático. INIFAP. CIRPAC. Libro técnico No. 1. 103 p.
- Olivas G.E., Valdez J.R., Aldrete A., Gonzáles M. de J., Vera G. 2007. Áreas con aptitud para establecer plantaciones de maguey cenizo: definición mediante Análisis Multicriterio y SIG. Rev. Fitotec. Mex. Vol. 30 (4): 411-419
- Ruiz C.J.A., Medina G., González I.J., Ortiz C., Flores H.E., Martínez R.A., Byerly K.F. 1999. Requerimientos agroecológicos de cultivos. Libro Técnico Núm. 3. INIFAP-CIRPAC. Ed. Conexión Gráfica. Guadalajara, Jalisco, México. México. 362 p.
- Ruiz C.J.A. 2007. Requerimientos agroecológicos y potencial productivo del agave (*Agave tequilana* Weber) en México. In: Rulfo V., F.O. et al. (eds.). Conocimientos y prácticas agronómicas para la producción de *Agave tequilana* Weber en la zona de denominación de origen del tequila. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional Pacífico Centro. P. 11-36
- Secretaría de Economía. 2009. Estudio de territorialidad del agave para la integración y proyección de la industria elaboradora de comiteco. San Cristóbal de Las Casas, Chiapas. Informe. Secretaría de Economía.
- Serrano A.S.V., Díaz G., López A., Cano M.A.G., Báez A.D., Garrido E.R. 2006. Estadísticas climatológicas básicas del estado de Chiapas (período 1961-2003). Libro técnico No. 1. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Centro de Chiapas. México. 186 pp.



EFFECTO DEL MEDIO DE CULTIVO EN LA PROPAGACIÓN *in vitro* DE GENOTIPOS DE *Cedrela odorata* L.

EFFECT OF THE CULTIVATION MEDIUM ON THE *in vitro* PROPAGATION OF *Cedrela odorata* L. GENOTYPES

Sampayo-Maldonado, S.¹; Castillo-Martínez, C.R.^{2*}; Jasso-Mata, J.¹;
Jiménez-Casas, M.¹; López-Upton, J.¹; Sánchez-Monsalvo, V.³

¹ Posgrado en Ciencias Forestales, Colegio de Postgraduados *Campus* Montecillo. Km 36.5 carretera México-Texcoco. 56230, Montecillo, Texcoco, Estado de México. ² Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. CENID-COMEF. Av. Progreso No. 5, Colonia Barrio de Santa Catarina, Delegación Coyoacán, Ciudad de México. ³ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental El Palmar, km 16 Carretera Tezonapa-El Palmar Grande. Tezonapa, Veracruz, México. C. P. 95096.

***Autor de correspondencia:** castillo.carlos@inifap.gob.mx

RESUMEN

Para la industria forestal de México *Cedrela odorata* es la especie de mayor importancia, con amplia demanda para el establecimiento de plantaciones comerciales, las cuales pueden ser cubiertas mediante propagación *in vitro* de genotipos sobresalientes. Se desarrolló un protocolo para propagación *in vitro* de *C. odorata*, a través de yemas axilares, evaluando efectos de diferentes medios de cultivo en fases de establecimiento, multiplicación y enraizamiento de cinco genotipos seleccionados de *C. odorata*. Con el medio MS adicionado con antioxidantes, bactericidas y auxinas se obtuvo 55% de establecimiento, mientras que fase de multiplicación el medio MS adicionado con mayor concentración de auxinas favoreció la emisión de brotes (95%) y todos los medios favorecieron la elongación de los mismos. *C. odorata* presentó buen nivel de enraizamiento aun sin auxinas pero el medio MS adicionado con 0.1 ml L⁻¹ de AIB y 0.1 ml L⁻¹ de ANA fue superior en la generación de raíces (12%), concluyendo que el efecto del medio de cultivo es determinante para el establecimiento, multiplicación y enraizamiento *in vitro* de *C. odorata*. Mientras que el genotipo una vez establecido tiene efecto en la sobrevivencia y respuesta al enraizamiento.

Palabras clave: multiplicación, enraizamiento, auxinas, medio MS.

ABSTRACT

For México's forestry industry, *Cedrela odorata* is the species of greatest importance, with ample demand for the establishment of commercial plantations, which could be covered through the *in vitro* propagation of outstanding genotypes. A protocol for *in vitro* propagation of *C. odorata* was developed through auxiliary buds, evaluating effects from different cultivation mediums in the phases of establishment, multiplication and rooting of five *C. odorata* genotypes selected. Establishment of 55 % was obtained with the MS medium complemented with antioxidants, bactericides and auxins, while in the multiplication phase, the MS medium complemented with higher concentration of auxins favored the emission of shoots (95 %), and all the mediums favored their elongation. *C. odorata* presented a good level of rooting even without auxins, but the MS medium complemented with 0.1 ml L⁻¹ of AIB and 0.1 ml L⁻¹ of ANA was superior in root generation (12 %), concluding that the effect of the cultivation medium is determinant for the *in vitro* establishment, multiplication and rooting of *C. odorata*, while the genotype once established has an effect on the survival and response to rooting.

Keywords: Multiplication, rooting, auxins, MS medium.

Agroproductividad: Vol. 9, Núm. 2, febrero. 2016. pp: 62-69.

Recibido: octubre 2015. **Aceptado:** diciembre 2015.

INTRODUCCIÓN

El Cedro (*Cedrela odorata* L.) es la especie de mayor importancia comercial para la industria forestal de México (Quinto *et al.*, 2009). Su rentabilidad económica la hace atractiva para el establecimiento de plantaciones comerciales (Ramírez *et al.*, 2008), y según CONAFOR (2015) es la especie maderable con más hectáreas establecidas en territorio nacional. Para abastecer la demanda de planta para plantaciones comerciales, será necesario contar con germoplasma de origen genético conocido, seleccionados de acuerdo a características de interés que garanticen buen rendimiento (Sánchez *et al.*, 2003). Mediante la propagación vegetativa se obtienen plantas con identidad genética idéntica de los árboles de procedencia (Kumar, 2007), y las técnicas más usadas son el enraizamiento de estacas, acodado, injerto y micropropagación (Peña *et al.*, 2010; Hannrup *et al.*, 2008). Para la producción comercial de clones de genotipos sobresalientes de *C. odorata*, la propagación *in vitro* es una propuesta viable desde el punto de vista técnico y económico (Ewald *et al.*, 2000; Peña *et al.*, 2010), y consiste en producir plantas a partir de pequeñas porciones de tejidos, cultivadas asépticamente donde se puede controlar estrictamente las condiciones ambientales, sanitarias y de nutrición para la producción de un gran número de plantas en espacios reducidos y en cualquier época del año (Borges *et al.*, 2011; González *et al.*, 2012). Para propagar *C. odorata* y otras especies tropicales se ha usado el medio Murashige & Skoog (MS) (Mukherjee *et al.*, 2010), sin embargo, no existe un protocolo que garantice el éxito con porcentajes aceptables de propagación. Según Pérez *et al.* (2012), los principales problemas para el establecimiento *in vitro* de *C. odorata* es la contaminación durante el establecimiento y recalcitrancia de los explantes en las fases de multiplicación y enraizamiento. *C. odorata* se encuentra incluida en la lista de especies en riesgo sujeta a protección especial en la NOM. 059 (SEMARNAT, 2010), razón por la cual su conservación, propagación y uso sustentable cobra especial importancia (Muellner *et al.*, 2009). Con base en lo anterior, se desarrolló un protocolo para la propagación clonal de cinco genotipos selectos de *C. odorata*, a través de ápices y yemas axilares, probando diferentes medios de cultivo durante las fases de multiplicación y enraizamiento.

MATERIALES Y MÉTODOS

Fase de establecimiento

Se utilizaron yemas y ápice de plantas establecidas por

semilla de *C. odorata*, recolectada en mayo del 2012 de la familia 99 del Huerto semillero del Campo Experimental El Palmar, del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). La siembra se realizó en abril 2013, en condiciones de invernadero en el Colegio de Postgraduados, Texcoco, estado de México. Como sustrato se usó una mezcla de turba, agrolita y vermiculita (2:1:1) contenida en tubetes de polietileno de un litro de capacidad con la adición de 10 gr^{-1} de fertilizante de liberación controlada por tubete. La germinación se inició a los 15 días, y se completó a los 35 días, obteniendo un 95% de germinación. Después de año y medio la planta fue llevada al invernadero del Centro Nacional de Recursos Genéticos (CNRG), Tepatitlan, Jalisco, México, donde se le dio un manejo de riegos frecuentes y con aplicación foliar de fungicida (captan® 1 g L^{-1}) cada mes. Para estimular la formación de material juvenil se realizaron tres podas cada dos meses a una altura de 6 cm sobre el cuello de raíz. Después los brotes sin lignificar que tuvieron una longitud mayor a 25 cm y diámetro de 1 cm, fueron recolectados y se eliminaron los folíolos. Finalmente, los brotes se seccionaron en explantes de aproximadamente 5 cm de largo y llevados al laboratorio. Los explantes fueron lavados con jabón en agua corriente por 10 min y se enjuagaron tres veces con agua destilada, seguidamente, se dejaron 60 minutos en Captan® (3 g L^{-1}), se enjuagaron tres veces con agua destilada, se trataron con etanol al 70% durante un minuto y enjuagaron tres veces con agua destilada. Posteriormente, se dejaron en inmersión en cloro al 30% durante 18 minutos. Finalmente, en la campana de flujo laminar se les aplicaron tres enjuagues con agua estéril.

Se probaron dos medios de cultivo, utilizando como base el medio Murashige y Skoog (MS) (1962) con 4.43 g L^{-1} . Al medio uno (ME-1) se les adicionaron 9 g L^{-1} de agar, 30 g L^{-1} de sacarosa, 2 g L^{-1} de carbón activado, 1 g L^{-1} de Polivinilpirrolidona (PVP) como antioxidante y 1 ml L^{-1} de Plant Preservative Mixture (PPM) como agente biocida. Para el medio dos (ME-2), además de los anteriores, se le adicionaron 1 ml L^{-1} de benciladenina (BA) y 0.01 ml L^{-1} de ácido indolacético (AIA). El pH de los medios se ajustó a 5.7 y mediante un despachador se vaciaron 10 ml de medio a los tubos de ensayo y después fueron esterilizados. La siembra de explantes se realizó en condiciones asépticas en campana de flujo laminar. Las explantes se disectaron en cajas petri con bisturí estéril para obtener secciones nodales de 1 cm con una yema. Se sembró un explante en cada tubo de ensayo, después fueron sellados con parafilm y etiquetaron.

Posteriormente fueron colocados en la cámara de incubación a 24 ± 2 °C con fotoperiodo de 16 horas luz, usando lámparas de alógeno con una intensidad lumínica de $28.05 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y 8 h de oscuridad. La siembra se realizó el 25 de mayo 2015, y durante un mes se realizaron conteos y determinó el porcentaje de contaminación, así como, explantes vivos y muertos.

Fase de multiplicación

Se utilizaron los brotes viables desarrollados en la fase de establecimiento. Se seleccionaron cinco familias (1, 5, 6, 39 y 59) para evaluar su respuesta a la multiplicación en cinco medios de cultivo. Se evaluaron cinco medios de cultivo, el primero: medio Murashigue y Skoog (MS) (1962) (MM-1); el segundo, medio MS adicionado con 0.5 ml L^{-1} de BA y 0.05 ml L^{-1} de ácido naftalenacético (ANA) (MM-2); el tercer medio, MS adicionado con 1 ml L^{-1} de BA y 0.1 ml L^{-1} de ANA (MM-3), el cuarto medio; MS adicionado con 2 ml L^{-1} de BA y 0.2 ml L^{-1} de ANA (MM-4) y el quinto medio MS adicionado con 4 ml L^{-1} de BA y 0.4 ml L^{-1} de ANA (MM-5). A los cinco medios anteriores se les adicionaron 9 g L^{-1} de agar, 30 g L^{-1} de sacarosa y 2 g L^{-1} de carbón activado. El pH de los medios se ajustó a 5.7 y mediante un despachador se depositaron 10 ml de medio a los tubos de ensayo, los cuales después fueron esterilizados. La siembra de explantes se realizó en condiciones asépticas en la campana de flujo laminar, disectandolos en cajas petri con bisturí estériles para obtener ápices de 1 cm y sembrar uno por cada tubo de ensayo, después fueron sellados con parafilm y etiquetaron. Posteriormente fueron colocados en la cámara de incubación a 24 ± 2 °C con un fotoperiodo de 16 horas luz, usando lámparas de alógeno con una intensidad lumínica de $28.05 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. La siembra se realizó entre el 29 de junio 2015, y durante dos meses se realizó conteo diario y determinó el porcentaje de contaminación, cantidad de ápices vivos, desarrollados y enraizados.

Fase de enraizamiento

En ésta fase se utilizaron los brotes, correspondientes a las mismas familias evaluadas que sobrevivieron y desarrollaron en la fase de establecimiento para evaluar su respuesta al enraizamiento en cinco medios de cultivo. el primero: medio Murashigue y Skoog (MS) (MR-1) (1962); el segundo medio: MS adicionado con 0.05 ml L^{-1} de ácido indolbutírico (AIB) y 0.05 ml L^{-1} de ANA (MR-2); el tercer medio: MS adicionado con 0.1 ml L^{-1} de AIB y 0.1 ml L^{-1} de ANA (MR-3); el cuarto medio MS adicionado con 0.15 ml L^{-1} de AIB y 0.15 ml L^{-1} de ANA

(MR-4) y el quinto: MS adicionado con 0.2 ml L^{-1} de AIB y 0.2 ml L^{-1} de ANA (MR-5). A los cinco medios anteriores se les adicionaron 9 g L^{-1} de agar, 30 g L^{-1} de sacarosa y 2 g L^{-1} de carbón activado. El pH de los medios se ajustó a 5.7 y mediante un dispensador ajustable se depositaron 10 ml de medio a los tubos de ensayo, los cuales después fueron esterilizados para sembrar los explantes en condiciones asépticas en campana de flujo laminar, disectando en cajas petri con bisturí estéril para obtener ápices de 1 cm y sembrar un ápice en cada tubo de ensayo. Las condiciones de incubación fueron iguales a las registradas en la fase de multiplicación. La siembra se realizó el 2 de julio 2015, y durante dos meses se realizó conteo y determinó el porcentaje de contaminación, cantidad de ápices vivos, desarrollados y enraizados.

Diseño experimental

En todos los experimentos se utilizó un diseño completamente al azar con arreglo factorial de tratamientos; para el establecimiento fue de 5×2 (cinco familias y dos medios) con 40 repeticiones, para la multiplicación y enraizamiento fueron 5×5 (cinco familias y cinco medios de cultivo) con 10 repeticiones. Los datos registrados no cumplieron con los supuestos de normalidad, por lo que previo al análisis de varianza la variables de porcentaje (Y) fue transformada con la función arcoseno de la raíz cuadrada del valor original expresado en fracción decimal [$T = \text{arcoseno}(\sqrt{Y})$]. La variable número de brotes fue transformada con la función logaritmo, [$T = \log_{10}(Y)$]. Posteriormente los valores promedio fueron nuevamente transformados a las unidades originales, con la función [$Y = 100 \text{ seno}^2(T)$] para la variable porcentaje y con la función [$Y = 10^T$] para la variable de conteo (Itoh *et al.*, 2002; Syros *et al.*, 2004; Ruíz *et al.*, 2005; Muñoz *et al.*, 2009). Se realizó una comparación múltiple de medias de Tukey ($p \leq 0.05$). Los análisis se realizaron con el programa estadístico SAS (2004).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la fase de establecimiento el efecto del medio de cultivo resultó significativo ($p \leq 0.05$), en la sobrevivencia de los explantes. Para la fase de multiplicación el efecto del medio resultó significativo ($p \leq 0.05$) en la sobrevivencia, enraizamiento y longitud del brote. Mientras que el genotipo fue significativo para la generación de raíz. En la fase de enraizamiento el efecto del medio resultó significativo ($p \leq 0.05$) en la sobrevivencia y enraizamiento, mientras que el genotipo fue significativo en la sobrevivencia (Cuadro 1). Las interacciones entre los medios

Cuadro 1. Valores de P del análisis de varianza de las variables consideradas en el establecimiento, multiplicación y enraizamiento *in vitro* de *Cedrela odorata* L.

Fuente de variación	Brotos vivos (%)	Brotos enraizados (%)	Brotos		Contaminación (%)		
			número	longitud	Hongos	Bacterias	Necrosis
Establecimiento							
Medio	0.045**	0.273	0.182	0.274	0.892	0.439	0.671
Genotipo	0.340	0.162	0.381	0.328	0.294	0.452	0.519
Medio*Genotipo	0.629	0.450	0.327	0.456	0.427	0.394	0.712
Multiplicación							
Medio	0.001**	0.004**	-	0.003*	-	-	-
Genotipo	0.239	0.034**	-	0.080	-	-	-
Medio*Genotipo	0.728	0.483	-	0.159	-	-	-
Enraizamiento							
Medio	0.008**	0.019**	-	0.210	-	-	-
Genotipo	0.021**	0.384	-	0.328	-	-	-
Medio*Genotipo	0.259	0.317	-	0.539	-	-	-

** Con diferencias significativas ($p \leq 0.05$).

de cultivo y genotipos no fueron significativas en las diferentes fases de la propagación *in vitro*.

Fase de establecimiento

Con el ME-2 los porcentajes de supervivencia mejoraron 10% respecto al ME-1. Mientras que el establecimiento de cinco familias (genotipos) no presentó diferencias significativas para la supervivencia (Cuadro 2). En los porcentajes de contaminación no se presentaron diferencias significativas, sin embargo, la contaminación de hongos fue dos veces más alta que la de bacterias y nueve veces más que la necrosis (Cuadro 2).

En el establecimiento de yemas de *C. odorata* se obtuvo 50 % de sobrevivencia, atribuido a la adición del antioxidante (PVP) al medio de cultivo que evitó el deterioro y muerte del tejido. Concepción *et al.* (2005) mencionan que la adición de antioxidantes como el PVP limita la exudación de compuestos fenólicos al medio de cultivo y que las yemas de

Cuadro 2. Valores medio y error estándar para determinar el efecto del medio de cultivo y el genotipo en la fase de establecimiento *in vitro* de *Cedrela odorata* L.

Factor	Brotos vivos (%)	Brotos		Contaminación (%)		
		Número	Longitud (cm)	Hongos	Bacterias	Necrosis
Medios						
M-1	45±3 b	1.18±0.9 a	1.91±0.11 a	61±5 a	31±6 a	8±3 a
M-2	55±3 a	1.23±0.5 a	1.79±0.8 a	68±7 a	26±5 a	6±2 a
CV (%)	6.3	2.3	1.7	2.4	1-3	1-9
Genotipo						
F-1	47±6 a	1.23±0.5 a	1.81±0.5 a	69±5 a	24±6 a	7±2 a
F-5	45±4 a	1.15±0.5 a	1.85±0.3 a	65±4 a	26±4 a	9±3 a
F-6	57±5 a	1.19±0.3 a	1.90±0.5 a	60±6 a	35±5 a	5±3 a
F-39	53±3 a	1.21±0.4 a	1.86±0.4 a	66±3 a	28±4 a	6±2 a
F-59	48±4 a	1.25±0.6 a	1.83±0.3 a	63±5 a	29±3 a	8±2 a
CV (%)	1.1	1.4	2.2	1.3	1.6	1.7
Promedio	50	1.205	1.85	64.5	28.5	7

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$). M: medio, F: familia, CV: coeficiente de variación.



brotos juveniles poseen el menor contenido de fenoles. Azofeifa (2009) menciona que el establecimiento *in vitro* especialmente en especies leñosas está limitado por la ocurrencia de oxidación de explantes en medio de cultivo. También menciona que las principales estrategias para evitar o disminuir los problemas oxidativos son el uso de explantes juveniles, subcultivos frecuentes, uso de adsorbentes como carbón activado y antioxidantes, entre otros.

La contaminación por hongos y bacterias se presentó a pesar de los tratamientos preventivos de desinfección y adición al medio de PPM. En el caso de *Saccharum officinarum* L., Digonzelli *et al.* (2005) menciona que PPM en concentración de 0.25 ml L⁻¹ controla la contaminación por bacterias. De acuerdo con Valverde *et al.* (2008) es frecuente observar la contaminación de bacterias en el cultivo *in vitro* de *C. odorata*, lo que hace suponer presencia intracelular. En el caso de *Cedrela salvadorensis* Standl, el mejor método para la desinfección fue con cloro al 3% por 10 minutos con sólo 10% de contaminación; aunque en éste caso se utilizaron materiales más juveniles de sólo ocho meses de edad (Soto *et al.*, 2010). En esta investigación, probablemente la habilidad del operador al momento de la siembra pudo generar la contaminación en los medios, además, se debe considerar incrementar la concentración de PPM.

Se generó en promedio 1.2 brotes por explante con longitud media de 1.85 cm. De acuerdo con Peña *et al.* (2010) la adición de BA al medio de cultivo estuvo relacionado con mayor cantidad de brotes. Mientras que la elongación de los mismos se vio favorecida por gran cantidad de nitrógeno y potasio que tiene el medio MS (Flores *et al.*, 2011).

Fase de multiplicación

El MM-3 fue significativamente superior en la supervivencia (100%) de los explantes y buen porcentaje de explantes con brotes, pero no favoreció el desarrollo de raíz; mientras que el MM-4 presentó los valores más bajos en sobrevivencia, generación de brotes y raíz (Cuadro 3). Respecto a la elongación de brotes, el MM-5 fue significativamente superior en más de 0.7 cm. En ésta fase el genotipo fue determinante en la generación de raíz, siendo significativamente superior la familia 59 con más de 10%, mientras que para sobrevivencia, generación y longitud de brotes no hubo diferencias significativas (Cuadro 3).

En esta fase, el 87% de los explantes formaron brotes de 1.84 cm de largo, lo que pudo deberse a que el medio MS contó con altos contenidos de nitrógeno y potasio (Flores *et al.*, 2011). De acuerdo con Rout *et al.* (2001) en *Paulownia tomentosa* la adición de ANA al medio de cultivo MS con BA, favoreció la tasa de multiplicación y elongación de brotes. El genotipo no tuvo diferencias significativas en la respuesta a la brotación, pero si en la respuesta a enraizamiento. El carbón activado en el medio de cultivo pudo haber favorecido el enraizamiento de los explantes, ya que de acuerdo con Basto *et al.* (2012), la adición de carbón activado en el medio de cultivo en *Cedrela montana* (Moritz ex Turcz) estimuló la formación de raíces de los explantes. Además, Flores *et al.* (2011) mencionan que el carbón activado fomenta una mayor aireación genera un medio oscuro que propicia el desarrollo de las raíces y absorbe sustancias inhibitoras indeseables como etileno o pigmentos tóxicos.

El genotipo no tuvo diferencias significativas en la respuesta a la brotación, pero si en la respuesta a enraizamiento. El carbón activado en el medio de cultivo pudo haber favorecido el enraizamiento de los explantes, ya que de acuerdo con Basto *et al.* (2012), la adición de carbón activado en el medio de cultivo en *Cedrela montana* (Moritz ex Turcz) estimuló la formación de raíces de los explantes. Además, Flores *et al.* (2011) mencionan que el carbón activado fomenta una mayor aireación genera un medio oscuro que propicia el desarrollo de las raíces y absorbe sustancias inhibitoras indeseables como etileno o pigmentos tóxicos.

Fase de enraizamiento

En ésta fase, el medio de cultivo presentó diferencias significativas en el porcentaje de sobrevivencia y generación de

Cuadro 3. Valores estadísticos del efecto de medio de cultivo y genotipo en la fase de multiplicación *in vitro* de *Cedrela odorata* L.

Factor	Explantes (%)			Brotos
	supervivencia	Con brotes	Con raíz	Longitud (cm)
Medios				
M-1	92±3 b	90±3 a	68±6 a	1.36±0.29 b
M-2	85±5 c	85±5 a	68±5 a	1.51±0.30 b
M-3	100±0 a	90±4 a	60±5 ab	1.55±0.27 b
M-4	80±6 c	75±4 b	52±7 b	2.02±0.31 ab
M-5	96±2 b	95±2 a	76±6 a	2.76±0.08 a
CV (%)	6.8	4.7	4.3	6.2
Genotipos				
F-1	88±5 a	85±4 a	68±4 b	1.37±0.29 a
F-5	96±2 a	84±6 a	36±8 c	1.49±0.28 a
F-6	92±3 a	90±4 a	64±5 b	1.98±0.33 a
F-39	92±3 a	92±3 a	72±6 b	1.83±0.29 a
F-59	84±5 a	84±5 a	84±5 a	2.54±0.30 a
CV (%)	1.7	2.1	6.3	1.8
Promedio	90.4	87	64.8	1.84

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p>0.05). M: medio, F: familia, CV: coeficiente de variación.

raíz. El MR-3 presentó el mayor valor y fue significativamente superior en la generación de raíces en 12% (Cuadro 4). Referente a sobrevivencia, el genotipo presentó diferencias significativas, siendo la familia 59 superior con un 8%. Mientras que no se encontraron diferencias significativas en cuanto a generación de brotes y raíz. En el caso de longitud de brotes, el medio de cultivo y genotipo no registraron diferencias significativas (Cuadro 4).

El 77.6% de los explantes generaron raíces, y respecto a ello, Millán *et al.* (2011) mencionan que *C. odorata* presenta buena capacidad de enraizamiento aún sin auxinas, pero la aplicación exógena de éstas, aumentan el porcentaje de enraizamiento, siendo significativamente superior con la aplicación de AIB en el medio de cultivo (Figura 1).

En un híbrido de almendro con durazno H1, Parada y Villegas (2009)

mencionan que aumentar la concentración de AIB aumenta el número de raíces. Joshi *et al.* (2003) en un medio MS suplementado con 1 mg L⁻¹ de AIB obtuvieron 75% de enraizamiento en eucalipto (*Eucalyptus* spp.). En brotes de caoba (*Swietenia macrophylla*) en un medio de cultivo MS al 50% con diferentes concentraciones de ANA, no se favoreció el enraizamiento (Carranza *et al.*, 2003).

CONCLUSIONES

En la fase de establecimiento el uso de materiales juveniles en el medio MS adicionado con antioxidantes, desinfectante y auxinas favoreció la sobrevivencia de explantes. Para la fase de multiplicación el medio MS adicionado con 1 ml L⁻¹ de BA y 0.1 ml L⁻¹ de ANA fue significativamente superior en la sobrevivencia, mientras que la elongación de los brotes el uso del medio MS adicionado con 4 ml L⁻¹ de BA y 0.4 ml

L⁻¹ de ANA fue significativamente superior. En la fase de enraizamiento el medio MS adicionado con 0.1 ml L⁻¹ de AIB y 0.1 ml L⁻¹ de ANA presentó la mayor sobrevivencia y fue significativamente superior en generar raíces en 12%, por lo que se puede concluir que el efecto del medio de cultivo y el genotipo es determinante para la propagación *in vitro* de *C. odorata*.

LITERATURA CITADA

- Azofeifa A. 2009. Problemas de oxidación y oscurecimiento de explantes cultivados *in vitro*. *Agronomía Mesoamericana* 20(1): 153-175.
- Basto S., Serrano C., Hodson de J.E. 2012. Effects of donor plant age and explants on *in vitro* culture of *Cedrela montana* Moritz ex Turcz. *Universitas Scientiarum* 17(3): 263-271.
- Borges G.M., Destrade B.R., Meneses R.S., Gómez K.R., Malaurie B., Hamon P., Demenorval L.C. 2011. Optimización de un medio de cultivo para plantas micropropagadas de *Dioscorea alata* L. *Revista Colombiana de Biotecnología* 13(2): 221-228.
- Carranza P.M., Reyes M.H., Mora S.W., Cevallos F.O., Escobar T.A., Cadme A.M., Nieto R.J., Morante C.J. 2013. Propagación clonal *in vitro* de *Swietenia macrophylla* King (caoba). *Ciencia y Tecnología* 6(2): 1-8.
- CONAFOR. 2015. Principales especies maderables establecidas en plantaciones forestales comerciales 2000-2014. Consultado en CONAFOR. Mayo de 2015.
- Concepción O., Nápoles L., Pérez A.T., Peralta N., Hernández M., Trujillo R. 2005. Efecto de tres antioxidantes en el cultivo *in vitro* de ápices de guayaba (*Psidium guajava* L.) relación entre origen del explante y el contenido de compuestos fenólicos. *Cultivos Tropicales* 26(1): 33-39.
- Digonzei P., Díaz L., Carrizo B.S. 2005. Uso de PPM (Plant Preservative Mixture) para controlar contaminantes bacterianos en la multiplicación *in vitro* de caña de azúcar. *Revista Facultad de Agronomía* 22: 22-32.
- Ewald D., Naujoks G., Piegert H. 2000. Performance and Wood Quality of *in Vitro* Propagated Hybrid Curly

Cuadro 4. Valores estadísticos del efecto de medio de cultivo y genotipo en la fase de enraizamiento *in vitro* de *Cedrela odorata* L.

Factor	Explantes (%)			Brotes
	supervivencia	Con brotes	Con raíz	Longitud (cm)
Medios				
M-1	92±3 a	87±4 a	80±5 b	1.06±0.18 a
M-2	84±4 ab	81±5 a	76±4 b	1.13±0.19 a
M-3	96±2 a	92±3 a	92±3 a	1.20±0.11 a
M-4	92±4 a	85±5 a	76±5 b	1.50±0.18 a
M-5	84±6 ab	79±6 a	64±6 b	1.76±0.19 a
CV (%)	3.6	2.2	5.8	1.9
Genotipos				
F-1	88±5 b	85±5 a	80±6 a	1.11±0.18 a
F-5	88±6 ab	82±4 a	76±5 a	1.21±0.19 a
F-6	88±4 b	86±3 a	80±4 a	1.27±0.18 a
F-39	88±4 b	84±5 a	80±5 a	1.57±0.15 a
F-59	96±2 a	87±4 a	72±6 a	1.49±0.17 a
CV (%)	4.7	1.5	2.0	1.8
Promedio	89.6	84.8	77.6	1.33

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$). M: medio, F: familia, CV: coeficiente de variación.



Figura 1. Fase de establecimiento: A: corte de yemas. B: establecimiento de yemas. C-D: crecimiento y desarrollo de brotes. Fase de multiplicación: E: corte de ápices. F: establecimiento de ápices. G: crecimiento y desarrollo de brotes con raíz. Fase de enraizamiento: H: corte de ápices. I: establecimiento de ápices: J: crecimiento de ápices y K: brotes con raíces desarrolladas.

Birch (*Betula pendula* × *Betula pendula* var. *carelica* SOK.) Clones. *Silvae Genetica* 49(2): 98-101.

Flores E.G., Gil V.I., Colinas L.M.T., Mata R.M. 2011. Propagación *in vitro* de la orquídea *Brassia verrucosa* Bateman Ex.Lindl. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 17(1): 5-8.

González M., Mogollón N., Alvarado G., Jiménez A. Capote T. 2012. Efecto del medio del cultivo *in vitro* y la fuente nitrogenada sobre el crecimiento del cocuy (*Agave cocui* Trelease). *Bioagro* 24(1): 39-44.

Kumar A. 2007. Growth Performance and Variability in Different Clones of *Gmelina arborea* (ROXB.). *Silvae Genetica* 56(1): 32-36.

Hannrup B., Jansson G., Danell O. 2008. Genotype by environment interaction in *Pinus sylvestris* L. in southern Sweden. *Silvae Genetica* 57(6): 306-311.

Itoh A., Yamakura T., Kanzaki M., Ohkubo T., Palmiotto P.A., LaFrankie J.V., Kendawang J.J., Lee H.S. 2002. Rooting ability of cuttings relates to phylogeny, habitat preference and growth characteristics of tropical rainforest trees. *Forest Ecology and Management* 168: 275-287.

Joshi I., Bisht P., Sharma V.K., Uniyal D.P. 2003. *In vitro* clonal propagation of mature Eucalyptus F1 hybrid (*Eucalyptus tereticornis* Sm. × *E. grandis* Hill ex. Maiden). *Silvae Genetica* 52(3-4): 110-113.

Millán O.L., Corredoira E., San José M.C. 2011. *In vitro* rhizogenesis: histoanatomy of *Cedrela odorata* (Meliaceae) microcuttings. *Revista Biología Tropical* 59(1): 447-453.

Muellner A.N., Pennington T.D., Chase M.W. 2009. Molecular phylogenetics of Neotropical Cedreleae (mahogany family, Meliaceae) based on nuclear and plastid DNA sequences reveal multiple origins of "*Cedrela odorata*". *Molecular Phylogenetics and Evolution* 52: 461-469.

Mukherjee P., Husain N., Misra S.C., Rao V.S. 2010. *In vitro* propagation of a grape rootstock, de Grasset (*Vitis champinii* Planch.): Effects of medium compositions and plant growth regulators. *Scientia Horticulturae* 126: 13-19.

Muñoz G.L., Vargas H.J.J., López U.J., Soto H. M. 2009. Effect of cutting age and substrate temperature on rooting of *Taxus globosa*. *New Forests* 38: 187-196.

- Murashige T., Skoog F. 1962. A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures. *Plant Physiology* 15: 473-497.
- Parada P.D.M., Villegas M. A. 2009. Propagación *in vitro* del híbrido almendro×manzano H1. *Revista Fitotecnia Mexicana* 32(2): 103-109.
- Peña R.Y.J., Juárez G.J., Gómez L.L., Jerónimo P.J., García S.L.I., González R.J.A., Robert M.L. 2010. Multiple adventitious shoot formation in Spanish Red Cedar (*Cedrela odorata* L.) cultured *in vitro* using juvenile and mature tissues: an improved micropropagation protocol for a highly valuable tropical tree species. *In Vitro Cell. Dev. Biol.-Plant*. 46: 149-160.
- Pérez F.J., Aguilar V.M.E., Roca T.R. 2012. Assays for the *in vitro* establishment of *Swietenia macrophylla* and *Cedrela odorata*. *Rev. Colombiana de Biotecnología* 14(1): 20-30.
- Quinto L.P., Martínez H.A., Pimentel B.L., Rodríguez T.D.A. 2009. Alternativas para mejorar la germinación de semillas de tres árboles tropicales. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 15(1): 23-28.
- Ramírez G.C., Vera C.G., Carrillo A.F., Magaña T.O.S. 2008. El cedro rojo (*Cedrela odorata* L.) como alternativa de reconversión en terrenos abandonados por la agricultura comercial en el Sur de Tamaulipas. *Agricultura Técnica en México* 34(2): 243-256.
- Rout G.R., Reddy G.M., Das P. 2001. Studies on *in vitro* clonal propagation of *Paulownia tomentosa* Studed and evaluation of genetic fidelity through RAPD marker. *Silvae Genetica* 50(5-6): 208-212.
- Ruiz G.R., Vargas H.J.J., Cetina A.V.M., Villegas M A. 2005. Efecto del ácido indolbutírico (AIB) y tipo de estaca en el enraizado de *Gmelina arborea* Roxb. *Revista Fitotecnia Mexicana* 28(4): 319-326.
- Sánchez M.V., Salazar G.J.G., Vargas H.J.J., López U. J., Jasso M.J. 2003. Genetic parameters and response to selection for growth traits in *Cedrela odorata* L. *Revista Fitotecnia Mexicana* 26(1): 19-27.
- SAS Institute. 2004 SAS/STAT 9.1 Guide for Personal Computers. SAS Institute Inc. Cary, N.C. 378 p.
- SEMARNAT. 2010. NORMA Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección ambiental -Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo. Diario oficial. p. 67.
- Soto V.B., Valverde C.L., Rojas V.A., Hine G A. 2010. Establecimiento *in vitro* de *Cedrela salvadorensis* Standl. *Tecnología en Marcha* 23(4): 66-73.
- Syros T., Yupsanis T., Zafiriadis H., Economou A. 2004. Activity and isoforms of peroxidases, lignin and anatomy, during adventitious rooting in cuttings of *Ebenus cretica* L. *Journal of Plant Physiology* 161: 69-77.
- Valdés A.E., Fernández B., Centeno M.L. 2003. Alterations in endogenous levels of cytokinins following grafting of *Pinus radiata* support ratio of cytokinins as an index of ageing and Vigour. *J. Plant Physiology* 160: 1407-1410.
- Valverde L., Rojas A., Hine A. 2008. *In vitro* propagation of *Albizia guachapele*, *Cedrela odorata*, *Playmiscium pinnatu* and *Guaicum sanctum*. *Plan Tissue Cult & Biotech*, 18(2): 151-156.

APLICACIÓN DE SECUENCIACIÓN MASIVA PARA EL ESTUDIO Y EXPLORACIÓN DE DIVERSIDAD MICROBIANA Y SU APROVECHAMIENTO BIOTECNOLÓGICO

APPLICATION OF MASSIVE SEQUENCING TO STUDY AND EXPLORATION MICROBIAL DIVERSITY AND ITS BIOTECHNOLOGICAL USE

Cadena-Zamudio, J.D.¹; Martínez-Peña, M.D.¹; Guzmán-Rodríguez, L.F.¹; Arteaga-Garibay, R.I.^{1*}

¹ Centro Nacional de Recursos Genéticos (CNRG), Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias Boulevard de la Biodiversidad 400, Rancho las Cruces. C.P. 47600 Tepatitlán de Morelos, Jalisco. México.

*Autor de correspondencia: arteaga.ramon@inifap.gob.mx

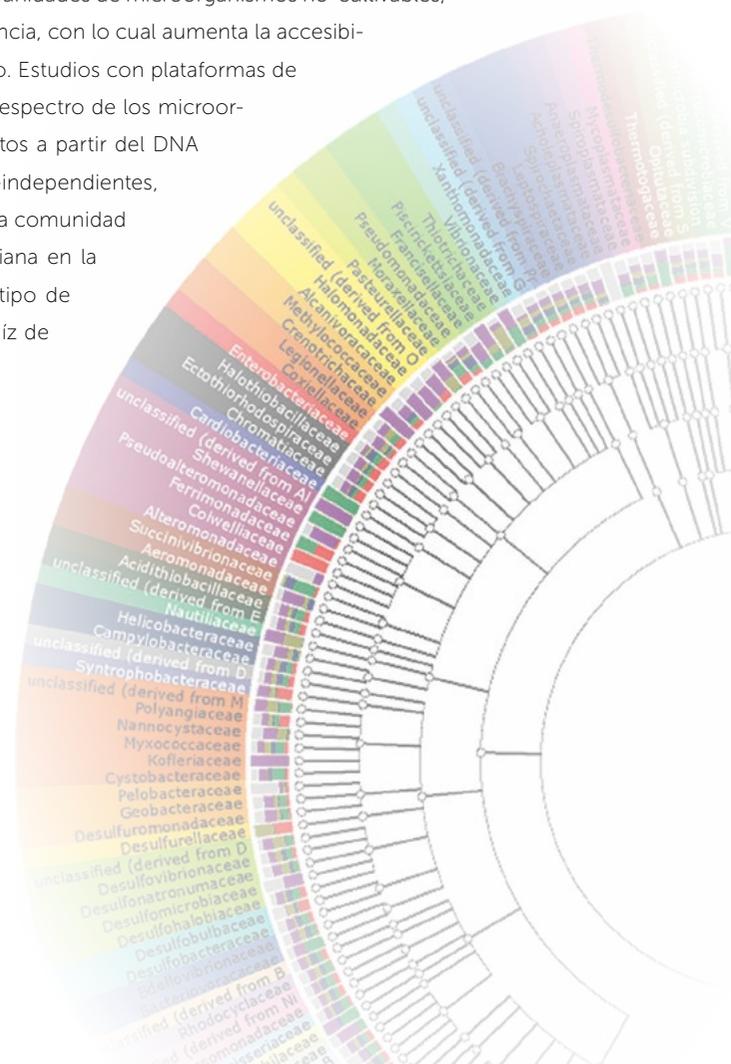
RESUMEN

Se describe brevemente las metodologías más importantes de la metagenómica como técnica alternativa a métodos clásicos de cultivo para el estudio de microorganismos. Cerca de 99% de los microorganismos no pueden ser cultivados fácilmente, por ello se ha registrado un aumento en el uso de tecnologías que ofrecen respuestas rápidas, económicas y de mayor precisión sobre la información de genomas. Una de estas tecnologías es la secuenciación de próxima generación (NGS) ubicada como herramienta emergente para estudiar comunidades de microorganismos no-cultivables; por su capacidad de obtener grandes volúmenes de datos de secuencia, con lo cual aumenta la accesibilidad de los recursos genéticos contenidos, por ejemplo en un suelo. Estudios con plataformas de NGS en ácidos nucleicos extraídos de rizósfera proveen un amplio espectro de los microorganismos que la habitan, además de obtener y amplificar fragmentos a partir del DNA genómico de la comunidad y ser analizados por técnicas cultivo-independientes, capaces de mostrar la influencia de la planta sobre la estructura de la comunidad microbiana y deducir que la composición de la microbiota bacteriana en la rizósfera se ve afectada por un complejo de interacción entre el tipo de suelo, la especie hospedera y circundantes y la localización de la raíz de la planta hospedera.

Palabras clave: Meta genómica, Microbioma, Rizósfera, NGS (Next Generation sequencing).

ABSTRACT

A brief revision of the most important methodologies of metagenomics was carried out, to describe the approaches where it makes incursions, as an alternative technique to classic cultivation methods for the study of microorganisms. Close to 99 % of microorganisms cannot be easily cultivated, so technologies that offer fast, economic and more precise



Agroproductividad: Vol. 9, Núm. 2, febrero. 2016. pp: 70-83.

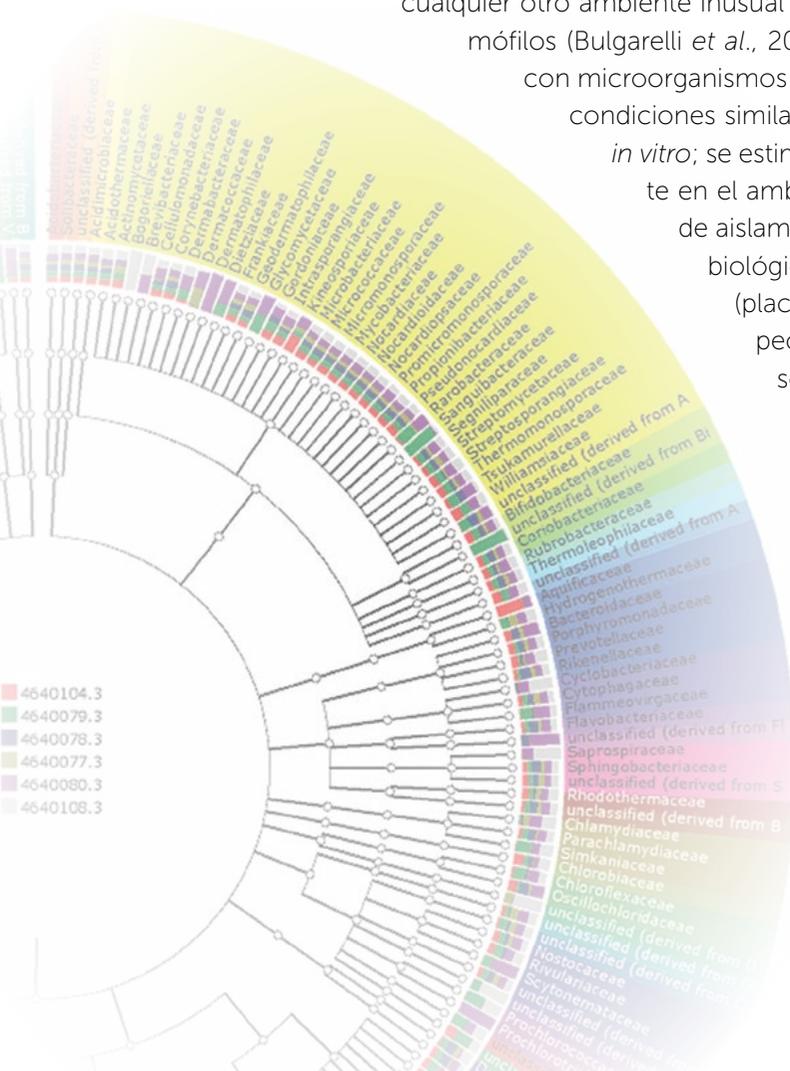
Recibido: diciembre, 2015. **Aceptado:** febrero, 2016.

responses about genomes are applied. Next generation sequencing (NGS) is described as an emerging tool to study communities of non-cultivable microorganisms, used because of its capacity to obtain large volumes of sequencing data, with which the accessibility to genetic resources contained, for example, in soils, is increased. Studies with NGS platforms on nucleic acids extracted from rhizosphere provide a broad spectrum of microorganisms that inhabit it, in addition to obtaining and amplifying fragments from genomic DNA in the community, and being analyzed through crop-dependent techniques, capable of showing the influence of one plant on the structure of the microbe community and deducing that their composition in the rhizosphere is affected by a complex of interaction between the type of soil, the hosting and surrounding species, and the localization of the root from the host plant.

Palabras clave: Metagenomics, microbiome, rhizosphere, NGS (Next Generation Sequencing).

INTRODUCCIÓN

La actividad y diversidad de la microbiota son algunas de las condicionantes en la fertilidad, estabilidad y funcionamiento de ecosistemas y agroecosistemas. La diversidad microbiana es esencial para garantizar los ciclos de nutrientes y procesos de descomposición del material vegetal en cualquier ecosistema terrestre debido a que procesos biológicos tales como, oxidación, reducción, descomposición de materia orgánica y mineralización, así como, interacciones interespecíficas e intraespecíficas que se establecen, están reguladas por microorganismos que habitan en ese nicho. Por ello el aumento en el conocimiento de la diversidad microbiana se ha convertido en una de las líneas de investigación más relevantes de la ecología; pues sus múltiples aportes en el conocimiento de la función, estructura, evolución y relación de poblaciones que la componen la postulan como una fuente emergente en la investigación médica y biotecnológica (López-Reyes *et al.*, 2015; Acinas, 2007). La mayoría de formas vivientes en la Tierra son de tamaño microscópico y habitan casi en cualquier ambiente, desde lugares muy fríos con temperaturas inferiores a 0 °C, hasta sitios muy cálidos superiores a 100 °C (Hernández-León *et al.*, 2010), así como, en sustratos muy ácidos, muy alcalinos, de presión elevada, y en general cualquier otro ambiente inusual desde el punto de vista humano y son denominados extremófilos (Bulgarelli *et al.*, 2013). Debido a su tamaño pequeño y su diversidad, trabajar con microorganismos no es sencillo ya que muchos de estos al no encontrarse en condiciones similares a las de sus ecosistemas naturales no pueden cultivarse *in vitro*; se estima que cerca del 99% de una comunidad microbiana presente en el ambiente no es realmente accesible por métodos tradicionales de aislamiento microbiológicos tales como: cultivo en medios microbiológicos, microscopia, caracterización bioquímica y metabólica (placas EcoPlate^{MR} de BIOLOG). Estas herramientas tienen un espectro limitado para su uso en la clasificación e identificación, sobre todo, para microorganismos de difícil desarrollo, lo que abre paso al estudio con estrategias alternativas e independientes del cultivo (Metzker, 2010; Nichols, 2007); con ellas la necesidad de cultivar las bacterias presentes en una muestra, ha sido sustituida por la capacidad de aislar y caracterizar el material genético presente de cada uno de los microorganismos encontrados en una muestras de suelo o de cualquier nicho ecológico determinado, también llamado "metagenoma" (Handelsman *et al.*, 2002). El desarrollo de nuevas técnicas de biología molecular para el estudio de las comunidades microbianas se ha vuelto una herramienta importante en el campo de la microbiología, ya que con ellas se puede estudiar el ambiente microbiano con mayor detalle para describir su estructura y la función que desempeñan en estos ambientes bajo condiciones naturales



(Metzker, 2010; Schmeisser *et al.*, 2007). Los métodos moleculares basados en el análisis de DNA o RNA representan un grupo de herramientas muy útiles para analizar las comunidades microbianas (Figura 1), estos incluyen la amplificación de blancos moleculares para detectar e identificar un microorganismo, o indagar la funcionalidad de ciertos genes relacionados a su metabolismo (Wang *et al.*, 2011; Carvalhais *et al.*, 2013; de Zelicourt; Dey *et al.*, 2014).

De igual forma, se pueden estudiar comunidades microbianas con un enfoque metagenómico en el que se obtienen cantidades de datos mayores (Giga o Tera bases de nucleótidos) a procesar ya que estos son del total de organismos existentes en ese ambiente (Shakya *et al.*, 2013; Edwards *et al.*, 2013; Bulgarelli *et al.*, 2015). Los enfoques metagenómicos se impulsaron con los avances en la secuenciación masiva de ácidos nucleicos que permitió obtener información de las porciones de microorganismos cultivables y no cultivables, aún de ambientes

diversos, así como, la detección de genes asociados a la biosíntesis de enzimas, proteínas u otros metabolitos relevantes con alguna aplicación biotecnológica o con beneficio en actividades humanas diversas (Shakira *et al.*, 2010; Avneet y Vakhlu, 2015; Lorenz y Eck, 2005). Con base en lo anterior, se realizó una breve revisión acerca de las aplicaciones de secuenciación masiva del DNA en el estudio de la diversidad microbiana, con el fin de facilitar su comprensión en el campo de la microbiología (Figura 1).

Las ciencias Ómicas

Un estudio con herramientas meta-ómicas (Cuadro 1), normalmente tiene como objetivo identificar la diversidad de organismos microbianos, genes, variantes y funciones metabólicas que caracterizan la comunidad microbiana que habita una muestra medio ambiental. La metagenómica como término se refiere a la secuenciación específica de DNA de toda la comunidad; esta puede ser complementada por estudios transcriptómicos (secuenciación de ADNc) y tecnologías funcionales, tales como proteómica y metabolómica (Wilmes y Bond, 2006; Turnbaugh y Gordon, 2008; Gilbert y Hughes, 2011). Los enfoques metagenómicos y transcriptómicos evalúan en particular la composición genómica y la diversidad dentro y entre las comunidades microbianas por medio de las tecnologías de secuenciación, incluyendo la secuenciación dirigida RNAr genes (16S en bacterias, 18S en eucariotas, y el espaciador interno transcrito, por lo general en los hongos (Segata *et al.*, 2013).

Este escrito se centra en la metagenómica, la cual permite el estudio de los genomas obtenidos de muestras ambientales, vegetales, animales y humanos; esta área se define por la aplicación de técnicas modernas en ciencias genómicas que

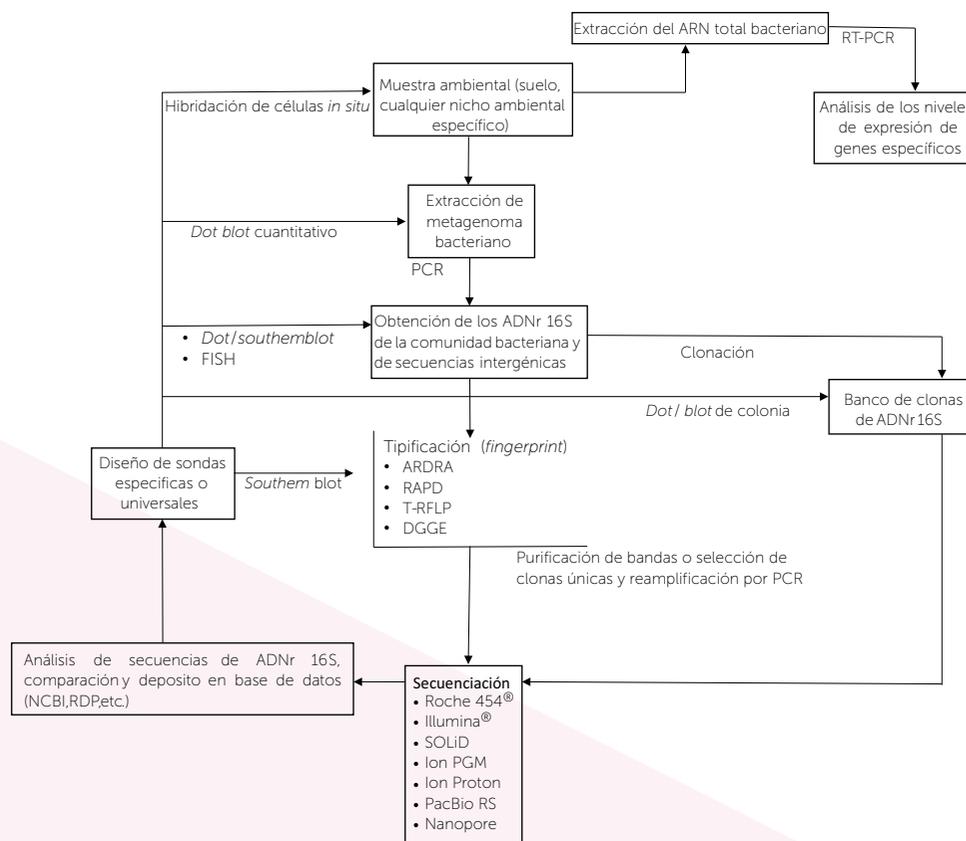


Figura 1. Técnicas moleculares no dependientes del cultivo microbiano utilizadas en el análisis de la diversidad bacteriana de suelos. Abreviaciones: **NCBI**: National Center for Biotechnology Information; **RDP**: Ribosomal Database Project; **FISH**: hibridación fluorescente *in situ*; **PCR**: reacción en cadena de la polimerasa; **ARDRA**: análisis de restricción de ADN ribosomal amplificado; **RAPD**: amplificación aleatoria de ADN; **T-RFLP**: polimorfismo de fragmentos de restricción terminales; **DGGE**: electroforesis desnaturizante de gradiente en gel; **RT-PCR**: PCR en tiempo real (Tomada y modificada de Escalante-Lozada *et al.*, 2004)

Cuadro 1. Descripción de las diferentes áreas de las ciencias Ómicas (tomado y modificado de García-Vallejo, 2004).

Nivel de análisis	Definición	Método de análisis
Metagenoma	Conjunto completo de genes y genomas de un microbioma	Secuenciación del material genético
Transcriptoma	Conjunto completo de moléculas de RNAm presentes en células, tejido u órgano	Hibridación. SAGE (análisis seriado de la expresión de genes). Microplataformas de DNA.
Proteoma	Total de moléculas proteicas presentes en células, tejido u órgano	Electroforesis bidimensional. Microplataformas de péptidos.
Metaboloma	Conjunto completo de metabolitos (intermediarios de bajo peso molecular) en células, tejido u órgano	Espectroscopia con luz infrarroja. Espectrometría de masas. Espectrometría con resonancia nuclear magnética

incluye el estudio de las comunidades de organismos microbianos; y que requieren de la obtención de los ácidos nucleicos totales de una muestra representativa del entorno natural, lo cual no condiciona el aislamiento y cultivo de la fracción cultivable (Shakira *et al.*, 2010); esta herramienta puede ser utilizada para el descubrimiento de nuevos microorganismos y sus productos naturales y funciones metabólicas (He *et al.*, 2007). La metagenómica combina una gran cantidad de técnicas moleculares desarrolladas al final de la segunda mitad del siglo XXI (Daniel, 2005), lo que ha permitido el investigar de forma más amplia la ecología microbiana y sus interacciones con otros seres vivos; y describir el potencial biotecnológico que presentan estos microorganismos (Helen y Wolfgang, 2005). Este tipo de perfiles "funcionales" pueden ser inferidos utilizando información de referencia del genoma o por mapeo del mismo (a nivel de nucleótidos), también se puede deducir la funcionalidad de un gen o proteína mediante búsquedas en bases de datos como NCBI, KEGG, SEED (Segata *et al.*, 2013). Ofrece además el potencial de una visión imparcial relativa en la composición genética de las comunidades microbianas complejas; perspectiva que ha sido difícil de alcanzar y que es crucial debido al impacto fundamental que estas co-

munidades tienen en la salud humana, animal y ciclos biogeoquímicos globales (Turnbaugh *et al.*, 2006; Gómez-Álvarez *et al.*, 2009), y aunque los metagenomas proporcionan ideas provocativas de la capacidad metabólica de las comunidades microbianas y otros ambientes, es imperativo entender sus limitaciones (Gómez-Álvarez *et al.*, 2009), tales como, su uso a nivel diagnóstico, el excesivo volumen de datos genómicos obtenidos, la dificultad en la interpretación de resultados y la obtención de un gran número de resultados inesperados, posible contaminación o nuevas inserciones, duplicaciones de segmentos, pérdida de fragmentos en la lectura de genes o genomas y cambios de algoritmos utilizados entre un tipo de secuenciador y otro (Alkan *et al.*, 2011; Wold y Myers, 2008).

Plataformas de secuenciación de próxima generación (NGS)

Las tecnologías de secuenciación masiva incluyen una serie de pasos universales que se agrupan en términos generales en la preparación de bibliotecas y templado, reacción de secuenciación, y análisis de datos (Figura 2). La combinación única de protocolos específicos distingue a cada una de las tecnologías y determina el tipo y cantidad de datos producidos de una plataforma a otra. Las diferencias entre platafor-

mas son notables al comparar los datos obtenidos en calidad, cantidad y costo de la secuenciación (Wold *et al.*, 2008; Metzker, 2010; Alkan *et al.*, 2011). Aunque las puntuaciones de calidad y precisión de las estimaciones son proporcionadas por cada fabricante, no hay consenso establecido para determinar una "calidad mínima" de las secuencias, es decir, no se puede hacer una equivalencia entre una plataforma y otra, debido a diversas métricas de secuenciación utilizadas por las diferentes tecnologías (Metzker, 2010). Los distintos sistemas de secuenciación de nueva generación (NGS, por sus siglas en inglés: *Next-Generation Sequencing*) tienen en común la alta producción de datos, a partir de la secuenciación masiva en paralelo en el orden de las "Gigabases" o "Terabases". A menudo, los instrumentos de NGS se clasifican como tecnologías de secuenciación de segunda y tercera generación (Schadt *et al.*, 2010; Niedringhaus *et al.*, 2011; Pareek *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2012); y hasta el momento no existe una definición coherente para esta terminología, y es difícil asignar a todos los instrumentos de forma inequívoca a una u otra categoría (Schadt *et al.*, 2010; Thompson y Milos, 2011). De manera general se hace referencia como instrumentos de secuenciación de segunda generación a to-

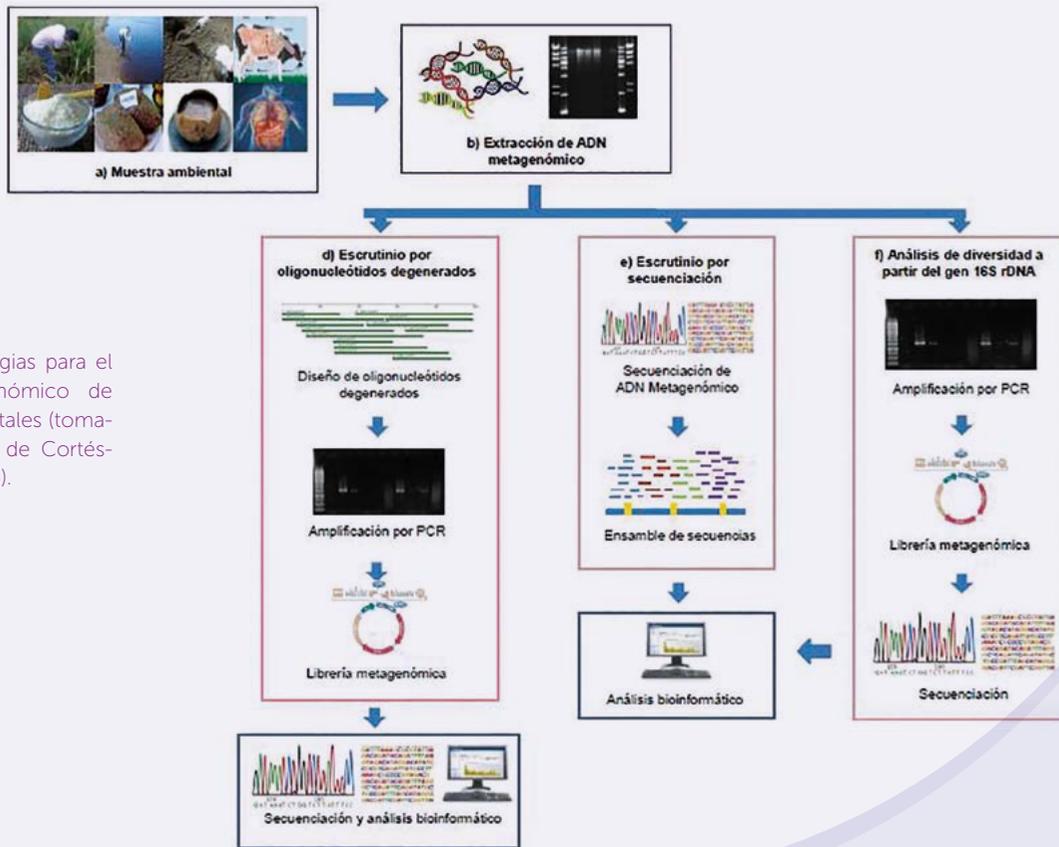


Figura 2. Estrategias para el estudio metagenómico de muestras ambientales (tomada y modificada de Cortés-López *et al.*, 2014).

dos aquellos métodos dependientes de una etapa de amplificación vía una PCR (Reacción en cadena de la polimerasa) para la intensificación de la señal antes de la reacción de secuenciación, las cuales incluyen plataformas tales como, 454 Life Sciences de Roche®, las diferentes plataformas de Illumina® y las plataformas de Life Technologies el SOLiD® (por sus siglas en inglés “Sequencing by Oligonucleotide Ligation and Detection”) y la Ion Torrent™ (Knief, 2014).

La única plataforma de secuenciación que se considera como de tercera generación es la PacBio RS® (Pacific Biosciences), que es capaz de secuenciar pequeños fragmentos de DNA miles de veces con gran precisión y leer secuencias de DNA que tengan un largo de entre 1,000 bases y 1,200 bases, lo que sin duda ayuda a resolver problemas asociados a la segunda generación de secuenciadores, es decir, regiones homopoliméricas, repeticiones en tándem, lecturas cortas; representando un avance significativo respecto a otras plataformas cuya máxima capacidad de lectura es cercana a 100 bases (Knief, 2014; Merriman *et al.*, 2012; Metzker, 2010). Otra gran ventaja es que cada lectura del PacBio® costaría USD \$100, 10 veces menos de lo que cuesta una corrida en las actuales plataformas, con una velocidad de

secuenciación de solo 12 horas por corrida (Knief, 2014) (Cuadro 2).

Ventajas de la secuenciación masiva

La mayor ventaja de la metagenómica respecto a los métodos dependientes de cultivo, es que se brinda información de la estructura de las comunidades microbianas (riqueza y distribución) (Figura 5), sus genomas, análisis funcionales de genes, proteínas, enzimas y metabolitos secundarios, análisis filogenéticos y taxonómicos a nivel de especie, análisis de transferencia horizontal de genes y muchos más, entre diversos tipos de microorganismos, de los cuales destacan las bacterias, hongos, arqueas y virus (Hugenholtz y Tyson, 2008). Este conocimiento puede aumentar la información de la relación existente entre el hospedero y microorganismo con aplicación en estados diferentes de salud o etapas de crecimiento. Otros estudios han revelado la capacidad funcional de los organismos en el aparato gastrointestinal u oral de diversas especies, que incluyen al ser humano (Belda-Ferre *et al.*, 2011; Kurokawa *et al.*, 2007; Turnbaugh *et al.*, 2009), roedores (Turnbaugh *et al.*, 2006; Turnbaugh *et al.*, 2008), ciervos (Brulc *et al.*, 2009), pollos (Qu *et al.*, 2008), aves (Stevens y Hume, 1995; Kohl, 2012), peces (Engeszer *et al.*, 2007; Roeselers *et al.*, 2011), insectos

Cuadro 2. Especificaciones tecnológicas de plataformas de secuenciación de próxima generación (modificada de Knief, 2014).

Compañía	Plataforma	Amplificación de librería	Portador de Biblioteca, moléculas o perlas durante la secuenciación	Principio de secuenciación	Modificaciones de nucleótido	Método de detección de señal	Máxima salida de datos por corrida
Roche®	454	PCR en emulsión con microesferas	Picotiterplate	Pirosecuenciación	Solo para dATP, se une como tiol derivado de dATP α S	Detección de luz emitida en reacciones secundarias iniciadas por la liberación de PP al incorporarse un nucleótido	35-700 Mb
Illumina® Inc., 2016	Illumina	PCR fluida en núcleos unidos a la superficie celda	Celda de flujo	Secuenciación por síntesis desde el extremo libre	Nucleótidos bloqueados en el extremo 3' con fluorocromos	Detección óptica de emisión de nucleótidos con extremos fluorescentes	3-600 Gb
ThermoFisher Sci. Inc., 2016	SOLiD	PCR en emulsión con microesferas o PCR fluida en superficie de una celda	Celda de flujo	Secuenciación por ligación	2 bases codificadas en los iniciadores con fluorescencia	Detección óptica de emisión de nucleótidos con extremos fluorescentes	<1-260 Gb
Ion Torrent™	Ion PGM Ion Proton	PCR en emulsión microesferas	Chip semiconductor	Secuenciación por síntesis	Ninguno	Detección de H ⁺ liberados por la incorporación de nucleótido	60-2000 Mb <1-10 Gb
Pacific biosciences®	PacBio RS	No aplica	SMRT	Fósforo fluorescente ligado a nucleótidos	Fosfolípido unido a nucleótidos fluorescentes	Detección óptica en tiempo real de polimerasa modificada con fluorescencia en sitio de incorporación	400 Mb
Oxford Nanopore Technologies, 2016	MinION	Análisis electrónico de moléculas con un nanoporo		DNA polymers through a protein nanopore			>200 Kb

(Basset *et al.*, 2003; Hongoh, 2010; Köhler *et al.*, 2012; Minard *et al.*, 2013). También se ha logrado encontrar enzimas con homologías muy bajas a las existentes, las cuales se han utilizado para algún fin biotecnológico (Danil, 2004).

Aplicación de estudios metagenómicos en la biotecnología

Actualmente, se sabe que el suelo es el ambiente natural más rico y diverso de todos los que se puedan encontrar

en la tierra por su diversidad y complejidad microbiológica (Rolf, 2005; Gans *et al.*, 2005; Méndez, 2013), y se dice que 1 g⁻¹ de suelo puede contener más de 10 billones de microorganismos y miles de especies (Rosello y Amann, 2001), lo anterior se relaciona con reportes donde se describe que 30 g⁻¹ de suelo contienen cerca de 500,000 especies (Shakira *et al.*, 2010); y se ha estimado que 1 g⁻¹ de suelo podría contener cerca de 3,000 o más genomas, de los cuales solo 1% se puede aislar por técnicas de cultivo (Rolf, 2005; Shakira *et al.*, 2010). Estos

datos ayudan a ilustrar que la diversidad metagenómica del suelo es un campo nuevo, amplio y rico para la búsqueda de nuevas enzimas y componentes bioactivos con posible uso biotecnológico. Los estudios de diversidad microbiana con herramientas que involucren plataformas de NGS pueden proporcionar una evaluación independientes de cultivo de la reserva genética de las comunidades microbianas del suelo, pues comprende el aislamiento del DNA ambiental, y con ello la construcción y selección de bibliotecas que permitan describir de forma más confiable un escenario más completo de las comunidades en el ambiente estudiado, y comprender mejor las interacciones entre microorganismos y ambiente (Shakira *et al.*, 2010). La metagenómica ofrece la posibilidad no sólo de analizar la diversidad filogenética de biopelículas ambientales sino también de localizar genes y operones que codifican biomoléculas novedosas, tales como, antimicrobianos, enzimas, pigmentos, entre otros metabolitos; lo que podría permitir el aislamiento de productos derivados y potenciar su uso para la producción a gran escala (Schmeisser *et al.*, 2007; Shakira *et al.*, 2010; Knief, 2014). Los estudios metagenómicos han tenido un impacto relevante en la industria farmacéutica, principalmente en la búsqueda de antimicrobianos mediante la creación de bibliotecas metagenómicas para la detección de genes asociados a las rutas biosintéticas de estos o de genes homólogos involucrados en grupos microbianos relacionados (Gillespie *et al.*, 2002; Brady *et al.*, 2004); también se tienen reportes enfocados en la exploración de la biosíntesis de vitaminas en muestras de suelo para búsqueda de nuevos genes, tales como, el de biotina, existe un reporte de su detección vía la construcción de siete cosmidos obtenidos a partir suelo forestal (Entcheva *et al.*, 2001). De igual forma se han identificado enzimas amilolíticas a partir de bibliotecas de DNA metagenómico (Yun *et al.*, 2004; Ferrer *et al.*, 2005). Otro descubrimiento fue la palmitoylputrescina aislada a partir de bibliotecas metagenómicas de un tanque de agua de bromelias (Díaz-Torres *et al.*, 2003). Otros estudios con búsqueda funcional de celulasas a partir de bibliotecas metagenómicas generadas de suelo, revelaron un total de ocho clonas celulolíticas, de las cuales solo una fue purificada y caracterizada para su utilización en la industria textil (Voget *et al.*, 2006) debido a diversas aplicaciones de las celulasas en diferentes ramas económicas, tales como, la producción de químicos, combustible, alimentos, fabricación

de cerveza y vino, alimentación, textil, papel, y agricultura, entre otras (Sun y Cheng, 2002; Bhat, 2000). Elend *et al.* (2006), lograron identificar una serie de nuevos genes codificantes para enzimas lipolíticas, tales como, esterases y lipasas, de las cuales, una fue la esterasa EstCE1, que se derivó a partir de DNA metagenómico aislado de suelo, mostrando alto nivel de estabilidad, que la convirtió en un hallazgo muy útil para aplicaciones biotecnológicas (Lorenz y Eck, 2005).

Uno de los principales beneficios de la aplicación de la metagenómica en estudios de farmacología es el aumento en el conocimiento sobre los mecanismos de resistencia a antibióticos bacterianos, lo cual permite desarrollar compuestos para inhibir dicha resistencia (Helen y Wolfgang, 2005). Otro punto es el esclarecimiento de la diversidad de enzimas que se pueden encontrar en las bibliotecas metagenómicas y la identificación de variaciones en las características funcionales de las enzimas que les confiere especial interés para el campo farmacéutico y biotecnológico (Lorenz y Eck, 2005; Voget *et al.*, 2006; Schmeisser *et al.*, 2007). La gama completa de productos de genes potencialmente interesantes puestos a disposición en las bibliotecas metagenómicas aún no ha llegado a su máxima expresión, pues el hecho de poder descubrir o identificar nuevos genes, enzimas o proteínas en cada muestra y análisis, brinda un panorama casi ilimitado para el campo de la ciencia en general (Eyers *et al.*, 2004). Por estas razones el uso de la metagenómica como herramienta para descubrir, analizar, y aislar moléculas, genes, enzimas o proteínas de interés, es de mucha utilidad gracias a la facilidad práctica que brinda analizar una muestra medio ambiental, y la cantidad de metadatos obtenidos a partir de un solo análisis.

Estudios metagenómicos de microbiota bacteriana en plantas

Las especies vegetales en entornos naturales y agrícolas están continuamente expuestas a una gran cantidad de microorganismos, que llevan a cabo la colonización microbiana de la rizósfera, lo que conlleva a procesos acompañados de una intrincada red de interacciones simultáneas entre microorganismo y planta (Carvalho *et al.*, 2013), quienes son capaces de establecer gran número de interacciones, desde una perspectiva agronómica, el microbioma (conjunto

de microorganismos que se localizan de manera normal en un nicho específico (Bulgarelli *et al.*, 2012) del suelo puede producir efectos benéficos o perjudiciales en crecimiento y producción de la planta (Carvalhais *et al.*, 2013; Bulgarelli *et al.*, 2012; Bulgarelli *et al.*, 2013). Se han realizado estudios en la rizósfera y su impacto sobre las plantas con plataformas de NGS para identificar los phylas dominantes en el ambiente de la rizósfera en diversos tipos de plantas y suelos, en los cuales se ha descrito un alto rango taxonómico (especies), pero bajo rango de phylas que incluyen Acidobacteria, Actinobacteria, Bacteroides, Chloroflexi, Firmicutes y Proteobacteria; lo cual sugiere posibles rutas hacia la selectividad microbiana dependiente del hospedero y suelo. También se ha logrado describir la diversidad de taxa que alberga la rizósfera (bacterias, hongos, oomicetos, nematodos, protozoarios, algas, virus, arqueas y artrópodos) (Figura 3). La mayoría de estos están implícitos en una compleja red de alimentos que utiliza gran cantidad de nutrientes liberados por la planta llamados rizodepósitos (exudados, mucílago, etcétera) que son una fuerza impulsora importante en la regulación de la diversidad y actividad microbiana en las raíces de las plantas. Cook (1995) postuló que estas pueden modular el microbioma de la rizósfera a su beneficio mediante la estimulación selectiva de microorganismos con características que beneficien el crecimiento vegetal y la salud de la planta (Méndez *et al.*, 2013; Andreote *et al.*, 2014). Este tipo de selección está dada por exudados radiculares, que son un factor clave

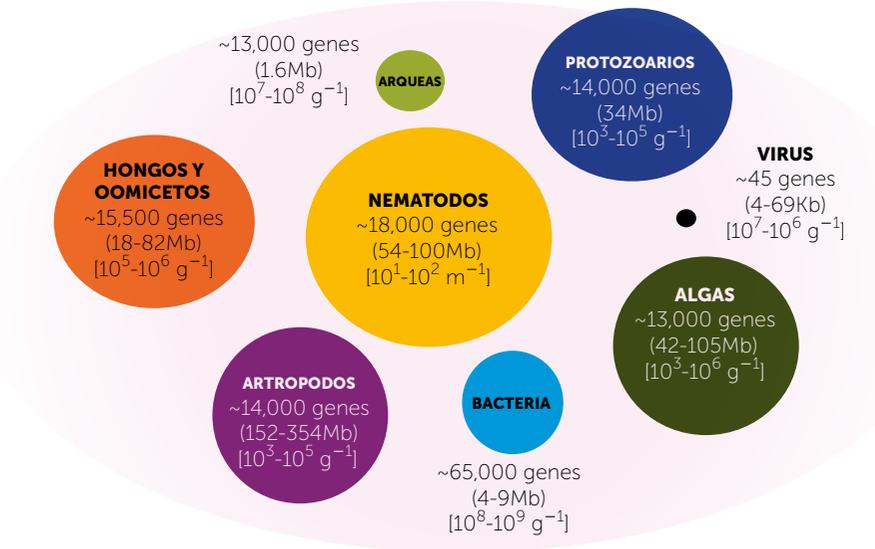


Figura 3. Medida promedio del número de genes en genomas de especies representativas de cada grupo de organismos. El tamaño de sus respectivos genomas está indicado entre paréntesis. Para cada uno de estos (micro) organismos, el número aproximado de su abundancia está indicado entre corchetes (Tomado y modificado de Mendes *et al.*, 2013). Las especies seleccionadas para ilustrar la composición de microbioma de la rizósfera y calcular el tamaño y número de genes y genomas son: **Protozoarios:** *Dictyostelium discoideum*; **Virus:** *Pseudomonas phage 73*, *Fusarium graminearum* dsRNA mycovirus-4, *Agrobacterium phage 7-7-1*, *Rhizoctonia solani* virus 717; **Algas:** *Chlorella variabilis* y *Chlamydomonas reinhardtii*; **Bacterias:** *Pseudomonas fluorescens*, *Bradyrhizobium japonicum*, *Rhizobium leguminosarum*, *Bacillus cereus*, *Bacillus amyloliquefaciens*, *Burkholderia cenocepacia*, y *Streptomyces filamentosus*; **Artrópodos:** *Metaseiulus occidentalis*, *Acromyrmex echinator*, y *Solenopsis invicta*; **Nematodos:** *Caenorhabditis elegans* y *Meloidogyne hapla*; **Hongos/Oomicetos:** *Laccaria bicolor*, *Nectria haematococca*, *Piriformospora indica*, *Verticillium dahliae*, *Metarhizium anisopliae*, *Fusarium oxysporum*, *Sporisorium reilianum*, *Phytophthora sojae*, *Phytophthora parasitica*, *Aphanomyces euteiches*, *Phytophthora cinnamomi*, y *Pythium ultimum*; **Arqueas:** *Candidatus Nitrosoarchaeum koreensis*.

para el enriquecimiento de las poblaciones microbianas específicas en la rizósfera, y pueden consistir de oxígeno, iones, agua, enzimas, mucílago y una amplia variedad de metabolitos primarios y secundarios que contienen carbono (Andreote *et al.*, 2014). Los ácidos orgánicos, azúcares, aminoácidos, lípidos, cumarinas, flavonoides, proteínas, enzimas, compuestos alifáticos y aromáticos son ejemplos de sustancias primarias encontradas en la interface suelo-raíz. Entre ellos, los ácidos orgánicos han recibido atención considerable debido a su papel en el suministro de sustratos para el metabolismo microbiano y como productos intermediarios para reacciones biogeoquímicas en el suelo, donde la cantidad y complejidad de estos componentes es específica para cada familia o especie vegetal (Berg y Smalla, 2009). Los microorganismos capaces de interactuar con la amplia gama de factores selectivo-atrayentes aportados por el genotipo hospedero, se han identificado como microorganismos promotores del crecimiento vegetal (PGPM), o en mayor medida las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) las cuales colonizan la raíz de la planta, promueven el crecimiento, sanidad, y reducen la incidencia de enfermedades y patógenos (Figura 4)

a través de una variedad de mecanismos que incluyen la solubilización de fosfatos (Richardson *et al.*, 2009), producción de auxinas (IAA) (Spaepen y Vanderleyden, 2011), de antibióticos (Chen *et al.*, 2009), actividad ACC desaminasa (Siddikee *et al.*, 2010) e incremento de eficiencia fotosintética (Zhang *et al.*, 2008) entre otros.

Además de un análisis filogenético amplio del microbioma en rizósfera, hay necesidad de ir más allá de catalogar las comunidades microbianas ("coleccionar sellos") y determinar qué microorganismos están activos durante las etapas de desarrollo de la planta y que genes son activados a través de la secreción de exudados en el desarrollo de la misma. La habilidad de los PGPR para utilizar un amplio panel de nutrientes es un factor característico que influye en el éxito de la colonización de la rizósfera, como la utilización de aminoácidos, que es un componente principal de los exudados (Bais *et al.*, 2006) y están involucrados en la expresión de genes como *hutU* que codifican para urocanasa involucrada en la degradación de histidina, este gen se ha visto involucrado en la rizósfera de maíz (*Zea mays* L.) (Matilla *et al.*, 2007) y caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) (Zhang *et al.*, 2006). Otros estudios han revelado la expresión de genes en procesos de detoxificación y estrés, inducidos por la rizósfera ya que esta ejerce una presión selectiva me-

dante la liberación de componentes tóxicos derivados de la planta como flavonoides y terpenoides (Bais *et al.*, 2006) los cuales inducen estrés en presencia de cierto tipo de bacterias como consecuencia de los PGPM, en especial los PGPR superan este estrés químico debido a la utilización de bombas como la MDR (resistencia multidroga) (Matínez *et al.*, 2009) y bombas pertenecientes a RND (resistencia célula/nódulo) como MexAB-OprM (Silby *et al.*, 2009), MexCD-OprJ (Martilla *et al.*, 2007) y componentes de extrusión de la familia DinF (Barret *et al.*, 2009). Otros estudios realizados en el organismo modelo *Pseudomonas fluorescens* en procesos de secreción, han revelado que los T3SSs son genes conservados, ya que fueron identificados en todo el genoma de *P. fluorescens* (Kimbrel *et al.*, 2010), y dichos genes pertenecientes a la familia Hrp1, son genes de biocontrol (*P. fluorescens*) que acoplan su expresión acorde a las necesidades de la rizósfera (Jackson *et al.* 2005; Mavrodi *et al.* 2011), y recientemente el T3SSs ha demostrado estar inmerso en la promoción simbiote de ectomicorizas con *P. fluorescens* (Cusano *et al.*, 2010) (Figura 4).

De manera similar se ha identificado que la rizosfera de maíz y caña de azúcar es capaz de activar los genes *yidC* y *secB*, involucrados en el tráfico de proteínas (Matilla *et al.*, 2007; Giddens *et al.*, 2007; Silby *et al.*, 2009). Los genes ortólogos como SecB han demostrado estar inmersos en la translocación de proteínas sintetizadas de novo a través de la membrana, y miembros de YidC en el desdoblamiento, inserción y ensamblaje de proteínas en la cara interna de la membrana en bacterias, ambos inducidos por la interacción con diversos exudados radiculares del hospedero (Yuan *et al.*, 2010). Los estudios con plataformas de NGS en ácidos nucleicos extraídos de rizósfera proveen un amplio espectro de los microorganismos que la habitan, además de obtener y amplificar fragmentos de interés a partir del DNA genómico de la comunidad y posteriormente poder ser analizados por técnicas cultivo-independientes, los cuales son capaces de mostrar la influencia de la planta sobre la estructura de la comunidad microbiana; y con ello, poder deducir que la composición de la microbiota bacteriana en la rizósfera se ve afectada por un complejo de interacción entre el tipo de suelo, la especie hospedera y circundantes, así como, la localización de la raíz de la planta hospedera.

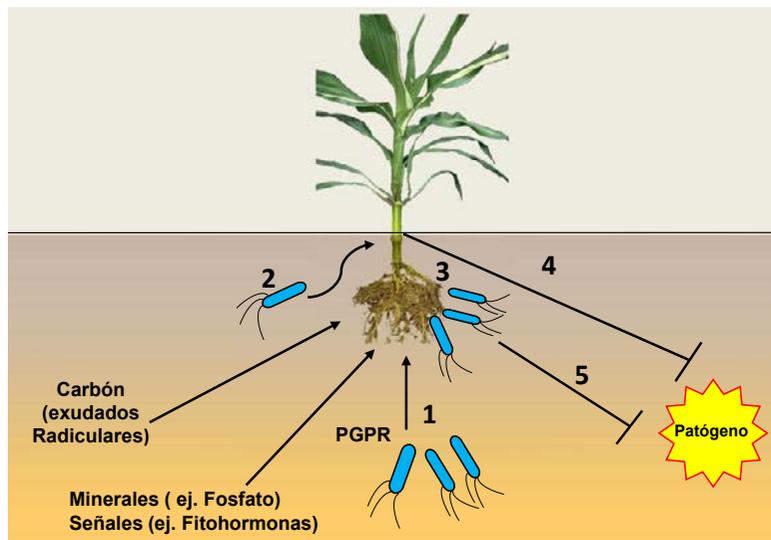


Figura 4. Interacciones benéficas planta-bacteria en la rizósfera. Poblaciones de PGPR seleccionadas por exudados radiculares específicos. Movilidad (1), Adherencia (2) crecimiento (3) pasos importantes en la competencia por la rizósfera. Las diversas cepas de PGPR pueden mejorar el crecimiento de la planta por la liberación de nutrimentos y fitohormonas y/o inhibir enfermedades en las raíces causadas por fitopatógenos. La inhibición de fitopatógenos puede ocurrir de manera indirecta a través del ISR (sistema inmune sistémico) (4) o de manera directa, debido a la producción de metabolitos secundarios (5) (Tomado y modificado de Barret *et al.*, 2011).

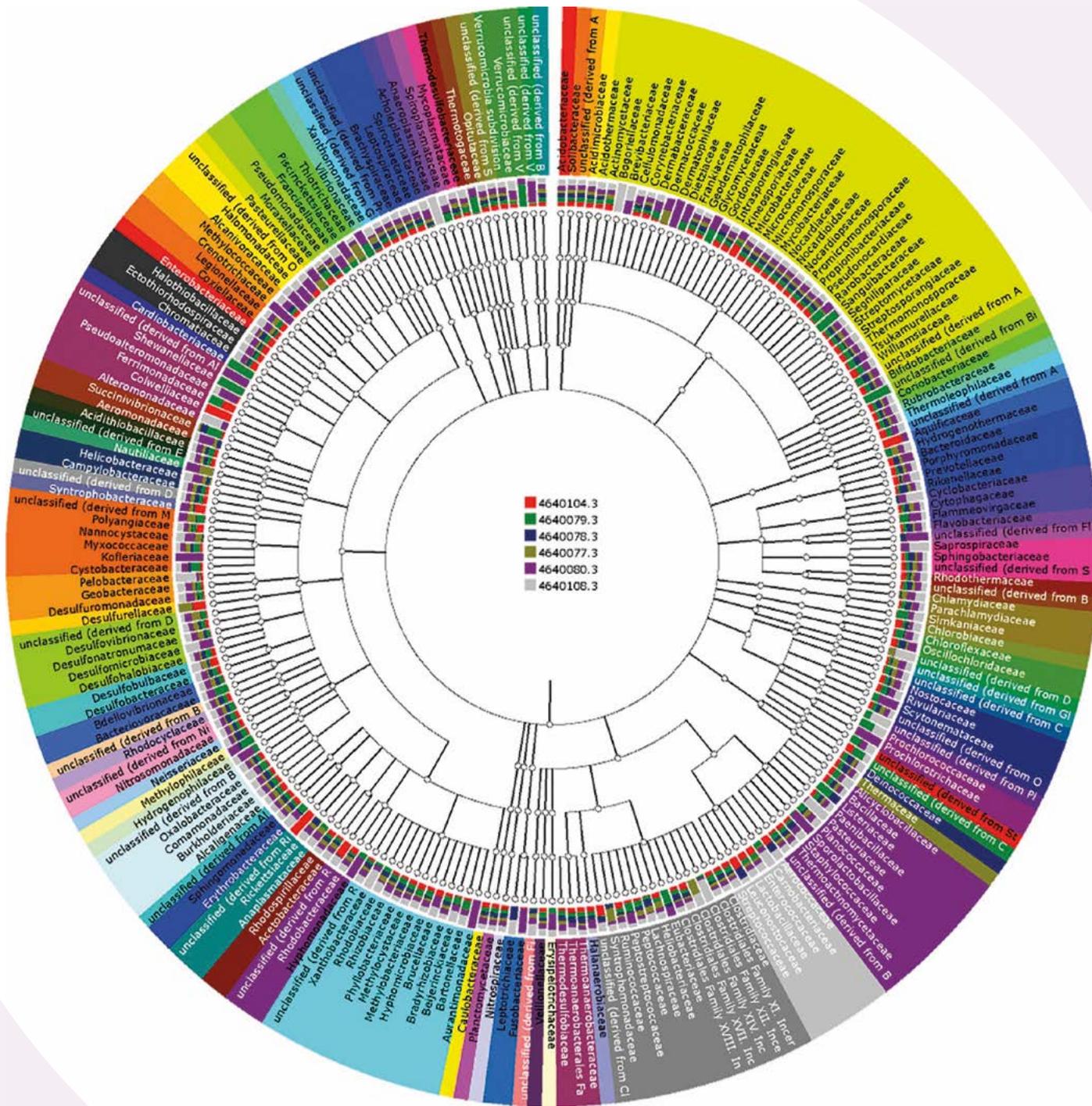


Figura 5. Diversidad microbiana obtenido directamente de la rizósfera de maíz (*Zea mays* L.) y analizado mediante tecnologías de NGS ION Torrent™ (Tomado de Arteaga-Garibay R. I.; Cadena-Zamudio J. D.; Martínez-Peña M. D. (2015) sin publicar).

CONCLUSIONES

Las tecnologías de NGS tienen amplia variedad de aplicaciones, y cada día son implementadas en más campos de la ciencia. Además de las aplicaciones descritas anteriormente, las tecnologías de NGS pueden ser utilizadas para caracterizar relaciones evolutivas entre genomas o dilucidar el papel de diversas proteínas, enzimas o ácidos, como el RNAs no codificante en salud y enfermedad. En un futuro es previsible que la tecnología NGS pueda utilizarse para obtener alta calidad de los datos de la secuencia de un genoma aislado de una sola célula, la cual podría ser algún microorganismo aislado, metabolitos vegetal lo que sería un gran avance, especialmente para el campo de la biomedicina. El área de las tecnologías de NGS y sus aplicaciones son ya un movimiento rápido e indispensable en la investigación a nivel mundial; lo cual convierte al área de las ómicas como herramienta complementaria en cualquier tipo de estudio.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por el proyecto de investigación "ESTUDIO DE LA DIVERSIDAD MICROBIANA ASOCIADA A SUELO RIZOFÉRICO DE 10 VARIEDADES DE MAÍZ" de recursos fiscales del INIFAP con N° de proyecto SIGI: 16131431995. Agradecemos el apoyo del Tesista Juan Lara Aguilera por la facilidad en el manejo y obtención de datos para la Figura 5.

LITERATURA CITADA

- Alkan C., Sajjadian S., Eichler E.E. 2011. Limitations of next-generation genome sequence assembly. *Nature methods* 8: 61-65
- Andreote F.D., Gumiere T., Durrer A. 2014. Exploring interactions of plant microbiomes. *Scientia Agricola* 71: 528-539
- Avneet K. S., Vakhlu J. 2015. Isolation and in silico characterization of novel esterase gene with b-lactamase fold isolated from metagenome of north western Himalayas. *3 Biotech* 5: 553-559
- Acinas S.G. 2007. Diversidad y estructura de una comunidad microbiana. *Sociedad Española de Microbiología* 44: 24-29
- Bais H.P., Weir T.L., Perry L.G., Gilroy S., Vivanco J.M. 2006. The role of root exudates in rhizosphere interactions with plants and other organisms. *Annual Review of Plant Biology* 57: 233-266
- Barret M., Frey-Klett P., Boutin M., Guillermin-Erckelboudt A.Y., Martin F., Guillot L., Sarniguet A. 2009. The plant pathogenic fungus *Gaeumannomyces graminis* var. *tritici* improves bacterial growth and triggers early gene regulations in the biocontrol strain *Pseudomonas fluorescens* Pf29Arp. *New phytologist journal* 181: 435-447
- Barret M.M., J-P., O'Gara F. 2011. Functional genomics analysis of plant growth-promoting rhizobacterial traits involved in rhizosphere competence. *Biol Fertil Soils* 47: 729-743
- Basset Y., Novotny V., Miller S.E., Kitching R.L. 2003. Arthropods of Tropical Forests. Spatio-temporal Dynamics and Resource Use in the Canopy. Cambridge University Press.
- Berg G., Smalla K. 2009. Plant species and soil type cooperatively shape the structure and function of microbial communities in the rhizosphere. *Federation of European Microbiological Societies* 68: 1-13
- Bhat M.K. 2000. Research review paper: cellulases and relate enzymes in biotechnology. *Biotechnology Advances Journal*. 18: 355-383
- Brady S. F., Chao C. J., Clardy J. 2004. Longchain N-acyltyrosine synthases from environmental DNA. *Applied Environmental Microbiology* 70: 6865-6870
- Brady S. F., Clardy J. 2004. Palmitoylputrescine, an antibiotic isolated from the heterologous expression of DNA extracted from Bromeliad Tank water. *Journal of Natural Products* 67: 1283-1286
- Bruic J.M., Antonopoulos D.A., Berg Miller., M.E., Wilson M.K., Yannarell C., Dinsdale E.A. 2009. Gene-centric metagenomics of the fiber-adherent bovine rumen microbiome reveals forage specific glycoside hydrolases. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106: 1948-1953
- Bulgarelli D., Rott M., Schlaeppi K., Ver Loren van T. E., Ahmadinejad N. 2012. Revealing structure and assembly cues for Arabidopsis root-inhabiting bacterial microbiota. *Nature* 488: 91-95.
- Bulgarelli D., Schlaeppi K., Spaepen S., Ver Loren van Themaat E., Schulze-Lefert P. 2013. Structure and Functions of the Bacterial Microbiota of Plants 64: 07-38.
- Bulgarelli D., Garrido-Oter R., McHardy A.C., Schulze-Lefert P. 2015. Structure and Function of the Bacterial Root Microbiota in Wild and Domesticated Barley. *Cell Host & Microbe* 17: 392-403
- Carvalho L.C., Muzzi F., Chin-Hong T., Hsien-Chooand J., Schenk P.M. 2013. PlantgrowthinArabidopsisisassistedbycompostsoil-derivedmicrobialcommunities. *Frontiers in Plant Science* 4: 1-15.
- Chen X.H., Koumoutsi A., Scholz R., Borriss R. 2009. Morethan anticipated-productionofantibioticsandothersecondarymetabolitesby *Bacillusamyloliquefaciens* FZB42. *Journal of Molecular Microbiology and Biotechnology*. 16: 14-24.
- Cortés-López N., Montor-Antonio J., Olvera-Carranza C., Peña-Castro J., del Moral-Ventura S. 2014. Metagenómica: una ventana de oportunidad a nuevos genes y genomas microbianos. *Revista Iberoamericana de Ciencias* 1: 45-58
- Cusano A.M., Burlinson P., Deveau A., Vion P., Uroz S., Preston G.M., Frey-Klett P. 2010. *Pseudomonas fluorescens* Bbc6R8 type III secretion mutants no longer promote ectomycorrhizal symbiosis. *Environmental Microbiology Reports* 3: 203-210.
- Daniel R. 2005. The metagenomics of soil. *Nature Reviews Microbiology* 3: 470-478.
- de Zelicourt A., Al-Yousif M., Hirt H. 2013. Rhizosphere microbes as essential partners for plant stresstolerance. *Molecular Plant - Journal* 6: 242-245.
- Dey R.P., Bhatt K.K., D.M., Chauhan S.M. 2004. Growth promotion and yield enhancement of peanut (*Arachis hypogaea* L.) by application of plant growth-promoting rhizobacteria.

- Microbiology Research. 159: 371-394.
- Díaz-Torres M.L., McNab R., Spratt D.A., Villedieu A., Hunt N., Wilson, M., Mullany P. 2003. Novel tetracycline resistance determinant from the oral metagenome. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy* 47: 1430-1432.
- Edwards K.J., Wheat C.G., Sylvan J.B. 2011. Under the sea: Microbial life in volcanic oceanic crust. *Nature Review Microbiology* 9: 703-712.
- Elend C., C Schmeisser., C Leggewie., P Babiak., Carballeira J. D., Steele H. L., Reymond J. L., Jaeger K. E., Streit W. R. 2006. Isolation and biochemical characterization of two novel metagenome-derived esterases. *Applied and Environmental Microbiology* 72: 3637-3645.
- Engeszer R. E., Patterson L. B., Rao A. A., Parichy D. M. 2007. Zebrafish in the wild: a review of natural history and new notes from the field. *Zebrafish* 4: 21-40.
- Entcheva P., W Liebl., A Johann, T Hartsch., Streit W.R. 2001. Direct cloning from enrichment cultures, a reliable strategy for isolation of complete operons and genes from microbial consortia. *Applied and Environmental Microbiology* 67: 89-99.
- Escalante-Lozada A., Gosset-Lagarda G., Martínez-Jiménez A., Bolívar-Zapata F. 2004. Diversidad bacteriana del suelo: métodos de estudio no dependientes del cultivo microbiano e implicaciones biotecnológicas. *Agrociencia* 38: 583-592.
- Eyers L., George I., Schuler L., Stenuit B., Agathos S.N., Fantroussi S.E. 2004. Environmental genomics: exploring the unmined richness of microbes to degrade xenobiotics. *Applied Microbiology and Biotechnology* 66: 123-130.
- Ferrer M., Golyshina O.V., Chernikova T.N., Khachane A.N., Reyes-Duarte D., Martins Dos Santos V.A.P., Strompl C., Elborough K., Jarvis G., Neef A., Yakimov A., Timmis M. M., Golyshin P.N. 2005. Novel hydrolase diversity retrieved from a metagenome library of bovine rumen microflora. *Environmental Microbiology* 7: 1996-2010.
- Gans J., Wolinsky M., Dunbar J. 2005. Computational improvements reveal great bacterial diversity and high metal toxicity in soil. *Science* 309: 1387-90.
- García-Vallejo F. 2004. La genómica nutricional: un nuevo paradigma de la investigación de la nutrición humana. *Colombia Medica* 35: 150-160.
- Giddens S.R., Jackson R.W., Moon C.D., Jacobs M.A., Zhang X.X., Gehrig S.M., Rainey P.B. 2007. Mutational activation of niche-specific genes provides insight into regulatory networks and bacterial function in a complex environment. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104: 18247-18252.
- Gilbert J.A., Hughes M. 2011 Gene expression profiling: metatranscriptomics. *Methods in molecular biology* 733: 195-205.
- Gillespie D.E., Brady S.F., Bettermann A.D., Cianciotto N.P., Liles M.R., Rondon M.R., Clardy J., Goodman R.M., Handelsman J. 2002. Isolation of antibiotics turbomycin a, and b from a metagenomic library of soil microbial DNA. *Applied Microbiology and Biotechnology* 68: 4301-4306.
- He J.Z., Zhu Y.G., Zheng Y.M., Zhang L.M., Shen J.P. 2007. Methodology and application of soil metagenomics. *Chinese Academy of Science* 18: 212-8.
- Helen L., Steele Wolfgang R.S. 2005. Metagenomics: Advances in ecology and biotechnology. *FEMS Microbiology Letters* 247: 105-111.
- Hernández-León R. I., Velázquez-Sepúlveda M. C., Orozco-Mosqueda G. S. *Revista internacional de botánica experimental international journal of experimental botany*. 79: 133-139.
- Hongoh Y. 2010. Diversity and genomes of uncultured microbial symbionts in the termite gut. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry* 74: 1145-1151.
- Hugenholtz P., Tyson G. W. 2008. Metagenomics. *Nature* 455: 481-483.
- Jackson R. W., Preston G. M., Rainey P. B. 2005. Genetic characterization of *Pseudomonas fluorescens* SBW25 *rsp* gene expression in the phytosphere and *in vitro*. *Journal of Bacteriology* 187: 8477-8488.
- Kimbrel J. A., Givan S. A., Halgren A. B., Creason A. L., Mills D. I., Banowetz G. M., Armstrong D. J., Chang J. H. 2010. An improved, high-quality draft genome sequence of the germination-arrest factor-producing *Pseudomonas fluorescens* WH6. *BMC Genomics* 11: 522.
- Knief C. 2014. Analysis of plant microbe interactions in the era of next generation sequencing technologies. *Frontiers in Plant Science* 5: 1-23.
- Kohl K.M., Dearing D. 2012. Experience matters: prior exposure to plant toxins enhances diversity of gut microbes in herbivores. *Ecology Letters* 15: 1008-15.
- Köhler T., Dietrich C., Scheffrahn R., Brune H.A. 2012. High-resolution analysis of gut environment and bacterial microbiota reveals functional compartmentation of the gut in wood-feeding higher termites (*Nasutitermes* spp.) *Applied and Environmental Microbiology* 78: 4691-701.
- Kurokawa K., Itoh T., Kuwahara T., Oshima K., Toh H., Hidehiro T., Atsushi T., Hideto T., Hidetoshi M., Vineet K. Sharma T.P., Srivastava T.D., Taylor H., Noguchi H., Mori Y., Ogura D.S., Ehrlich K.I., Toshihisa T., Yoshiyuki S., Tetsuya H., Masahira H. 2007. Comparative metagenomics revealed commonly enriched gene sets in human gut microbiomes. *DNA Research* 14: 169-181.
- Liu L., Li Y., Li S., Hu N., He Y., Pong R. 2012. Comparison of next-generation sequencing systems. *Journal of Biomedicine and Biotechnology* 2012: 251-364.
- Lorenz P., Eck J. 2005. Metagenomics and industrial applications. *Nature Reviews Microbiology* 3: 510-516.
- López-Reyes L., Carcaño-Montiel M., Tapia-Hernández A., Jiménez-Salgado T., Mauricio-Gutiérrez A. 2015. *saberes y ciencias* 48:
- Matilla M.A., Espinosa-Urgel M., Rodríguez-Herva J.J., Ramos J.L., Ramos-Gonzalez M.I. 2007. Genomic analysis reveals the major driving forces of bacterial life in the rhizosphere. *Genome Biology* 8: 9.
- Mavrodi D.V., Mavrodi J.A., Hassan K.A., Weller D.M., Paulsen I.T., Loper J.E., Alfano J.R., Thomashow L.S. 2011. Structural and functional analysis of the type III secretion system from *Pseudomonas fluorescens* Q8r1-96. *Journal of Bacteriology* 193: 177-189.
- Mendes R., Kruijt M., de Bruijn I., Dekkers E., van der Voort M., Schneider J.H., Piceno Y.M., De Santis T.Z., Andersen

- G.L., Bakker P.A., Raaijmakers J.M. 2011. Deciphering the rhizosphere microbiome for disease-suppressive bacteria. *Science* 332: 1097-100.
- Mendes R., Garbeva P., Raaijmakers J.M. 2013. The rhizosphere microbiome: significance of plant beneficial, plant pathogenic, and human pathogenic microorganisms. *Federation of European Microbiological Societies* 37: 634-663.
- Merriman B., Rothberg J.M., IonTorrent R&D Team. 2012. Progression in ion torrent semiconductor chip based sequencing. *Electrophoresis* 33: 3397-3417.
- Metzker M.L. 2010. Sequencing technologies-the next generation. *Nature reviews Genetics* 11: 31-46.
- Minard G., Mavingui P., Moro C.V. 2013. Diversity and function of bacterial microbiota in the mosquito holobiont. *Parasites y Vectors* 6: 146.
- Nichols D. 2007. Cultivation gives context to the microbial ecologist. *FEMS Microbiology Ecology* 60: 351-357.
- Niedringhaus T. P., Milanova D., Kerby M. B., Snyder M. P., Barron A. E. 2011. Landscape of next-generation sequencing technologies. *Journal of Analytical Chemistry* 83: 4327-4341.
- Pareek C. S., Smoczynski R., Tretyn A. 2011. Sequencing technologies and genome sequencing. *Journal of Applied Genetics* 52: 413-435.
- Qu A., Brulc J. M., Wilson M. K., Law B. F., Theoret J. R., Joens L. A., Konkol M. E., Angly F., Dinsdale E. A. Edwards R. A. 2008. Comparative metagenomics reveals host specific metaviromes and horizontal gene transfer elements in the chicken cecum microbiome. *PLoS One* 3: e2945.
- Richardson A. E., Barea J. M., McNeill A. M., Prigent-Combaret C. 2009. Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by microorganisms. *Plant and Soil* 321: 305-339.
- Roeselers G., Mittge E. K., Stephens W. Z., Parichy D. M., Cavanaugh C. M., Guillemin K., Rawls J.F. 2011. Evidence for a core gut microbiota in the zebrafish. *The ISME Journal*. 5: 1595-1608.
- Rolf D. 2005. The Metagenomics of Soil. *Nature Reviews* 3: 470-478.
- Schmeisser C., Helen S., Wolfgang R.S. 2007. Metagenomics, biotechnology with non-culturable microbes. *Applied Microbiology and Biotechnology* 75: 955-962.
- Segata-Boernigen D., Tickle T. L., Morgan X. C., Garrett W.S., Huttenhower C. 2013. Computational meta'omics for microbial community studies. *Molecular Systems Biology* 9: 666.
- Shakya M., Quince C., Campbell J. H., Yang Z. K., Schadt C. W., Podar M. 2013. Comparative metagenomic and rRNA microbial diversity characterization using Archaeal and Bacterial synthetic communities. *Environmental Microbiology* 15: 1882-1899.
- Siddikee M.A., Chauhan P.S., Anandham R., Han G.H., Sa T. 2010. Isolation, characterization, and use for plant growth promotion under salt stress, of a cedeaminase-producing halotolerant bacterium derived from coastal soil. *Journal of Microbiology and Biotechnology* 20: 1577-1584.
- Silby M. W., Cerdeno-Tarraga A. M., Vernikos G. S., Giddens S. R., Jackson R. W., Preston G. M., Zhang X. X., Moon C. D., Gehrig S. M., Godfrey S. A. C., Knight C. G., Malone J. G., Robinson Z., Spiers A. J., Harris S., Challis G. L., Yaxley A. M., Harris D., Seeger K., Murphy L., Rutter S., Squares R., Quail M. A., Saunders E., Mavromatis K., Brettin T. S., Bentley S. D., Hotherhall J., Stephens E., Thomas C. M., Parkhill J., Levy S. B., Rainey P. B., Thomson N. R. 2009. Genomic and genetic analyses of diversity and plant interactions of *Pseudomonas fluorescens*. *Genome Biology* 10: R51
- Spaepen S., Dobbelaere S., Croonenborghs A., Vanderleyden J. 2008. Effects of *Azospirillum brasilense* indole-3-acetic acid production on inoculated wheat plants. *Plant and Soil* 312: 15-23.
- Spaepen S., Vanderleyden J. 2011. Auxin and plant-microbe interactions. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*. 3: a001438
- Stevens C.E., Hume I.D. 1998. Contributions of microbes in vertebrate gastrointestinal tract to production and conservation of nutrients. *Physiological Reviews* 78: 393-427.
- Shakira G., Atiya A., Mudassar A.G., Muhammad I. 2010. Metagenomics and its application in soil microbial community studies: biotechnological prospects. *Journal of Animal & Plant Sciences* 2: 611-622.
- Sun Y., Cheng J. 2002. Hydrolysis of lignocellulosic material from ethanol production: A review. *Bioresource Technology* 83: 1-11.
- Schadt E.E., Turner S., Kasarskis A. 2010. A window into third-generation sequencing. *Human Molecular Genetics* 19: R227-R240.
- Thompson J.F., Milos P.M. 2011. The properties and applications of single-molecule DNA sequencing. *Genome Biology and Evolution* 12: 217.
- Turnbaugh P. J., Ley R. E., Mahowald M. A., Magrini V., Mardis E. R., Gordon J. I. 2006. An obesity-associated gut microbiome with increased capacity for energy harvest. *Nature* 444: 1027-1031.
- Turnbaugh P. J., Backhed F., Fulton L., Gordon, J. I. 2008. Diet-induced obesity is linked to marked but reversible alterations in the mouse distal gut microbiome. *Cell Host Microbe* 3: 213-223.
- Turnbaugh P. J., Gordon J. I. 2008. An invitation to the marriage of metagenomics and metabolomics. *Cell* 134: 708-713.
- Turnbaugh P. J., Ley R. E., Mahowald M. A., Magrini V., Mardis E. R. Gordon J. I. 2006. An obesity-associated gut microbiome with increased capacity for energy harvest. *Nature* 444: 1027-1031.
- Turnbaugh P. J., Ridaura V. K., Faith J. J., Rey F. E., Knight, R., Gordon J. I. 2009. The effect of diet on the human gut microbiome: a metagenomic analysis in humanized gnotobiotic mice. *Science Translational Medicine* 1: 6ra14.
- Uroz S., Buee M., Murat C., Frey-Klett P., Martin F. 2010. Pyrosequencing reveals a contrasted bacterial diversity between oak rhizosphere and surrounding soil. *Environmental Microbiology* 2: 281-88.
- Voget S., Steele H. L., Streit W. R. 2006. Characterization of a metagenome derived halo tolerant cellulase. *Journal of Biotechnology* 126: 26-36.
- Wang P., Du Y., Zhao X., Miao Y., Song C.P. 2013. The MPK6-ERF6-ROS-responsive cis-acting element 7/GCC box complex modulates oxidative gene transcription and the oxidative response in Arabidopsis. *Journal of Plant Physiology* 161: 1392-1408.
- Wilmes P., Bond P.L. 2006. Metaproteomics: studying functional gene expression

- in microbial ecosystems. Trends Microbiology 14: 92-97.
- Wold B., Myers R.M. 2008. Sequence census methods for functional genomics. Nature Methods 5: 19-21.
- Yuan J. J., Zweers J. C., Van Dijk J. M., Dalbey R. E. 2010. Protein transport across and into cell membranes in bacteria and archaea. Cellular and Molecular Life Sciences 67: 179-199.
- Yun J., Seowon K., Sulhee P., Hyunjin Y., Myo- Jeong K., Sunggi H., Sangyeol R. 2004. Characterization of a novel amyolytic enzyme encoded by a gene from a soil-derived metagenomic library. Applied and Environmental Microbiology 70: 7229-7235.
- Zhang X. X., George A., Bailey M. J., Rainey P. B. 2006. The histidine utilization (hut) genes of *Pseudomonas fluorescens* SBW25 are active on plant surfaces, but are not required for competitive colonization of sugar beet seedlings. Microbiology Society Journals 152: 1867-1875.
- Zhang H. M., Xie X. T., Kim M. S., Korniyev D. A., Holaday S., Pare P. W. 2008. Soil bacteria augment Arabidopsis photosynthesis by decreasing glucose sensing and abscisic acid levels in plants. The Plant Journal 56: 264-273.



Sistema de bioseguridad para reducir el viviparismo (SIBIOREVI)

Responsables: Jorge **Cadena-Iñiguez**¹, Ma. de C. Lourdes **Arévalo-Galarza**², Siul Dennis **Romero Velázquez**² (jocadena@colpos.mx; larevalo@colpos.mx). Gildardo **Olguin-Hernandez**³

¹ Campus San Luis Potosí, Calle Iturbide No. 73, C.P. 78600 Salinas de Hidalgo, S.L.P., México.

² Campus Montecillo. Km 36.5 Carretera Mexico Texcoco. CP 56230. Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas. ³ Grupo Interdisciplinario de Investigación en *Sechium edule* en Mexico.

Problema

El chayote (*Sechium edule*), es un producto de exportación, cuyo uso principal es el alimentario; el fruto en madurez hortícola o fisiológicamente maduro es el órgano principal de consumo como verdura. La comercialización a gran escala de chayote en México y Centroamérica, tiene como destinos principales los Estados Unidos de América y Canadá. El chayote se cosecha manualmente y su alta susceptibilidad a la fricción, rodamiento, oxidación y manipulación durante la selección y empaque, reduce la calidad del fruto, además por su alta manipulación tiene el riesgo de contaminarse con microorganismos causantes de enfermedades gastrointestinales. Uno de los problemas que enfrentan las variedades de chayote es el viviparismo (germinación de la semilla) que reduce la vida de anaquel y es castigado en el mercado destino. El fruto presenta alta tasa de transpiración, generando agua condensada en el empaque, que propicia proliferación de enfermedades que reducen significativamente su vida de anaquel.

Solución planteada

Se diseñó un equipo para el pre-tratamiento y empaque de frutos de chayote; y consiste en un clasificador, un equipo de limpieza, un equipo para desinfección mediante agua ozonificada, equipos que aplican capa de cera y equipo de emisión de rayos UV para reducir incidencia de viviparismo y carga microbiológica. El equipo registrado como Modelo de Utilidad (Patente)

permite el empaque en un tren de flujo continuo de grandes cantidades de fruto sin daño, mantiene la calidad y evita caídas entre rampas, rodamiento, fricción, acelera la selección y empaque por calidades y reduce pérdidas por manejo rudo. Se evaluó la efectividad de la luz ultravioleta (1, 3 y 5 kJ m⁻²) y agua ozonificada frutos de chayote, registrando reducción del viviparismo por el efecto de la luz UV-C y menor pérdida de peso en frutos irradiados con 1 kJ m⁻² comparados con el testigo, sin afectar su sabor y color, dosis mayores a 3 kJ m⁻² pueden provocar quemaduras. Además el uso de agua ozonificada reduce las pérdidas de peso además de reducir la incidencia de ampolla mostrando calidad superior respecto a frutos testigo.

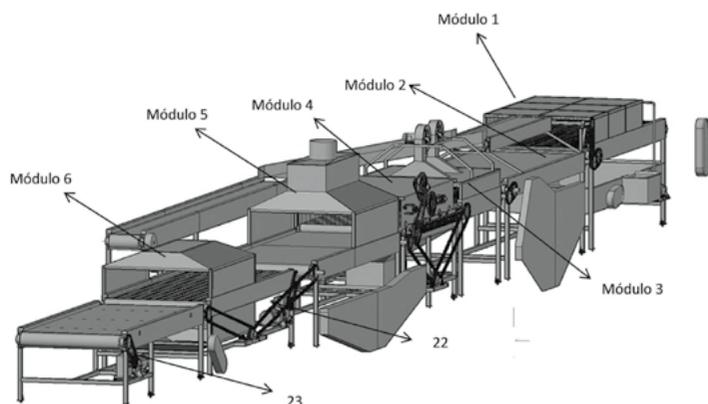


Figura 1. Vista en perspectiva de los seis módulos que conforman el sistema de bioseguridad.

Innovaciones, Impactos e indicadores

Innovación	Impacto	Indicador General	Indicador Específico
Equipo de manejo Postcosecha	Reducción de riesgos microbiológicos, mejores prácticas de empaque y calidad sostenida. Certificación internacional anual	- Ciencia y Tecnología - Económico - Ambiental	Innovación e Investigación, Recursos financieros, Actividad económica, sector Agropecuario
Registro Modelo de utilidad SIVIOREBI® (patente)	innovación e investigación	- Ciencia y Tecnología	Registros y Patentes solicitadas y concedidas, Establecimientos certificados. Competitividad; Bioseguridad
Nuevos mercados: Presentación de producto final	USA, Canadá, Norte de México	- Económico	Comercio exterior, Exportación, Agricultura
Investigación participativa	Talentos formados: Licenciatura, Maestría y Doctorado	- Ciencia y Tecnología	Recursos humanos, Egresados

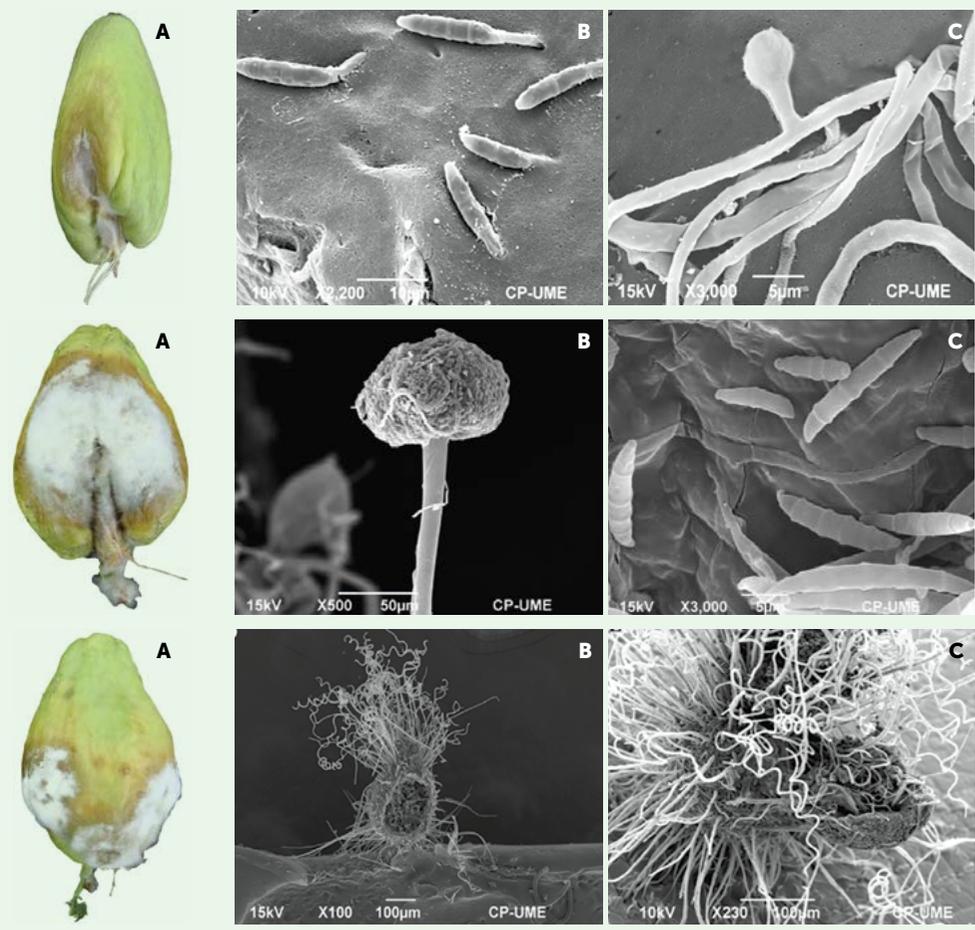


Figura 2. A: Síntomas causados en frutos de chayote por *Fusarium oxysporum*. B: Micrografía de microscopio electrónico de barrido a 2200X de macroconidios. C: Micrografía de una clamidospora de *F. oxysporum* a 3000X.

Figura 3. A: Síntomas causados en frutos de chayote por *Fusarium solani*. A-B: Micrografías de microscopio electrónico de barrido a 500X y 3000X de un conidióforo de *F. solani*.

Figura 4. A) Síntomas causados en frutos de chayote por *Chaetomium globosum*. B) y C) Micrografías de microscopio electrónico de barrido (100X) y ascomas de *C. globosum* (230X).



Figura 5. Frutos sanos de chayote con calidad exportación.



Modelo de Utilidad registrado ante el INSTITUTO MEXICANO DE LA PROPIEDAD INDUSTRIAL: Dirección Divisonal de Patentes: Expediente: MX/u/2013/000160; Fecha: 5/ABR/2013; Hora: 10:35:28; Folio: MX/E/2013/024858; Patente Otorgada: 8 abril 2015.



MAESTRÍA en CIENCIAS INNOVACIÓN en MANEJO de RECURSOS NATURALES

OBJETIVO

Preparar profesionales a nivel postgrado, dentro del ámbito del desarrollo e innovación en el manejo sustentable de recursos naturales para la transformación rural, que se integren dentro de los sectores público y privado y sean coadyuvantes en el desarrollo rural y en el mejoramiento de la calidad de vida de la sociedad.

Innovando con ciencia y visión sustentable



Programa con reconocimiento del Padrón Nacional de Posgrados de Calidad (PNPC) del CONACYT

Duración: **2 años**

Becas CONACYT al 100% para los estudiantes aceptados a cursar el programa de Maestría en Ciencias en Innovación en Manejo de Recursos Naturales

Fechas límite para recepción de documentos:

- Último día de Septiembre de cada año para ingreso en enero del siguiente año
- Último día de Mayo de cada año para ingreso en Agosto del mismo año

Los requisitos de ingreso y formato de admisión pueden descargarse en www.colposlp.mx

Informes

Subdirección de Educación. Campus San Luis Potosí.
Colegio de Postgraduados
Tel. 01 (496) 963 0240 y 0448 ext. 4020 y 4008
admisiones.cslp@colpos.mx
Iturbide #73, Salinas de Hidalgo, S.L.P. C.P. 78600

