



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN CIENCIAS FORESTALES

FERTILIZACIÓN, CRECIMIENTO E INCIDENCIA DE

Hypsipyla grandella ZELLER EN *Cedrela odorata* L

FLOR MARÍA MONTERO SOLÍS

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTORA EN CIENCIAS FORESTALES

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2017

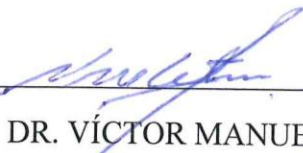
La presente tesis, titulada: **FERTILIZACIÓN, CRECIMIENTO E INCIDENCIA DE *Hypsipyla grandella* ZELLER EN *Cedrela odorata* L.**, realizada por la alumna: **Flor María Montero Solís**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

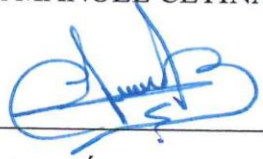
DOCTORA EN CIENCIAS

EN CIENCIAS FORESTALES

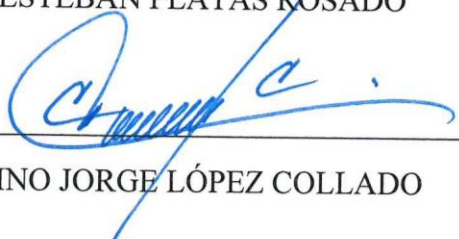
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO: 
DR. MIGUEL ÁNGEL LÓPEZ LÓPEZ

ASESOR: 
DR. VÍCTOR MANUEL CETINA ALCALÁ

ASESOR: 
DR. MARCOS JIMÉNEZ CASAS

ASESOR: 
DR. DIEGO ESTEBAN PLATAS ROSADO

ASESOR: 
DR. CATALINO JORGE LÓPEZ COLLADO

Montecillo, Texcoco, México, Febrero de 2017

FERTILIZACIÓN, CRECIMIENTO E INCIDENCIA DE *Hypsipyla grandella* ZELLER EN *Cedrela odorata* L

Flor María Montero Solís, Dra.
Colegio de Postgraduados, 2017

RESUMEN

Se evaluó el efecto del intercalamiento *G. sepium* y la aplicación de N y P sobre el crecimiento, estado nutrimental e incidencia de *H. grandella* en *C. odorata*. Se establecieron bajo un diseño factorial (3 x 2 x 2) doce tratamientos con cuatro repeticiones distribuidas en forma completamente al azar. Durante 12 meses, en forma trimestral, se midieron variables de crecimiento y mensualmente la incidencia de la plaga. El intercalamiento con *G. sepium* (3 individuos, $X^2 = 0.0545$) mejoró la disponibilidad de K y Mg y redujo el ataque de la plaga en el primer año ($X^2 = 0.0545$). La aplicación de N y P no mejoró el crecimiento de *C. odorata* ni afectó la incidencia de *H. grandella*.

Para identificar algunos de los factores importantes en el enraizamiento de *Gliricidia sepium* y facilitar el establecimiento de masas mezcladas de esta especie y *C. odorata*, se evaluó el efecto de sustratos y hormonas sobre el enraizamiento y producción de nódulos en estacas de *G. sepium* durante cinco meses. Se seleccionaron aleatoriamente árboles de cercas vivas de *G. sepium* y bajo un diseño factorial 3 x 2 se establecieron seis tratamientos con tres tipos de sustratos (suelo natural, peat moss y la mezcla de peat moss y agrolita) con 4 repeticiones y la aplicación de AIA en las estacas. Se registró el peso seco de raíz (PSRa), el número y peso seco de nódulos (NoNod y PSNod), el peso seco de follaje (PSFo) y porcentaje de enraizamiento por tratamiento (%). El sustrato “suelo (tierra de monte)” promovió el mayor peso seco en ambas variables evaluadas. El uso de AIB-no es viable para el enraizamiento de estacas de *G. sepium*, probablemente debido a que la fitohormona es producida por la misma leguminosa.

Se hicieron estimaciones de la producción de *C. odorata* mediante el modelo 3-PG contemplando la aplicación o no de materiales fertilizantes. Las predicciones del modelo 3-PG indican que a los cinco años de edad, la fertilización reflejará sus mayores efectos en el volumen de madera,

acumulándose $51.9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ sin fertilización en contraste con $66.9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ que se obtendrían al aplicarse fertilizantes a la plantación.

Palabras clave: Cedro rojo, nutrimento, plantación tropical, leguminosas arbóreas, modelo de procesos.

FERTILIZATION, GROWTH AND INCIDENCE OF *Hypsipyla grandella* ZELLER IN *Cedrela odorata* L

Flor María Montero Solís, Dra.
Colegio de Postgraduados, 2017

ABSTRACT

Effects of intermixing *G. sepium* and *Cedrela odorata*, as well as application of N and P on growth, nutrient status and incidence of *H. grandella* in *C. odorata* were evaluated. Twelve factorial (3 X 2 X 2) treatments with four replicates were distributed according to a complete randomized design. During 12 months, on a quarterly basis, growth variables were measured, while pest incidence was evaluated monthly. Intermixing of *G. sepium* and *C. odorata* (3 individuals, $X^2 = 0.0545$) improved the availability of K and Mg thus reducing the attack of the pest during the first year ($X^2 = 0.0545$). The application of N and P did not improve the growth of *C. odorata* nor did it affect the incidence of *H. grandella*.

To improve knowledge on factors affecting rooting of *Gliricidia sepium* cuttings and enable the establishment of mixed masses of this species and *C. odorata*, we evaluated the effect of substrates and hormones on rooting and nodule production of *G. sepium* cuttings during five months. Trees were randomly selected from live fences of *G. sepium* and under a 3 x 2 factorial design with four replicates, six treatments were established on three types of substrates (natural local soil, peat moss and a mixture of peat moss and perlite), considering application or not of AIB on the cuttings. Root dry weight (PSRa), number and dry weight of nodules (NoNod and PSNod), foliage dry weight (PSFo) and percentage of rooting per treatment (%) were recorded. The substrate "soil (local soil)" promoted the highest dry weight in both variables evaluated. The use of AIB is not viable for the rooting of *G. sepium* cuttings.

Production estimates for *C. odorata* were made using the 3-PG model, considering the application or not of fertilizer materials. The predictions of the 3-PG model indicate that at five years of age, fertilization will reflect its greatest effects on the volume of wood, accumulating $51.9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ with no fertilization in contrast to $66.9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ that would be obtained when applying fertilizers to the plantation.

Key words: Red cedar, nutrient, tropical plantation, tree legumes, process-based model.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para la realización de mis estudios doctorales.

A mi familia, que sin su apoyo moral, espiritual y material no hubiera podido llegar a esta meta.

Al Postgrado en Ciencias Forestales por haber permitido culminar los estudios doctorales. Así como no sin antes agradecer al Postgrado en Agroecosistemas Tropicales, Campus Veracruz donde inicié esta etapa de formación académica.

Por las facilidades de la Consultora para el Desarrollo Rural y Ordenamiento Ambiental S.A. de C.V. “Cedro”, Xalapa, Veracruz, para la donación de las plantas de cedro rojo para el establecimiento del experimento.

Al Sr. Jaime Montero Montero (mi Padre), quien me permitió establecer mi experimento en sus terrenos.

A mis hermanos IAZ José Alfredo y Jaime Iván, mi sobrino Jaime Iván y demás equipo de trabajo y apoyo técnico en campo: Adrián, Diego, Jorge, Beto, “Don Chicho”.

A todos los profesores, compañeros, amigos que estuvieron en mi camino de formación en Campus Veracruz, Montecillo y NCSU, los cuales fueron pieza clave para mi desarrollo y alentaron para no rendirme y levantarme con más fuerza.

Al Dr. Miguel Ángel López López, quien con su dedicación, profesionalismo y calidad humana lograron que culminara con esta etapa profesional.

A todos los miembros del Consejo Particular por su aportación, profesionalismo, amistad y consejo para seguir adelante en la culminación de la tesis.

Al Dr. Barry Goldfarb, profesor en Forest Productivity Cooperative en North Caroline State University (NCSU), Raleigh, Carolina del Norte, Estados Unidos, quien me brindó su tiempo, facilidades técnicas y asesoría durante mi estancia.

Al Dr. José Álvarez Muñoz, quien me asesoró y brindó la oportunidad de realizar un capítulo de mi tesis durante mi estancia en NCSU. Gracias a sus conocimientos, experiencia, profesionalismo, correcciones y amistad.

Al Dr. Miguel Caballero Deloya, por compartir sus conocimientos, consejo y aceptar fungir como sinodal.

A Dios, por ser mi fuerza, mi fortaleza, mi sostén y alegría en todo momento.

A mi familia, a cada uno de ellos que siempre estuvieron para apoyarme, animarme y alentarme para seguir adelante y culminar mis estudios.

A los que creyeron en mí y a los que no creyeron, pero que me hicieron más fuerte y lograr vencer todo obstáculo.

CONTENIDO

RESUMEN.....	iii
ABSTRACT.....	v
AGRADECIMIENTOS.....	vii
LISTA DE TABLAS.....	xii
LISTA DE FIGURAS.....	xiii
INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
CAPITULO I. <i>Gliricidia sepium</i> and fertilization affect growth, nutrient status, and incidence of <i>Hypsipyla grandella</i> in a <i>Cedrela odorata</i> plantation.....	3
Resumen.....	3
Abstract.....	4
Introduction.....	4
Materials and methods.....	6
Results.....	8
Discussion.....	17
Conclusions.....	19
Acknowlegments.....	19
References.....	20
CAPÍTULO II. Efecto de sustratos y hormonas en el enraizamiento de estacas de <i>Gliricidia sepium</i> (Jacq.) Kunth ex Walp.....	24
Resumen.....	24
Abstract.....	25
Introducción.....	25
Materiales y métodos.....	26
Resultados y discusión.....	27
Conclusiones.....	33
Agradecimientos.....	33
Literatura citada.....	33
CAPÍTULO III. Potencial productivo de <i>Cedrela odorata</i> L: estimación mediante el modelo 3-PG.....	36

Resumen	36
Abstract	37
Introducción	37
Simulación de crecimiento con el modelo 3-PG	38
Materiales y métodos	42
Resultados y discusión	48
Conclusión	59
Agradecimientos	60
Literatura citada	60
CONCLUSIONES GENERALES	63

LISTA DE TABLAS

Capítulo I

Table 1 Chemical analysis of soil from the experimental area.....	8
Table 2 Adequate nutrient concentrations in <i>C. odorata</i> foliage.....	9
Table 3 Tukey ($\alpha=0.05$) tests for the growth variables studied.....	13
Table 4 Wilcoxon-Mann Whitney analysis of variance for the factors N and P.....	17

Capítulo II

Tabla 1 Factores y niveles probados en el experimento de enraizamiento de <i>Gliricidia sepium</i>	27
Tabla 2 Pruebas de Tukey ($\alpha=0.05$) para las variables de biomasa evaluadas.....	32

Capítulo III

Tabla 1 Descripción de parámetros 3-PG, símbolos 3PGpjs y valores.....	44
Tabla 2 Desarrollo del rodal bajo un escenario sin fertilización (FR=0.3) en la localidad de Miahuapan.....	49
Tabla 3 Desarrollo del rodal bajo un escenario sin fertilización (FR=0.3) en la localidad de Miahuapan.....	50

LISTA DE FIGURAS

Capítulo I

Fig 1 Location of the study site.....	6
Fig 2 Nomograms showing status of nitrogen (2a), phosphorus (2b), potassium (2c), calcium (2d), and magnesium (2e) in foliage of <i>C. odorata</i> , in response to interplanting <i>G. sepium</i> into the experimental plots, and application of N and P fertilizers. 3G: three <i>G. sepium</i> trees per experimental plot; 6G: Six <i>G. sepium</i> trees per experimental plot; N: Nitrogen fertilizer; P: Phosphorus fertilizer.....	11
Fig 3 Nomograms showing status of zinc (3a), manganese (3b), boron (3c), and copper (3d) in foliage of <i>C. odorata</i> , in response to interplanting <i>G. sepium</i> into the experimental plots, and application of N and P fertilizers. 3G: three <i>G. sepium</i> trees per experimental plot; 6G: six <i>G. sepium</i> trees per experimental plot; N: Nitrogen fertilizer; P: Phosphorus fertilizer.....	12
Fig 4 Root collar diameter (RCD, mm) growth during the evaluation time.....	14
Fig 5 Total height (TH, cm) growth during the evaluation time.....	15
Fig 6 Kruskal-Wallis points for the number of tree shoots attacked by <i>H. grandella</i> (NSA), as a function of the number of <i>G. sepium</i> trees per plot.....	16
Fig 7 Kruskal-Wallis points for the number of perforations per shoot (NPS), as a function of the number of <i>G. sepium</i> trees per plot.....	16

Capítulo II

Fig 1 Porcentaje de enraizamiento por tratamiento.....	28
Fig 2 Peso seco de follaje (g) promedio de <i>G. sepium</i> por sustrato.....	28
Fig 3 Peso seco de raíz (g) promedio de <i>G. sepium</i> por sustrato.....	29
Fig 4 Número de nódulos promedio de <i>G. sepium</i> por sustrato	29
Fig 5 Peso seco de nódulos (g) promedio de <i>G. sepium</i> por sustrato	29
Fig 6 Peso seco de follaje (g) promedio de <i>G. sepium</i> con y sin hormona	30
Fig 7 Peso seco de raíz (g) promedio de <i>G. sepium</i> con y sin hormona	30
Fig 8 Peso seco de nódulos (g) promedio de <i>G. sepium</i> con y sin hormona	31

Capítulo III

Fig 1a y b Biomasa de follaje en los tratamientos sin fertilización FR=0.3 (a) y con fertilización FR=0.6 (b).....	51
---	----

Fig 2a y b Biomasa de raíz Mg ha ⁻¹ en los tratamientos sin fertilización FR=0.3 (a) y con fertilización FR=0.6 (b).....	51
Fig 3a y b Biomasa de fuste Mg ha ⁻¹ en los tratamientos sin fertilización FR=0.3 (a) y con fertilización FR=0.6 (b).....	52
Fig 4a y b Volumen del rodal m ³ ha ⁻¹ en los tratamientos sin fertilización FR=0.3 (a) y con fertilización FR=0.6 (b).....	52
Fig 5a y b Incremento de volumen promedio anual m ³ ha ⁻¹ en los tratamientos sin fertilización FR=0.3 (a) y con fertilización FR=0.6 (b).....	53
Fig 6a y b Altura (cm) en los tratamientos sin fertilización FR=0.3 (a) y con fertilización FR=0.6 (b).....	54
Fig 7a y b Diámetro a la altura del pecho (DAP) cm en los tratamientos sin fertilización FR=0.3 (a) y con fertilización FR=0.6 (b).....	54
Fig 8a y b Variables respuesta del desarrollo del rodal en los tratamientos sin fertilización FR=0.3 (a) y con fertilización FR=0.6 (b).....	55
Fig 9a y b Relación de biomasa del fuste (Ws), el IAF (Índice de área foliar) en el tratamiento sin fertilización FR=0.3 (a) y con fertilización FR=0.6 (b).....	56
Fig 10 Relación entre el volumen modelado y el observado de <i>C. odorata</i> sin fertilización FR=0.3	57

INTRODUCCIÓN GENERAL

Gliricidia sepium (Jacq.) Kunth ex Walp es un árbol leguminoso con amplia distribución en la zona tropical de México y Centroamérica, utilizado principalmente para leña, forraje animal y abono vegetal (Chamberlain and Galwey, 1993; Benítez *et al.*, 2004; Castrejón *et al.*, 2015).

La combinación de *Gliricidia* sp con otros cultivos resulta eficaz para elevar la productividad, especialmente si se maneja correctamente otros componentes de la fertilidad del suelo, tales como nutrimentos inorgánicos que generan sinergia con las fijadoras de N (Akinnifessi *et al.*, 2006).

Las plagas y enfermedades representan una de las limitantes más importantes para el desarrollo de las plantaciones forestales comerciales, si no se consideran criterios y estrategias de manejo integrado. *Hypsipyla grandella*, conocida como el “taladrador” de las meliáceas, es una plaga forestal económicamente importante (Howard and Merida, 2004). En el trópico mexicano *H. grandella* ha sido objeto de investigación y ha sido contrarrestada por diversos tipos de controles que en el mediano y largo plazo resultan costosos y poco efectivos. La implementación de sistemas mixtos de plantación a base de leguminosas arbóreas intercaladas con *C. odorata* pudiera presentar beneficios desde los puntos de vista ecológico y económico al reducir la incidencia de la plaga debido a que la sombra lateral estimula el crecimiento vertical y la auto-poda (Hilje and Cornelius, 2001).

El intercalamiento de *Gliricidia sepium* en plantaciones de *C. odorata*, en combinación con un manejo nutrimental adecuado, podría mejorar la sanidad de los árboles y la productividad de los sitios. Es por ello que en el capítulo I se presenta el efecto de *G. sepium* (Jacq.) Kunth ex Walp, nitrógeno y fósforo sobre el crecimiento, estado nutrimental e incidencia de *H. grandella* en *C. odorata* L.

En el capítulo II se hace referencia a la propagación vegetativa por estacas de *Gliricidia sepium*, especie que al ser incluida en el primer experimento mostró efectos positivos en la incidencia de *H. grandella* reviste su importancia por su facilidad para regenerarse y establecerse en potreros, (Di Stéfano y Fournier, 1996; Clavero y Razz, 2002; Contreras y Ochoa, 2003), para la producción de forraje o establecimiento de cerca viva (Contreras *et al.*, 2003; Aldana-García, 2009). La velocidad de rebrote llega a ser de mediano a rápido en condiciones naturales, pero poco se ha

estudiado sobre el enraizamiento de tejidos del árbol. Por ello, el ensayo consistió en evaluar el efecto de sustratos y hormonas sobre el enraizamiento y producción de nódulos en estacas de *G. sepium* (Jacq.) Walp.

A nivel nacional se han realizado algunos trabajos que evalúan el rendimiento promedio de plantaciones de *C. odorata* (CONAFOR-CP, 2011) no obstante, aún es escasa la información de campo. La zona norte del estado de Veracruz, cuenta con potencial para la explotación forestal por poseer en su composición florística a especies preciosas maderables, pero no se tiene un registro del volumen de producción (PACMA e INAP, 2013).

Con lo anterior señalado es que en el capítulo III, se realiza una predicción fisiológica del crecimiento de *C. odorata*, mediante el modelo 3-PG. Simulando escenarios de fertilidad que permitan el incremento de la productividad de las plantaciones de cedro rojo en el municipio de Tihuatlán, Veracruz. Finalmente, se realizó el apartado de conclusiones generales del aporte de la investigación realizada.

CAPITULO I. *Gliricidia sepium* and fertilization affect growth, nutrient status, and incidence of *Hypsipyla grandella* in a *Cedrela odorata* plantation

Resumen

Gliricidia sepium es una especie apreciada por su capacidad para reclutar, liberar nutrimentos y elevar la productividad primaria del sitio. No existen reportes de casos en que se haya intercalado *G. sepium* en plantaciones de *Cedrela odorata* y existen pocos estudios que examinan el suministro de nutrimentos como estrategia para disminuir la incidencia de *H. grandella* en la mencionada especie. En San Pedro Miahuapan, Veracruz se evaluó el efecto del intercalamiento *G. sepium* y la aplicación de N y P sobre el crecimiento, estado nutrimental e incidencia de *H. grandella* en *C. odorata*. Se establecieron bajo un diseño factorial (3 x 2 x 2) doce tratamientos con cuatro repeticiones distribuidas en forma completamente al azar en el sitio experimental. Durante 12 meses, en forma trimestral, se midieron variables de crecimiento y mensualmente la incidencia de la plaga. Los nutrimentos más deficientes en el sitio fueron potasio y magnesio. El intercalamiento con *G. sepium* (3 individuos, $X^2 = 0.0545$) probablemente mejoró la disponibilidad de K y Mg, mejorando el estado nutrimental de *C. odorata* y minimizado el ataque de la plaga en el primer año del desarrollo de la plantación ($X^2=0.0545$). La aplicación de N y P no mejoró el crecimiento del *C. odorata* ni afectó la incidencia de *H. grandella*.

Palabras clave: Cedro rojo, nutrimento, plantación tropical, leguminosas arbóreas.

Abstract

Gliricidia sepium has the ability to recruit and release nutrients, thus increasing primary productivity of forest sites. There are no reports documenting intercropping of *G. sepium* and *Cedrela odorata* and few studies examining nutrient supply as a strategy to decrease incidence of *Hypsipyla grandella* in *C. odorata* plantations. In this study, intercropping of *G. sepium* and *C. odorata* and fertilization with N and P was tested in order to examine the effects of such factors on growth, nutrient status, and incidence of *H. grandella* on *C. odorata* trees. Twelve treatments fourfold replicated and derived from a 3x2x2 set of factors were randomly established within the experimental site. During 12 months, growth and pest-incidence variables were measured quarterly and monthly, respectively. K and Mg were the most deficient nutrients in the experimental site. Interplanting three *G. sepium* trees per plot improved K and Mg availability, thus improving *C. odorata* nutrient status and minimizing incidence of the pest during the first year. Supply of N or P did not improve growth of *C. odorata* neither affected the incidence of *H. grandella*.

Key words: Spanish cedar, nutrient, tropical plantation, tree legume.

Introduction

Gliricidia sepium (Jacq.) Kunth ex Walp is a legume tree widely distributed all over the tropical zone of Mexico and Central America. It is used mainly for firewood, forage, and green manure (Chamberlain and Galwey 1993; Benítez *et al.* 2004; Castrejón *et al.* 2015), as well as for constructing living fences, shades for livestock, and maintaining soil fertility, provided tree ability to fix atmospheric nitrogen (Atta-Krah and Sumberg 1988; Akinnifesi *et al.* 2006). Recently, its fungicide, nematicide, larvicide, pupicidal, and antibacterial properties have been studied on several crops, especially in African countries, Cuba, Central, Eastern and Southeastern Mexico (Aragón-García *et al.* 2008; Adekunle 2009).

Combining of N-fixing trees with commercial tree crops represents an alternative technology with ecological and economic advantages, since this type of systems reduces labor and capital needs to increase the productivity of forest plantations. N-fixing plants recruit atmospheric N₂ and convert it into chemical forms that are readily available for absorption by other plants, promoting

their growth (Bouillet *et al.* 2008). Intercropping systems of *G. sepium* and maize mainly have been tested in Eastern and Southern Africa, proving effectiveness at conserving water and increasing soil fauna (Mafongoya *et al.* 2006; Akinnifesi *et al.* 2010), and improving availability of N-NO₃, N-NH₄ and P as well (Rothe and Binkley 2001). According to Ewel and Bigelow (2011), system reduces five times the nutrient losses by leaching. Combination of *G. sepium* with other crops has proved efficacy to increase productivity, especially if other soil fertility components such as nutrients that act synergistically with the N-fixing plants, are correctly managed (Akinnifesi *et al.* 2006).

Pests and diseases frequently limit success of commercial forest plantations if integral management criteria and strategies are not considered. *Hypsipyla grandella* (Zeller), known as “mahogany shoot borer” is an economically important forest pest (Howard and Merida 2004) causing a severe damage to trees even when a single larva is present. Worms attack young tree buds, causing loss of apical dominance, ramification and stem deformation, thus reducing wood quality (Martínez-Vento *et al.* 2005; Sánchez *et al.* 2009; Calixto *et al.* 2015).

In the Mexican tropics, *H. grandella* has been controlled by diverse methods that result, in the long run, expensive and poorly effective. Implementation of mixed-species plantations using N-fixing species interplanted with cedro rojo (*C. odorata* L.) should be economically and ecologically beneficial to reduce the incidence of *H. grandella*, since the legume shade would stimulate height growth and self-pruning of *C. odorata* (Hilje and Cornelius 2001). This type of mixed systems has not been tested in Mexico, but there are studies on intercropping of *C. odorata* with annual crops such as maize, quinchoncho (*Cajanus cajan*), and yuca (*Manihot esculenta*), which have been reported to reduce infestation and improve wood quality two years later (Paul and Weber 2012).

Control of *H. grandella* has been tested by using *Beauveria bassiana* and the organic insecticide neem in Southeastern Mexico (Díaz-Maldonado *et al.* 2002); nonetheless, according to the authors, it is necessary to continue to study this approach under varying site conditions.

Improvement of plant nutrient status has proved successful at controlling some forest insects (López-López and Estañol-Botello 2007; Pérez-Camacho *et al.* 2013). This type of control has been tested in *C. odorata* plantations by Calixto *et al.* (2015), who observed tendencies of decreasing incidence of *H. grandella* when potassium was applied.

Mixing of *G. sepium* and *C. odorata*, and appropriate nutrient management could improve health and productivity of commercial trees. This is why the present study was aimed to determine how intercropping of *G. sepium* and *C. odorata*, plus application of nitrogen and phosphorus, affect growth and nutrient status of *C. odorata*, as well as the incidence of *H. grandella*.

Materials and methods

The study was carried out in an extensive livestock farming area located at San Pedro Miahuapan, Tihuatlán, Veracruz, Mexico, around 20°37'39.71'' N and 97°38'08.45'' W, at the physiographical region known as Llanura Costera del Golfo de Mexico, 110 masl. The original vegetation was deciduous tropical forest (Miranda and Hernández X. 1964; Pennington and Sarukan 1998). Soil is clayey loam and climate has been classified as Aw´ 1(e): warm and sub-humid with summer rains (June to October) and a four-to-six-month dry season (January to May), with mean annual temperature and precipitation of 25 °C and 1,156 mm, respectively (García 1973).

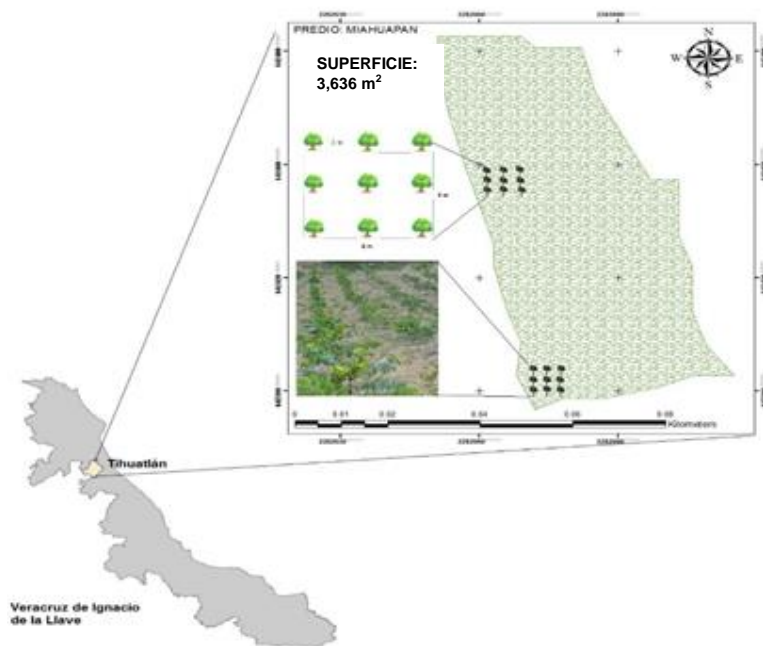


Fig 1 Location of the study site

Seedlings around 30 cm in height were donated by Consultora para el Desarrollo Rural y Ordenamiento Ambiental “Cedro”, Xalapa, Veracruz. Before planting, soil was prepared with a disc plow, and hollows 30x30x30 cm in length, width, and depth, respectively, were excavated. Plantation operations were carried out from October 6th to 10th, 2014, and a 3x2x2 factorial set of treatments was applied according to a complete randomized experimental design with four replicates using a 3x3 plot as the experimental unit, containing nine *C. odorata* trees. The first factor consisted of the intermixing of cero, three or six individuals of *G. sepium* inside the experimental units. The second factor corresponded to the application of nitrogen in doses zero or 1,173 g of urea per plot, distributed in three application dates, between November 2014 and July 2015. The third factor dealt with the application of P as zero or 780 g of triple superphosphate (TSP) per experimental unit. Since establishment of the plantation, manual or mechanical weed control was performed periodically.

Tree root-collar-diameter (RCD; mm), total height (TH; cm), survival (SV), crown diameter of *C. odorata* (CDc; cm), number of tree shoots attacked by *H. grandella* (NSA), and number of perforations per shoot (NPS; Calixto *et al.* 2015) were registered quarterly. The variables related with attacks by *H. grandella* were registered since May 2015. Additionally, an initial soil sampling was made, by recollecting six soil subsamples distributed along three elevational levels within the experimental area. Finally, three composite samples were made; one for each of the elevational levels: high, medium, and low. Soil samples were processed in the “Salvador Alcalde Blanco” laboratory (SAB), from Colegio de Postgraduados, Mexico, where total nitrogen, N-NO₃, P, K, Ca, Mg, Fe, Zn, Mn, B, and Cu were determined, in addition to electrical conductivity (EC), pH, and organic matter. One additional composite soil sample was sent to Fertilab, S. de R.L. where the same determinations were made.

In January 2016, foliage from three of the four replicates of the treatments was recollected. Three of the nine trees from each of the selected plots contributed 10 to 13 fully developed leaflets each, showing no senescence. Leaflets were removed from the medium section of the leaves. All three leaflet samples from a plot were used to make a foliar composite sample. Ten-leaflet dry weight was determined from composite samples. Foliar samples were sent to the SAB laboratory, Colegio de Postgraduados, Mexico, where concentrations of N, P, K, Ca, Mg, Fe, Zn, Mn, B, and Cu were determined.

Results

Soil pH is basic and organic matter (OM) content is constant (Table 1) with vegetation prevailing before plantation operations (basically herbaceous and *Paspalum* sp.).

Table 1 Chemical analysis of soil from the experimental area

Soil property	SAB Laboratory	Fertilab S. de R.L.
pH	7.9	8.4
OM (%)	2.5	3.1
Electrical conductivity (dS m ⁻¹)	0.4	-
Hydraulic conductivity (cm h ⁻¹)	-	2.0
Macronutrients		
Total N (%)	0.15	-
N-NO ₃ (ppm)	-	21.4
P (Olsen, ppm)	0.5	8.9
K (ppm)	78	172
Ca (ppm)	10,440	5,613
Mg (ppm)	532.4	139
S (ppm)	-	8.9
Micronutrients		
Fe (ppm)	5.5	12.6
Zn (ppm)	0.4	0.6
Mn (ppm)	3.1	5.1
B (ppm)	-	0.2
Cu (ppm)	0.4	0.5

Bold values indicate deficiency of the corresponding nutrients

Data were analyzed using analysis of variance and Tukey tests ($\alpha=0.05$) for the variables showing normal distribution. For non-normal variables Kruskal-Wallis and Mann Whitney-Wilcoxon tests were used (SAS 2015). Foliar analyses were interpreted by using the graphical vector analysis (Timmer and Stone 1978).

Soil P is deficient and according to the SAB laboratory, K is deficient too, since its value is lower than the 150 ppm recommended by Horneck *et al.* (2011) as adequate. According to the same author, concentrations of Ca, Mg, and S are adequate, while those of Zn, Mn, B, and Cu, are low. Table 2 shows foliar concentrations found in the literature as well as those determined in the present study. Literature values correspond to those summarized by Drechsel and Zech (1991) and the ones presented by Alvarado *et al.* (2014) as well, for *C. odorata*. According to Table 2, K and Mg are likely to be the deficient nutrients in the experimental area, since their concentrations in foliage are lower or equal (Mg) than those interpreted as “low” by Drechsel and Zech (1991). Hernández and Torres (2009) determined that critical concentrations of K and Mg for nursery stage *C. odorata* foliage are 1.00 and 0.39 %, respectively. According to these authors, both nutrients are deficient in our plantation.

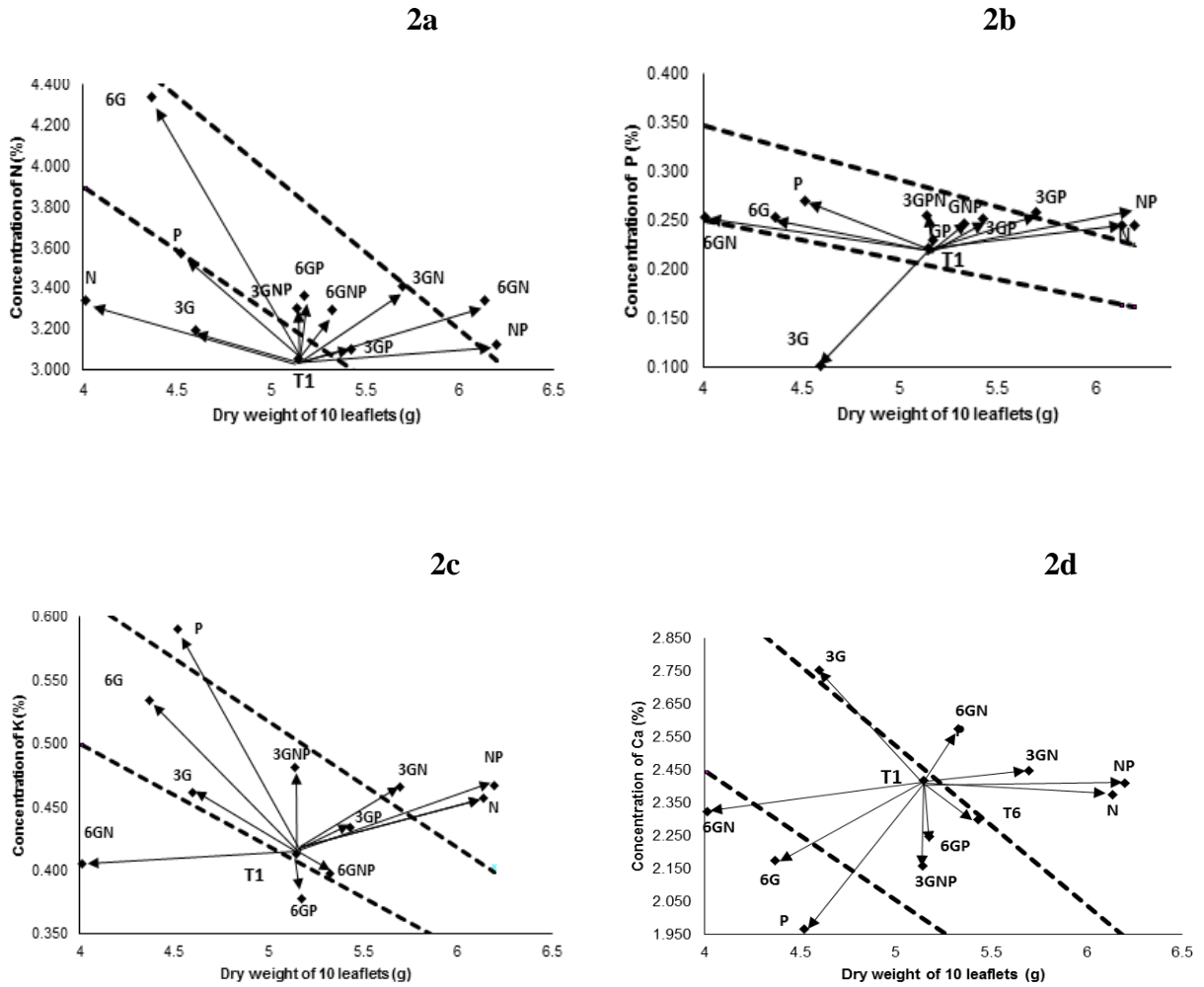
Table 2 Adequate nutrient concentrations in *C. odorata* foliage

Nutrient	Concentration				Present study	Likely diagnosis at a plantation level
	*Very low	*Low	*Medium	*High		
Macronutrients (%)						
N	1.42	-	3.07	-	3.37	S
P	-	0.10	0.23	-	0.24	S
K	-	0.92	2.44	-	0.46	D
Ca	-	1.27-1.79	-	-	2.34	S
Mg	-	0.12-0.28	-	-	0.18	D
Micronutrients (ppm)						
Fe	-	-	148	562	-	-
Zn	-	-	14-17	-	34.8	S
Mn	-	22	25	-	34.0	S
B	-	-	27	-	35.9	S
Cu	-	2	6	-	5.62	S/D

*Concentrations from Drechsel and Zech (1991) and Alvarado *et al.* (2014). S: Sufficient; D: Deficient

Fig. 2a shows that interplanting *G. sepium* and application of N and P decreased *C. odorata* growth, even though some combinations between factors resulted in positive effects on dry weight of 10 leaflets (DW10). It is the case of combinations NP and 6GN (Fig. 2; interplanting six *G. sepium*

trees + application of N). Fig. 2b confirms that all treatments, with the exception of 3G, presented sufficient levels of foliar P. When P was applied, even though DW10 decreased, P concentration in foliage increased (Fig. 2), thus confirming P sufficiency (López-López and Alvarado-López 2010).



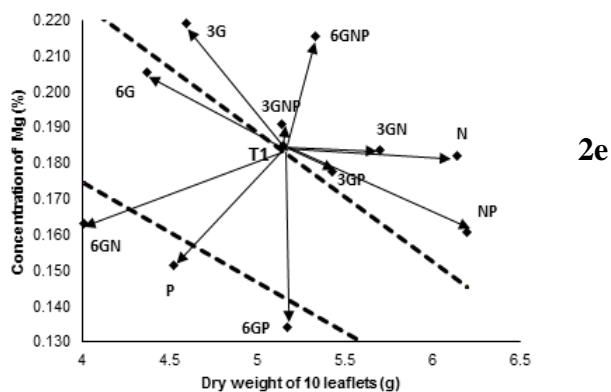


Fig 2 Nomograms showing status of nitrogen (2a), phosphorus (2b), potassium (2c), calcium (2d), and magnesium (2e) in foliage of *C. odorata*, in response to interplanting *G. sepium* into the experimental plots, and application of N and P fertilizers. 3G: three *G. sepium* trees per experimental plot; 6G: Six *G. sepium* trees per experimental plot; N: Nitrogen fertilizer; P: Phosphorus fertilizer

Fig. 2c shows too low foliar concentrations of potassium. It is worth noticing that intermixing of three or six *G. sepium* trees contributed to increase potassium concentration in *C. odorata* foliage, as compared with the control treatment. This can be an important fact implying that *G. sepium* should be improving tree nutrient status and vigor, since K is a limiting nutrient as judged by the soil (Table 1) and foliar (Table 2) analyses. Similarly, mixing of *G. sepium* trees within the experimental plots contributed to increase foliar Mg in *C. odorata* foliage (Fig. 2e). Being Mg a limiting nutrient (Table 2), improvement of its concentration in *C. odorata* leaves is likely to promote its growth.

Even though soil analysis indicates Zn deficiency (Table 1), foliar analysis shows sufficiency concentrations of Zn (Fig. 3a). Nonetheless, combination of three *G. sepium* trees with application of N (vector 3GN), promoted growth and concentration of Zn in *C. odorata* foliage. This might indicate that *G. sepium* improves Zn availability. The treatment with three *G. sepium* trees alone (3G) also improved Zn concentration in *C. odorata* foliage; however, such an increased concentration seems to be a result of growth reduction (López-López and Alvarado-López 2010).

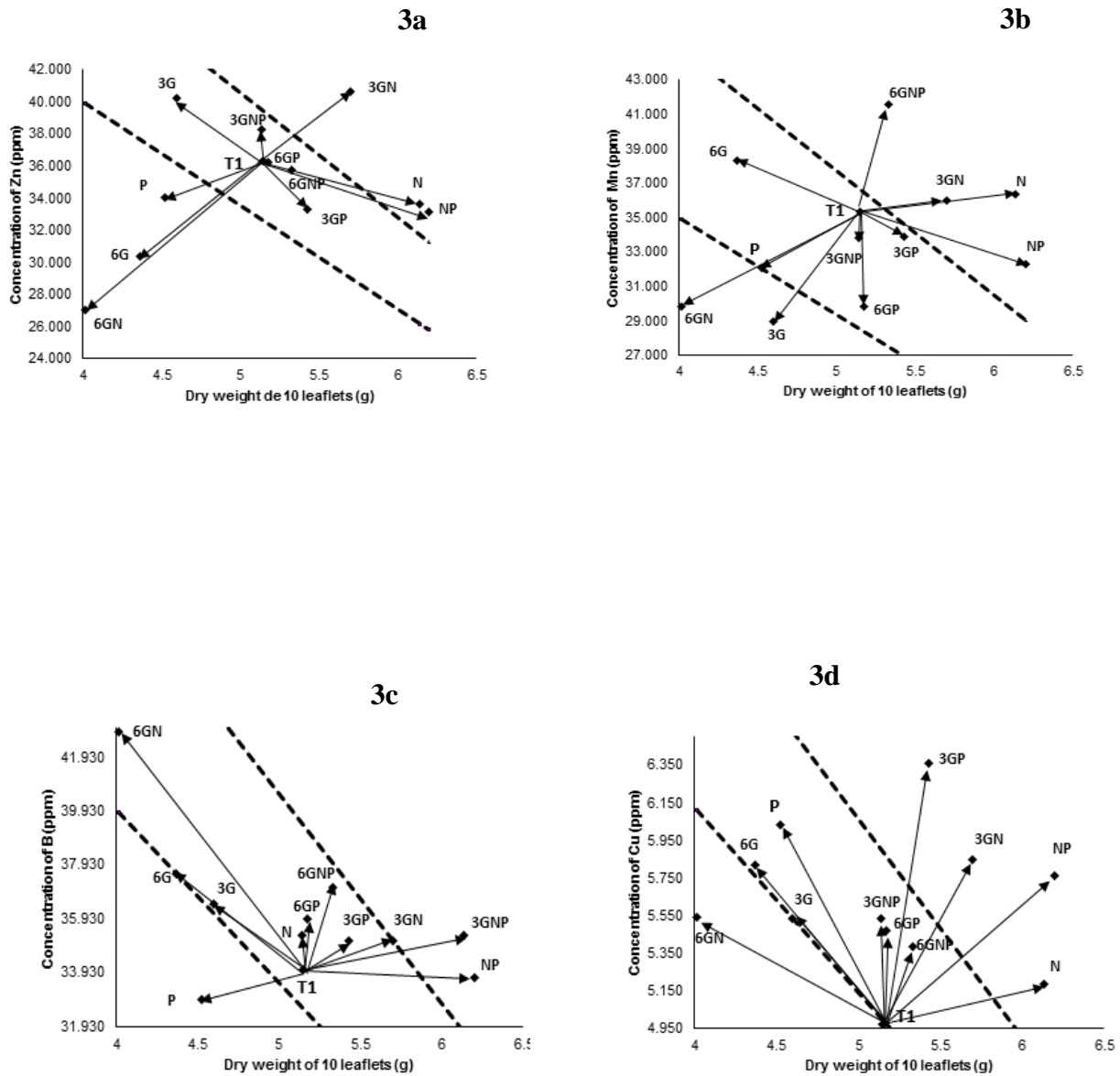


Fig 3 Nomograms showing status of zinc (3a), manganese (3b), boron (3c), and cooper (3d) in foliage of *C. odorata*, in response to interplanting *G. sepium* into the experimental plots, and application of N and P fertilizers. 3G: three *G. sepium* trees per experimental plot; 6G: Six *G. sepium* trees per experimental plot; N: Nitrogen fertilizer; P: Phosphorus fertilizer

Manganese is deficient in the soil (Table 1), although it is sufficient within foliage (Table 2). With the exception of treatments 6GNP and 3GN, treatments with *G. sepium* induced reductions in Mn concentrations, probably due to competition between *G. sepium* and *C. odorata* trees (Fig. 3b).

Application of P conducted to decreased DW10 and Mn concentration as compared to the control plots, thus denoting a likely antagonistic effect among these nutrients. Positive effects of treatments 6GNP, 3GN, and N on DW10 were observed (Fig. 3).

Boron (Table 1) was deficient according to soil analysis, although it registered foliar concentrations well above adequate concentrations (Table 2; Fig. 3c). With the exception of treatments P, 3G, and 6G, all treatments increased B availability (B content in foliage, Fig. 3c).

All treatments applied increased copper concentration within foliage. Most of them improved its availability, but P, 3G, 6G, and 6GN likely increased Cu concentration by decreasing *C. odorata* DW10 (López-López and Alvarado-López 2010).

Table 3 Tukey ($\alpha=0.05$) tests for the growth variables studied

Response variable	<i>G. sepium</i>			N		P	
	0	3	6	0	1,173	0	780
RCD15	11.3 ^a	11.7a	10.6a	11.4a	11.0a	11.4a	11.0a
TH15	61.1 ^a	59.6a	59.3a	60.3a	60.0a	61.5a	58.4a
CDc15	35.6 ^a	37.2a	34.7a	36.5a	35.2 ^a	34.6a	37.0a
RCD16	44.3 ^a	29.9a	33.8a	46.8a	32.4 ^a	36.0a	38.6a
DBH16	34.6 ^a	34.1a	30.6a	33.3a	33.0a	33.4a	33.0a
TH16	281.3 ^a	300.0a	248.3b	279.1a	274.0a	267.0b	286.2a
CDc16	135.4 ^a	131.5a	130.1a	128.0a	137.0a	134.1 ^a	130.5a
ITH15-16	220.2 ^a	240.4a	189.0b	218.8a	214.3a	205.3a	228.0a
IRCD15-16	68.7 ^a	68.7a	57.2a	65.1a	64.6 ^a	65.5a	64.2a
ICDc15-16	99.7 ^a	94.3a	95.4a	91.5a	101.4a	99.4a	93.5a

Different letters within a response variable and a variation factor imply corresponding means are statistically different ($\alpha=0.05$). *G. sepium*=Number of *G. sepium* trees intermixed; N=Nitrogen fertilizer applied; P=Phosphorus fertilizer applied; RCD15=Root collar diameter 2015; TH15=Total height 2015; CDc15= *C. odorata* crown diameter; RCD16= Root collar diameter 2016; DBH16= Diameter at breast height 2016; TH16=Total height 2016; CDc= *C. odorata* crown diameter; ITH15-16= Increment of total height 2015-2016; IRCD15-16= Increment of root collar diameter 2015-2016; ICDc15-16= Increment of *C. odorata* crown diameter 2015-2016.

According to Table 3, means of TH16 and ITH15-16 were significantly lower in the six-*G. sepium* plots than in the three or no *G. sepium* plots. The factor “N” at its levels 0 and 1,173 did not induce statistical differences in the response variables studied. Conversely, the factor “P” exerted significant effects on TH16.

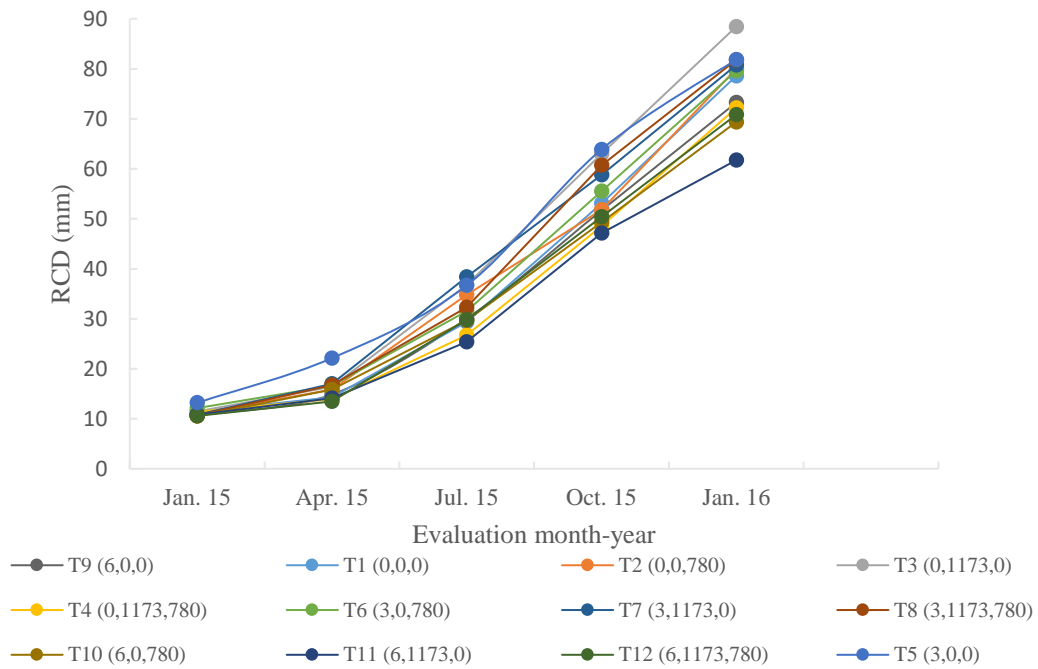


Fig 4 Root collar diameter (RCD, mm) growth during the evaluation time

Fig. 4 shows exponential trends of growth of root collar diameter (RCD) for all twelve treatments during the evaluation period. Initial RCD (January 2015) were similar for all treatments, but differences developed as time went by. At the end of the experimental period, treatments with three *G. sepium* trees had higher values for RCD, while those with six N-fixing trees per plot exhibited the lowest values.

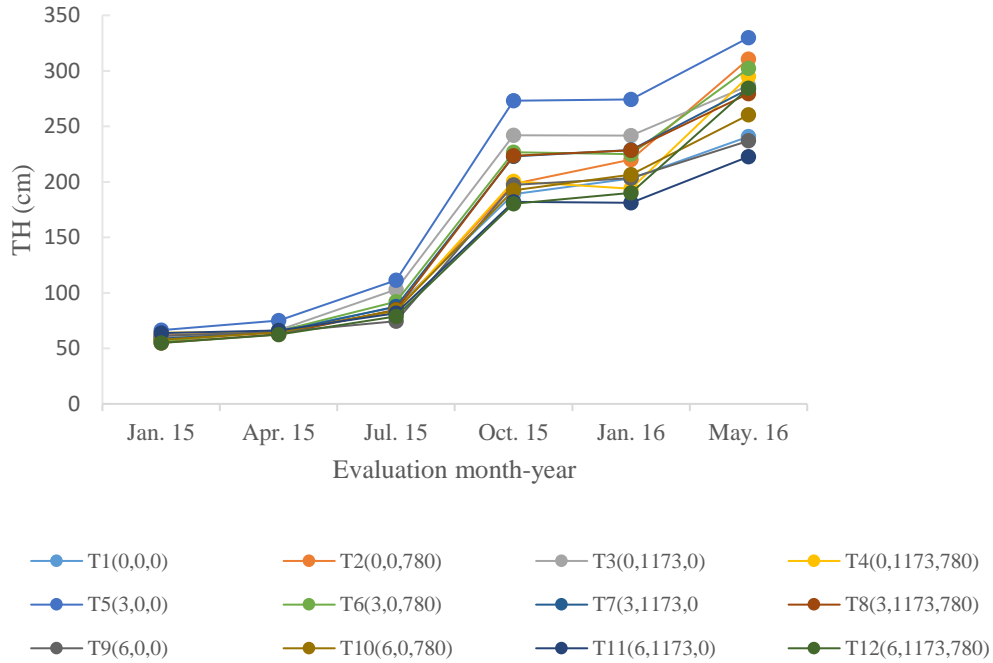


Fig 5 Total height (TH, cm) growth during the evaluation time

Height growth (TH) seems to be affected by different factors than RCD growth. The highest TH16 (329.8 cm) was reached in treatment 5 (3 *G. sepium* trees + 0N + 0P; Fig. 5), followed by treatments 2 (0, 0, 780), six (3, 0 780), and four (0,1173,780; Fig. 5). It looks like this variable is mainly affected positively by the addition of P. This finding matches the statistical significance this factor exerted on TH16 (Table 3). Also, coinciding with Table 3, treatments with the lowest height growth were those with six *G. sepium* trees per plot.

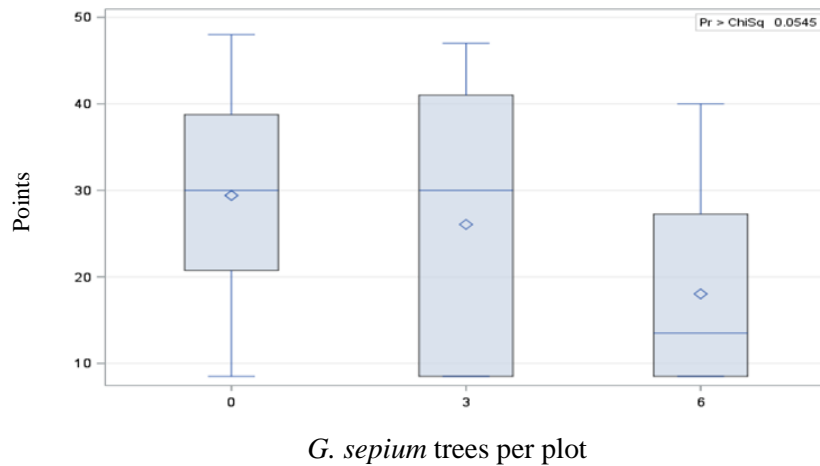


Fig 6 Kruskal-Wallis points for the number of tree shoots attacked by *H. grandella* (NSA), as a function of the number of *G. sepium* trees per plot

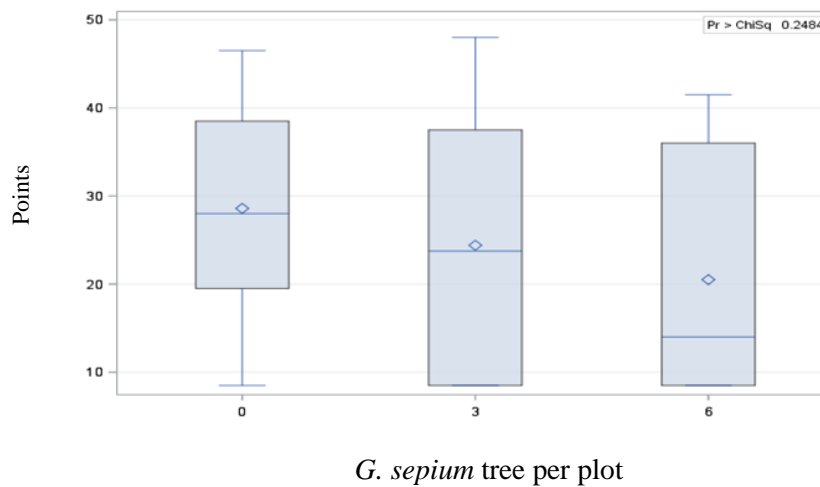


Fig 7 Kruskal-Wallis points for the number of perforations per shoot (NPS), as a function of the number of *G. sepium* trees per plot

According to Fig. 6, the number of shoots attacked per tree (NSA) registered a noticeable reduction (26 points) when three *G. sepium* individuals were present in the experimental plots. Such a reduction was lower (18 points) when six *G. sepium* individuals per plot were present ($X^2 =$

0.0545). The number of attacks by *H. grandella* per *C. odorata* shoot was not significantly affected by the presence of *G. sepium* ($X^2 = 0.2484$), although a numerical reduction of 20.5 points was indicated by the Kruskal-Wallis test (Fig. 7).

Table 4 Wilcoxon-Mann Whitney analysis of variance for the factors N and P

Response variable	N		P	
	0	1,173	0	780
NSA	1.3a	1.8a	1.2a	1.9a
NPS	1.5a	2.0a	1.3a	2.1a
SURV	1.2a	0.9a	0.9a	1.2a

Different letters associated with values within a response variable and a factor indicate that the values were significantly affected by the factor; NSA: Number of shoots attacked per tree; NPS: Number of perforations per shoot; SURV: Survival.

Response variables were not affected by the factors N or P. Nonetheless, higher values for NSA and NPS were found in plots receiving N and/or P (Table 4).

Discussion

The treatments with *G. sepium* individuals interplanted with *C. odorata* trees promoted a reduction of the mean weight of *C. odorata* leaflets (Fig. 2 and 3). This negative effect of *G. sepium* was likely due to competition for P between the tree species, probably combined with competition for soil water, although this factor was not studied in this research work. In fact, Fig. 2b indicates that at least the 3G treatment made *C. odorata* P concentration to go down reaching a value as low as 0.1 %. According to Drechsel and Zech (1991) and Alvarado *et al.* (2014), this concentration is interpreted as low. Even with the competition effects mentioned above, RCD and TH (Fig. 4 and 5) seem to show trends indicating that treatments with three *G. sepium* trees per plot will eventually surpass the remaining treatments.

According to soil analysis, soil N is sufficient while soil P is close to deficiency levels. Nonetheless, foliar analyses (Table 2) and vector analysis (Fig. 2b) show that *C. odorata* foliage has adequate P concentrations, as judged by the P concentrations presented by Drechsel and Zech (1991) and Alvarado *et al.* (2014). Leaf P concentration found in the present study (0.24 %; Table 2) is similar to that reported by Webb *et al.* (2000) in Australia, in which case, P supply promoted a foliar P concentration of 0.3 %.

The abundance of soil N in the plantation, probably resulting from organic matter derived from grasses and legumes of the genus *Desmodium*, present in the study site before planting, caused no effect of application of N on *C. odorata* growth. A similar response was found by Calixto *et al.* (2015), who also found no effect from applying N at Papantla, Veracruz; a site located 45 Km from our study site.

Even though sufficiency concentrations of foliar P were found in *C. odorata* (Table 2; Fig. 2b), application of P significantly increased tree total height (Table 3). This effect is likely to be indirect; that is, P applied probably improved growth of *G. sepium* trees, provided that this species, like other N-fixing species, is highly-P-demanding (López-López 2004). If such effect did occur, it is likely that increased growth of *G. sepium* promoted competition for light between this species and *C. odorata*, thus promoting height growth of the latter species.

Height growth of *C. odorata* is an important variable because the faster the tree growth the sooner the shoots are out of reach of *H. grandella*. Accordingly, management of P supply in our mixed-species system is worth of special attention if low productivity and *H. grandella* outbreaks are to be avoided. RCD and DBH did not respond significantly to the application of P fertilizer. This agrees with our perception that soil P concentration lays on the boundary between deficiency and sufficiency.

The most limiting nutrients in the studied site were K and Mg, as indicated in Table 1, Table 2 and vector analyses (Fig. 2c and 2e). Accordingly, the factors tested in the present study (intercropping of *G. sepium* N, and P) do not correspond to the limiting factors in the study site. According to the law of the minimum of Liebig, positive responses in growth and increased resistance of plants to attack by *H. grandella* should be little likely to occur in this site (Pérez-Camacho *et al.* 2013). However, as indicated by Table 3, total height of *C. odorata* and increment of height increased with intercropping three individuals of *G. sepium*. This positive effect is likely to have resulted from competition for light between *G. sepium* and *C. odorata* trees, which probably promoted *C. odorata* height growth as a strategy of trees to reach solar radiation. On the other hand, *G. sepium* increased availability of K, Mg, and Cu (Fig. 2c, 2e, and 3d, respectively) for *C. odorata*. Provided that at least K and Mg are deficient in the study site (Table 2), their higher availability probably improved *C. odorata* resistance against *H. grandella* attack. In fact, Pérez-Camacho *et al.* (2013), state that improvement of tree nutrient status leads to a higher resistance of trees against pest attack.

Some studies have correlated nutrient supply with resistance of *C. odorata* against *H. grandella* attacks. It has been reported that high soil Ca could decrease the attack by the shoot borer (Newton *et al.* 1998). Similarly, Amtmann *et al.* (2008) reported that 63 % of the reduction found in the number of attacks by insects in plants was due to application of K. Coincidentally, Calixto *et al.* (2015) also found that application of K tended to decrease the attack by *H. grandella* during the first year following the application of treatments.

The positive effect of *G. sepium* on resistance of *C. odorata* to the attacks by *H. grandella* may be explained by the changes in soil fertility it promotes. Additionally, the presence of secondary metabolites such as phenols, alkaloids, essential oils, saponins, protocatechic acid within *G. sepium* foliage can also be into play (Inostrosa and Fournier 1982).

Conclusions

Potassium and magnesium are the most limiting nutrients in the experimental area. The availability of these nutrients for *C. odorata*, as well as that of copper, is improved by interplanting *G. sepium*. One year after the establishment of the experiment, the treatments do not significantly affect the response variables, except total height (TH16) and increment in total height (ITH15-16), which are improved by the presence of three *G. sepium* trees, as well as by the application of P fertilizer. Height growth of *C. odorata* is relevant for reducing incidence of *H. grandella*. The number of affected shoots per *C. odorata* tree (NSA) is significantly reduced by interplanting *G. sepium*. Trends of the effects indicate that in a longer term, tree diameter and height will significantly increase within the experimental plots having three *G. sepium* trees. We recommend interplanting *G. sepium* trees in *C. odorata* plantations in order to improve productivity and reduce incidence of *H. grandella*.

Acknowledgments

Authors acknowledge Mexican Council for Science and Technology (CONACYT) for supporting part of the research work through the scholarship awarded the first author. We also thank Mr. Jaime Montero Montero, for the facilities provided, and Consultora para el Desarrollo Rural y Ordenamiento Ambiental S.A. de C.V. “Cedro”, Xalapa, Veracruz, for donating the *C. odorata* seedlings.

Conflict of interest: The authors declare that they have no conflict of interest.

References

- Adekunle OK (2009) Population dynamics of *Meloidogyne incognita* and three other phytonematodes on okra cultivars planted in alleys of *Leucaena leucocephala* and *Gliricidia sepium*. *Australas Plant Pathol* 38: 211-215.
- Akinnifesi FK, Makumba W, Kwesiga FR (2006) Sustainable maize production using *Gliricidia*/maize intercropping in Southern Malawi. *Expl Agric* 42:1-17.
- Akinnifesi FK, Ajayi OC, Sileshi G, Chirwa PG, Chianu J (2010) Fertiliser trees for sustainable food security in the maize-based production systems of East and Southern Africa A review. *Agron Sustain Dev* 615-629.
- Alvarado A, Fernández-Moya J, Segura JM, Vaides EE, Camacho M, Avellán MJ, Ávila C E (2014) Nutrient Management Improvements in Forestry Species. *Better Crops* 98 (4):16-18.
- Amtmann A, Troufflard S, Armengaud P (2008) The effect of potassium nutrition on pest and disease resistance in plants. *Physiol Plant* 1-10 pp doi: 10.1111/j.1399-3054.2008.01075.x
- Aragón-García A, Torija-Torres A, Avelleira-Cortés A, Tapia-Rojas AM, Contreras-Mora IR, López-Olguín JF (2008) Control de plagas de la jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.) con *Gliricidia sepium* (Jacq.) en Chiautla, Puebla. [Pest control in the Jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.) using *Gliricidia sepium* (Jacq.) at Chiautla, Puebla]. *AIA* 12(3): 33-41.
- Atta-Krah AN, Sumberg JE (1988) Studies with *Gliricidia sepium* for crop/livestock production systems in West Africa. *Agrofor Syst* 6: 97-118.
- Benítez BG, Pulido-Salas Ma. TP, Equihua ZM (2004) Árboles multiusos nativos de Veracruz para reforestación, restauración y plantaciones [Multipurpose trees native to Veracruz, for reforestation, restoration, and plantations]. Instituto de Ecología, A.C. SIGOLFO. CONAFOR. Xalapa, Veracruz, México, 288 pp.
- Bouillet JP, Laclau JP, Gonçalves MJL, Jourdan MZ, Galiana A (2008) Mixed-species plantations of *Acacia mangium* and *Eucalyptus grandis* in Brazil. In: Site Management and Productivity in Tropical Plantation Forests. Proceedings of Workshops in Piracicaba (Brazil) 22-26 November 2004 and Bogor (Indonesia) 6-9 November 2006. Sadanandan Nambiar EK (ed), Bogor, Indonesia: Center for International Forestry Research (CIFOR), pp 157-172.
- Calixto CG, López MA, Equihua A, Lira DE, Cetina VM (2015) Crecimiento de *Cedrela odorata* e incidencia de *Hypsipyla grandela* en respuesta al manejo nutrimental [Growth of *Cedrela*

- odorata* and incidence of *Hypsipyla grandella* in response to nutrient management]. BOSQUE 36 (2):265-273.
- Castrejón PFA, Martínez PP, Corona L, Valle JL, Mendoza GD (2015) Partial substitution of soybean meal by *Gliricidia sepium* or *Guazuma ulmifolia* leaves in the rations of growing lambs. Trop Anim Health Prod. Published Online: 22 October, 2015. DOI 10.1007/s11250-015-0932-2.
- Chamberlain JR, Galwey NW (1993) Methods of identifying genetic diversity in *Gliricidia* species for biomass production. Expl Agric 29:87-96.
- Díaz-Maldonado MERA, Rivera LRR, Centeno ELR (2002) Control de *Hypsipyla grandella* en plantaciones de *Cedrela odorata* [Control of *Hypsipyla grandella* in *Cedrela odorata* plantations]. Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). www.conafor.gob.mx/programas_nacionales_forestales/imasd/proyectos_2002/63.htm.
- Drechsel P, Zech W (1991) Foliar nutrient levels of broad-leaved tropical trees: A tabular review. Plant and Soil 131: 29-46.
- Ewel JJ, Bigelow SW (2011) Tree species identity and interactions with neighbors determine nutrient leaching in model tropical forests. Oecología 167: 1127-1140.
- García ME (1973) Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen [Adaptations to the Köppen climatic classification system]. Instituto de Geografía. UNAM. 2nd edn, México. D.F. 245 pp.
- Hernández PF, Torres LS (2009) Niveles críticos nutrimentales preliminares para especies forestales de México a nivel vivero [Preliminary critical nutrient levels for Mexican forest species at the nursery stage]. Bachelor Thesis DICIFO, UACH. México, 151 pp.
- Hilje L, Cornelius J (2001) ¿Es inmanejable *Hypsipyla grandella* como plaga forestal? [As a forest pest, is *Hypsipyla grandella* unmanageable] Hoja Técnica. Manejo Integrado de Plagas (Costa Rica) (61): 1-4.
- Horneck DA, Sullivan DM, Owen JS, Hart JM (2011) Soil Test Interpretation Guide. Oregon State University Extension Service 12 pp.
- Howard F, Merida MA (2004) El taladrador de las meliáceas, *Hypsipyla grandella* (Zeller) (Insecta: Lepidoptera: Pyralidae: Phycitinae) [The meliaceae shoot borer, *Hypsipyla grandella*

- (Zeller) (Insecta: lepidoptera: Pyralidae: Phycitinae)]. IFAS Extension, University of Florida, pp 1-8.
- Inostrosa I, Fournier LAO (1982) Efecto alelopático de *Gliricidia sepium* (Jacq.) Steud (Madero Negro) [Allelopathic effect of *Gliricidia sepium* (Jacq.) Steud (Madero Negro)]. Rev Biol Trop, 30 (1): 35-39.
- López-López MA (2004) Growth, nutrient, and water status of montezuma pine as affected by alder in the state of Hidalgo, Mexico. Dissertation, Colorado State Univrsity, U.S.A., 118 pp.
- López-López MA, Estañol-Botello E (2007) Detección de deficiencias de hierro en *Pinus leiophylla* a partir de los efectos de dilución y concentración nutrimental [Detection of iron deficiencies in *Pinus leiophylla* from nutrient dilution and concentration effects]. Terra Latinoamericana 25(1):9-15.
- López-López MA, J Alvarado-López (2010) Interpretación de nomogramas de análisis de vectores para diagnóstico nutrimental de especies forestales [Interpretation of vector analysis nomograms for forest tree nutrient diagnosis]. Madera y Bosques 16 (1): 99-108.
- Mafongoya PL, Kuntashula E, Sileshi G (2006) Managing Soil Fertility and Nutrient Cycles through Fertilizer Trees in Southern Africa In: Uphoff N, Ball AS, Fernandes E, Herren H, Husson O, Laing M, Palm C, Pretty J, Sanchez P, Sanginga N, Thies J (ed), Biological Approaches to Sustainable Soil Systems, Taylor and Francis Group, 289 pp.
- Martínez-Vento N, Estrada-Ortíz J, Góngora F, Martínez-González L, Curbelo-Gómez S (2005) *Hypsipyla grandella* Zeller, su incidencia en plantaciones en fomento de *Cedrela odorata* L. en el municipio de Viñales, Pinar del Río, Cuba [*Hypsipyla grandella* Zeller; its incidence in *Cedrela odorata* plantations at Fomento, municipality of Viñales, Pinar del Río, Cuba]. Revista Ciencias.com www.revistaciencias.com/publicaciones/EElpFZpykuRmfjJGkK.php.
- Miranda F, Hernández-X E (1964) Los tipos de vegetación de México y su clasificación [Types of vegetation in Mexico and their classification]. Colegio de Postgraduados. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Bol Soc Bot México, Chapingo Estado de México. México. Num. 28. 38 pp.

- Newton AC, Cornelius JP, Mesén JF, Correa EA (1998) Variation in attack by the mahogany shoot borer, *Hypsipyla grandella* (Lepidoptera: Pyralidae), in relation to host growth and phenology. *Bulletin of Entomological Research* 88:319-326.
- Paul C, Weber M (2012) Intercropping *Cedrela odorata* with shrubby crop species to reduce infestation with *Hypsipyla grandella* and Improve the Quality of Timber, *ISRN Forestry Vol 2013*, Article ID 637410. 10 p. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/6374>.
- Pennington TD, Sarukhan J (1998) Árboles tropicales de México. Manual para la identificación de las principales especies [Tropical trees of Mexico. A guide for identification of the main species]. UNAM, Fondo de Cultura Económica, México, D.F. México. 521 pp.
- Pérez-Camacho M, López-López MA, Equihua-Martínez A (2013). Relationships between site factors and bark beetle attack on pine trees. *Journal of Biological Sciences* 13 (7):621-627.
- Rothe A, Binkley D (2001) Nutritional interactions in mixed species forests: a synthesis. *Review Can J For Res* 31: 1855-1870.
- Sánchez SS, Domínguez DM, Cortés MH (2009) Efecto de la sombra en plantas de caoba sobre la incidencia de *Hypsipyla grandella* Zeller y otros insectos en Tabasco, México [Shade effect on the incidence of *Hypsipyla grandella* Zeller and other insects in mahogany plants in Tabasco, Mexico]. *Universidad y Ciencia Trópico Húmedo* 25(3): 225-232.
- Statistical Analysis System (SAS) (2015). SAS Institute Inc. Cary, NC, Ver. 9.4.
- Timmer VR, Stone EL (1978) Comparative foliar analysis of young balsam fir fertilized with nitrogen, phosphorus, potassium, and lime. *Soil Sc Soc Am Proc* 42:125-130.
- Webb MJ, Reddell P, Hambleton A, Robson K (2000) Growth response of four tropical plantation timber species to increasing phosphorus supply and assessment of phosphorus requirements using foliar analysis. *New Forests* 20: 193-211.

CAPÍTULO II. Efecto de sustratos y hormonas en el enraizamiento de estacas de *Gliricidia sepium* (Jacq.) Kunth ex Walp

Resumen

La reproducción asexual por estacas es una técnica que ha tenido relevancia en especies forestales de clima templado y tropical, principalmente por el bajo costo que involucra. *Gliricidia sepium* es una especie que se ha establecido en campo sin problema; a pesar de lo anterior ha sido una de las principales especies arbóreas multipropósito de la que poco se ha estudiado el enraizamiento y su velocidad de rebrote. En el presente estudio se evaluó el efecto de sustratos y hormonas sobre el enraizamiento y producción de nódulos en estacas de *G. sepium*. Se seleccionaron aleatoriamente árboles de cercas vivas de *G. sepium* y bajo un diseño factorial 3 x 2 se establecieron seis tratamientos con cuatro repeticiones, para probar tres tipos de sustratos (suelo natural, peat moss y la mezcla de peat moss y agrolita) y dos niveles de aplicación de hormonas (sin y con ácido indolbutírico, AIB). Después de cinco meses se registró el peso seco de raíz (PSRa), el número y peso seco de nódulos (NoNod y PSNod), así como el peso seco de follaje (PSFo) y porcentaje de enraizamiento por tratamiento (%). Existieron efectos significativos del sustrato sobre biomasa de follaje y raíz; $P < 0.0020$ y $P < 0.0311$, respectivamente. El sustrato “suelo (tierra de monte)” promovió el mayor peso seco en ambas variables evaluadas. El uso de AIB no es viable para el enraizamiento de estacas de *G. sepium*.

Palabras clave: Ácido indol-3-butírico, producción de raíces, nodulación, reproducción vegetativa.

Abstract

Asexual reproduction by cutting rooting is a technique that has had relevance for temperate and tropical forest species, mainly because of the low cost that it involves. *Gliricidia sepium* is a species showing no problems to be established in the field; nonetheless, it is one of the main multipurpose tropical tree species for which few studies on rooting of cuttings and speed of regrowth have been reported. In the present study we evaluated the effect of substrates and hormones on rooting and nodule production in *G. sepium* cuttings. Trees were randomly selected from live fences of *G. sepium* and under a 3 x 2 factorial design six treatments with four replicates were established with three types of substrates (natural soil, peat moss and the mixture of peat moss and perlite) and application or not of indolbutyric acid (AIB) to the cuttings. After 5 months, root dry weight (PSRa), number and dry weight of nodules (NoNod and PSNod), as well as dry weight of foliage (PSFo) and percentage of rooting per treatment (%) were recorded. There were significant effects of the substrate on foliage and root biomass; $P < 0.0020$ and $P < 0.0311$, respectively. The substrate "soil (local forest soil)" promoted the highest dry weight in both variables evaluated. The use of AIB is not viable for the rooting of *G. sepium* cuttings.

Key words: Indole-3-butyric acid, root production, nodulation, vegetative reproduction.

Introducción

Gliricidia sepium (Jacq.) Kunth ex Walp es un árbol leguminoso caducifolio nativo de América Tropical, adaptado a un amplio rango de suelos en climas húmedos y subhúmedos (OFI-CATIE, 2014). En México, se encuentra en las vertientes del Golfo y del Pacífico y en la Península de Yucatán. Es una especie pionera común en claros de bosques, dunas costeras, márgenes de ríos, orillas de caminos, campos de cultivo y terrenos abandonados (Niembro-Rocas, 2002). Es un árbol que se regenera fácilmente después de la tumba y se propaga principalmente por estacas (Benítez-Badilla *et al.* 2004; OFI-CATIE, 2014). Además favorece la fertilidad del suelo por la fijación de nitrógeno que ocurre por bacterias del género *Rhizobium* en asociación con las raíces finas del árbol (Elevitch y Francis, 2006; Bala, 2007; Parrotta, 1992).

La propagación asexual por estacas ha sido aplicada tanto en horticultura como en dasonomía, principalmente en especies de clima templado y es uno de los métodos de reproducción más baratos y sencillos (Vastey, 1962), mediante el uso de auxinas: ácido indol-3-butírico (AIB) que

promueve de manera rápida el enraizamiento en especies difíciles de propagar (Castillo-Flores *et al.*, 2011).

Gliricidia sepium, se establece en potreros en cercos vivos y dado a su habilidad para regenerarse, ha sido incluida en diversos ensayos sobre propagación vegetativa de estacas en condiciones de campo (Di Stéfano y Fournier, 1996; Clavero y Razz, 2002; Contreras y Ochoa, 2003), para la producción de forraje o cerca viva (Contreras *et al.*, 2003; Aldana-García, 2009). La velocidad de rebrote llega a ser de mediana a rápida en condiciones naturales, pero poco se ha estudiado sobre el enraizamiento de tejidos del árbol. Lograr un mejor enraizamiento de la especie permite una mayor supervivencia, un mejor anclaje y protección al suelo, así como también un mayor número de nódulos fijadores de nitrógeno en los primeros centímetros de la superficie del suelo (Baggio, 1982).

Dos de los factores que más frecuentemente afectan el enraizamiento de tejido y órganos vegetales son el tipo de sustrato, dosis y hormonas utilizadas (Mesén, 1998; Castrillón *et al.*, 2008; Castillo-Flores *et al.*, 2013). Por ello, el presente ensayo consiste en evaluar el efecto de sustratos y hormonas sobre el enraizamiento y producción de nódulos en estacas de *Gliricidia sepium* (Jacq.) Kunth ex Walp.

Materiales y métodos

Obtención del material vegetal

Se seleccionaron aleatoriamente cuatro árboles de cercas vivas de *G. sepium* de entre 1 y 1.5 años de edad. De las ramas laterales de cada árbol se cortaron estacas de 20 cm de longitud y de diámetros entre 4 y 5 mm según lo propuesto por Clavero y Razz (2002).

En cada estaca se realizó un corte en el extremo inferior para facilitar la absorción del enraizador Rádix 10,000 (ácido indol-3-butírico [10,000 ppm] (factor 2).

Preparación de sustratos y enraizador

Bajo un diseño factorial 3 x 2 se establecieron seis tratamientos con tres tipos de sustratos (tierra de monte, peat moss y la mezcla peat moss + agrolita en proporción 1:4,) y dos niveles de auxina con 4 repeticiones, dispuestos en charolas (24 unidades experimentales) de plástico (28 x 11 cm) con 50 estacas cada una (Tabla 1).

Tabla 1 Factores y niveles probados en el experimento de enraizamiento de *Gliricidia sepium*

Tratamiento	Sustrato	SE	CE
T1	TM	X	
T2	TM		X
T3	PM	X	
T4	PM		X
T5	PM+AG	X	
T6	PM+AG		X

TM: tierra de monte, PM: peat moss, AG: agrolita, SE: sin hormona, CE: con hormona

Las charolas fueron colocadas sobre una tarima de madera y puestas en un sitio techado, en la comunidad de Zapotalillo, Tihuatlán, Veracruz. Durante los primeros 15 días de establecimiento se aplicaron riegos y posteriormente estos disminuyeron al ser trasladadas las charolas a un área abierta, donde fueron expuestas las estacas a lluvias esporádicas durante el resto del período experimental. Al término de cinco meses se evaluó el peso seco de raíz (PsRa), el número y peso seco de nódulos (NoNod y PsNod, respectivamente), así como el peso seco de follaje (PsFo) y porcentaje de enraizamiento por tratamiento.

Se realizó análisis de varianza (ANOVA) mediante el procedimiento GLM y se corrieron pruebas de comparación de medias (Tukey $P < 0.05$) para determinar posibles diferencias entre los tratamientos.

Resultados y discusión

De acuerdo a la Fig. 1, los tratamientos sin aplicación de AIB son los que mayor porcentaje de enraizamiento presentaron. El mayor porcentaje de enraizamiento fue en el sustrato de Peatmoss (PM) sin AIB con 75 % y peatmoss más agrolita sin AIB (PM+AG) con 45 % de enraizamiento; sin embargo la tierra de monte (TM) con AIB presentó 56.25 % de enraizamiento, ligeramente mayor que cuando no se aplicó AIB (55 %). El tratamiento de peatmoss (PM) con AIB presentó el menor porcentaje de enraizamiento (40 %; Fig. 1).

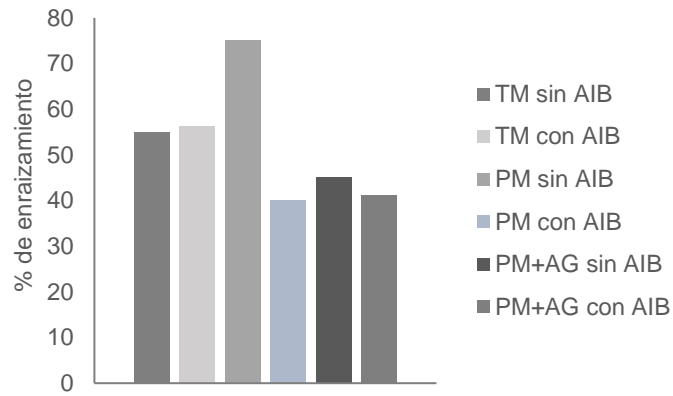


Fig 1 Porcentaje de enraizamiento por tratamiento

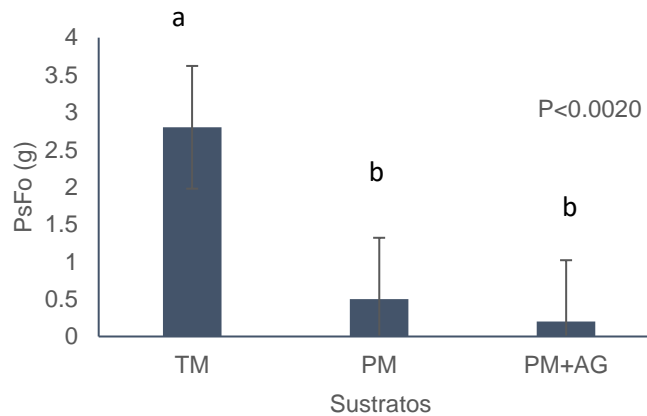


Fig 2 Peso seco de follaje (g) promedio de *G. sepium* por sustrato

Existieron efectos significativos del sustrato sobre biomasa de follaje y raíz (g); $P < 0.0020$ y $P < 0.0311$, respectivamente (Fig. 2 y 3). Las mencionadas figuras muestran que el sustrato (tierra de monte TM) promovió el mayor peso seco en ambas variables evaluadas.

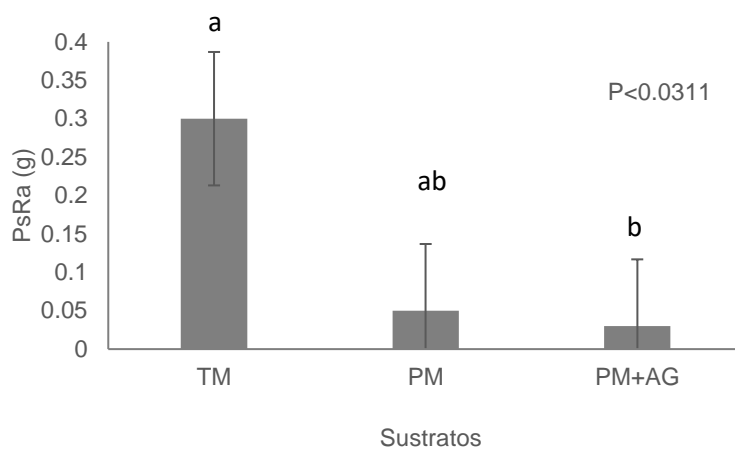


Fig 3 Peso seco de raíz (g) promedio de *G. sepium* por sustrato

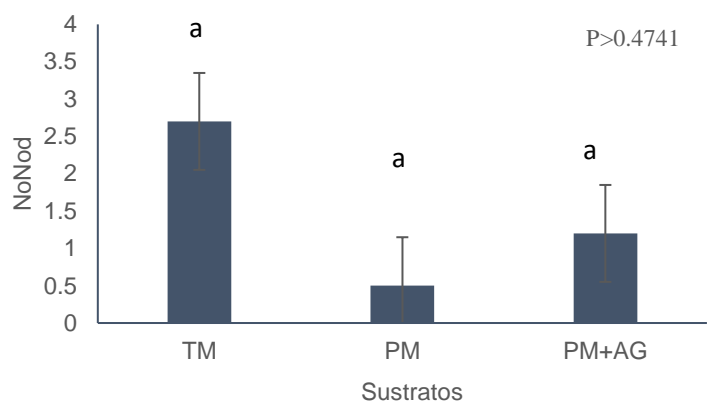


Fig 4 Número de nódulos promedio de *G. sepium* por sustrato

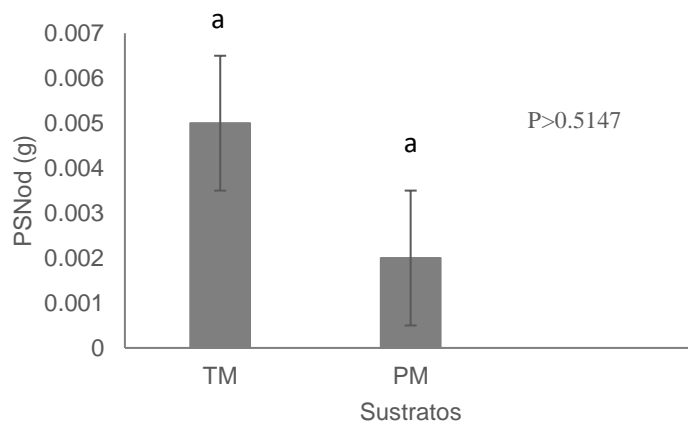


Fig 5 Peso seco de nódulos (g) promedio de *G. sepium* por sustrato

El número y peso seco de nódulos no presentaron efecto por el sustrato (NoNod: $P>0.4741$), (PsNod: $P>0.5147$), respectivamente, (Fig. 4 y 5). Sin embargo, sigue siendo el sustrato “suelo o tierra de monte (TM) el que presentó los mayores valores en las variables evaluadas.

La aplicación de la auxina (AIB) en las estacas, no presentó efecto sobre las variables peso seco de follaje (PsFo: $P>0.9871$, Fig. 6), peso seco de raíz (PSRa: $P>0.6794$, Fig. 7) y peso seco en nódulos (PsNod: $P>0.5147$, Fig. 8).

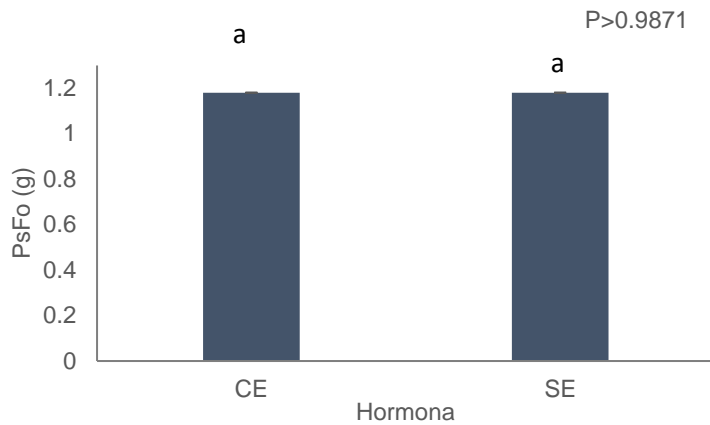


Fig 6 Peso seco de follaje (g) promedio de *G. sepium* con y sin hormona

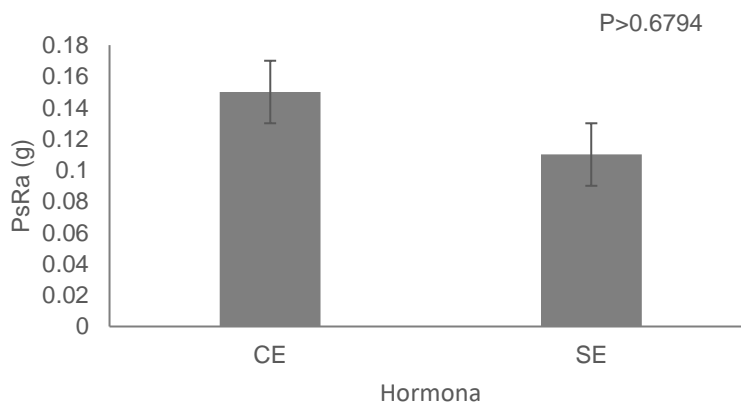


Fig 7 Peso seco de raíz (g) promedio de *G. sepium* con y sin hormona

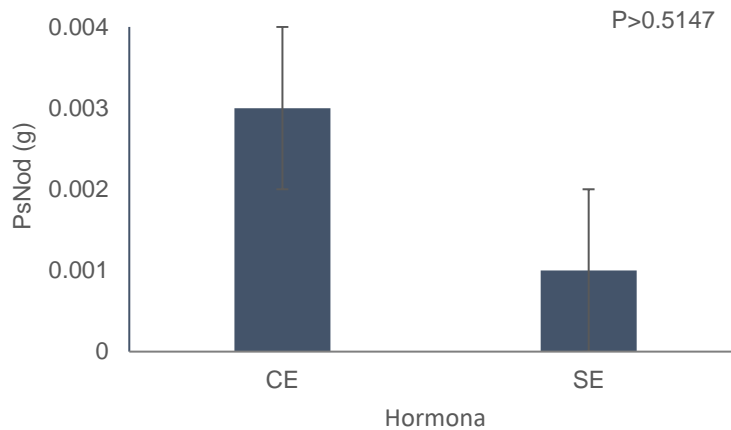


Fig 8 Peso seco de nódulos (g) promedio de *G. sepium* con y sin hormona

En la Tabla 2 derivada de la pruebas de Tukey ($\alpha=005$), se muestran resumidas las medias del peso seco de follaje (PsFo), peso seco de raíz (PsRa) (g) y peso seco de nódulos bacterianos (PSNod). La tabla indica que el follaje generado por las estacas representó la mayor biomasa. Por otro lado, la mayor biomasa se obtuvo cuando se establecieron las estacas en suelo. Di Stefano y Fournier (1996) mencionan que en su estudio, la mayor biomasa correspondió también al follaje, lo que atribuyen a que las estacas de *Gliricidia* utilizan sus reservas para producir primero hojas y ramas tiernas.

Tabla 2 Pruebas de Tukey ($\alpha=0.05$) para las variables de biomasa evaluadas

Variables respuesta	Sustratos		
	Suelo (tierra de monte TM)	Peatmoss (PM)	Peatmoss+agrolita (PM+AG)
NoNOD	2.7a	0.5a	1.2a
PSFo	2.8a	0.5b	0.2b
PSRa	0.3a	0.05ab	0.03b
PSNod	0.005a	0.002a	0.000a

Para una variable de respuesta, medias con letras distintas son significativamente diferentes. NoNOD=Número de nódulos de *G. sepium*;PSFo=Peso seco de follaje (g); PSRa=Peso seco raíz (g); PSNod=Peso seco de nódulos (g).

La aplicación de ácido indol-3-butírico (AIB) no fue viable para el desarrollo radicular y de nódulos en estacas de *Gliricidia*. Cepas del género *Bradyrhizobium* y *Rhizobium* en soya, demuestran que los nódulos radiculares sintetizan ácido indoloacético (AIA); por tanto en el ensayo se pudo producir un exceso de auxinas exógenas y una sinergia negativa en las estacas que no permitió una mayor efectividad en el enraizamiento (Barrientos, 1989; Hernández *et al.*, 2015), ya que la aplicación de auxinas en concentraciones altas pueden inhibir la elongación de la raíz en la zona central (Cleland, 2010). La auxina AIA se encuentra de manera natural en las plantas (Mesen *et al.*, 1992) y durante la fase de inducción del enraizamiento, las auxinas endógenas libres permanecen en niveles altos, pero disminuyen antes de la fase de iniciación, debido a la aplicación exógena de auxinas (Cleland, 2010). Incluso se ha probado también la aplicación de promotores de enraizamiento naturales (cristales de *Aloe vera*) en estacas de *G. sepium*, cuyo efecto ha sido nulo y por el contrario ha disminuido el peso seco de la raíz (Giraldo *et al.*, 2009).

Son diversos los trabajos que confirman que los mejores resultados de propagación vegetativa de *G. sepium* han sido en condiciones de campo (Clavero y Razz, 2002; Cuervo-Jiménez *et al.*, 2013), por su capacidad para enraizar con facilidad.

El peat moss (turba) fue el segundo sustrato que presentó el mayor incremento de follaje y raíz (Tabla 2), posiblemente debido a su composición orgánica (98.5 %) y su capacidad para retener agua, y el que presentó el mayor porcentaje de enraizamiento cuando no se le aplicó AIB.

Es probable que las características de los contenedores utilizados haya influido negativamente en el desarrollo de raíces, debido a que las estacas produjeron raíces laterales fuertes (Cuervo-Jiménez *et al.*, 2013) que en estas condiciones de sustrato limitado representó también limitaciones en la disponibilidad de agua y nutrientes, dado que las raíces crecen de manera superficial (Casanova *et al.*, 2007) y entonces pudo presentarse un mayor estrés hídrico (Mesén *et al.*, 1992).

Conclusiones

El enraizamiento de las estacas de *G. sepium* se presentó en suelo mineral de la región de la zona de estudio sin la aplicación de hormonas (AIB); obteniendo la mayor biomasa de follaje y raíz (g). Factores intraespecíficos de competencia por agua, nutrientes y luz pudieron haber disminuido la producción de biomasa, aunado a las condiciones limitadas de espacio por lo contenedores.

El uso de auxinas exógenas no es viable para el enraizamiento de estacas de *G. sepium*, debido a que la fitohormona ácido indol-3 butírico (AIB) se produce en nódulos radiculares.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para la realización de la investigación.

Literatura citada

- Aldana GM (2009) Matarratón o Madre de cacao (*gliricidia sepium*) Una alternativa de sombra en un sistema agroforestal para el cultivo de cacao. Programa MIDAS de USAID. 42 pp.
- Baggio AJ (1989). Establecimiento, manejo y utilización del sistema agroforestal cercos vivos de *Gliricidia sepium* (Jacq.) Steud. en Costa Rica. TESIS Magister Scientiae. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, CATIE Programa de Recursos Naturales Renovables Turrialba, Costa Rica, 106 pp.
- Barrientos DL (1989) Antecedentes de la fijación biológica de nitrógeno en leguminosas. V Seminario Nacional de Leguminosas de Grano, Temuco, Julio 1989. 23-37 p.

- Benítez BG, Pulido-Salas Ma. TP, Equihua ZM (2004) Árboles multiusos nativos de Veracruz para reforestación, restauración y plantaciones [Multipurpose trees native to Veracruz, for reforestation, restoration, and plantations]. Instituto de Ecología, A.C. SIGOLFO. CONAFOR. Xalapa, Veracruz, México, 288 pp.
- Casanova F, Ramírez L, Solorio F (2007) Interacciones radiculares en sistemas agroforestales: mecanismos y opciones de manejo. Avances en Investigación Agropecuaria. Universidad de Colima, Colima México. 11(003): 41-52.
- Castillo-Flores JD, López-López MA, Cetina-Alcalá VM, López-Upton J., Hernández-Tejeda, T (2011) Factores de influencia en el enraizamiento de estacas de *Abies religiosa* (H.B.K.) Schl. et Cham. Conference Paper. November 2011.
- Castrillón JC, Carvajal E, Ligarreto G, Magnitskiy S (2008) El efecto de auxinas sobre el enraizamiento de las estacas de agraz (*Vaccinium meridionale* Swartz) en diferentes sustratos. Agronomía Colombiana 26(1): 16-22.
- Clavero T, Razz R (2002) Establecimiento vegetativo de *Gliricidia sepium*. Revista Científica Vol 12, suplemento 2. 587-588.
- Cleland RE (2010) The final action of hormones. Auxina and Cell Elongation. 204-220 p. In: Davies PJ. 2010. Plant Hormones. Biosynthesis, Signal Transduction, Action!. Third Edition. Springer.
- Contreras V, Ochoa A (2003) Estacas cortas y gruesas: Una opción agronómica para la siembra vegetativa de *Gliricidia sepium*. Zootecnia Tropical. 21(4):
- Contreras V, Ochoa A, Moreno A (2003) Evaluación preliminar de las implicaciones agronómicas de la longitud y diámetro de las estacas en la propagación vegetativa de *Gliricidia sepium*. Zootecnia Tropical 21 (2): 167-181.
- Cuervo-Jiménez A, Narváez-Solarte W, Hahn von-Hessberg (2013) Características forrajeras de la especie *Gliricidia sepium* (Jacq.) Stend, Fabaceae. Boletín Científico Centro de Museos. Museo de Historia Natural 17(1), enero-junio, 33-45.
- Di Stéfano JF, Fournier OLA (1996) Desarrollo de raíces en estacas de *Gliricidia sepium* (Fabaceae) recién establecidas, Ciudad Colón de Mora, Costa Rica. Rev. Biol.Trop. 44(1): 81-85.
- Elevitch CR, Francis JK (2006) *Gliricidia sepium* (gliricidia). Species Profiles for Pacific Island Agroforestry. <https://www.Traditional tree. v. 2.1. 1-18 p>.

- Hernández FI, Nápoles GMC, Morales MB (2015) Caracterización de aislados de rizobios provenientes de nódulos de soya (*Glycine max* (L) Merrill) con potencialidades en la promoción del crecimiento vegetal. *Cultivos Tropicales* 36(1):65-72.
- Mesén F (1998) Enraizamiento de estacas juveniles de especies forestales: uso de propagadores de sub-irrigación. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza-CATIE. Programa de Investigación Proyecto de Semillas Forestales – PROSEFOR. Turrialba, Costa Rica. Serie Técnica. Manual Técnico No. 30. 34 p.
- Mesén F, Leakey RRB, Newton AC (1992) Hacia el desarrollo de técnicas de silvicultura clonal para el pequeño finquero. *Investigación El Chasqui*. Número 28: 6-18.
- OFI-CATIE (2014) Árboles de Centroamérica. Descripciones de especies: *Gliricidia sepium*. 549-554 p.
- Parrotta JA. 1992. *Gliricidia sepium* (Jacq.) Walp. Gliricidia, mother of cocoa. SO-ITF-SM-50. New Orleans, LA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station. 236-242 p.
- Statistical Analysis System (SAS) (2015) SAS Institute Inc. Cary, NC, Versión 9.4.
- Vastey J (1962) Estudios sobre propagación de especies forestales por estacas. Tesis de Magister of Agriculture. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA. 78 p.

CAPÍTULO III. Potencial productivo de *Cedrela odorata* L: estimación mediante el modelo 3-PG

Resumen

El modelo 3-PG (Principios Fisiológicos de Predicción del Crecimiento) es aplicable a diversas especies arbóreas. Utiliza características fisiológicas específicas de las especies en conjunto con datos empíricos del rodal y características de la especie para cuantificar la productividad primaria neta (PPN, Mg ha⁻¹). El modelo 3-PG permite predecir el crecimiento de un rodal incluso en áreas donde no ha crecido la especie en cuestión, estimando así la productividad del sitio. La productividad de los sistemas forestales en el trópico mexicano ha tenido serias restricciones por la carencia de medidas silvícolas que promuevan su competitividad. La madera de cedro rojo, es una especie económicamente importante en el trópico mexicano. Poco se conoce acerca de los rendimientos y cómo mejorar su productividad. Para ello, en el presente trabajo se estimó mediante el modelo 3-PG, el crecimiento y el efecto que tiene la nutrición sobre la especie a partir de variables fisiológicas de la especie y similares. La biomasa de follaje y el diámetro promedio a la altura del pecho (DAP), en la condición con fertilización (FR=0.6,) incrementaron cuando se consideró a la fertilización en el rodal (FR=0.6). El año cinco es el que registró el mayor volumen en la condición con fertilización de 66.9 m³ha⁻¹ vs sin fertilización (FR=0.3), el modelo predijo un volumen de 51.9 m³ha⁻¹. Además el volumen del rodal (m³ ha⁻¹), la biomasa de tronco (Mg ha⁻¹) y la altura (cm) también incrementaron con la edad del rodal en el tratamiento con fertilización (FR=0.6). El modelo 3-PG se aplica por vez primera en esta especie y en México, por lo que se requiere continuar con estudios ecofisiológicos de la especie y aspectos de nutrición, para lograr una mejor predicción del crecimiento. El modelo 3-PG ha mostrado ser una herramienta útil en la toma de decisiones de manejo forestal.

Palabras clave: *Cedrela odorata*, plantación forestal, modelo de procesos, nutrición.

Abstract

The model 3-PG (Physiological Principles of Growth Prediction) is applicable to various tree species. It uses species-specific physiological characteristics in conjunction with empirical stand data and species characteristics to quantify net primary productivity (PPN, Mg ha⁻¹). The model 3-PG allows to predict the growth of a stand even in areas where the species in question has not grown, thus estimating the productivity of the site. The productivity of forest systems in the Mexican tropics has been severely constrained by the lack of silvicultural actions to promote their competitiveness. Spanish cedar is an economically important species in the Mexican tropics. Little is known about its yield and how to improve its productivity. This is why the present study aimed to estimate the growth and effect of nutrition on the species through the 3-PG model, based on physiological variables of the species. Foliage biomass and mean diameter at breast height (DBH), in the fertilized condition (FR = 0.6,) increased when fertilization was considered in the stand (FR = 0.6). The year five was the one that registered the highest volume in the condition with fertilization (66.9 m³ha⁻¹) vs no fertilization (FR = 0.3; 51.9 m³ ha⁻¹). In addition, the stem volume (m³ha⁻¹), trunk biomass (Mg ha⁻¹) and height (cm) also increased with the age of the stand in the fertilization treatment (FR = 0.6). The 3-PG model is applied for the first time in this species and in Mexico, so it is necessary to continue with ecophysiological studies of the species and aspects of nutrition, to achieve a better prediction of growth. The 3-PG model has proved to be a useful tool in decision making of forest management.

Key words: *Cedrela odorata*, forest plantation, process model, nutrition.

Introducción

El cedro rojo es una especie multipropósito en sistemas agroforestales (López-Sánchez y Musálem, 2007). Actualmente, tiene la categoría de protección especial (PR) NOM-059-SEMARNAT, 2010, y es una de las especies forestales de mayor importancia económica en México después de *Eucalyptus* spp, catalogada como madera preciosa destinada para aserrío. A nivel comercial en el periodo de 1998 a 2008 *C. odorata* representó aproximadamente 20.7 % (20,750.0 ha) de las plantaciones forestales comerciales (PFC). Los estados de Veracruz y Campeche concentran el 51 % de las plantaciones de cedro rojo (*C. odorta*) del país -(CONAFOR, 2011). Ha sido una de las especies mayormente demandadas en el mercado internacional por sus características estéticas, propiedades tecnológicas y durabilidad (Arnáez, 1988; CONAFOR, 2011). Sin embargo, la

productividad y competitividad de esta especie en el sector forestal ha estado restringida por la magnitud del turno y problemas sanitarios causados por el barrenador *Hypsipyla grandella*, que frena el crecimiento y la calidad de la madera (PRONAFOR, 2014-2018), así como de las prácticas agrícolas y de ganadería extensiva que han desplazado áreas de vegetación forestal de aproximadamente unas 30 mil hectáreas en Veracruz (PVD, 2011-2016). A nivel nacional se han realizado algunos trabajos que evalúan el rendimiento promedio de plantaciones de *C. odorata* (CONAFOR-CP, 2011) no obstante, aún es escasa la información de campo. La zona norte del estado de Veracruz, cuenta con potencial para la explotación forestal por poseer en su composición florística a especies preciosas maderables, pero no se tiene un registro del volumen de producción (PACMA e INAP, 2013), ya que la actividad es incipiente y existen muy pocas unidades de producción, a pesar de que la actividad del procesamiento de la madera (extracción y ebanistería) se ha venido ejecutando por más de 30 años, habiéndosele reconocido a la zona como “lugar donde la madera se hace arte”, con los mejores establecimientos dedicados a la ebanistería a nivel estatal y nacional.

El impulso de la actividad forestal con el establecimiento de plantaciones maderables de cedro rojo significa una opción importante en la activación del sector forestal en la zona; siempre y cuando se refine la tecnología silvícola para el manejo de la especie, incluyendo—el uso de herramientas que permitan realizar un manejo sostenible de la especie. Por este motivo, el presente trabajo tiene como objetivo conocer el potencial productivo de *Cedrela odorata* (L) mediante el modelo de predicción fisiológico 3-PG en el municipio de Tihuatlán, Veracruz.

Simulación de crecimiento con el modelo 3-PG

Descripción del modelo

El modelo 3-PG (Principios Fisiológicos de Predicción del Crecimiento), desarrollado por Landsberg y Waring (1997) se basa en procesos fisiológicos que predicen el crecimiento de árboles de la misma edad a partir de datos parametrizados relativamente homogéneos en un rodal (Sands y Landsberg, 2002). El modelo es aplicable a diversas especies arbóreas. Utiliza características fisiológicas específicas de las especies (Rodríguez y Álvarez, 2010) en conjunto con datos empíricos del rodal y características de la especie para cuantificar la producción primaria neta (PPN, Mg ha⁻¹), la distribución de asimilados a los depósitos de biomasa, la dinámica de la población y el balance del agua en el suelo (González-Benecke *et al.*, 2014). El modelo 3-PG

permite predecir el crecimiento de un rodal incluso en áreas donde no ha crecido la especie en cuestión, estimando así la productividad del sitio (Landsberg *et al.*, 2003). Requiere de parámetros del sitio y descriptores del suelo-entradas del modelo-, así como de datos climáticos mensuales y algunas constantes pre-establecidas (Rodríguez y Álvarez, 2010). Es un modelo que predice el crecimiento de rodales de la misma edad. El modelo 3-PG ha sido utilizado y adaptado para validar diversos procesos como el crecimiento, partición de biomasa, absorción de luz, balance de agua, respuestas a CO₂, distribución del diámetro y mortalidad (Forrester *et al.*, 2015) en especies como *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) (Coops *et al.*, 2010; Swenson *et al.*, 2005); *Eucalyptus globulus* (Sands y Landsberg, 2002; Fontes *et al.*, 2010; Rodríguez-Suárez *et al.*, 2010; Vega-Nieva *et al.*, 2013), así como también para evaluar interacciones y sus efectos en densidad de rodales con especies mixtas (Forrester y Tang, 2016). El modelo requiere como entradas datos climáticos mensuales de radiación solar (MJm⁻²d⁻¹), temperatura promedio del aire (°C), déficit atmosférico de presión de vapor (mbar), precipitación (mm por mes) y días con heladas (días por mes). Otras entradas son los factores de las propiedades físicas del suelo como latitud, fertilidad del suelo (FR), textura del suelo y máxima disponibilidad de agua en el suelo θ_{sx} (mm) (González-Benecke *et al.*, 2014). El modelo 3-PG se puede aplicar para cualquier número de años usando datos mensuales del clima o bien datos históricos promedio.

Las salidas del modelo pueden ser de valores mensuales o anuales, incluyen tallo o fuste (madera de fuste + corteza+ ramas, raíces y follaje (W_S, W_R, W_F t ha⁻¹), disponibilidad de agua en el suelo (θ_S mm) y transpiración del rodal (mm). Las salidas del modelo incluyen el índice de área foliar del dosel (L), volumen promedio del fuste (m³ ha⁻¹), promedio del diámetro del fuste a la altura del pecho (cm), promedio del incremento del fuste volumen (m³ha⁻¹año⁻¹) y número de fustes (árboles por hectárea). El modelo 3-PG está formado por cinco submodelos: la asimilación de carbohidratos, la distribución de biomasa entre raíces, tallos y follaje, la determinación del número de fustes (ha), el balance del agua en el suelo y la conversión de los valores de biomasa en variables de interés comercial (Sands y Landsberg, 2002).

El primer submodelo predice la absorción de luz y calcula la productividad primaria bruta (PPB) basado en el máximo potencial de intercepción de luz α_{Cx} reducido en respuesta a limitaciones de la temperatura, heladas, déficit de la presión de vapor (VPD), humedad y fertilidad del suelo, CO₂ atmosférico y edad del rodal. La productividad primaria neta (PPN) se calcula asumiendo

PPN/PPB = 0.47, la cual es una constante para los árboles. La nutrición se clasifica por un índice (FR), basado en la evaluación de la fertilidad del suelo del sitio. La nutrición afecta la eficiencia cuántica del dosel, así como la distribución de carbohidratos. La radiación fotosintéticamente activa (PAR Φ_{pa}) que incide sobre el dosel, se calcula de la radiación solar, asumiendo que 1 MJ de radiación solar es equivalente a 2.3 mol PAR. La PAR es absorbida por el dosel (Φ_{pa} (mol m⁻²) y se determina del índice de área foliar (L) y Φ_{pa} mediante la Ley de Beer. Este cálculo asume que el follaje se distribuye uniformemente en el rodal. Se calcula la producción primaria bruta (P_G) de la radiación fotosintéticamente activa utilizable ($\Phi_{p.a.u.}$) y el coeficiente de la eficiencia cuántica del dosel. La radiación fotosintéticamente activa utilizable ($\Phi_{p.a.u.}$) se obtiene reduciendo los valores de la radiación fotosintéticamente activa ($\Phi_{p.a.}$) por cantidades determinadas por modificadores (f_i) con valores que varían entre 0 y la unidad (1). El coeficiente de la eficiencia cuántica del dosel está basado en el déficit de la presión atmosférica de vapor (VPD), agua disponible en el suelo (f_{sw}), temperatura promedio del aire (f_T), días helados por mes (f_F), fertilidad del sitio (f_N) y edad del rodal (f_{edad}). La productividad primaria neta (PPN o P_N (Mg ha⁻¹ = (PG-respiración autotrófica). Los indicadores reflejan las restricciones impuestas en la utilización de radiación absorbida por las hojas, debido al cierre estomático, causado por alto déficit en la presión de vapor (D), sequía del suelo, definida por la relación de la cantidad de agua en la zona de la raíz a la máxima cantidad posible agua máxima disponible (θ) mm, o los efectos de temperaturas sub-heladas

La productividad primaria bruta (PPB o P_G carbono fijado por unidad de tiempo mol m⁻² o Mg ha⁻¹) es proporcional a Φ_{pa} con 1 mol de C equivalente a 24 g_{DM}). La productividad primaria neta (PPN o P_N (Mg ha⁻¹ = (PG-respiración autotrófica), es una fracción constante $Y = 0.47$) de PPB o GPP, se calcula de una relación simple de PPN a PPB o GPP. Posteriormente se distribuye a raíces, tallos y follaje. La distribución de carbono a las raíces es basada en el principio del buen establecimiento de la plantación que influencía las condiciones del crecimiento, así la proporción de PPN distribuida a las raíces incrementa si el estatus nutricional y/o relación de agua es pobre (Sands y Lansberg, 2002). El segundo submodelo se refiere a la distribución de la PPN al follaje, tallo y raíces. La distribución a las raíces es influida por la fertilidad del suelo, VPD y humedad del suelo. Esta distribución de la biomasa (PPN) a las raíces se determina por las condiciones de crecimiento, tal como se expresa por el agua disponible en el suelo, déficit de la presión de vapor

y nutrición del sitio; así, la proporción W_R de la distribución de PPN a las raíces incrementa cuando el estatus nutricional o la disponibilidad de agua en el suelo son bajos. La distribución de la biomasa al follaje W_F a los tallos W_S varía con las condiciones de crecimiento, del tamaño de los individuos en el rodal. La distribución a tallo y follaje en el modelo de 3-PG es autorregulado; se basa en la relación de derivadas de las ecuaciones alométricas que describen la biomasa de follaje (W_F) y tallo en términos del diámetro del tronco a la altura del pecho (DAP). La distribución del carbono al follaje va a variar de acuerdo a la edad del rodal (tamaño del árbol) y condiciones de crecimiento (humedad del suelo, VPD, fertilidad del suelo). El modelo calcula mensualmente cambios en biomasa del fuste; para ello se usa una ecuación alométrica inversa (resuelta del promedio de DAP), por lo que la relación entre DAP y W_F determina el área basal del rodal y volumen en cualquier tiempo.

El tercer submodelo referido a la mortalidad de árboles, determina si hay dependencia de densidad-mortalidad, usando la ley del autoaclareo o de los $-3/2$, ajustando el número de árboles por hectárea. Así también, calcula si existe independencia de la densidad-mortalidad. El primer paso es el cálculo del promedio de la biomasa del fuste de árboles individuales (kg árbol^{-1}), si el valor calculado es menor que la biomasa del fuste del árbol en un rodal a una densidad de 1000 árboles por hectárea, la mortalidad es posteriormente calculada usando una función de la mortalidad independiente de la densidad. Si el promedio del tronco de árboles individuales excede la biomasa del tronco del árbol objetivo, entonces el número de árboles se reduce por la ley de los $-3/2$. Cuando los tallos de los árboles se eliminan, se asume que es el 20 % de la biomasa y por tanto, los árboles que mueren son aquéllos más pequeños con baja biomasa y poco o nada de follaje. Después se calcula el área basal (AB, $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$) del diámetro promedio a la altura del pecho (DAP, cm) y se actualiza la densidad de árboles, el volumen del fuste sin corteza ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) se calcula de la actualización de W_S (descontando la fracción de corteza y ramas) y a gravedad específica de la madera, el volumen del fuste con corteza ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) se calcula del volumen del fuste sin corteza y la fracción del volumen de la corteza. Para el siguiente proceso (mes) se utiliza la actualización de los valores de biomasa de los árboles por hectárea W_S , W_F y W_R , repitiéndose el ciclo y ajustando las funciones de edad-dependencia. El cuarto submodelo calcula el balance del agua en el suelo. El modelo calcula la conductancia del dosel a vapor de agua, usando la conductancia máxima específica del dosel de la especie g_c (m s^{-1}), el índice de área foliar IAF ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) y en seguida ajustando el valor sobre VPD y humedad del suelo, calculando posteriormente la transpiración del

rodal (mm mes^{-1}) con el modelo Penman-Monteith y la evaporación del dosel se calcula usando IAF, la interceptación del dosel y la cantidad de lluvia. La evapotranspiración del rodal es calculada como la transpiración del dosel + evaporación del dosel. Los cambios del agua disponible del suelo se calculan posteriormente y se consideran como la diferencia entre precipitación y pérdidas por evapotranspiración. Cuando la evapotranspiración es mayor que el agua disponible en el suelo la PPN se reduce (González-Benecke *et al.*, 2014; Landsberg *et al.* 2001; Forrester 2015; Sands y Landsberg 2002; Landsberg y Waring, 1997).

Materiales y métodos

Parametrización del modelo para Cedrela odorata L

La versión utilizada para modelar el volumen (m^3) de madera de cedro rojo a 20 años en este trabajo fue 3PGpjs.2.7 (Sands, 2010).

En la Tabla 1 se reportan en forma resumida los parámetros que se utilizaron, algunos de ellos fueron considerados por referencia de *Eucalyptus* sp, de trabajos de fisiología de *C. odorata* (Araque *et al.*, 2009; Álvarez *et al.*, 2012), así como valores predeterminados del modelo. Los datos de inicialización del rodal y datos del sitio se obtuvieron de la plantación de *C. odorata* establecida en arreglo de factorial de 3x3 m desde octubre de 2014 en la localidad de Miahuapan, Tlaxiahuatlán Veracruz. Este sitio se encuentra en la Llanura Costera del Golfo de México a una altitud de 110 msnm y la vegetación original fue selva mediana subperennifolia (Miranda y Hernández X., 1964; Pennington y Sarukhán, 1998). El suelo es franco arcilloso, el clima se clasifica como $\text{Aw}'_1(\text{e})$: cálido subhúmedo con lluvias en verano (junio-octubre) y temporada seca de cuatro a seis meses (enero-mayo), con una temperatura media anual de 25 °C y precipitación media anual de 1,156 mm. Los factores del sitio que se consideraron fueron: datos iniciales de biomasa de follaje, raíz y tronco (W_F , W_R y W_s) respectivamente, se obtuvieron de literatura para la edad de dos años de cedro (Haggar y Ewel, 1995), la densidad fue de 1111 árboles ha^{-1} (CONAFOR-CP, 2011); la máxima y mínima agua disponible en el suelo (ASW) se consideró con niveles de 150 y 40, respectivamente, valores predeterminados del modelo y la fertilidad del suelo FR con valores de 0.3 y 0.6 para el tratamiento sin fertilización y con fertilización, respectivamente.

Calibración del modelo

La calibración del modelo consistió en el ajuste individual de los parámetros de manera iterativa de valores alométricos del follaje con datos climáticos del sitio y datos de la capacidad de retención del agua en el suelo (ASW) a 20 años.

Validación del modelo

Para la validación del modelo se aplicó una prueba de t-Student ($p < 0.05$) al tratamiento sin fertilización (FR=0.3), de manera gráfica en una relación 1:1, en dicha relación se contrastaron los volúmenes observados (m^3ha^{-1}), que se tomaron como referencia (CONAFOR-CP, 2011) vs volúmenes (m^3ha^{-1}) obtenidos del modelo 3-PG.

Tabla 1 Descripción de parámetros 3-PG, símbolos 3PGpjs y valores

Descripción del parámetro	Símbolo	Unidad	Valor para <i>C. odorata</i>	Valor predeterminado, ajustado, consultado
Partición y movimiento de biomasa				
<i>Relaciones alométricas y partición</i>				
Follaje: proporción de la partición del tronco en D=2 cm	p_{FS2}	-	0.096	Ajustado <i>Eucalyptus</i> sp
Follaje: proporción de la partición del tronco en D=20 cm	p_{FS20}	-	0.034	Ajustado <i>Eucalyptus</i> sp
Constante de la masa del tronco y relación con el diámetro	a_S	-	0.065	Ajustado <i>Eucalyptus</i> sp
Potencial de la masa del tronco y relación con el diámetro	n_S	-	2.68	Ajustado <i>Eucalyptus</i> sp
Máxima fracción de PPN a raíces	n_{Rx}	-	0.8	Ajustado <i>Eucalyptus</i> sp
Mínima fracción de PPN a raíces	n_{Rn}	-	0.25	Ajustado <i>Eucalyptus</i> sp
<i>Hojarasca y rotación radicular</i>				
Máxima tasa de producción de hojarasca	γ_{Fx}	Mes	0.03	Ajustado <i>Eucalyptus</i> sp
Tasa de producción de hojarasca en t=0	γ_{F0}	Mes	0.001	Ajustado <i>Eucalyptus</i> sp
Edad en la cual la tasa de producción de hojarasca tiene valor medio	$t_{\gamma F}$	Mes	4	Ajustado <i>Eucalyptus</i> sp
Tasa promedio mensual de la rotación radicular	γ_R	Mes	0.015	Ajustado <i>Eucalyptus</i> sp
PNN y modificadores de la conductancia				
<i>Modificador de la temperatura f_T</i>				
Temperatura mínima para crecer	T_{min}	°C	20	CONABIO,2016; OFI-CATIE, 2016.
Temperatura óptima para crecer	T_{opt}	°C	24	CONABIO,2016; OFI-CATIE, 2016.
Temperatura máxima para crecer	T_{max}	°C	35	CONABIO,2016; OFI-CATIE, 2016.
<i>Modificador de helada f_{Frost}</i>				
Producción por pérdida por días de helada	k_F	Días	0	CONABIO,2016; OFI-CATIE, 2016.
<i>Modificadores de agua en el suelo f_{SW}</i>				
Déficit de la tasa de humedad para $f_\theta = 0.5$	S_{Wconst}	-	0.7	Ajustado <i>Eucalyptus</i> sp
Potencial del déficit de la tasa de humedad	S_{Wpower}	-	9	Ajustado <i>Eucalyptus</i> sp
Modificador de CO₂ atmosférico f_{CO_2}				
Factor de asimilación mejorado en 700 ppm	f_{Ca700}	-	1.4	Predeterminado
Factor de mejoramiento de la conductancia del dosel a 700 ppm	f_{Cg700}	-	0.7	Predeterminado
Efectos de la fertilidad				
Valor de ‘m’ cuando FR=0	m_0	-	0	Ajustado <i>Eucalyptus</i> sp

Tabla 1. Descripción de parámetros 3-PG, símbolos 3PGpis y valores (continuación)

Descripción del parámetro	Símbolo	Unidad	Valor para <i>C. odorata</i>	Valor predeterminado, ajustado, consultado
Valor de 'm' cuando FR=0	m_0	-	0	Ajustado <i>Eucalyptus</i> sp
Valor de 'fNutr' cuando FR=0	f_{N0}	-	1	Ajustado <i>Eucalyptus</i> sp
Potencial de (1-FR) en 'fNutr'	f_{Nn}	-	0	Ajustado <i>Eucalyptus</i> sp
Modificador de la edad $f(edad)$				Ajustado <i>Eucalyptus</i> sp
Máxima edad usada del rodal como edad modificada	t_x	Años	50	Predeterminado
Potencial de edad relativa en función de f_{edad}	n_{edad}	-	4	Predeterminado
Edad relativa dada $f_{edad}=0.5$	r_{edad}	-	0.95	Ajustado <i>Eucalyptus</i> sp
Mortalidad de árboles y auto-aclareo				
Tasa de mortalidad para (mayores t)	γ_{Nx}	Años	0	Ajustado <i>Eucalyptus</i> sp
Tasa de mortalidad de plántulas (t=0)	γ_{N0}	Años	0	Ajustado <i>Eucalyptus</i> sp
Edad en la que la tasa de mortalidad tiene un valor medio	$t_{\gamma n}$	Años	0	Ajustado <i>Eucalyptus</i> sp
Forma de respuesta de la mortalidad	$n_{\gamma N}$	-	1	Ajustado <i>Eucalyptus</i> sp
Máxima masa del tronco por árbol en 1000/ha	W_{Sx1000}	Kg/árbol	300	Ajustado <i>Eucalyptus</i> sp
Potencial en el principio de auto-raleo	n_N	-	1.5	Ajustado <i>Eucalyptus</i> sp
Fracción media de biomasa de follaje perdida por muerte individual de árbol.	m_F	-	1	Ajustado <i>Eucalyptus</i> sp
Fracción media de biomasa de raíz perdida por muerte individual del árbol.	m_R	-	0.2	Ajustado <i>Eucalyptus</i> sp
Fracción media de biomasa de tronco perdida por muerte individual del árbol.	m_S	-	0.2	Ajustado <i>Eucalyptus</i> sp

Tabla 1. Descripción de parámetros 3-PG, símbolos 3PGpjs y valores (continuación)

Descripción del parámetro	Símbolo	Unidad	Valor para <i>C. odorata</i>	Valor por default, ajustado, consultado
Producción y respiración				
Eficiencia cuántica del dosel	α_{Cx}	molC/molPAR	0.055	Ajustado <i>Eucalyptus</i> sp
Relación PPN/PPB	Y	-	0.47	Predeterminado
Conductancia				
Conductancia mínima del dosel	g_{Cn}	m/s	0	Predeterminado
Conductancia máxima del dosel	g_{Cx}	m/s	0.02	Predeterminado
Índice de área foliar (IAF) para la conductancia máxima del dosel	L_{Cx}	-	3.33	Predeterminado
Define la respuesta estomática a déficit de la presión atmosférica de vapor de presión (VPD)	k_D	mBar	0.05	Predeterminado
Capa límite de la conductancia del dosel	g_B	m/s	0.02	Predeterminado
Madera y propiedades del rodal				
<i>Ramas y fracción de corteza</i>				
Rama y fracción de corteza en la edad 0	p_{BB0}	-	0.75	Ajustado <i>Eucalyptus</i> sp
Rama y fracción de corteza para rodales maduros	p_{BB1}	-	0.15	Ajustado <i>Eucalyptus</i> sp
Edad de ramas y fracción de corteza=1/2 ($p_{BB0}+p_{BB1}$)	t_{BB}	Años	2	Ajustado <i>Eucalyptus</i> sp
<i>Densidad básica</i>				
Densidad mínima básica –para árboles jóvenes-	ρ_0	t/m ³	0.33	OFI-CATIE, 2016
Densidad máxima básica –para árboles viejos-	ρ_1	t/m ³	0.6	OFI-CATIE, 2016
Edad en la cual $\rho=1/2$ = densidad de árboles viejos y jóvenes	t_ρ	Años	4	Predeterminado

Tabla 1. Descripción de parámetros 3-PG, símbolos 3PGpjs y valores (continuación)

Descripción del parámetro	Símbolo	Unidad	Valor para <i>C. odorata</i>	Valor por default, ajustado, consultado
Relación alométrica de la altura del tronco				
Constante relacionada a la altura del tronco	a_H	-	0	Default
Eficiencia del DAP en relación a la altura del tronco	n_{HB}	-	0	Default
Eficiencia de la media relacionada a la altura del tronco	n_{HN}	-	0	Default
Relación alométrica del volumen del tronco				
Constante relacionada al volumen del tronco	a_V	-	0	Default
Eficiencia del DAP en relación del volumen del tronco	n_{VB}	-	0	Default
Eficiencia de la media en relación del volumen del tronco	n_{VN}	-	0	Default
Factores de conversión				
Intercepto de la radiación neta vs relación de la radiación solar	Q_a	Wm ²	-90	Default
Inclinación de la radiación neta vs relación de la radiación solar	Q_b	-	0.8	Default
Peso molecular de la materia seca		gmol ⁻¹	24	Default
Conversión de la radiación solar a PAR		molMJ ⁻¹	2.3	Default

Resultados y discusión

En las Tablas 2 y 3 se muestran las salidas del modelo 3PG para los escenarios sin fertilización $FR=0.3$ y con fertilización $FR=0.6$, respectivamente, así como la comparación del volumen $m^3 ha^{-1}$ de acuerdo a datos obtenidos por CONAFOR-CP (2011) para la validación de volumen en el rodal $m^3 ha^{-1}$, mostrando diferencias mayores en la calibración del modelo 3-PG (Figura 10).

Tabla 2 Desarrollo del rodal bajo un escenario sin fertilización (FR=0.3) en la localidad de Miahuapan

Edad del rodal (años)	Número de árboles·ha ⁻¹	Materia seca de follaje (Mg ha ⁻¹)	Materia seca de raíz (Mg ha ⁻¹)	Biomasa de árboles Mg ha ⁻¹	Volumen del rodal estimado (m ³ ha ⁻¹) excluyendo ramas y corteza	Índice de área foliar IAF (m ² m ⁻²)	Incremento de volumen promedio anual (m ³ ha ⁻¹ año ⁻¹)	Promedio Dap (cm)	Altura (m)	*Datos observados de volumen (m ³ ha ⁻¹).	Diferencias en volumen (m ³ ha ⁻¹)
2	1111	1.82	5.59	7.11	9.57	2.18	4.78	5.54		6.4	3.17
3	1111	1.76	15.65	16.72	24.27	1.94	8.09	7.63	6.87		
4	1111	1.64	23.32	25.75	38.77	1.76	9.69	8.96	8.33		
5	1111	1.50	28.73	33.93	51.88	1.51	10.37	9.93	9.43	31.2	20.68
6	1111	1.34	32.08	41.09	63.12	1.26	10.52	10.67	10.27		
7	1111	1.18	33.65	47.18	72.35	1.01	10.33	11.23	10.93	49	23.35
8	1111	1.02	33.76	52.20	79.66	0.79	9.96	11.66	11.44		
9	1111	0.87	32.73	56.24	85.26	0.62	9.47	11.99	11.82		
10	1111	0.72	30.90	59.42	89.45	0.47	8.94	12.24	12.12	71.3	18.15
11	1111	0.60	28.58	61.90	92.51	0.36	8.41	12.43	12.34		
12	1111	0.49	26.00	63.81	94.73	0.27	7.89	12.57	12.51	82.6	12.13
13	1111	0.39	23.35	65.27	96.31	0.20	7.41	12.68	12.64		
14	1111	0.31	20.76	66.40	97.43	0.16	6.96	12.76	12.74		
15	1111	0.25	18.31	67.28	98.23	0.12	6.55	12.82	12.81	94.7	3.53
16	1111	0.20	16.04	67.96	98.79	0.09	6.17	12.87	12.87		
17	1111	0.16	13.99	68.49	99.18	0.07	5.83	12.91	12.92	100.3	-1.11
18	1111	0.12	12.14	68.90	99.45	0.06	5.52	12.94	12.95		
19	1111	0.10	10.49	69.22	99.64	0.04	5.24	12.96	12.98		
20	1111	0.07	9.04	69.47	99.76	0.03	4.99	12.98	12.99	106.1	-6.33

Tabla 3 Desarrollo del rodal bajo un escenario con fertilización (FR=0.6) en la localidad de Miahuapan

Edad del rodal (años)	Número de árboles ha ⁻¹	Materia seca de follaje (Mg/ha ⁻¹)	Materia seca de raíz (Mg/ha ⁻¹)	Biomasa de árboles Stem Mg/ha ⁻¹	Volumen del rodal estimado (m ³ ha ⁻¹) excluyendo ramas y corteza	Índice de área foliar IAF (m ² m ⁻²)	Incremento de volumen promedio anual (m ³ ha ⁻¹ año ⁻¹)	Promedio Dap (cm)	Altura (m)	Diferencias en volumen (m ³ ha ⁻¹)
2	1111	1.82	5.59	7.11	9.57	2.18	4.78	5.54		3.17
3	1111	1.91	13.06	19.72	28.63	2.00	9.54	7.96	7.40	
4	1111	1.88	19.09	32.11	48.34	1.94	12.08	9.49	9.20	
5	1111	1.80	23.62	43.76	66.92	1.76	13.38	10.61	10.57	12.6
6	1111	1.68	26.70	54.36	83.50	1.53	13.92	11.47	11.65	
7	1111	1.53	28.48	63.72	97.71	1.28	13.96	12.14	12.50	14.71
8	1111	1.37	29.00	71.74	109.47	1.05	13.68	12.67	13.18	
9	1111	1.20	28.62	78.45	118.93	0.84	13.21	13.07	13.72	
10	1111	1.04	27.49	83.94	126.35	0.66	12.63	13.39	14.15	12.64
11	1111	0.88	25.85	88.37	132.07	0.51	12.00	13.63	14.48	
12	1111	0.74	23.89	91.90	136.43	0.40	11.37	13.82	14.73	9.3
13	1111	0.61	21.78	94.71	139.74	0.31	10.75	13.96	14.93	
14	1111	0.50	19.64	96.94	142.24	0.24	10.16	14.07	15.09	
15	1111	0.36	17.56	98.72	144.13	0.19	9.61	14.16	15.21	4.02
16	1111	0.29	15.59	100.14	145.57	0.15	9.09	14.23	15.31	
17	1111	0.23	13.76	101.28	146.67	0.12	8.63	14.28	15.39	0.98
18	1111	0.19	12.09	102.19	1147.51	0.09	8.19	14.326	15.45	
19	1111	0.15	10.58	102.93	1148.14	0.08	7.80	14.360	15.50	
20	1111	0.12	9.22	103.51	148.63	0.06	7.43	14.39	15.54	-2.58

La Figura 1 muestra que el modelo 3-PG predice cambios ligeros en la biomasa foliar de *Cedrela odorata* por efecto de la fertilización. A los dos años tuvieron una biomasa inicial de 1.8 Mg ha⁻¹ y a los 20 años alcanzaron una biomasa de 0.08 y 0.15 Mg ha⁻¹ (Fig. 1a y b).

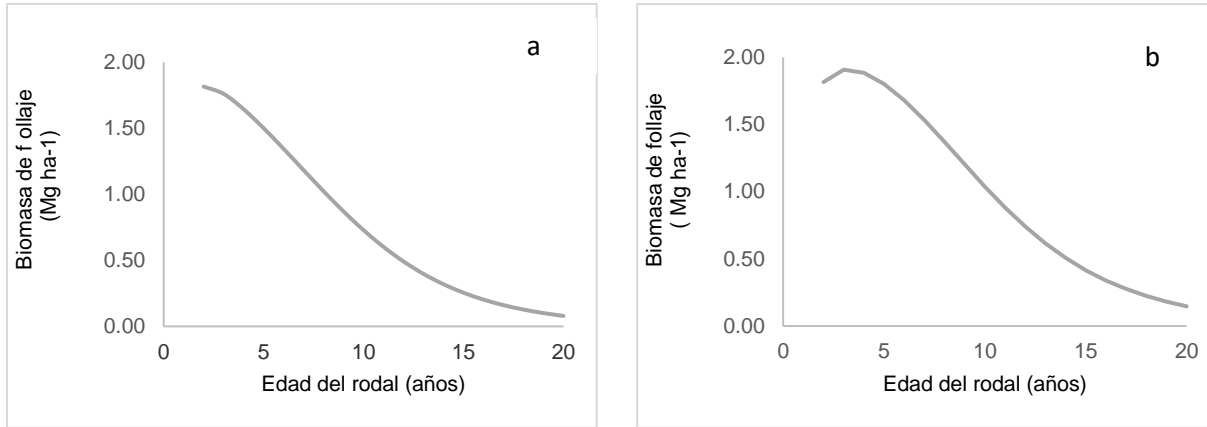


Fig 1a y b Biomasa de follaje en los tratamientos sin fertilización FR=0.3 (a) y con fertilización FR=0.6 (b)

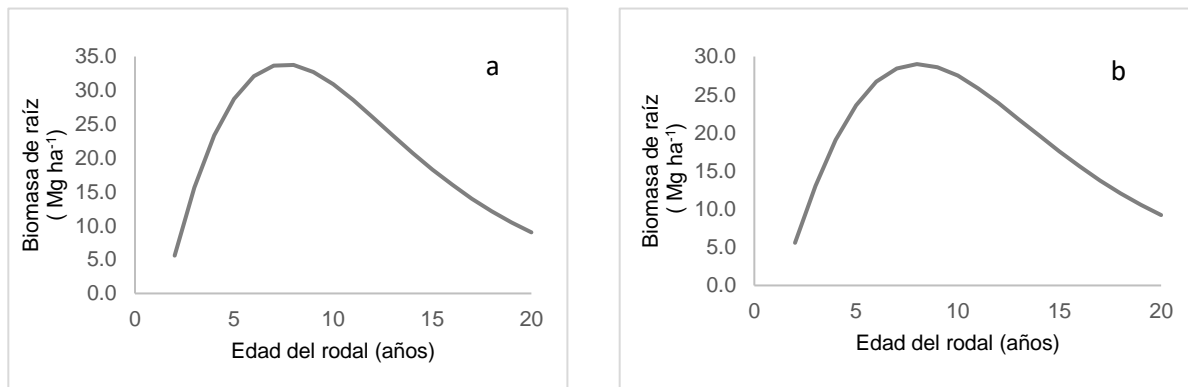


Fig 2a y b Biomasa de raíz Mg ha⁻¹ en los tratamientos sin fertilización FR=0.3 (a) y con fertilización FR=0.6 (b)

Efectos similares de la fertilización se identifican en cuanto al crecimiento de raíces (Figura 2).

En las Fig. 2a y b la biomasa de raíz en la condición (FR=0.3) sin fertilización y con fertilización (FR=0.6) a los dos años presentaron una biomasa de raíz de 5.6 Mg ha⁻¹, y a los 8 años la condición sin fertilización tuvo un ligero aumento de 33.7 Mg ha⁻¹, dicho incremento se mantuvo sólo hasta antes de los 20 años en que la condición con fertilización (FR=0.6) incrementó tan sólo 0.05 Mg ha⁻¹ (9.2 Mg ha⁻¹).

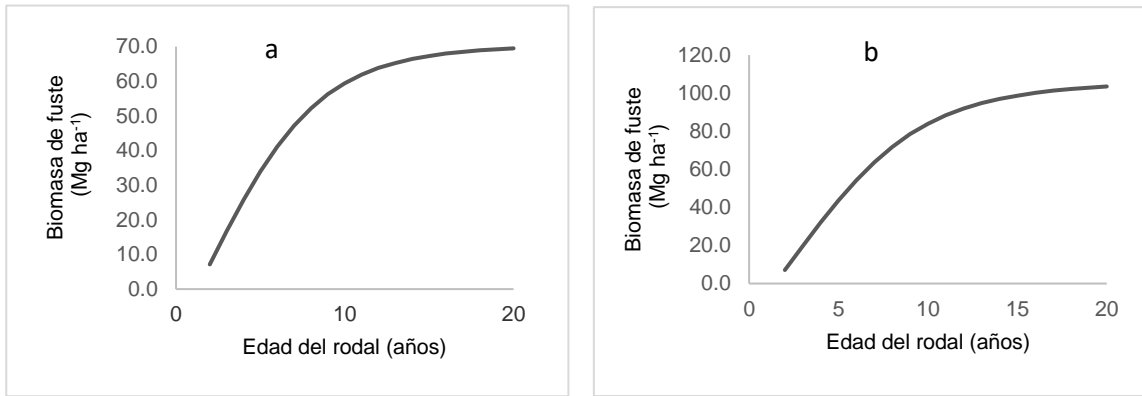


Fig 3a y b Biomasa de fuste Mg ha^{-1} en tratamiento sin fertilización $\text{FR}=0.3$ (a) y con fertilización $\text{FR}=0.6$ (b)

A diferencia de los efectos de la fertilización sobre la biomasa foliar y de raíces, la biomasa de fuste sí fue afectada de manera conspicua por la fertilización. Sin fertilización, la biomasa de fuste alcanzó casi 70 ton ha^{-1} (Figura 3a), mientras que en condiciones de mayor fertilidad del suelo, la biomasa de fuste superó a $103.5 \text{ ton ha}^{-1}$ (Figura 3 b). Las diferencias entre condiciones de baja ($\text{FR}=0.3$) y alta fertilidad ($\text{FR}=0.6$), también se manifiestan en la productividad en términos de volumen de fustes (Figura 4).

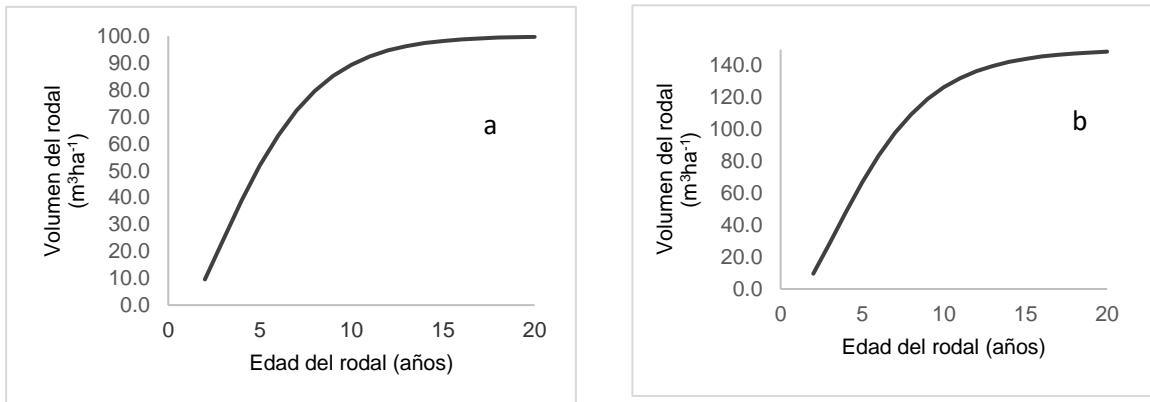


Fig 4a y b Volumen del rodal $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ en tratamiento sin fertilización $\text{FR}=0.3$ (a) y con fertilización $\text{FR}=0.6$ (b)

En la Fig. 4a y b se observan diferencias notables en cuanto al volumen del rodal en los primeros años existe una tendencia de incremento en la condición con fertilización (FR=0.6). A los tres años presentó un incremento de $28.6 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$, vs $24.2 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ (FR=0.3), una diferencia de $4 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$. El máximo volumen se presentó a los 10 años en ambos tratamientos FR=0.3, $89.4 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ y FR=0.6, $126.3 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$, tendencia que a los 20 años se alcanzó $148.6 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ en el tratamiento con fertilización. Una diferencia de $48.8 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ entre ambas condiciones.

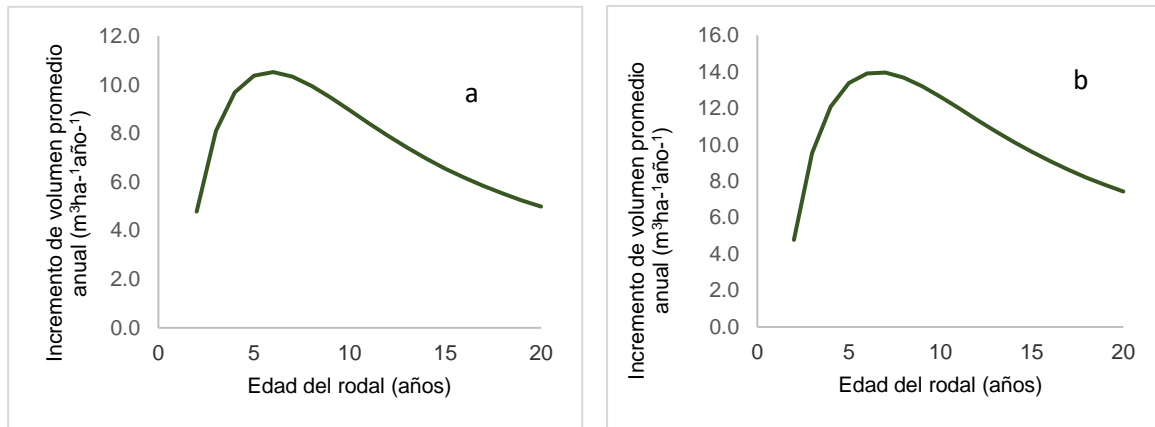


Fig 5a y b Incremento de volumen promedio anual ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$) en tratamiento sin fertilización FR=0.3 (a) y con fertilización FR=0.6 (b)

El incremento de volumen promedio anual alcanzó su máximo a los 6 años en ambos tratamientos FR=0.3 ($10.5 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$) y FR=0.6 ($13.9 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$), obteniendo una diferencia a los 20 años de $2.4 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ entre ambos tratamientos (FR=0.3, $4.9 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$; FR=0.6, $7.4 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$).

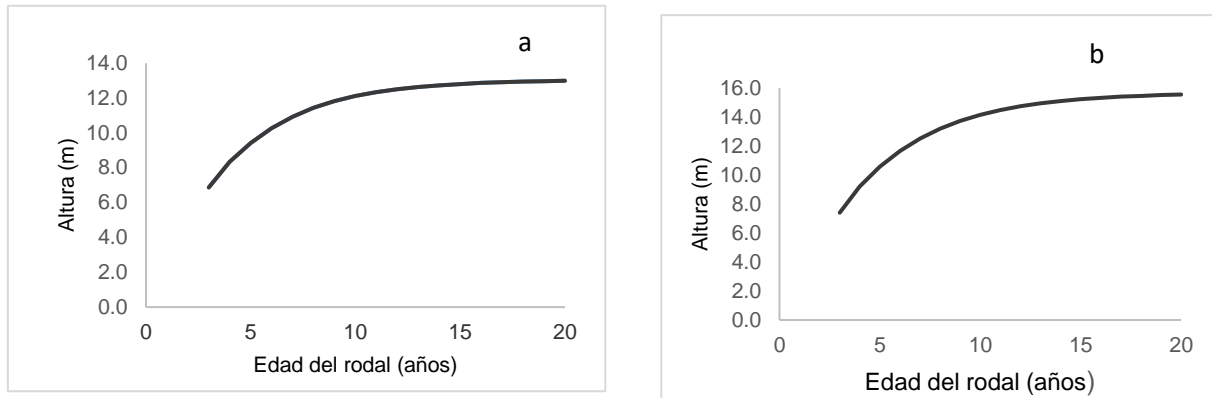


Fig 6a y b Altura (cm) en tratamiento sin fertilización FR=0.3 (a) y con fertilización FR=0.6 (b)

En ambas Fig. 6a y Fig. b es a los 10 años cuando se presenta la mayor altura (12.1 m) FR=0.3 y 14.1 cm (FR=0.6). Hasta alcanzar a los 20 años en el tratamiento con fertilización 15.5 m. Una diferencia de 2.5 m entre ambas condiciones.

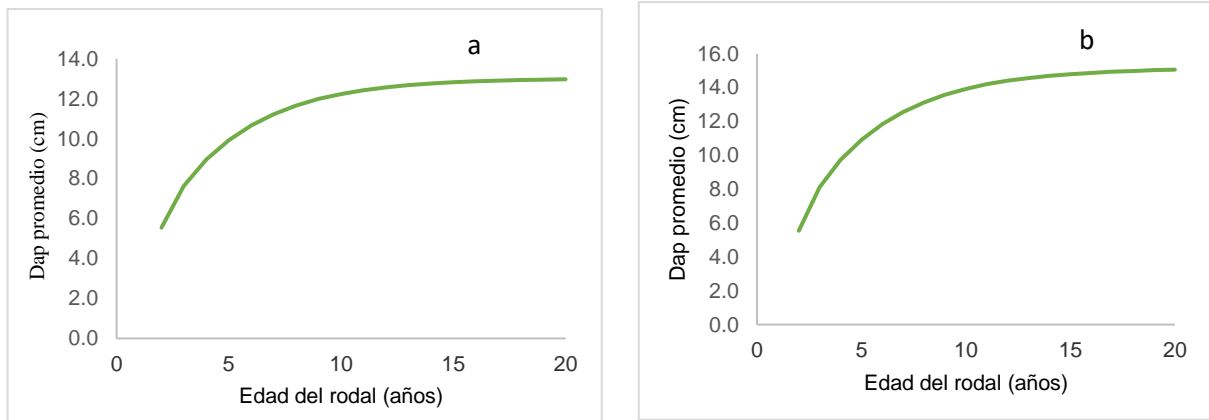


Fig 7a y b Diámetro a la altura del pecho (DAP) cm en tratamiento sin fertilización FR=0.3 (a) y con fertilización FR=0.6 (b)

En el tratamiento sin fertilización (FR=0.3) se alcanzó un DAP a los 20 años de 13.0 cm, mientras que el tratamiento con fertilización FR=0.6, obtuvo a los 20 años 15.0 cm, una diferencia de 2 cm con respecto al tratamiento sin fertilización.

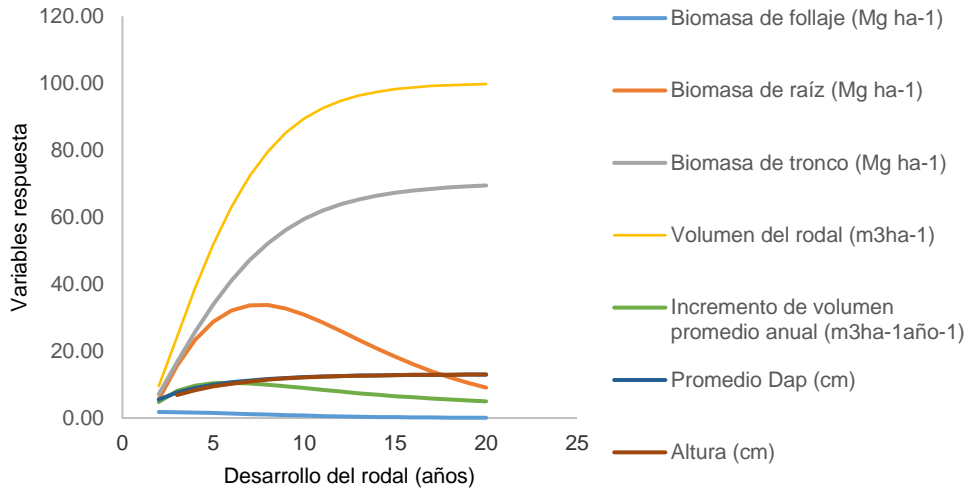


Fig 8a Variables respuesta del desarrollo del rodal en el tratamiento sin fertilización (FR=0.3)

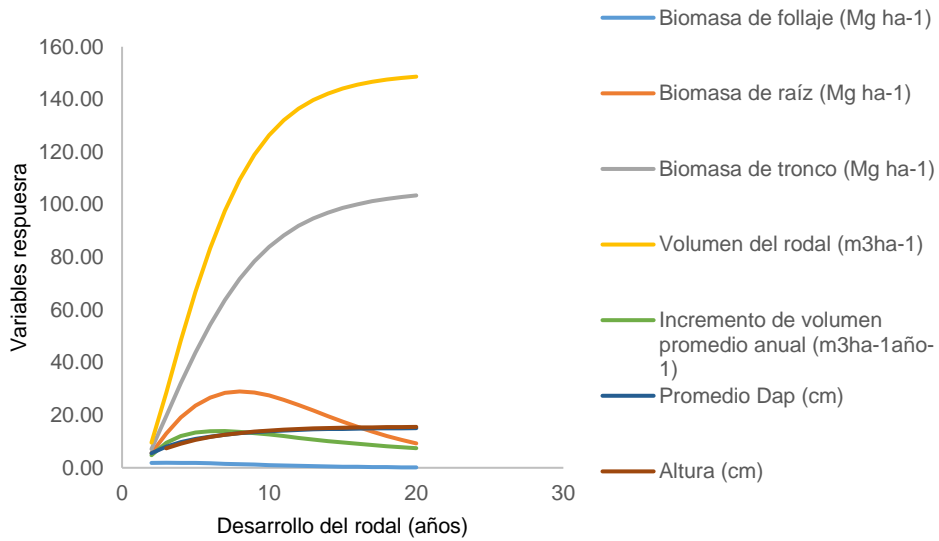


Fig b Variables respuesta del desarrollo del rodal en tratamiento con fertilización FR=0.6

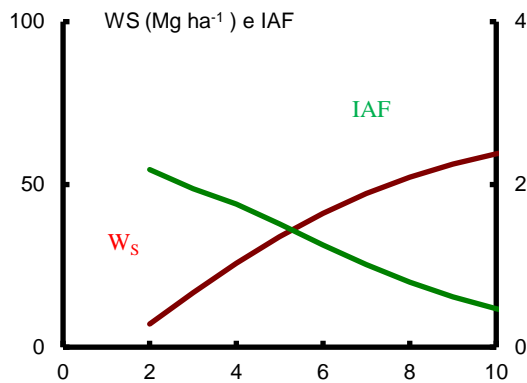


Fig 9a Relación de biomasa del fuste (W_s) e IAF (índice de área foliar) en el tratamiento sin fertilización (FR= 0.3)

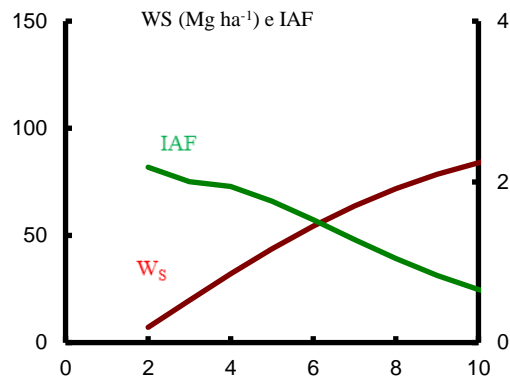


Fig b Relación de biomasa del fuste (W_s) e IAF (índice de área foliar) en el tratamiento con fertilización (FR= 0.6)

En la Fig. 9a se observa cómo el incremento de la biomasa en el árbol ($Mg\ ha^{-1}$) en la parcela, alcanza su máximo a los 10 años ($59.4\ Mg\ ha^{-1}$) (línea roja) (Tabla 2), en contraste con IAF (índice de área foliar) que disminuye conforme aumenta la biomasa del tronco (línea verde). Por el contrario, en un escenario de fertilización (FR=0.6) el modelo indica una mayor biomasa que supera en más del 20 % el valor del tratamiento sin fertilización a los 10 años ($83.9\ Mg\ ha^{-1}$) (Fig. 9b).

Para la validación del modelo la Fig. 10 muestra la relación entre los valores de volumen de datos observados (m^3ha^{-1}) y los obtenidos mediante el modelo para el tratamiento sin fertilización FR=0.3, no son estadísticamente significativos ($P>0.67$), ajustado el modelo a una relación 1:1, por lo que el modelo predice el incremento en volumen del rodal (Tabla 2). Los valores observados (CONAFOR-CP, 2011) se ajustan a la recta del modelo.

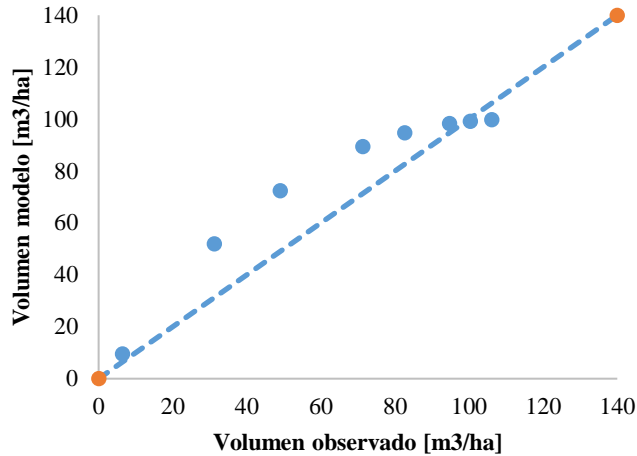


Fig 10 Relación entre el volumen modelado y el observado de *C. odorata* sin fertilización (FR=0.3)

Existe una notoria diferencia entre los tratamientos, de acuerdo a la Figura 8a el tratamiento sin fertilización (FR=0.3) presentó un incremento en el volumen del rodal a los 20 años de tan sólo $99.8 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$; mientras que el tratamiento con fertilización (FR=0.6) incrementó a $148.6 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ (Figura 8 b). Enseguida lo fue para la biomasa del tronco, la cual partió con 7.1 Mg ha^{-1} para ambos tratamientos hasta llegar a 69.5 Mg ha^{-1} en el tratamiento sin fertilización (FR=0.3) y 103.5 cm para el tratamiento con fertilización (FR=0.6).

Hay una relación inversa entre el incremento de la biomasa del tronco y la partición a las raíces (Beets y Whitehead, 1996) (Figuras 9a y 9b), es decir, mientras que la biomasa de tronco incrementó con la fertilización (103.5 Mg ha^{-1}), la biomasa en raíz disminuyó a 9.2 Mg ha^{-1} (Fig. 2b y 9b). La simulación con fertilización del rodal disminuyó a partir del año 10 la biomasa de raíz (Tabla 3). La misma situación se presentó en la condición sin fertilización (FR=0.3) a los diez años (32.7 Mg ha^{-1}) la biomasa radicular disminuyó drásticamente a 9.0 Mg ha^{-1} en el año veinte (Tabla 2, Fig. 2a y 9a).

El diámetro promedio a la altura del pecho (DAP), en la condición con fertilización FR=0.6, presentó mayores incrementos que los reportados por Ramírez-García *et al.* (2008), el cual en los primeros tres años de la plantación de cedro rojo tuvo un diámetro promedio de 2.3, 3.3 y 5.2 cm

respectivamente. La predicción del modelo 3-PG tuvo mayores incrementos de 5.5 cm en el segundo año y de 8.1 cm en el tercer año (Fig. 7b y 8 b).

Respecto a la biomasa aérea, ésta incrementó ligeramente con la presencia de fertilización (Fig. 1b y 8 b). Una de las características claves del modelo 3-PG es que la biomasa del follaje disminuye conforme el DAP (cm) aumenta (Lansberg *et al.*, 2005). Lo anterior se observó en el año diez tanto en el tratamiento sin fertilización (FR=0.3), como con el tratamiento con fertilización (FR=0.6) (Figuras 8 a y 8 b, respectivamente).

Son el volumen del rodal (m^3ha^{-1}), la biomasa de fuste (Mg ha^{-1}) y la altura (cm) las principales variables que incrementaron con la edad del rodal en el tratamiento con fertilización (FR=0.6) (Fig. 9 b).

La altura de acuerdo al modelo de procesos 3-PG resulta en la condición con fertilización FR=0.6 a los veinte años, un aumento de más de 10 m de altura promedio (15.5 m), con respecto a lo reportado por Villaseñor-López (2012) donde obtuvo al año cinco de plantada una altura de 5.4 m vs 10.6 m (modelo). Así como por lo obtenido por Ramírez-García *et al.* (2008) con alturas comparativamente menores que el modelo (3.1 m vs 7.4 m a los tres años y 4.4 m vs 9.2 m al cuarto año).

De acuerdo a lo obtenido por la predicción del modelo 3-PG, es el año cinco de la plantación en que se observaron mayores diferencias en el volumen del rodal, siendo que para la condición sin fertilización (FR=0.3) el modelo predijo un volumen de $51.9 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ vs los datos con los que se calibraron de CONAFOR-CP (2011) fueron de $31.2 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$, una diferencia entre ambos volúmenes de $20.7 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ (Tabla 2). Para la condición con el índice de fertilización (FR=0.6) el volumen del rodal fue de $66.9 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ (Tabla 3). Existieron diferencias entre el volumen predicho por el modelo vs datos observados (CONAFOR-CP, 2011), principalmente al compararlos con el tratamiento con fertilización (FR=0.6), sin embargo, sólo se pudieron comparar y calibrar con poca información de volúmenes compilados por CONAFOR-CP (2011), referidos a sólo ocho años, en los cuales se mostraron diferencias en sus incrementos cuando se predijo el modelo con FR=0.6. Lo anterior nos da la pauta que la nutrición del sitio de plantación es un indicador importante para elevar el volumen de madera de *C. odorata*. En la condición sin fertilización (FR=0.3), el volumen del rodal (m^3ha^{-1}) en el año dos fue de $9.6 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$, mientras que para los datos disponibles de CONAFOR-CP (2011) el volumen fue de $6.4 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$, una diferencia entre ambos de $3.2 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ (Tabla 2).

Hay una relación directa entre el IAF, la biomasa aérea (follaje, fuste) y el volumen del rodal, tal como lo observamos en la Fig. 9 a y 9 b. Antes de los diez años *C. odorata* se presentó el mayor incremento en el tratamiento con fertilización (FR=0.6), Tabla 3. El modelo calcula el IAF en relación a la biomasa de hojas, lo que indicaría un rápido incremento hasta los 10 años y luego una ligera reducción.

La radiación utilizable por el dosel en los primeros años (diez) permitió un rápido incremento de la biomasa distribuida a diversos compartimentos del árbol (Landsberg y Waring, 1997) y posteriormente un descenso. La biomasa es proporcional a la cantidad de radiación absorbida fotosintéticamente activa (McMurtrie, 1991). Sin embargo, después de ese período el IAF disminuyó aunque mayor en la condición sin fertilización (FR=0.3, Tabla 2, Fig. 9a) puesto que podría haber una mayor competencia de copas que no permiten la mayor entrada de luz, así también la longevidad foliar corta de cedro rojo al mantener la mayor eficacia del uso de nutrimentos en las hojas individuales durante los primeros años (Hiremath, 2000), disminuyendo posteriormente la producción de follaje (carbono) a los veinte años (0.08 Mg ha^{-1}). Por otro lado, cuando existe un estrés hídrico y es muy severo los árboles sacrifican su IAF como una forma de disminuir la tasa de transpiración (Rodríguez y Álvarez, 2010).

El modelo 3-PG es una herramienta que predice las variables silvícolas del rodal. Es la primera vez que se intenta estimar el potencial productivo de *C. odorata* en México mediante modelos de procesos, sin embargo, la información con la que se cuenta de la especie es muy limitada y se requiere mayor atención para continuar con investigación en aspectos ecofisiológicos, índice de área foliar (IAF), nutrición y mayores registros del rendimiento (volumen) de la especie para continuar modelando y obtener mejor y mayor información que sea calibrada posteriormente en sitios de plantación.

Conclusión

El modelo de procesos 3-PG resultó una herramienta útil para predecir la productividad de *Cedrela odorata* L. El uso de este modelo de procesos permite sentar las bases para posteriores estudios en especies tropicales, además de instar la continuidad de estudios ecofisiológicos de la especie en estudio.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para la realización de la investigación, así como también al Sr. Jaime Montero Montero por las facilidades del predio y a la Consultora para el Desarrollo Rural y Ordenamiento Ambiental S.A. de C.V. “Cedro”, Xalapa, Veracruz, por la donación de los individuos de cedro.

Literatura citada

Arnáez E (1988) Características de la madera de *Cedrela odorata* L. (cedro amargo, Meliaceae) en Costa Rica 36 (1): 67-73

Beets PN, Whitehead D (1996) Carbon partitioning in *Pinus radiata* in relation to foliage nitrogen status. Tree Physiology 16: 131-138.

Comisión Nacional Forestal y Colegio de Postgraduados (CONAFOR-CP) (2011) Situación actual y perspectivas de las plantaciones forestales comerciales en México. 472 p.

Coops NC, Hember RA, Waring RH (2010) Assessing the impact of current and projected climates on Douglas-Fir productivity in British Columbia, Canada, using a process-based model (3-PG). Can. J. For. Res. 40:511-524.

Forrester DI, Tang X (2016) Analysing the spatial and temporal dynamics of species interactions in mixed-species forests and the effects of stand density using the 3-PG model. Ecological Modelling 319: 233-254.

García ME (1973) Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen [Adaptations to the Köppen climatic classification system]. Instituto de Geografía. UNAM. 2nd edn, México. D.F. 245 pp.

González-Benecke CA, Jokela EJ, Cropper Jr WP, Bracho R, Leduc DJ. (2014) Parameterization of the 3-PG model for *Pinus elliottii* stands using alternative methods to estimate fertility rating, biomass partitioning and canopy closure. Forest Ecology and Management 327:55-75.

Haggar JP, Ewel JJ (1995) Establishment, resource acquisition, and early productivity as determined by biomass allocation patterns of three tropical tree species. Forest Science 41(4): 689-708.

Hiremath AJ (2000) Photosynthetic nutrient-use efficiency in three fast-growing tropical trees with differing leaf longevities. *Tree Physiology* 20: 937-944.

Landsberg JJ, Waring RH (1997) A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *Forest Ecology and Management* 95: 209-228.

Landsberg JJ, Johnsen KH, Albaugh TJ, Lee Allen H, McKeand SE (2001) Applying 3-PG, a simple process-based model designed to produce practical results, to data from *Loblolly pine* experiments. *Forest Science* 41(1): 43-51.

Landsberg JJ, Waring RH, Coops NC (2003) Performance of the forest productivity model 3-PG applied to a wide range of forest types. *Forest Ecology and Management* 172: 199-214.

Landsberg JJ, Mäkelä A, Sievänen R, Kukkola M (2005) Analysis of biomass accumulation and stem size distributions over long periods in managed stands of *Pinus sylvestris* in Finland using the 3-PG model. *Tree Physiology* 25:781-792.

López-Sánchez E, Musálem MA (2007) Sistemas agroforestales con cedro rojo, cedro nogal y primavera, una alternativa para el desarrollo de plantaciones forestales comerciales en los Tuxtlas, Veracruz, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 13(1): 59-66.

McMurtrie RE (1991) Relationship of forest productivity to nutrient and carbon supply- a modeling analysis. *Tree Physiology* 9: 87-99.

Miranda F, Hernández-X E (1964) Los tipos de vegetación de México y su clasificación [Types of vegetation in Mexico and their classification]. Colegio de Postgraduados. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. *Bol Soc Bot México, Chapingo Estado de México. México. Num. 28. 38 pp.*

NOM-059-2010. Norma Oficial Mexicana. DIARIO OFICIAL. Segunda sección, 78 p.

PACMA Exploración y Producción, Instituto Nacional de Administración Pública, A.C. (INAP) (2013) Diagnósticos Municipales PACMA. Entidad: Veracruz de Ignacio de la Llave (30) Municipio: Tihuatlán (175). 50 p.

Plan Veracruzano de Desarrollo (PVD) 2011-2016.

Pennington TD, Sarukhán J (1998) Árboles tropicales de México. Manual para la identificación de las principales especies [Tropical trees of Mexico. A guide for identification of the main species]. UNAM, Fondo de Cultura Económica, México, D.F. México. 521 pp.

Programa Nacional Forestal (PRONAFOR) 2014-2018.

Ramírez-García C, Vera-Castillo G, Carrillo-Anzures F, Magaña-Torres OS (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): 243-250.

Rodríguez S J y J Álvarez M (2010) Nutrición y Fertilización de las Plantaciones Forestales. Santiago de Chile, 520 p.

Rodríguez-Suárez JA, Soto B, Iglesias ML (2010) Application of the 3PG forest growth model to a *Eucalyptus globulus* plantation in Northwest Spain. Eur J Forest Res 129: 573-583.

Sands PJ, Landsberg JJ (2002) Parameterisation of 3-PG for plantation grown *Eucalyptus globulus*. Forest Ecology and Management 163: 273-292.

Swenson JJ, Waring RH, Fan W, Coops N. 2005. Predicting site index with a physiologically based growth model across Oregon, USA. Can J. For. Res. 35: 1697-1707.

Sands P. 2010. 3PGPJS 2.4 User guide. 27 p.

Vega-Nieva DJ, Tomé M, Tomé J, Fontes L, Soares P, Ortiz L, Basurco F, Rodríguez- Soalleiro R (2013) Developing a general method for the estimation of the fertility rating parameter of the 3-PG model: application in *Eucalyptus globulus* plantations in northwestern Spain. Can. J. For. Res. 43: 627-636.

CONCLUSIONES GENERALES

La productividad de las plantaciones forestales se incrementa al utilizar técnicas silvícolas como fertilización e intercalamiento de especies arbóreas capaces de minimizar los efectos de ataques por plagas. El cedro rojo presentó incrementos en altura total en el último año de la plantación, al ser intercalada con bajas densidades de *G. sepium* (tres).

Se recomienda el intercalado de *G. sepium* en plantaciones de *C. odorata* como estrategia para mejorar la productividad y disminuir el ataque de *H. grandella*.

El enraizamiento de las estacas de *G. sepium* en suelo mineral sin aplicación de hormonas (AIA) obtuvo la mayor biomasa de follaje y raíz (g). El uso de auxinas exógenas no es viable para el enraizamiento de estacas de *G. sepium*, debido a que la fitohormona es producida por la misma leguminosa.

El uso de modelos de procesos resulta una importante herramienta en la predicción del crecimiento de especies de interés forestal. En *C. odorata* resulta una primicia su predicción y se sentan las bases para futuras especies tropicales. Es necesario continuar con estudios ecofisiológicos que integren mayor información de la especie y aplicarla para mejorar la productividad de cedro rojo.