

FERTILIZACIÓN INICIAL DE PLANTACIONES COMERCIALES DE TECA (*Tectona grandis* Linn F.) EN EL SURESTE DE MÉXICO

INITIAL FERTILIZATION IN COMMERCIAL PLANTATIONS OF TEAK (*Tectona grandis* Linn F.) IN SOUTHEAST MÉXICO

Manuel Balám-Che¹, Armando Gómez-Guerrero^{1*}, J. Jesús Vargas-Hernández²,
Arnulfo Aldrete¹ y J. Jesús Obrador-Olán¹

¹Postgrado Forestal, Colegio de Postgraduados. Km 36.5 Carr. México-Texcoco. 56230, Montecillo, Texcoco, Edo. de México. Tel: 595 952 0246; Fax: 595 952 0256.

²Col. Bellavista, Texcoco, Edo. de México.

*Autor para correspondencia (agomezg@colpos.mx)

RESUMEN

El Sureste de México es una región de alto potencial para el establecimiento de plantaciones forestales comerciales (PFC). Aunque la superficie de éstas se ha incrementado en esa región, los resultados de los experimentos con especies forestales exóticas y de rápido crecimiento rara vez se difunden. Este trabajo muestra resultados de un experimento factorial para evaluar el efecto de N, P, K y micronutrientes sobre el crecimiento inicial de teca (*Tectona grandis* Linn F.) en campo, efectuado entre los años 2009 al 2012. Se probaron tres niveles de cada factor N, P y K que generaron 27 combinaciones, los cuales se distribuyeron en un diseño de bloques al azar. En forma paralela, se establecieron subparcelas aledañas (gemelas) para probar el efecto de la aplicación de micronutrientes, con dos niveles, con y sin micronutrientes. Las dosis de fertilización se identificaron como medias si correspondían a la dosis usual (testigo), y altas o bajas según se encontraran 50 % arriba o abajo de dicha dosis, respectivamente. Los resultados mostraron un efecto pequeño, pero significativo, sobre el crecimiento del diámetro a la base del árbol (2 mm año⁻¹) con la dosis alta de N. No se observaron efectos sobre el crecimiento por la aplicación de P. Contrario a lo esperado, el K en dosis alta influyó negativamente en el incremento en área basal (-3.6 cm² año⁻¹). Los resultados de este trabajo sugieren que la aplicación alta de K puede afectar la absorción de otros nutrientes. Ni las interacciones de nutrientes NPK, ni el complemento de micronutrientes tuvieron efecto sobre el crecimiento inicial de teca.

Palabras clave: *Tectona grandis*, crecimiento arbóreo inicial, fertilidad de suelos forestales, plantaciones forestales, suelos tropicales.

SUMMARY

Southeast México could potentially harbor commercial forest plantations (CFP). Although CFP acreage is increasing in that region, results from field experiments with exotic and fast growing species are seldom published. This work shows results from a factorial experiment carried out from 2009 to 2012 which evaluated effects of NPK fertilization and micronutrients, on initial growth of teak (*Tectona grandis* Linn F.). Three levels of each factor N, P and K resulted in 27 combinations, which were distributed according to a randomized block design. Twin plots were established to test the effect of adding micronutrients. Fertilization dosages were identified as the normally used average in teak CFP (control), and high or low if they were 50 % higher or lower in relation to average doses. Results showed a small, but significant, single effect on basal diameter growth (2 mm year⁻¹)

with high N. There were no effects on tree growth due to P fertilization. Unexpectedly, K affects tree growth negatively for basal area increments (-3.6 cm² year⁻¹). Results suggest that high additions of K may influence the absorption of other nutrients. No significant effects were found for NPK interaction or micronutrients addition.

Index words: *Tectona grandis*, forest plantations, forest soils fertility, initial tree growth, tropical soils.

INTRODUCCIÓN

Como resultado del incremento en la demanda de productos forestales y estrategias de protección de los bosques naturales, la superficie de plantaciones forestales comerciales (PFC) en el mundo va en aumento. Existen estimaciones que indican que para finales del presente siglo los bosques naturales se reducirán en 30 % y las plantaciones forestales representarán 20 % de la superficie forestal del mundo (Brocknerhoff *et al.*, 2013).

Gracias al uso de conocimiento previo generado por investigación básica, actualmente 70 % (3.1 millones de ha año⁻¹) de las PFC establecidas en el mundo son exitosas (Sayer y Elliott, 2005; Brocknerhoff *et al.*, 2013). Las regiones con mayor expansión en PFC son Asia y América del Sur; sin embargo, la política interior de México contempla apoyos para PFC para equilibrar la balanza comercial negativa que existe en la importación de productos forestales (CONAFOR, 2013).

Las PFC con manejo sustentable ayudan a disminuir la presión sobre los bosques naturales, protegen el suelo, capturan carbono y generan ingresos económicos para las comunidades rurales (Langenberger y Liu, 2013; Ugalde, 2013). El gobierno mexicano ha apoyado el establecimiento de más de 200,000 ha de PFC; sin embargo, la información técnica sobre experiencias en el establecimiento de PFC en el país pocas veces se publica (CONAFOR, 2013).

Una especie forestal exótica importante para las PFC en México es la teca (*Tectona grandis* Linn. F.), la cual se ha adaptado bien en regiones de los estados de Campeche, Chiapas, Tabasco, Veracruz, Michoacán y Nayarit (CONAFOR, 2013), pero las experiencias sobre su establecimiento rara vez han sido documentadas. La información sobre el establecimiento de PFC con teca es relevante para ayudar a nuevos plantadores u organizaciones interesados en cultivar la especie y favorecer al sector forestal.

El establecimiento de PFC con especies exóticas combinado con áreas de amortiguamiento para la conservación de especies nativas, es una estrategia importante para conservar el paisaje y aprovechar íntegramente el potencial del suelo (Brockhoff *et al.*, 2013). Dos aspectos que hacen viable el establecimiento de PFC con teca, en escalas pequeña y grande, son su tasa de crecimiento alta y la calidad de su madera (Langenberger y Liu, 2013). En la India, el uso principal de la teca es para construcción de barcos y muebles finos (Husen y Pal, 2003). Aunque en México la introducción de teca a nivel comercial es reciente, ya se cuenta con un modelo para cuantificar su productividad (Tamarit-Urias *et al.*, 2014) y estudios sobre plagas (González-Gaona *et al.*, 2010).

El presente trabajo se llevó a cabo para subsanar la falta de información sobre el crecimiento inicial de plantaciones de teca en México. El objetivo fue probar diferentes niveles de fertilización inicial (primeros dos años) en plantaciones comerciales de teca en la región de Balancán, Tabasco. Lo anterior, con la finalidad de ampliar el conocimiento con relación a la respuesta de esta especie en suelos tropicales de México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Condiciones ambientales del experimento

El experimento se estableció en un terreno privado de 980 ha, donde el experimento ocupó 2.2 ha (Empresa Agropecuaria Santa Genoveva). El sitio se ubica en el municipio de Balancán con coordenadas 68° 15' 01" O y 19° 76' 95" N, respectivamente, a una altitud de 50 m. El clima es cálido-húmedo con lluvias en verano concentradas principalmente en agosto y septiembre. La temperatura media es 32 °C, y la precipitación media anual es de 1800 mm. El suelo es una asociación de Cambisol éutrico, Cambisol ferrálico y Gleysol húmico y vértico, donde predomina la textura media (Geissen *et al.*, 2009).

Material biológico y establecimiento del experimento

La planta empleada en el estudio se produjo con el sistema Jiffy, con semilla del año 2008 de rodales semilleros

certificados por el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) de Costa Rica. El periodo de producción de la planta fue de 4 meses, y la planta así crecida fue homogénea en sus dimensiones de diámetro al cuello de la raíz (4 mm) y de altura (25 cm).

La plantación se estableció en junio de 2009 con el sistema de cepa común en marco real, con espaciamiento de 3.5 x 3.5 m. Previo al establecimiento de la plantación se realizó un muestreo sistemático de suelos alrededor del área del experimento, en 20 puntos de muestreo con distancia de separación de 500 m. El muestreo de cada punto se hizo a tres profundidades, 0-20, 20-40 y 40-60 cm. El Cuadro 1 resume las propiedades del suelo en el lugar del experimento.

Combinación de tratamientos

El experimento incluyó un total de 27 tratamientos de fertilización, resultado de la combinación factorial 3³ de N, P y K, en un diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones, para un total de 108 parcelas; cada parcela estuvo conformada por dos hileras de cinco árboles cada una. Para definir los tres niveles de N, P y K se tomó en cuenta la dosis tradicionalmente aplicada por los plantadores forestales del Sureste de México, y a partir de dicho nivel se establecieron otros dos, uno con 50 % menos y el otro 50 % más alto que la dosis usual (Cuadro 2).

Adicionalmente, para evaluar el efecto de micronutrientes, cada parcela se dividió en dos sub-unidades, una de ellas sin aplicación de micronutrientes (testigo) y la otra con la aplicación de un complemento de micronutrientes (Micro mix®), con S, Ca, Mg, Fe, Zn, Mn, Cu, B, Co y Mo, en una dosis equivalente a 3 % del peso de la dosis tradicional de NPK.

El modelo estadístico simplificado del experimento es:

$$y_{ijk} = m + b_i + t_j + b_i t_j + n_k + t_j n_k + e_{ijk}$$

$$i = 1, 2, \dots, 4; j = 1, 2, \dots, 27; k = 1, 2$$

y_{ijk} = Observación en la ijk -ésima unidad experimental; μ = Media poblacional; β_i = Efecto del i -ésimo bloque; t_j = Efecto del j -ésimo tratamiento de fertilización NPK; $\beta_i t_j$ = Efecto de la interacción del i -ésimo bloque con el j -ésimo tratamiento de fertilización NPK; n_k = Efecto del k -ésimo nivel de micronutrientes; $t_j n_k$ = Efecto de la interacción del j -ésimo tratamiento de fertilización NPK con el k -ésimo nivel de micronutrientes; y e_{ijk} = error experimental de la ijk -ésima unidad experimental.

A su vez, el efecto de los tratamientos de fertilización se puede descomponer de acuerdo al arreglo factorial 3³ para

Cuadro 1. Variables edafológicas del área de estudio, medidas a diferentes profundidades.

Variable	Profundidad de suelo (cm)											
	0-20			20-40			40-60					
	Media	Min	Max	Dev std.	Media	Min	Max	Std. Dev.	Media	Min	Max	Std. Dev
MO (%)	2.28	0.86	6.04	1.61	0.73	0.13	1.73	1.16	0.49	0.21	1.44	0.36
Arena (%)	58.20	43.50	78.00	11.33	55.32	34.00	74.00	41.64	46.52	36.00	68.00	9.38
Arcilla (%)	26.53	14.00	41.00	9.23	29.63	14.50	51.00	33.14	40.36	20.00	52.00	9.37
Limo (%)	12.23	5.00	17.00	3.39	11.63	7.00	16.50	10.50	10.21	5.00	18.00	3.92
CC (%)	32.70	21.38	45.00	8.92	30.88	18.38	46.88	30.35	40.75	23.63	52.88	8.71
PMP (%)	21.49	15.69	27.51	0.46	20.59	14.19	28.44	17.67	25.51	16.78	31.44	4.36
HA (%)	11.07	5.69	17.50	4.46	10.09	4.19	18.44	12.67	15.03	6.85	21.44	4.35
pH	6.52	5.39	7.59	0.70	6.76	5.56	7.88	4.49	6.90	5.54	7.85	0.81
CE (ds m ⁻¹)	0.33	0.21	0.67	0.14	0.27	0.19	0.76	0.52	0.30	0.20	1.26	0.32
Al. I. (cmol _c kg ⁻¹)	0.06	0.00	0.35	0.12	0.10	0.00	0.35	0.16	0.04	0.00	0.19	0.08
Ca ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	13.46	4.15	31.32	9.82	14.19	3.59	36.60	28.00	22.52	9.21	44.84	10.79
Mg ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	2.31	0.90	6.24	1.74	2.12	0.54	6.89	5.31	4.33	1.20	9.84	2.69
K+ (cmol _c kg ⁻¹)	0.28	0.10	1.40	0.39	0.13	0.06	0.44	0.29	0.12	0.08	0.28	0.06
Na+ (cmol _c kg ⁻¹)	0.14	0.08	0.23	0.05	0.24	0.11	0.70	0.48	0.62	0.18	2.07	0.60
CIC (cmol _c kg ⁻¹)	16.98	6.51	35.95	11.01	17.74	4.91	43.92	33.06	28.80	13.28	51.36	11.42
PO. (ppm, mg kg ⁻¹)	4.92	2.44	11.10	3.46	2.41	2.01	3.35	0.53	2.33	1.85	3.11	0.58
P. B. (ppm, mg kg ⁻¹)	3.11	1.18	9.62	2.59	1.47	0.54	4.05	2.11	0.76	0.09	4.83	1.62
Clase textural	Migajón arcillo-arenoso			Migajón arcillo-arenoso			Arcilla arenosa					

MO = materia orgánica; CC = capacidad de campo; PMP = punto de marchitez permanente; HA = humedad aprovechable; CE = conductividad eléctrica; Al I. = aluminio intercambiable; Ca = calcio; Mg = magnesio; K = potasio; Na = sodio; CIC = capacidad de intercambio de cationes; PO = fósforo Olsen; P. B. = fósforo Bray.

evaluar el efecto individual de los macronutrientes (N, P y K), así como las interacciones entre ellos.

Aplicación de fertilizante

En el año de establecimiento de la plantación (2009), todos los árboles del experimento recibieron una dosis de fertilización inicial NPK que comúnmente se emplea en la región de Balancán (30 g de N, 30 g de P y 15 g de K netos por árbol). Dado que se empleó un criterio estandarizado de tamaño de planta, todas las unidades experimentales fueron uniformes respecto al material biológico. Después de la fertilización inicial se aplicó la fertilización experimental en dos etapas, en octubre de 2010 y 2011, y los árboles recibieron fertilización diferenciada de acuerdo al tratamiento correspondiente de este estudio (Cuadro 2).

Cuadro 2. Factores y niveles de NPK probados en el experimento.

Factores	Niveles (g/árbol)		
	Menos 50 %	Usual	Más 50 %
N	N- 15	N0 30	N+ 45
P	P- 15	P0 30	P+ 45
K	K- 7.5	K0 15	K+ 22.5

Símbolo "-", "0" y "+" corresponden a las dosis: 50 % más y 50 % más de la dosis usual, respectivamente. Los números después del elemento corresponden a los gramos netos aplicados de cada elemento.

La aplicación del fertilizante fue en forma manual, a una distancia de 20 cm del tallo, en dos orificios hechos en el suelo, uno al norte y otro al sur a una profundidad de 15 cm. Los fertilizantes utilizados fueron urea (46-00-00), fosfato de amonio monobásico (11-52-00) y cloruro de potasio, KCI (00-00-60). El nombre comercial del fertilizante con micronutrientes es Micro mix® que es un concentrado de S, Ca, Mg, Fe, Zn, Mn, Cu, B, Co y Mo, y la aplicación correspondió a 3 % del peso de la fertilización NPK usual. La unidad experimental (sub-parcela) consistió en una hilera de cinco árboles, para un total de 1080 árboles.

Variables medidas

Después de verificar que las dimensiones de las plantas establecidas en el experimento eran uniformes, se realizaron dos evaluaciones, la primera en abril 2011 y la segunda en mayo de 2012. La altura se midió con una baliza de 6 m de longitud graduada en cm, y el diámetro a la base con un vernier graduado en mm. El volumen del tallo se estimó con la fórmula del cono:

$$V = 0.0333 (0.7854 \times (DAB)^2 \times H)$$

donde: V = volumen en decímetros cúbicos; DAB =

diámetro a la base del árbol, en cm; H = altura total, en m; 0.7854 = factor $p/4$; 0.0333 = factor de la forma cónica y unidades.

Análisis estadístico

Para verificar la distribución normal de los datos se empleó el módulo UNIVARIATE del paquete estadístico SAS®, versión 9.0. El análisis de varianza se realizó con el módulo ANOVA, y la comparación de medias mediante la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). En una primera etapa se realizó un análisis de varianza con el modelo estadístico simplificado (*i.e.*, con 27 tratamientos de fertilización). Posteriormente se hizo un análisis de varianza de acuerdo con el arreglo factorial de los tratamientos de fertilización, para evaluar el efecto individual y las interacciones de N, P y K, a nivel de parcelas.

Las variables analizadas fueron: altura, diámetro a la base, área basal a nivel del suelo (con el diámetro a la base y la fórmula del círculo) y volumen, y sus incrementos correspondientes que se calcularon mediante la diferencia de dimensiones entre 2009 y 2011, y el periodo entre 2011 y 2012. Dado que las dimensiones de la planta fueron homogéneas y el volumen inicial del tallo fue insignificante con relación al volumen desarrollado en el año 2011, el volumen del tallo de 2011 se considera el crecimiento neto entre 2009 y 2011. El efecto de la aplicación de micronutrientes se probó con el método gráfico de parcela gemela (Stape *et al.*, 2006), procedimiento pertinente en experimentos forestales de campo donde la variación del terreno puede ser mayor que en terrenos agrícolas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Variables dasométricas medidas en 2011

No se encontraron diferencias significativas atribuidas a tratamientos en ninguna de las variables dasométricas medidas en el año 2011 (Cuadro 3). De igual manera, no hubo diferencias significativas por la aplicación de micronutrientes. Este resultado se debe posiblemente a que en los primeros años es baja la demanda de nutrientes de los árboles de teca con relación a los reservorios de nutrientes del suelo. Además, en las etapas iniciales la exploración reducida de las raíces en el suelo pudo haber limitado el aprovechamiento de la fertilización. La baja respuesta a la fertilización también se puede explicar por una provisión adecuada de nutrientes del suelo en las primeras etapas, la cual en futuras fases se va limitando con la demanda de nutrientes cuando crecen los árboles (Ryan *et al.*, 2004).

El cultivo de teca tiene las mayores tasas de absorción de nutrientes alrededor de los diez años (Negi *et al.*, 1995), y

Cuadro 3. Significancia estadística de las variables dasométricas de 2011 y 2012.

FV	GL	Variables dasométricas			
		Altura	Diámetro	AB	Volumen
Datos del 2011					
Bloques	3	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001
Tratamientos	26	0.9776	0.9859	0.9374	0.9412
Micronutrientes	1	0.3323	0.3251	0.4077	0.5261
Trat x M	26	0.3772	0.1556	0.1419	0.1429
Datos del 2012					
FV	GL	Altura	Diámetro	AB	Volumen
Bloques	3	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001
Tratamientos	26	0.8286	0.2463	0.2549	0.5521
Micronutrientes	1	0.5127	0.2383	0.3283	0.4528
Trat x M	26	0.342	0.1115	0.1603	0.1683

FV = fuente de variación; Trat x M = interacción tratamiento x micronutrientes; GL = grados de libertad; AB = área basal.

otra etapa de alta demanda de las plantaciones forestales es previo al cierre de copas (Powers, 1999). El cierre de copas en teca ocurre entre 3 y 4 años después del establecimiento para la distancia de plantación aquí empleada (Ugalde, 2013). A los 20 años las plantaciones de teca demandan principalmente Ca cuyos niveles se abaten en suelos ácidos y de baja fertilidad (Oxisoles), pero posteriormente éstos recuperan Ca por la incorporación de hojarasca (Suzuki *et al.*, 2007).

Aunque el suelo del área de estudio muestra baja capacidad de intercambio de cationes (Cuadro 1), el pH y la cantidad de Ca y Mg son aceptables para el cultivo de la teca (Gunaga *et al.*, 2011). Contrario al resultado de este trabajo, los experimentos de invernadero muestran repuestas en crecimiento de plántulas de teca con el incremento de las dosis de NPK (Husen y Pal, 2003). Sin embargo, en condiciones de invernadero las plantas crecen bajo condiciones muy favorables y la respuesta a los niveles de fertilización se detecta con mayor facilidad que en campo.

Incrementos medidos entre 2011 y 2012

Aunque las variables dasométricas de 2012 no fueron significativamente diferentes, los incrementos de 2011-2012 mostraron diferencias significativas atribuibles al tratamiento de fertilización para diámetro a la altura de la base (DAB) y área basal a nivel del suelo (AB), pero no para la variables altura y volumen (Cuadro 4). Es probable que la altura y el volumen no hayan mostrado diferencias porque los árboles están espaciados regularmente y la competencia por radiación solar entre copas aún no se había iniciado.

Después de alcanzar su máxima productividad al cierre

de copas, los árboles de plantaciones tropicales compiten por recursos del suelo y expresan mejor los efectos de los tratamientos (Ryan *et al.*, 2004). La variable volumen es importante porque refleja en forma combinada el efecto sobre área basal y altura, y además es una variable altamente relacionada con biomasa; sin embargo, no se observó efecto significativo de tratamientos, y la aplicación de micronutrientes tampoco mostró una ventaja con respecto a los árboles que no los recibieron.

Se sabe que la disponibilidad de micronutrientes ayuda a la absorción de macronutrientes; sin embargo, el análisis gráfico que aquí se hizo, como sugirieron Stape *et al.* (2006), indicó que no hubo efecto sinérgico con la aplicación de micronutrientes con relación a los niveles de N (Figura 1). El mayor crecimiento en diámetro entre 2011 y 2012 estuvo asociado con el nivel alto de N y niveles medio y bajo de K (Figura 2).

Efecto de macronutrientes (NPK)

Los nutrientes con más respuesta fueron N y K. Se observó un efecto positivo a niveles crecientes de N con relación al incremento en diámetro (Figura 3), pero no para el resto de las variables. La dosis máxima de N, 45 g/árbol, produjo el mayor aumento en diámetro. Este es un resultado esperado ya que el N aplicado en dosis altas, como la de este estudio, favorece el crecimiento de teca tanto en campo (Fonseca, 2004) como en invernadero (Husen y Pal, 2003). En función de la fertilidad del suelo, las aplicaciones de N en los primeros tres años para teca varían de 25 a 100 kg ha⁻¹ (Fonseca, 2000). La aplicación en este estudio, al considerar las dos fechas, varió de 24 a 74 kg de N ha⁻¹.

Cuadro 4. Significancia estadística de los incrementos de teca medidos entre 2011 y 2012.

FV	GL	Altura	Diámetro	AB	Volumen
Bloques	3	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001
Tratamientos	26	0.4857	0.0429	0.049	0.3232
Micronutrientes	1	0.6134	0.4328	0.4761	0.3748
Trat x M	26	0.5278	0.9436	0.9180	0.9642

Trat x M = interacción tratamiento x micronutrientes; GL = grados de libertad; AB = área basal.

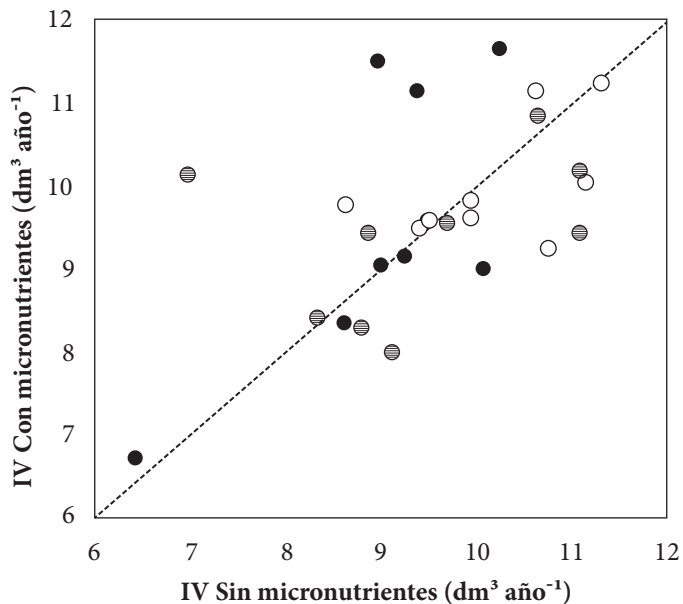


Figura 1. Relación del incremento en volumen (IV) entre tratamientos sin y con un complemento de fertilización con micronutrientes. Los puntos negros, blancos y en achurado identifican tratamientos con +50 %, 0 % y -50 % de N con respecto a la dosis usual (testigo).

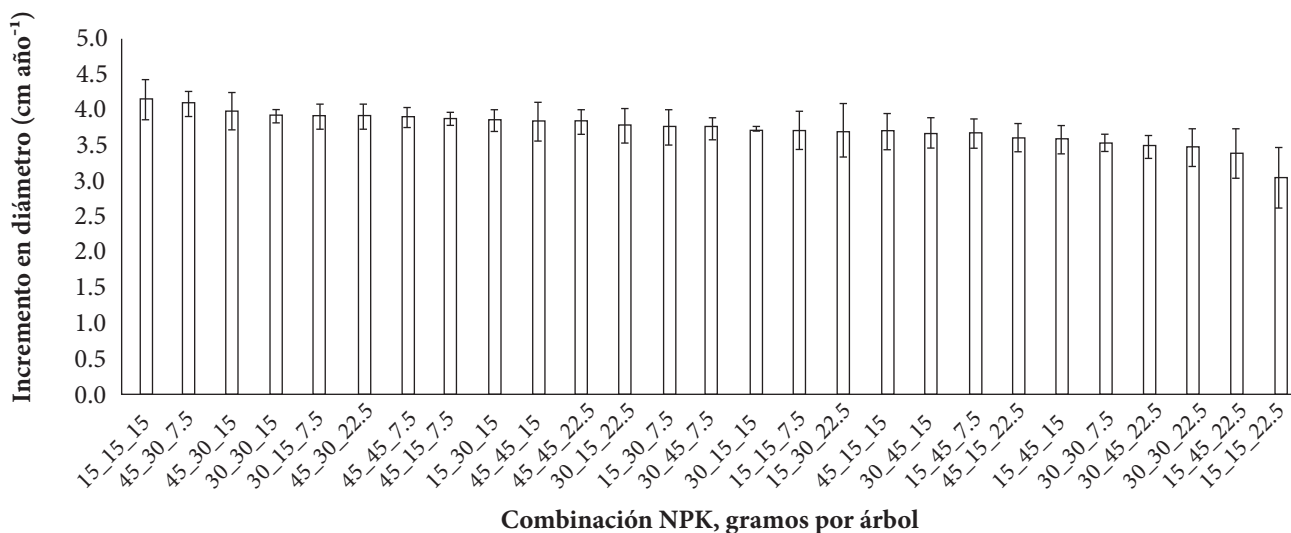


Figura 2. Incremento en diámetro en una plantación de teca de tres años de edad en respuesta a 27 combinaciones de NPK.

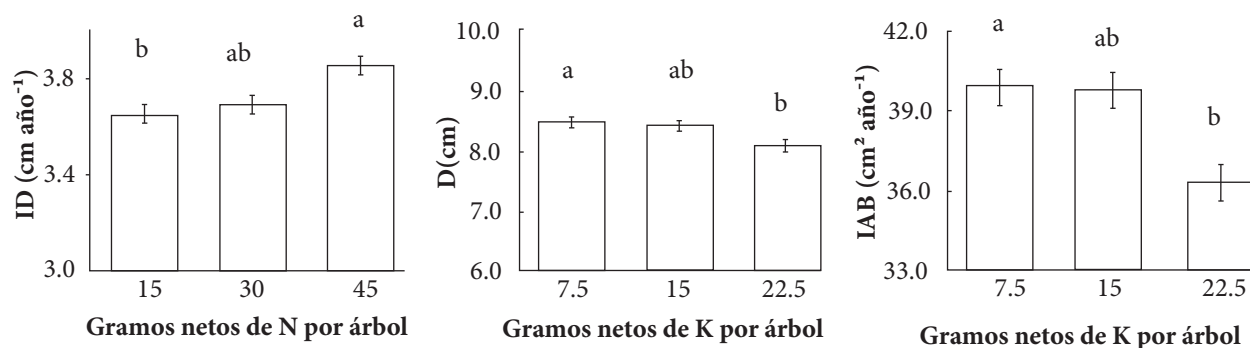


Figura 3. Efecto de N sobre el incremento en diámetro (ID) y K sobre diámetro (D) e incremento en área basal (IAB). Las literales sobre las barras indican diferencias significativas al 5 %, de acuerdo con la prueba de Tukey.

Llama la atención que el P no haya tenido efecto sobre el crecimiento de teca, sobre todo porque los análisis de suelo indicaron baja disponibilidad de este elemento (Cuadro 1). Aunque otros trabajos reportan respuestas favorables a la aplicación de P (Fonseca, 2000 y 2004), se debe considerar que el P es uno de los elementos de mayor reabsorción en plantaciones forestales (Powers, 1999), lo que hace que varias especies se puedan establecer en sitios de baja fertilidad (Binkley y Fisher, 2013). Es probable que la eficiencia en reabsorción de P sea alta en teca y por esa razón exista poca correlación entre los índices de disponibilidad de P en el suelo y el crecimiento (Amponsah y Meyer, 2000).

Como los requerimientos de fósforo varían con el tipo de suelo, una recomendación general es la aplicación de 50 kg P ha⁻¹ al inicio de la plantación (Fonseca, 2000). En el presente estudio la cantidad adicionada en dos aplicaciones, varió de 12 a 36 kg P ha⁻¹, por lo que sería recomendable que en estudios posteriores se exploren otros niveles de P. La demanda de P en plantaciones de teca es de aproximadamente 4 kg ha⁻¹ en los primeros años, pero a partir del año cinco la demanda puede aumentar hasta cinco veces (Jha, 2014).

El efecto del K fue significativo para el diámetro medido en 2012, así como para el incremento en área basal. Debe destacarse que el K muestra un efecto negativo cuando la dosis es mayor a la usual (Figura 2). Este resultado sugiere que no se debe modificar la dosis que hasta ahora se emplea. La relación de los niveles de K y el crecimiento en área basal no es un resultado esperado, sobre todo porque los niveles de K en el área del experimento se consideran bajos.

Una explicación es que la respuesta al K pudiera estar relacionada con un desbalance en la proporción de cationes (Ca, Mg y K) en la zona de intercambio del suelo. Para el cultivo de la teca el suelo del experimento muestra niveles aceptables de Ca y Mg, pero no para K (Mollinedo-García, 2003; Vaides-López, 2004; Ugalde, 2013). Otra explicación

podría ser un antagonismo a nivel de la planta entre el K y otros cationes (Ca y Mg). Los resultados de este estudio sugieren la necesidad de hacer más investigación sobre el tema en los suelos del Sureste de México. Si este proceso está ocurriendo en teca, la asimilación de Mg podría limitarse por adiciones de K.

Dado que no hay trabajos similares en la región, los resultados de este estudio son una referencia en la que debe considerarse que los niveles altos de N resultaron en una ganancia de 6 % en crecimiento en diámetro, y el nivel más alto de K ocasiona una reducción de casi 12 % del crecimiento en área basal. La teca se ha adaptado a diferentes condiciones en el mundo, y si bien los suelos del Sureste de México muestran en general un nivel adecuado de fertilidad, se requiere considerar con mayor detalle la distribución de cationes en la zona de intercambio para diseñar la mejor estrategia de fertilización. Para teca, se espera que la suma de cationes intercambiables de Ca + Mg + K sea mayor a 10 cmol_c por kg de suelo (Ugalde, 2013), lo que se cumple en el área de estudio. Según Negi *et al.* (1995) quienes consideran que los requerimientos de teca son en el orden Ca > K > N > Mg > P = S.

CONCLUSIONES

Se encontraron efectos positivos en crecimiento en diámetro en dosis crecientes de N. La interacción de nutrientes aplicados (NPK) no fue estadísticamente significativa en ningún caso. La adición de P en los niveles probados no se asoció con mayor crecimiento de teca. Contrario a lo esperado, el K en dosis alta influyó negativamente en el crecimiento.

De acuerdo con los resultados, se recomienda incrementar la dosis de N, y mantener los niveles tradicionales de fertilización de P y K. No se encontró una explicación contundente que documente el efecto negativo de K, por lo que se requieren estudios adicionales al respecto.

El suelo donde se estableció el experimento posee buen abastecimiento de Ca y Mg (16 y 2.6 cmol_c kg⁻¹, respectivamente), que son elementos muy demandados por la planta de teca. La aplicación de micronutrientes en dosis equivalentes a 3 % de la masa total del fertilizante total, no mejoró el crecimiento inicial de teca.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo financiero en los estudios de maestría del primer autor, y a la Empresa Agropecuaria Santa Genoveva por las facilidades para la realización del experimento.

BIBLIOGRAFÍA

- Amponsah I. and W. Meyer (2000)** Soil characteristics in teak plantations and natural forests in Ashanti region, Ghana. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 31:355-373.
- Binkley D. and R. Fisher (2013)** Ecology and Management of Forest Soils. Wiley-Blackwell, Oxford, UK. 345 p.
- Brockerhoff E. G., H. Jactel, J. A. Parrotta and S. E. B. Ferraz (2013)** Role of eucalypt and other planted forests in biodiversity conservation and the provision of biodiversity-related ecosystem services. *Forest Ecology and Management* 301:43-50.
- CONAFOR, Comisión Nacional Forestal (2013)** Programa de desarrollo de plantaciones forestales comerciales. A 15 años de su creación. Comisión Nacional Forestal. Zapopan, Jalisco, México. 190 p.
- Fonseca W. (2000)** La aplicación de fertilizantes químicos en *Tectona grandis* Linn. F. en Guanacaste: In: Taller de Nutrición Forestal, Oficina de Planificación de la Educación Superior. CONARE (ed.). Comisión Nacional de Rectores. San José, Costa Rica pp:39-44.
- Fonseca W. (2004)** Manual Para Productores de Teca (*Tectona grandis* Linn. F.) en Costa Rica. Fondo de Financiamiento Forestal. Heredia, Costa Rica. 121 p.
- Geissen V., R. Sanchez-Hernandez, C. Kampichler, R. Ramos-Reyes, A. Sepulveda-Lozada, S. Ochoa-Goana, B. H. J. de Jong, E. Huerta-Lwanga and S. Hernandez-Daumas (2009)** Effects of land-use change on some properties of tropical soils - an example from southeast Mexico. *Geoderma* 151:87-97.
- González-Gaona E., G. Sánchez-Martínez, A. Zhang, J. Lozano-Gutiérrez y F. Carmona-Sosa (2010)** Validación de dos compuestos feromonales para el monitoreo de la cochinilla rosada del hisbisco en México. *Agrociencia* 44:65-73.
- Gunaga R. P., A. H. Kanfode and R. Vasudeva (2011)** Soil fertility status of 20 seed production areas of *Tectona grandis* Linn. F. in Karnataka, India. *Journal of Forest Science* (Prague) 57:483-490.
- Husen A. and M. Pal (2003)** Effect of nitrogen, phosphorous and potassium fertilizers on growth of stock plants of *Tectona grandis* (Linn. F.) and rooting behaviour of shoot cuttings. *Silvae Genetica* 52:249-254.
- Jha K. K. (2014)** Temporal patterns of storage and flux of N and P in young teak plantations of tropical moist deciduous forest, India. *Journal of Forestry Research* 25:75-86.
- Langenberger G. and J. Liu (2013)** Performance of smallholder teak plantations (*Tectona grandis*) in Xishuangbanna, south-west China. *Journal of Tropical Forest Science* 25:289-298.
- Mollinedo-García M. S. (2003)** Relación Suelo-Planta, Factores de Sitio y Respuesta a la Fertilización, en Plantaciones Jóvenes de Teca (*Tectona grandis* L. F.) en la Zona Oeste, Cuenca del Canal de Panamá. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Turrialba, Costa Rica. 89 p.
- Negi M. S., V. N. Tandon and H. S. Rawat (1995)** Biomass and nutrient distribution in young teak (*Tectona grandis* Linn. F.) plantations in Tarai region of Uttar Pradesh. *Indian Forester* 121:455-464.
- Powers R. (1999)** On the sustainable productivity of planted forests: In: Planted Forests: Contributions to the Quest for Sustainable Societies. J. Boyle, J. Winjum, K. Kavanagh and E. Jensen (eds.). Springer Netherlands. pp:263-306.
- Ryan M. G., D. Binkley, J. H. Fownes, C. P. Giardina and R. S. Senock (2004)** An experimental test of the causes of forest growth decline with stand age. *Ecological Monographs* 74:393-414.
- Sayer J. and C. Elliott (2005)** The role of commercial plantations in forest landscape restoration. In: Forest Restoration in Landscapes: Beyond Planting Trees. S. Mansourian D. Vallauri and N. Dudley (eds.). Springer, New York. pp:379-383.
- Stape J. L., D. Binkley, W. S. Jacob and E. N. Takahashi (2006)** A twin-plot approach to determine nutrient limitation and potential productivity in eucalyptus plantations at landscape scales in Brazil. *Forest Ecology and Management* 223:358-362.
- Suzuki R., S. Takeda and H. M. Thein (2007)** Chronosequence changes in soil properties of teak (*Tectona grandis*) plantations in the Bago mountains, Myanmar. *Journal of Tropical Forest Science* 19:207-217.
- Tamarit-Urías J. C., H. M. De los Santos-Posadas, A. Aldrete, J. R. Valdez-Lazalde, H. Ramírez-Maldonado y V. Guerra-De la Cruz (2014)** Ecuaciones dinámicas de índice de sitio para *Tectona grandis* en Campeche, México. *Agrociencia* 48:225-238.
- Ugalde A. L. A. (2013)** Teak: New Trends in Silviculture, Commercialization and Wood Utilization. International Forestry and Agroforestry and FAO. San José, Costa Rica. 552 p.
- Vaides-López E. E. (2004)** Características de Sitio que Determinan el Crecimiento y Productividad de teca (*Tectona grandis* L. F.) en Plantaciones Forestales de Diferentes Regiones de Guatemala. Programa de Enseñanza para el Desarrollo y la Conservación. Centro Agronómico Tropical de Enseñanza e Investigación (CATIE). Turrialba, Costa Rica. 81 p.