



INTERACCIONES RADICALES Y AÉREAS EN LA ASOCIACIÓN AGROFORESTAL CEDRO-LIMÓN-CHAYA

[ABOVE AND BELOW GROUND INTERACTIONS IN THE AGROFORESTAL ASSOCIATION RED CEDAR-PERSIAN LIME-CHAYA]

Jesús Mao Estanislao Aguilar-Luna^{1*}, Francisco Javier Solorio-Sánchez², Salvador Hernández-Daumás³, Esperanza Huerta-Lwanga³, Pedro Antonio Macario-Mendoza¹

¹El Colegio de la Frontera Sur - Unidad Chetumal. Av. Centenario km 5.5, A.P. 424, C.P. 77014. Chetumal, Quintana Roo, México. *E-mail: laquilar@ecosur.mx,

²Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma de Yucatán. Carr. Mérida-Xmatkuil km 15.5, A.P. 116, C.P. 97100. Mérida, Yucatán, México.

³El Colegio de la Frontera Sur - Unidad Villahermosa. Carr. Villahermosa-Reforma km 15.5, C.P. 86280. Villahermosa, Tabasco, México.

* Corresponding author

RESUMEN

Se analizaron las interacciones radicales y aéreas en la asociación agroforestal 'cedro-limón-chaya', para conocer su densidad de plantación (DP) óptima inicial, en Quintana Roo, México. El cedro y el limón se establecieron en un círculo 'Nelder' de 3154 m² que consistió en 20 círculos concéntricos alternando cedros y limones a 1.50 m de distancia y 10 plantas por círculo; la chaya se estableció en marco rectangular a 1.50 x 3.00 m, superpuesta al círculo 'Nelder'. Se definieron ocho DP de 2602 a 3772 pl·ha⁻¹ con 10 repeticiones, para evaluar la longitud de la raíz principal (LRP), radio de exploración radical (RER), interacción radical (IR), altura de planta (AP), diámetro de copa (DC), interacción aérea (IA) y fertilidad del suelo (FS). El crecimiento intraespecífico presentó diferencia estadística ($P \leq 0.05$) al pasar de una DP a otra DP, mientras que el crecimiento interespecífico manifestó en las especies su distinto hábito de crecimiento. La asociación propició en el suelo una disminución de ± 2 % en fósforo, e incrementos de ± 14 % en MO y de ± 10 % en N, en todas las DP. La IR fue aumentando en relación directa con la DP, alcanzando su valor más alto (64 ± 5.8 %) a 3772 pl·ha⁻¹; la IA también aumentó en relación directa con la DP, su valor más alto (52 ± 3.1 %) fue a 3772 pl·ha⁻¹; por lo tanto, a mayor DP mayor IR e IA, a los 20 meses después de la plantación.

Palabras clave: *Cedrela odorata*; *Citrus latifolia*; *Cnidoscolus chayamansa*; densidad de plantación; diseño 'Nelder'.

SUMMARY

Above and below ground interactions were analyzed in the agroforestry association 'red cedar-Persian lime-chaya', to know the initial optimum planting density (PD), in Quintana Roo, Mexico. Red cedar and Persian lime were placed in a 'Nelder' circle of 3154 m² which consisted of 20 concentric circles alternating red cedars and Persian limes to 1.50 m apart and 10 plants per circle; chaya rectangular frame was set at 1.50 x 3.00 m, superimposed on the 'Nelder' circle. Defined eight PD 2602 to 3772 pl·ha⁻¹ with 10 repetitions, to evaluate the length of main root (LMR), radical exploration range (RER), below ground interaction (BGI), plant height (PH), crown diameter (CD), above ground interaction (AGI) and soil fertility (SF). The growth intraspecific he present statistical difference ($P \leq 0.05$) when moving from one PD to another PD, while the growth interespecific manifested different growth habit. The agroforestry association propitious in soil decreased phosphorous ± 2 %, and increases organic matter ± 14 % and nitrogen ± 10 % on all PD. The BGI was increased in direct relation with the PD, reaching its highest value (64 ± 5.8 %) to 3772 pl·ha⁻¹; the AGI also increased in direct relation with the PD, its highest value (52 ± 3.1 %) went to 3772 pl·ha⁻¹; therefore, to higher PD increased BGI and AGI, at 20 months after planting.

Key words: *Cedrela odorata*; *Citrus latifolia*; *Cnidoscolus chayamansa*; planting density; 'Nelder' design.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas agroforestales (SAF) son formas de uso y manejo de los recursos naturales, en los cuales las especies perennes leñosas son utilizadas en asociación deliberada con cultivos agrícolas y/o con animales en el mismo terreno, de manera simultánea o en secuencia temporal (Nair, 1997). En los SAF existen asociaciones de especies (componentes) que permiten tener estructuras morfológicas diferentes, con la finalidad de hacer un mejor aprovechamiento del espacio vertical y horizontal. Por ello, en los SAF se pretende optimizar las interacciones entre las especies y con el ambiente físico, para obtener un incremento en la producción total. La mayoría de las interacciones entre los componentes de los SAF se han enfocado en la porción aérea, buscando árboles de propósitos múltiples con un desarrollo de copas a diferentes alturas para aprovechar al máximo la energía luminosa. Sin embargo, la competencia por recursos puede darse tanto en la porción aérea como en la porción subterránea de las especies asociadas (García-Barrios, 2003).

Las interacciones se refieren a la influencia de un componente sobre el desempeño de otros componentes y del sistema como un todo. Las interacciones entre especies asociadas pueden ser complementarias (positivas), neutrales o competitivas (detrimentales). Las interacciones complementarias mejoran el crecimiento y permiten un uso eficiente del agua, luz, nutrientes y espacio físico. Las neutrales mantienen el nivel de crecimiento y la productividad. Las interacciones competitivas generan limitantes en el crecimiento debido a una desigual competencia por recursos, favoreciendo la presencia de plagas, enfermedades, maleza, alelopatía, entre otros. (García-Barrios, 2003). Aunque las interacciones complementarias y competitivas pueden ocurrir simultáneamente en un SAF, el efecto combinado de las interacciones competitivas es menor que el efecto combinado de las interacciones complementarias (Young, 1997). Esta hipótesis justifica a los SAF y promueve que, sí los recursos existentes son subutilizados o inutilizados en un sistema de monocultivo, entonces el arreglo temporal y/o espacial de los árboles producirá interacciones complementarias (Cannel *et al.*, 1996). Sin embargo, la oportunidad de una complementariedad probablemente va a estar limitada, a menos que las especies difieran en su duración, arquitectura de planta o patrón de distribución (Casanova *et al.*, 2007).

A nivel de sistemas radicales, son deseables aquellas especies cuyas raíces sean agresivas con relación a las del cultivo asociado, manifestando un crecimiento lateral profundo y una alta plasticidad. Las características de las raíces, particularmente su patrón de distribución (tanto vertical como horizontal), tienen

un papel importante en el éxito de los SAF. Sin embargo, las restricciones en el desarrollo de los sistemas radicales pueden deberse a mecanismos por medio de los cuales las plantas evitan la competencia inter e intraespecífica (Casanova *et al.*, 2007). En este sentido, las especies no competitivas pueden no ser tan eficientes como las especies competitivas en capturar nutrientes y mejorar la estructura del suelo a través de la actividad radical (García-Barrios, 2003).

Según Hagggar (1999) existen muchas y diversas especies que se pueden elegir para establecer un SAF, dependiendo de la finalidad que se busque. De ellas, el cedro rojo (árbol forestal maderable), el limón 'Persa' (arbusto frutal) y la chaya (arbusto de hojas comestibles), presentan cualidades que permiten asociarlas debido a su adaptación a las condiciones edáfico-ambientales, su distinto hábito de crecimiento y el conocimiento local que de ellas se tiene; lo cual fue corroborado por Aguilar-Luna (2005) mediante un índice de importancia cultural y por Granados-Sánchez *et al.* (1999) al estudiar los solares mayas.

La densidad de plantación (DP) es un factor agronómico de manejo que influye en el desarrollo de las especies; se refiere al número de plantas establecidas en un área determinada y tiene un efecto en todas las etapas del desarrollo de las plantas debido a la competencia por agua, luz, nutrientes y espacio físico. La DP puede modificar el medio ambiente, causando efectos en la planta tales como: aumento o disminución del crecimiento y desarrollo, así como de la producción de fotosintatos, debido a la competencia entre plantas. Un buen manejo de este factor, puede crear un medio ambiente ideal para el adecuado crecimiento del cedro, limón y chaya, en asociación. Trabajos sobre interacciones son poco frecuentes en SAF debido al conflicto inherente entre complementariedad y competitividad. Por lo anterior, el objetivo de esta investigación fue analizar las interacciones radicales y aéreas en la asociación agroforestal 'cedro-limón-chaya', para conocer su densidad de plantación óptima inicial.

MATERIAL Y MÉTODOS

El experimento se realizó de septiembre del 2008 a mayo del 2010 en Noh-Bec, Quintana Roo, México (19°06' N, 88°10' O y 11 msnm); presentó una temperatura media anual de 25.7 °C, 1562.4 mm de precipitación anual y 1404.3 mm de evaporación anual. El experimento se estableció en una parcela con suelo calcáreo "yaaxhoom" (según la clasificación maya) o vertisol pélico (según la clasificación de la FAO-UNESCO); sus características principales: color negro, profundo, de buen drenaje y fértil (WRB, 2010).

Se trabajó en una plantación agroforestal de 20 meses, que incluyó plantas de cedro rojo (*Cedrela odorata* L.), limón 'Persa' (*Citrus latifolia* Tan.) y chaya (*Cnidoscolus chayamansa* McVaugh). Para evaluar distintas DP se utilizó un diseño de plantación 'Nelder' (Nelder, 1962) para cedros y limones, el cual consistió en 20 círculos concéntricos alternando cedros y limones a 1.50 m de distancia entre ellos y 10 plantas por círculo; la altura inicial de los cedros fue de 25 cm y la de los limones de 50 cm; el portainjerto utilizado en limón fue naranjo agrio (*Citrus aurantium* L.). Superpuesto al círculo 'Nelder', y en la misma de superficie (3154 m²), se estableció el cultivo de chaya en un diseño en marco rectangular; para ello se ocuparon estacas semileñosas de 40 cm, distanciadas a 1.50 m entre plantas y 3.0 m entre líneas (Figura 1).

A los cedros se les hizo poda de formación a los 6 y 12 meses; a los limones se les quitaron los chupones (brotes vigorosos en torno al tallo) cada dos meses durante el primer año; a las chayas se les realizó una poda de formación a los 8 y 16 meses, dejando las plantas a una altura de 1 m; los residuos de las podas fueron picados en trozos de ±20 cm, los cuales se dejaron sobre la superficie del suelo para que funcionaran como cobertura. La maleza fue controlada con herbicida (paraquat, 2 L·ha⁻¹) además del chapeo (cortar la maleza con el machete) cada dos meses. Los tratamientos se definieron con base en la DP obtenida en el área de cada círculo del diseño 'Nelder' al asociar cedros, limones y chayas (Tabla 1).

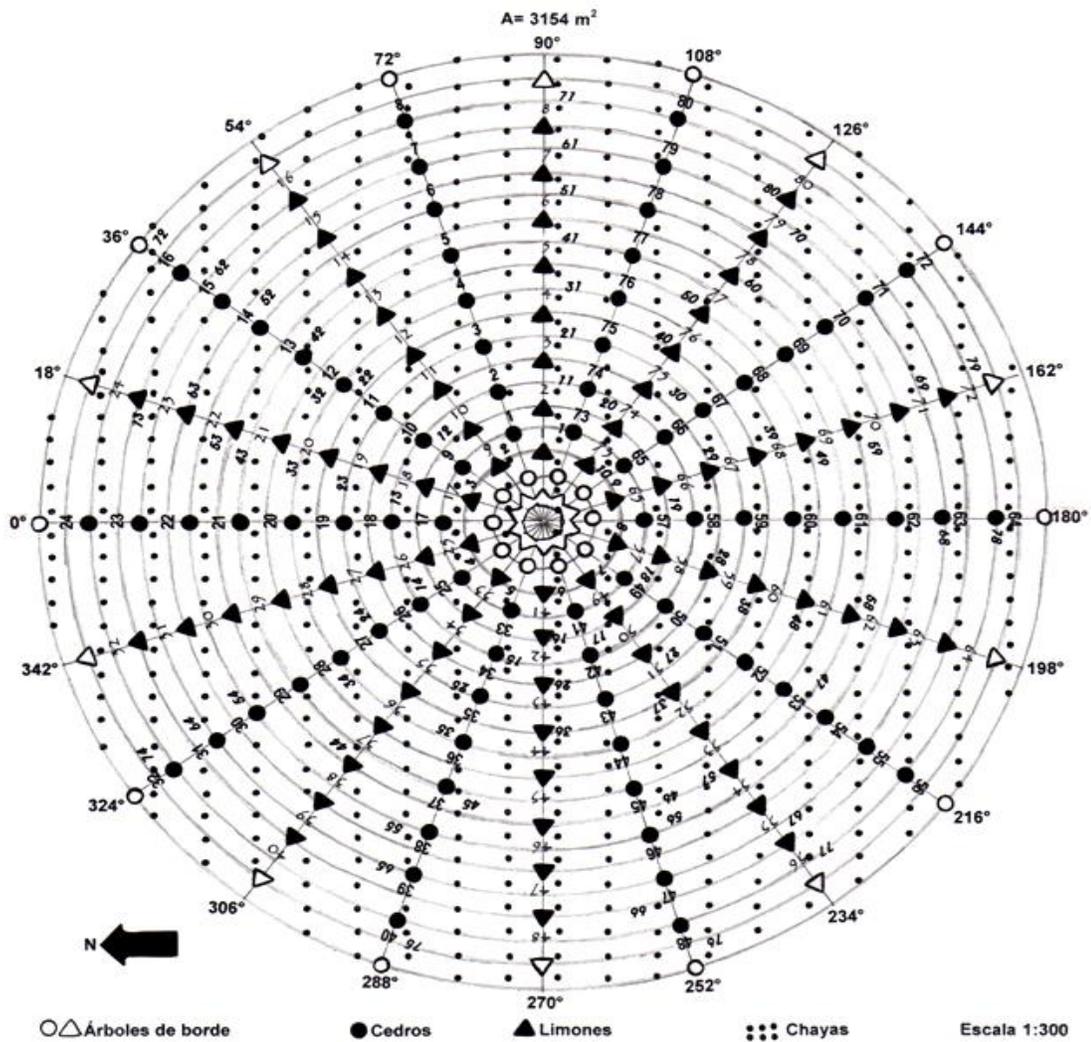


Figura 1. Diseño de plantación en círculo 'Nelder' superpuesto a un diseño de plantación en marco rectangular; para asociar cedros, limones y chayas, en un suelo vertisol pélico, en Quintana Roo, México.

Tabla 1. Descripción de tratamientos en la asociación agroforestal 'cedro-limón-chaya', en un suelo vertisol pélico, en Quintana Roo, México.

N	cedro			limón			chaya	Tratamiento (pl·ha ⁻¹)
	DC (m)	DA (m)	DP (pl·ha ⁻¹)	DC (m)	DA (m)	DP (pl·ha ⁻¹)	DP (pl·ha ⁻¹)	
1 [¶]	9.37	2.94	1134	6.37	2.00	1666	2222	
2	15.37	4.82	691	12.37	3.88	859	2222	T ₈ = 3772
3	21.37	6.71	497	18.37	5.77	578	2222	T ₇ = 3297
4	27.37	8.59	388	24.37	7.65	436	2222	T ₆ = 3046
5	33.37	10.48	318	30.37	9.54	349	2222	T ₅ = 2889
6	39.37	12.36	270	36.37	11.42	292	2222	T ₄ = 2784
7	45.37	14.25	234	42.37	13.31	250	2222	T ₃ = 2706
8	51.37	16.13	206	48.37	15.19	219	2222	T ₂ = 2647
9	57.37	18.02	185	54.37	17.08	195	2222	T ₁ = 2602
10 [¶]	63.37	19.90	167	60.37	18.96	176	2222	

N: Número de círculo; [¶] círculo usado como borde; DC: diámetro del círculo; DA: distancia entre árboles de la misma especie en el mismo círculo; DP: densidad de plantación en el círculo.

Se utilizó una muestra al azar de nueve plantas por tratamiento (tres de cedro, tres de limón y tres de chaya), para evaluar las siguientes variables:

a) Longitud de la raíz principal (LRP, cm), se midió el crecimiento en profundidad, utilizando una regla graduada; mediante el método de excavación (Young, 1997). La raíz principal en cedros y limones se determinó observando la continuación del eje principal (tallo); para la chaya (que fue macropropagada por estacas y que presentó por tal situación un sistema radical fibroso) se eligió la raíz que más profundizó y la más proximal al eje principal.

b) Radio de exploración radical (RER, cm), se midió el crecimiento radical horizontalmente (en la raíz más extensa y partiendo de la base del tallo); utilizando una cinta métrica (Stanley); mediante el método de excavación (Young, 1997).

c) Interacción radical (IR, %), se calculó el porcentaje de traslape o encuentro de los sistemas radicales de las tres especies en la misma DP, mediante el programa "Image Tool" versión 3.00 para Windows (Wilcox *et al.*, 2002), utilizando los datos de RER y LRP.

d) Altura de planta (AP, cm), distancia medida desde la base del tallo hasta la yema apical, utilizando un estadal (Haglof).

e) Diámetro de copa (DC, cm), se midió el diámetro ecuatorial N-S y E-O, de la porción aérea con una cinta diamétrica (Stanley).

f) Interacción aérea (IA, %), se calculó el porcentaje de traslape o encuentro de las copas de las tres especies en la misma DP, mediante el programa "Image Tool"

versión 3.00 para Windows (Wilcox *et al.*, 2002), utilizando los datos de DC.

g) Fertilidad del suelo (FS). Al inicio y al final del experimento se midieron los cambios ocurridos en la fertilidad, en cada uno de los tratamientos. Para ello se caracterizó el suelo mediante los siguientes parámetros físicoquímicos: densidad aparente (g·cm⁻³), pH, capacidad de intercambio catiónico (me 100 g⁻¹), materia orgánica (%), N total (%), P extraíble (mg·kg⁻¹), K intercambiable (me 100 g⁻¹). Se tomaron muestras de suelo (500 g) para su análisis en laboratorio, de 0 a 30 cm de profundidad (estrato de mayor concentración radical y absorción nutrimental).

La unidad experimental estuvo constituida por un árbol. La distribución de los tratamientos fue sistemática de acuerdo al diseño 'Nelder' (Nelder, 1962); con ocho tratamientos y 10 repeticiones cada uno. Los datos obtenidos en las diferentes variables de respuesta se sometieron a ANOVA independientes para cada especie, y pruebas de comparación medias por el método de Tukey a una $P \leq 0.05$, para un Modelo de Optimización Múltiple en Superficies de Respuesta (Montgomery, 2002); usando el software MINITAB 15 (Minitab, 2007).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Longitud de la raíz principal (LRP)

La LRP en cedros y limones no presentó diferencia estadística interespecífica al pasar de una DP a otra DP, mientras que en la chaya si hubo diferencia; quiere decir que los crecimientos de la raíz principal de cedros y los limones fueron homogéneos a cualquier DP, mientras que para la chaya el

crecimiento de la raíz principal fue inferior al de cedros y limones en condiciones homogéneas de profundidad máxima del suelo (45 cm en promedio) (Figura 2). La profundidad máxima del suelo pudo observarse mientras se hacia la excavación para hallar la raíz principal; a los 45 cm de profundidad se encontró material parental, el cual no permitió una mayor penetración de las raíces, atrofiando la raíz principal de cedros y limones; por lo que la exploración de capas profundas fue limitada, lo cual fue señalado por Osuna-Ceja *et al.* (2006) como patrón de resistencia física y mecánica del suelo. Los sistemas radicales de cedros y de limones fueron los que profundizaron más, de 45 a 48 cm; mientras que en la chaya profundizaron de 36 a 39 cm. Lo anterior es comprensible dado que las dos primeras especies presentaron sistemas radicales pivotantes al provenir de semilla, mientras que la chaya mostró un sistema radical fibroso porque su macropropagación fue asexual (por estacas caulinarias semileñosas). Al respecto, Hauggaard-Nielsen y Jensen (2005) afirmaron que cuando se tienen especies con hábito de crecimiento diferente, la extracción nutrimental difiere en una misma condición; por lo tanto la actividad de los sistemas radicales es complementaria.

Radio de exploración radical (RER)

El RER en cedros no mostró diferencia estadística, mientras que para limones y chayas si se presentó diferencia intraespecífica al pasar de una DP a otra DP (Figura 2). Lo cual sugiere que la distribución horizontal de los sistemas radicales, de la asociación 'cedro-limón-chaya', presentó complementariedad en DP 2602 a 3772 pl·ha⁻¹; es decir, el RER para la absorción de agua y nutrientes tuvo un patrón de distribución más equilibrado y un mayor crecimiento en altas DP, mismo que fue disminuyendo paulatinamente conforme la DP fue aumentando. También se presentó competitividad en DP de 2889 a 3772 pl·ha⁻¹, lo cual es lógico pues la DP fue aumentando. Conforme aumentó la DP el RER disminuyó para cedros hasta 73 cm y en limones hasta 44 cm; pero aumentó para chaya hasta 84 cm. Lo que indica que la competencia interespecífica por agua y nutrientes (zonas de agotamiento) va aumentando conforme aumenta la DP (Porter *et al.*, 1994); dependiendo del objetivo inmediato, el resultado puede ser benéfico para asociaciones interespecíficas, debido a que la competencia entre raíces de la misma especie es mayor que la competencia entre raíces de distintas especies (Casanova *et al.*, 2007). Los mayores crecimientos radicales de la asociación se obtuvieron en DP de 2602 pl·ha⁻¹, lo cual se debió a que en DP bajas hay mayor espacio de crecimiento para las plantas.

Interacción radical (IR)

A los 20 meses después de la plantación se presentó IR en las asociaciones 'cedro-cedro', 'cedro-limón', 'cedro-chaya', 'limón-limón', 'limón-chaya', 'chaya-chaya' y 'cedro-limón-chaya' (Tabla 2); lo quiere decir hubo un encuentro, interacción o traslape de los sistemas radicales a una DP determinada, aun y cuando las plantas son jóvenes. Lo anterior se debió en gran medida a que la DP de la chaya fue mayor que la DP de cedros y limones en el área de cada círculo (Figura 1 y Tabla 1). En estas asociaciones la IR fue aumentando conforme aumentó la DP, para la asociación 'cedro-limón-chaya' se obtuvo el valor más alto (64±5.8 %) a 3772 pl·ha⁻¹. Particularmente, en cedro hay que considerar que se deben realizar podas y aclareos lo cual puede modificar su distribución radical; en limón el crecimiento durante los primeros años es tan rápido que pronto agotan el área es asignada, por lo que la DP varía de 400 a 1400 árb·ha⁻¹, según se pase de una zona tropical a una zona subtropical (Rabe *et al.*, 1997; Medina-Urrutia *et al.*, 2004); en chaya no se tienen reportes al respecto.

Se puede hablar de una IR competitiva y complementaria simultánea en la asociación 'cedro-limón-chaya', porque los cedros y los limones disminuyeron su RER conforme aumentó la DP, para cedros (de 254 cm en DP de 2602 pl·ha⁻¹ a 181 cm en DP de 3772 pl·ha⁻¹) y para limones (de 175 cm en DP de 2602 pl·ha⁻¹ a 131 cm en DP de 3772 pl·ha⁻¹), sin dejar de considerar que una adecuada disponibilidad de nutrientes en el suelo, también favorece el observar sistemas radicales menos extensos (De Dorlodot *et al.*, 2007). Las chayas aumentaron su RER conforme aumentó la DP (de 104 cm en DP de 2602 pl·ha⁻¹ a 188 cm en DP de 3772 pl·ha⁻¹), lo que indica su gran plasticidad y habilidad de competencia por recursos cuando se asocia con otra especie, no forzando su sistema radical a desarrollarse en profundidad; resultados similares fueron reportados por Schaller *et al.* (2001) al asociar *Eucalyptus deglupta* con gramíneas. Según García-Barrios (2003), en esta facilitación indirecta de especies asociadas, la magnitud de los efectos positivos indirectos será mayor que los efectos negativos directos.

Altura de planta (AP) y diámetro de copa (DC)

Cedros, limones y chayas, presentan distinto hábito de crecimiento y manejo agronómico, razón por la cual resultó complicado encontrar una DP óptima en la cual las tres especies conjugaran sus objetivos principales de uso. Mediante el Modelo de Optimización Múltiple en Superficies de Respuesta (Montgomery, 2002), fue posible manejar una serie de posibles escenarios, con valores máximos individuales (Figura 3).

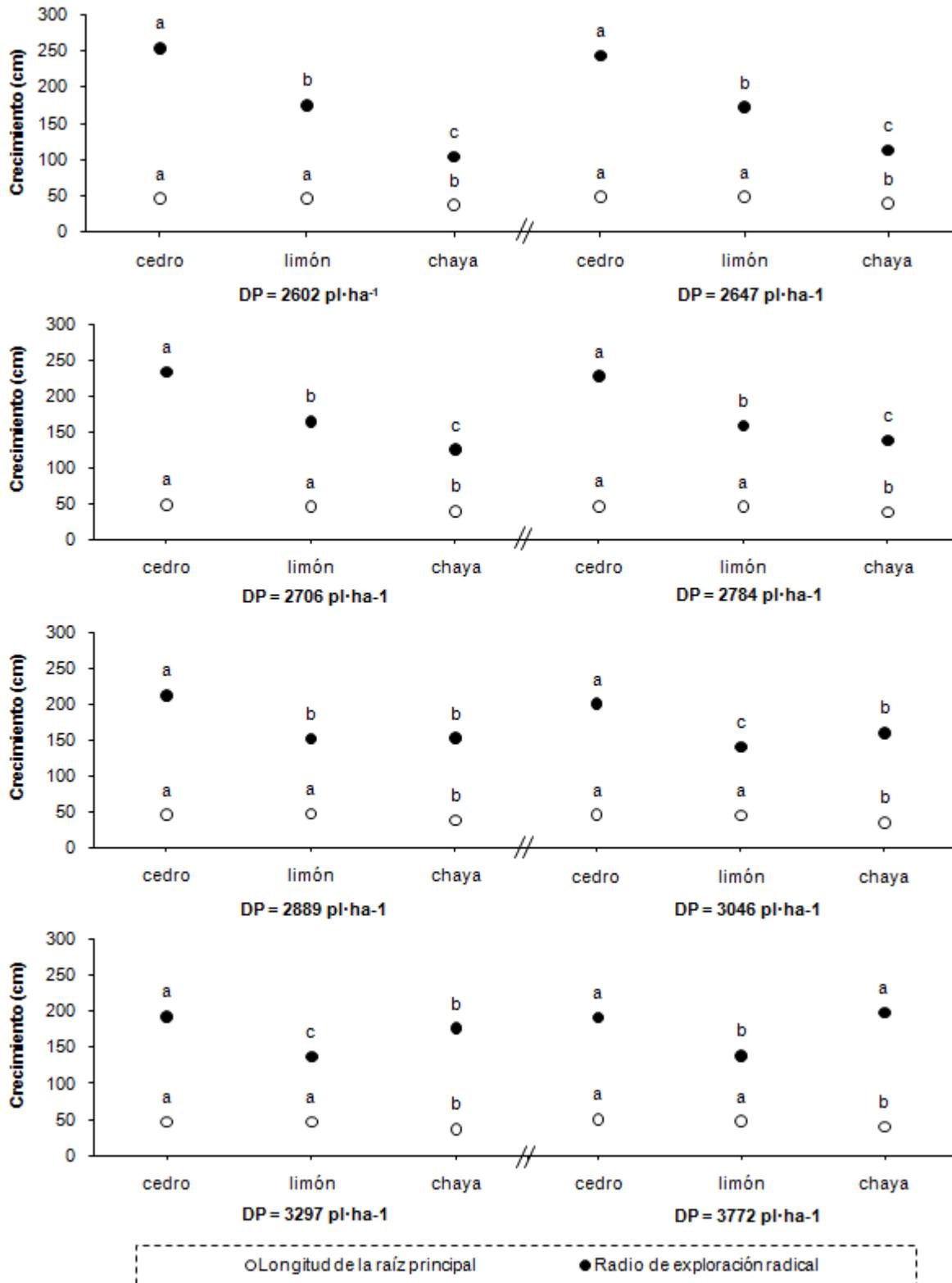


Figura 2. Longitud de la raíz principal y radio de exploración radical de cedros, limones y chayas, a los 20 meses después de la plantación, en un suelo vertisol pélico. Círculos con la misma letra en cada variable son iguales de acuerdo con el método de Tukey a una $P \leq 0.05$.

Tabla 2. Interacciones radicales y aéreas ocurridas a los 20 meses después de la plantación de cedros, limones y chayas, en un suelo vertisol pélico.

DP (pl·ha ⁻¹)	Ce-Ce	Ce-Li	Ce-Ch	Li-Li	Li-Ch	Ch-Ch	Ce-Li-Ch
			Interacción radical		(%)		
2602	0±0.1 c	0±0.1 c	8±2.2 c	0±0.1 c	9±2.2 c	22±2.8 b	8±1.6 c
2647	0±0.1 c	0±0.1 c	9±2.2 c	0±0.1 c	13±2.1 b	25±2.4 b	16±2.4 b
2706	0±0.1 c	0±0.1 c	11±2.1 b	0±0.1 c	18±2.4 b	28±2.9 b	24±2.5 b
2784	0±0.1 c	0±0.1 c	13±2.6 b	0±0.1 c	20±2.6 b	30±2.7 a	32±2.7 b
2889	0±0.1 c	1±0.2 b	17±2.7 b	1±0.1 b	24±2.3 a	33±2.9 a	40±3.6 a
3046	1±0.3 b	3±0.3 b	20±2.5 a	4±0.2 b	27±2.5 a	35±2.9 a	48±3.9 a
3297	3±0.5 a	5±1.1 a	26±2.4 a	7±0.5 a	30±2.7 a	38±3.1 a	56±4.1 a
3772	5±0.5 a	7±2.1 a	30±3.7 a	9±0.6 a	33±2.7 a	40±3.3 a	64±5.8 a
CV (%)	11.46	10.60	14.33	11.21	13.71	14.65	12.88
DMS	0.89	1.68	3.85	1.71	2.60	2.21	4.92
			Interacción aérea		(%)		
2602	0±0.1 c	0±0.1 c	22±2.1 b	0±0.1 c	35±2.1 b	35±3.3 b	9±0.2 c
2647	0±0.1 c	0±0.1 c	24±2.2 b	0±0.1 c	35±2.1 b	37±3.3 b	12±1.1 c
2706	0±0.1 c	0±0.1 c	25±2.3 b	0±0.1 c	39±2.5 b	40±3.2 a	20±1.5 b
2784	0±0.1 c	0±0.1 c	27±2.4 b	0±0.1 c	40±2.2 b	42±3.0 a	26±2.1 b
2889	0±0.1 c	0±0.1 c	31±2.3 a	1±0.1 b	42±2.3 a	44±3.0 a	35±2.7 b
3046	0±0.1 c	1±0.8 b	33±2.5 a	4±0.1 b	44±2.4 a	46±2.9 a	42±2.6 a
3297	1±0.1 b	3±1.5 b	35±2.2 a	7±0.3 a	45±3.0 a	48±3.0 a	46±2.8 a
3772	2±0.1 a	5±2.2 a	37±2.3 a	9±0.3 a	45±3.1 a	49±3.0 a	52±3.1 a
CV (%)	11.72	11.77	13.74	10.90	13.89	14.55	14.07
DMS	0.15	1.74	2.39	0.62	1.86	2.93	3.81

DP: densidad de plantación. Ce: cedro, Li: limón, Ch: chaya. CV: coeficiente de variación, DMS: diferencia mínima significativa. Medias con la misma letra dentro de cada columna son estadísticamente iguales de acuerdo con la prueba de Tukey a una $P \leq 0.05$.

El objetivo en cedro es la producción de madera, por ello el crecimiento en altura es fundamental en su etapa inicial; en la Figura 3A, las plantas de cedro tuvieron un incremento máximo en altura de 295.88 cm en una DP de 3270 pl·ha⁻¹; en esta DP el limón tuvo un incremento de 187.16 cm, que no fue el máximo, sin embargo no se vio perjudicado porque su tendencia es positiva; la chaya tuvo su incremento más bajo (202.71 cm) en esta DP, lo cual sugiere que DP altas no le favorecen cuando se encuentra en competencia interespecífica. El objetivo en limón es la producción de fruta, para ello se requiere de un buen desarrollo de copa que soporte la fructificación; en la Figura 3B, las plantas de limón alcanzaron un diámetro de copa de 204.60 cm en una DP de 3772 pl·ha⁻¹, donde también el cedro alcanzó su máximo valor (144.86 cm); sin embargo, esta densidad no es la más adecuada para que la chaya alcance su máximo valor. El objetivo en chaya es la producción de biomasa, el cual puede ser un reflejo de su porción aérea con el DC; en la Figura 3C, las plantas de chaya tuvieron un crecimiento máximo en DC de 203.79 cm en una DP de 2602 pl·ha⁻¹; sin embargo esta densidad no fue la más adecuada para que el cedro alcanzara su

máximo valor, mientras que para limón su crecimiento fue cercano a su valor máximo.

La presencia de la chaya (con un diseño de plantación en alta densidad y rápido crecimiento), permitió que la competencia por espacio y luz en la estratificación vertical, no repercutiera en los valores de AP y DC de cedros y limones (Figura 3A y 3B). Porque se le aplicaron podas a los 8 y 16 meses, con un periodo de recuperación de su porción aérea menor a 5 meses.

La competitividad interespecífica en la porción aérea presentó diferencia estadística en relación a las DP, en general, a mayor DP hubo competencia por recursos. El cedro alcanzó hasta 300 cm de AP y 165 cm de crecimiento anual a 3270 pl·ha⁻¹, y 143.70 cm de DC a 3772 pl·ha⁻¹; superando el crecimiento promedio anual obtenido en la Península de Yucatán que fue de 0.5 a 1 m en altura en una DP = 200 árb·ha⁻¹ (Cintron, 1990). El limón alcanzó hasta 201 cm de AP y 90.60 cm de crecimiento anual a 3046 pl·ha⁻¹, y 213.80 cm de DC a 2647 pl·ha⁻¹. La chaya alcanzó hasta 232 cm de AP y 198 cm de crecimiento anual a 2602 pl·ha⁻¹, y 219 cm de DC a 2784 pl·ha⁻¹. Para cedro se recomiendan

densidades altas, cuando el objetivo es la producción de madera, porque en ellas se presentaron los mayores crecimientos iniciales. Para limón se recomiendan densidades bajas, porque en ellas se desarrolló más su DC que está en relación directa con la fructificación. Para chaya se recomiendan densidades intermedias cuando se asocia con otras especies, y cuando el objetivo es la producción de biomasa.

El manejo de copas y aclareos en cedros y limones, dependen del objetivo en cuestión y del nivel de competencia por recursos; es dinámico a través del tiempo. Aunque en general, el cedro requiere de al menos 20 años para tener una copa bien desarrollada (Pennington y Sarukhán, 2005) y al limón hasta cinco años (Campbell y Malo, 1980). Lo cual es benéfico para la chaya en esta etapa inicial del SAF porque podrá aprovechar la energía luminosa que se filtra por las copas de cedros y limones; razón y causa del éxito de muchos SAF (Nair, 1997). En el mediano y largo plazo, el sombreado proporcionado por cedros será una limitante para el desarrollo y productividad de limones y chayas, para ello las prácticas de manejo como aclareos y podas serán fundamentales en las tres especies. En este sentido, la competencia por luz puede ser mucho más importante que la competencia radical en el SAF plantación-cultivo, debido al efecto de sombreado (Verinumbe y Okali, 1985).

Interacción aérea (IA)

A los 20 meses después de la plantación se presentó IA en las asociaciones 'cedro-cedro', 'cedro-limón',

'cedro-chaya', 'limón-limón', 'limón-chaya', 'chaya-chaya' y 'cedro-limón-chaya' (Tabla 2); lo quiere decir hubo un encuentro, interacción o traslape de las porciones aéreas a una DP determinada, aun y cuando las plantas son jóvenes. Lo anterior se debió en gran medida a que la DP de la chaya fue mayor que la DP de cedros y limones en el área de cada círculo (Figura 1 y Tabla 1). En estas asociaciones la IA fue aumentando conforme lo hizo la DP, para la asociación 'cedro-limón-chaya' se obtuvo el valor más alto (52±3.1 %) a 3772 pl·ha⁻¹, aun y cuando las copas de cedros y limones no estuvieron completamente desarrolladas.

Los crecimientos radicales y aéreos en la asociación, presentaron diferencias en una misma DP, lo que sugiere complementariedad más que competitividad debido a que son especies botánicamente distintas en las que se pueden manipular sus interacciones (García-Barrios, 2003). Al cedro, le favorecieron las DP altas para su crecimiento aéreo principalmente en AP (Figura 3A). En limón, el crecimiento aéreo se vio favorecido en bajas DP principalmente para DC (Figura 3B), resultados similares fueron obtenidos por Medina-Urrutia *et al.* (2004) en DP de 123 a 312 pl·ha⁻¹. La chaya mostró un comportamiento agresivo en cuanto a crecimiento y competitividad a cualquier DP; fue una especie con mayor plasticidad, cuya interacción con otras especies fue complementaria más que competitiva debido a su distinto nivel de competencia y capacidad de incrementar los niveles de MO y N en el suelo (Tabla 3).

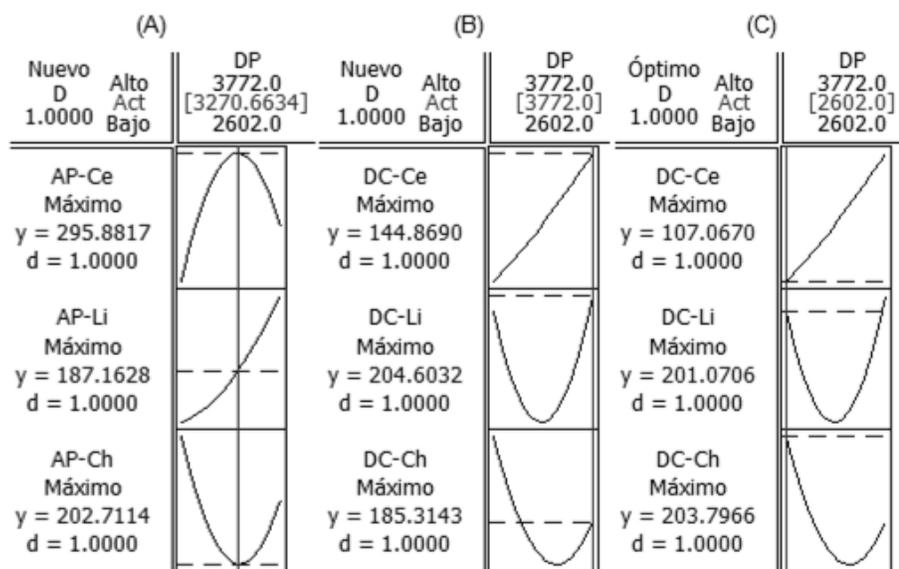


Figura 3. Posibles escenarios con valores máximos, en (A) altura de planta para cedro, en (B) diámetro de copa para limón, y en (C) diámetro de copa para chaya; a los 20 meses después de la plantación.

Fertilidad del suelo (FS)

Borges-Gómez *et al.* (2005) señalaron que la FS "yaaxhoom" es de las más altas en los suelos de la Península de Yucatán; lo cual se ha comprobado con los crecimientos obtenidos para cedro, limón y chaya; lo que indica una alta FS. En la Tabla 3 se observa que parámetros fisicoquímicos como: DAP, pH, CIC y K, no se modificaron a ninguna DP. Los que sí lo hicieron, fueron el P que disminuyó ± 2 % debido a que la chaya es un cultivo altamente extractor de este nutrimento, el N que se incrementó ± 10 % al igual que la MO en ± 14 %, en todas las DP. Los valores de estos dos últimos parámetros aumentaron en beneficio del suelo; aunque éste aumento fue más notable en DP altas (de 2889 a 3772 pl·ha⁻¹). Lo anterior pudo deberse a la deposición de residuos orgánicos al suelo,

dado que la MO se incorpora a la superficie del suelo en forma de hojarasca, por desprendimiento de raíces y podas (Young, 1997; García-Barrios, 2003).

Aunque ninguno de los componentes vegetales es un fijador biológico del N, este pudo aumentar en el suelo debido al aumento de MO y porque el efecto del sombreado y acolchado redujeron la pérdida por lixiviación y volatilización del N contenido en el suelo; resultados similares fueron obtenidos por Mafongoya *et al.* (1998). Aumentar el suministro de MO en el suelo a través de residuos orgánicos es la razón principal para la preferencia de árboles de rápido crecimiento con alta producción de biomasa en los SAF (Nair, 1997).

Tabla 3. Cambios fisicoquímicos ocurridos en un suelo vertisol pélico (0 a 30 cm de profundidad), a los 20 meses después de la plantación de cedros, limones y chayas.

DP (pl·ha ⁻¹)	DAP (g·cm ⁻³)	pH	CIC (me 100 g ⁻¹)	MO (%)	N (%)	P (mg·kg ⁻¹)	K (me 100 g ⁻¹)
Inicial							
2602	1.35	6.77	39.0	2.42	0.154	65.0	0.32
2647	1.37	6.59	40.0	2.50	0.150	57.5	0.33
2706	1.36	6.46	41.0	2.37	0.155	66.5	0.30
2784	1.37	6.59	43.5	2.34	0.158	75.0	0.33
2889	1.32	6.52	42.5	2.40	0.154	70.5	0.33
3046	1.33	6.42	42.5	2.38	0.158	67.0	0.33
3297	1.33	6.57	42.0	2.33	0.151	60.0	0.35
3772	1.32	6.54	40.5	2.46	0.150	58.0	0.32
Final							
2602	1.34 a	6.76 a	39.3 a	2.60 c	0.157 b	63.7 b	0.32 a
2647	1.35 a	5.60 a	40.1 a	2.60 c	0.157 b	56.3 c	0.32 a
2706	1.35 a	6.51 a	41.0 a	2.65 c	0.157 b	65.1 b	0.30 a
2784	1.36 a	6.55 a	43.2 a	2.77 b	0.162 b	73.5 a	0.33 a
2889	1.32 a	6.50 a	41.7 a	2.79 b	0.177 a	69.0 b	0.32 a
3046	1.32 a	6.51 a	42.4 a	2.79 b	0.179 a	65.6 b	0.32 a
3297	1.32 a	6.57 a	42.0 a	2.85 a	0.181 a	58.8 c	0.35 a
3772	1.33 a	6.55 a	41.0 a	2.88 a	0.181 a	56.8 c	0.32 a
CV (%)	17.00	14.99	20.67	12.83	12.77	11.56	16.14
(P _{≤0.5})	0.51 ^{ns}	0.82 ^{ns}	0.48 ^{ns}	0.001 ^{**}	0.003 ^{**}	0.0001 ^{**}	0.39 ^{ns}
DMS	0.62	0.83	1.78	0.27	0.55	4.40	0.11

DP: densidad de plantación; DAP: densidad aparente (método de la probeta); pH: potencial de hidrógeno (potenciómetro relación suelo/agua 1:2); CIC: capacidad de intercambio catiónico (extraído con acetato de amonio 1N, pH 7.0); MO: materia orgánica (método de Walkley y Black); N: nitrógeno total (método de Kjeldahl); P: fósforo extraíble (método de Olsen); K: potasio intercambiable (extraído con acetato de amonio 1N, pH 7.0). Medias con la misma letra en columnas son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey; CV: coeficiente de variación; DMS: diferencia mínima significativa; **: altamente significativo; ^{ns}: no significativo.

CONCLUSIÓN

Los componentes vegetales en la asociación agroforestal 'cedro-limón-chaya', presentaron diferencias en el crecimiento radical y aéreo, en densidades de 2602 a 3772 pl·ha⁻¹. Se presentó interacción radical e interacción aérea en todas las densidades de plantación aun y cuando las plantas fueron jóvenes. Individualmente, al cedro le favorecen las densidades altas, de 3046 a 3297 pl·ha⁻¹ principalmente para su crecimiento en altura; al limón le favorecen las densidades intermedias, de 2647 a 2706 pl·ha⁻¹ principalmente para su crecimiento en diámetro de copa; mientras que la chaya es altamente competitiva a cualquier densidad. La asociación como tal, propició en el suelo una disminución de ± 2 % en fósforo, e incrementos de ± 14 % en MO y de ± 10 % en N, en densidades de 2602 a 3772 pl·ha⁻¹. La interacción de la porción radical y porción aérea en la asociación 'cedro-limón-chaya', fue aumentando en relación directa con la densidad de plantación, alcanzando valores de 64 ± 5.8 y 52 ± 3.1 %, respectivamente, a los 20 meses después de la plantación.

REFERENCIAS

- Aguilar-Luna, J.M.E. 2005. Intervención agroforestal para el mejoramiento de un huamil en Noh-Bec, Quintana Roo. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Chapingo. 124 p.
- Borges-Gómez, L., Escamilla-Bencomo, A., Soria-Fregoso, M., Casanova-Villareal, V. 2005. Potasio en suelos de Yucatán. *Terra Latinoamericana*. 23(4):437-445.
- Campbell, C., Malo, S. 1980. The potential of *Citrus* species and their relatives in the American tropics. *Proceedings American Society Horticultural Sciences. Tropical Regions*. 24:51-58.
- Cannel, M.G.R., Van Noordwijk, M., Ong, C.K. 1996. The central agroforestry hypothesis: the trees must acquire resources that the crop would not otherwise acquire. *Agroforestry Systems*. 34:27-31.
- Casanova, F., Ramírez, L., Solorio, F. 2007. Interacciones radiculares en sistemas agroforestales: mecanismos y opciones de manejo. *Avances en Investigación Agropecuaria*. 11(3):41-52.
- Cintron, B. 1990. *Cedrela odorata* L. Cedro Hembra, Spanish Cedar. In: Burns, R., Honkala, B. (eds.). *Silvics of North America*: 2. Hardwoods. *Agricultural Handbook* 654. Washington D. C., E.U.A. pp. 250-257.
- De Dorlodot, S., Forster, B., Pagès, L., Price, A., Tuberosa, R., Draye, X. 2007. Root system architecture: opportunities and constraints for genetic improvement of crops. *Trends in Plant Science*. 12(10):474-481.
- García-Barrios, L. 2003. Plant-plant interactions in tropical agriculture. In: Vandermeer, J. (ed.). *Tropical Agroecosystem*. CRC Press, Florida, E.U.A. pp. 11-58.
- Granados-Sánchez, D., López-Ríos, G.F., Osorio, C. 1999. El solar en la zona maya de Quintana Roo. *Revista Chapingo Serie Horticultura*. 5(2):169-187.
- Haggar, J. 1999. *Manual Agroforestal para la Península de Yucatán*. ICRAF-México. 150 p.
- Hauggaard-Nielsen, H., Jensen, E.S. 2005. Facilitive root interactions in intercrops. *Plant and Soil*. 274:237-250.
- Mafongoya, P.L., Giller, K.E., Palm, C.A. 1998. Decomposition and nitrogen release patterns of tree pruning's and litter. *Agroforestry Systems*. 38:77-97.
- Medina-Urrutia, V.M., Becerra-Rodríguez, S., Ordaz-Ordaz, E. 2004. Crecimiento y rendimiento del limón mexicano en altas densidades de plantación en el trópico. *Revista Chapingo Serie Horticultura*. 10(1):43-49.
- Minitab, Inc. 2007. Software para estadísticas de Minitab, Versión 15 para Windows, State College, Pennsylvania. Disponible en: <http://www.minitab.com> [Consultada: junio 2010].
- Montgomery, D. 2002. *Diseño y Análisis de Experimentos*. 2da. edición, Limusa, D.F., México.
- Nair, P.K.R. 1997. *Agroforestería*. Centro de Agroforestería para el Desarrollo Sostenible, Universidad Autónoma Chapingo, México.
- Nelder, J.A. 1962. New kinds of systematic designs for spacing experiments. *Biometrics*. 18(3):283-307.
- Osuna-Ceja, E., Figueroa-Sandoval, B., Oleschko, K., Flores-Delgadillo, M., Martínez-Menes, M., González-Cossío, F. 2006. Efecto de la estructura del suelo sobre el desarrollo radical

- del maíz con dos sistemas de labranza. *Agrociencia*. 40:27-38.
- Pennington, T.D., Sarukhán, J. 2005. Árboles Tropicales de México. 2da edición, Fondo de Cultura Económica, ONU-FAO, UNAM, México.
- Porter, P.S., Comerford, N.B., Escamilla, J.A. 1994. Use of thiesen areas in models of nutrient uptake in forested ecosystem. *Soil Science Society American Journal*. 58(1):210-215.
- Rabe, E., Warrington, J., Tona, J. 1997. Spacing densities and economic perspective. *Proceedings of the International Society for Citriculture*. 2:825-831.
- Schaller, M., Schroth, G., Beer, J., Jiménez, F. 2001. Interacciones radiculares entre *Eucalyptus deglupta* y gramíneas competitivas. *Agroforestería en las Américas*. 8(30):44-47.
- Verinumbe, I., Okali, D.U. 1985. The influence of coppiced teak (*Tectona grandis* L.F.) regrowth and roots on intercropped maize (*Zea mays* L.). *Agroforestry System*. 3:381-386.
- Wilcox, D., Dove, B., Doss, M., Greer, D. 2002. UTHSCSA Image Tool for Windows Version 3.00. The University of Texas Health Science Center in San Antonio. E.U.A.
- WRB-World Reference Base for Soil Resources. 2010. Classification key. FAO. Disponible en: <http://www.fao.org/ag/agl/agll/wrbnewkey> [Consultada: marzo 2010].
- Young, A. 1997. *Agroforestry for Soil Management*. 2nd ed. CAB International / ICRAF. Wallingford / Nairobi, Kenya.

Submitted July 20, 2010 – Accepted September 20, 2010
Revised received October 26, 2010