

ARTÍCULO CIENTÍFICO

**Efecto de cinco sustratos en el contenido foliar de nutrientes y crecimiento inicial de tres especies forestales empleadas en Mesoamérica**

Julio Calvo-Alvarado<sup>1</sup>  
Dagoberto Arias Aguilar<sup>1</sup>  
Cesar Jiménez Rodríguez<sup>1</sup>  
Juan Carlos Solano Montero<sup>1</sup>

**Resumen**

Se estableció un ensayo para evaluar el efecto de cinco sustratos en el crecimiento, contenido foliar de nutrientes y clorofila (valores SPAD-502) de tres especies forestales. Los sustratos fueron: tres tipos de suelos (Ultisol, Andisol, Inceptisol) y de dos suelos modificados; Ultisol mejorado con  $\text{CaCO}_3$ +NPK y Andisol con NPK. Las especies seleccionadas fueron *Gmelina arborea* (L.) Roxb (melina), *Tectona grandis* L.f. (teca) y *Swietenia macrophylla* King (caoba). Se incluyó en los ensayos clones de teca y de melina. Se concluye que el sustrato de Ultisol mejorado tiene tasas de crecimientos comparables o mejores que los otros sustratos, lo que corrobora que este tipo de suelo se puede mejorar para proyectos de reforestación. Las interacciones entre especies y los niveles de fertilidad son distintas, pero en general el nivel de fertilidad, el pH, la saturación intercambiable de acidez en porcentaje (SA%) y el nivel de K son factores importantes que controlan el buen crecimiento y se relacionan con la concentración de nutrientes foliares. Teca es la especie que tuvo mayores concentraciones foliares de P, Fe, Cu y B, mientras que melina concentró más N, Ca, Mg, Zn y Mn. Los clones de teca y melina muestran una tendencia a tener menor concentración de Fe foliar con respecto a los arbolitos. Las lecturas de clorofila según el SPAD no brindan consistencia suficiente para ser empleadas como indicadores de vigor de planta.

**Palabras clave:** Nutrimientos foliares, Encalado, Fertilización, Clones, Sustratos, Suelos Tropicales, *Gmelina arborea*, Melina, *Tectona grandis*, Teca, *Swietenia macrophylla* King, Caoba, SPAD 502, Costa Rica.

**Abstract**

**Effect of five soil treatments on nutrient foliar concentration and initial growth of three tree species used in Mesoamerica.** A trial was established to evaluate the effect of five soil treatments in the growth, foliar nutrient concentration and chlorophyll concentration (SPAD-502 values) of three tree species. The selected soil treatments were three types of soils ((Ultisol, Andisol, Inceptisol) and two improved soils: Ultisol+ $\text{CaCO}_3$ +NPK and Andisol+NPK. The tree species were *Gmelina arborea* (L.) Roxb. (Gmelina), *Tectona*

<sup>1</sup> Instituto Tecnológico de Costa Rica. [jucalvo@itcr.ac.cr](mailto:jucalvo@itcr.ac.cr), [darias@itcr.ac.cr](mailto:darias@itcr.ac.cr), [cjiménez@itcr.ac.cr](mailto:cjiménez@itcr.ac.cr)

*grandis* L.F. (Teak) and *Swietenia macrophylla* King. (Mahogany). Clones of Teak and Gmelina were also included in the trial. It is concluded that the Ultisol+CaCO<sub>3</sub>+NPK treatment can result in similar or better growth rates than the other soil treatments, corroborating that the management of Ultisols is possible for reforestation. The soil and plant interactions are different among species but in general the trend indicates that soil pH, sum of base, exchangeable acidity in % (SA%) and K, are important factors that control plant growth and foliar nutrient concentrations. Teak is the species that has more foliar concentration of P, Fe, Cu y B, while Gmelina has more foliar concentration of N, Ca, Mg, Zn y Mn. Teak and Gmelina clones show a tendency to have less concentration of foliar Fe than tree seedlings. Chlorophyll concentration according to SPAD values are not consistent enough to be used as an index of plant vigor.

**Keywords:** Foliar nutrients, Soil liming, Soil fertilization, Clones, Soil treatments, Tropical soils, *Gmelina arborea*, Gmelina, *Tectona grandis*, Teak, *Swietenia macrophylla* King, Mahogany, SPAD 502, Costa Rica.

## INTRODUCCIÓN

Mesoamérica tiene una gran variedad de suelos e interacciones climáticas. La región, al ubicarse en la zona tropical, cuenta con la presencia de suelos con problemas de acidez y baja fertilidad (Sánchez, 1976). Muchos de estos suelos han sido sometidos a usos agropecuarios por varias décadas, por lo que presentan degradación de sus propiedades físico-químicas (Montagnini *et al*, 2003). Estos suelos son sujetos a proyectos de reforestación comercial con especies de rápido crecimiento, en los cuales es importante disminuir los costos de establecimiento y manejo a lo largo del turno de cosecha. Parte de las estrategias básicas para reducir costos se encuentran inmersas en técnicas silviculturales tales como: preparación de sitio con mecanización para descompactar el suelo, siembra de árboles al inicio de la estación lluviosa (maximizando el crecimiento y sobrevivencia ante el periodo de estación seca); control de malezas y aplicación de enmiendas (usualmente carbonato de calcio y fertilizantes), todas ellas dirigidas a que las plántulas logren un buen crecimiento durante los primeros años (Sotomayor *et al*, 2002).

La investigación en nutrición de especies forestales tropicales es reciente y se encuentra poca información relacionada a nuestro medio, sobre todo con referencia a especies locales que apenas se introducen en sistemas agroforestales o de reforestación. El estudio del efecto de diferentes tipos de suelos, del encalado y la fertilización en el crecimiento de los arbolitos en la etapa de establecimiento, es de gran importancia para asegurar el crecimiento inicial de las especies. Igualmente es importante generar información sobre las relaciones entre la fertilidad del suelo, fertilización, encalado y la concentración de nutrientes foliares por especie, de tal manera que se pueda apreciar los rangos de respuesta de cada especie en diferentes tipos de suelo y tratamientos.

En este artículo se evalúa el efecto de cinco sustratos en el crecimiento inicial y el contenido foliar de nutrientes de tres especies forestales, empleadas en proyectos de reforestación o sistemas agroforestales en Mesoamérica. Además de evaluar el efecto en tres especies, se aprovechó el ensayo para evaluar el efecto en los clones de dos de estas especies, con la intención de explorar igualmente el efecto de la selección genética en el contenido foliar de nutrientes y su respuesta al tipo de sustratos. El objetivo es estudiar el impacto de la aplicación de enmiendas en el crecimiento inicial de las especies/clones, la diferencia de crecimiento según el tipo de sustrato y la respuesta de las especies/clones al tipo de suelo y enmiendas en el contenido foliar de nutrientes.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Diseño experimental

Un ensayo de sustratos fue establecido en enero del 2004 en el vivero forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), en Santa Clara (Alajuela, Costa Rica) (N10°21'40" - O84°30'26"), que corresponde a la Zona de Vida Bosque Muy Húmedo Tropical según el sistema de clasificación de Holdridge (1967). El diseño estadístico fue de cuatro bloques completos al azar, con parcelas experimentales de cuatro arbolitos por especie en macetas plásticas de 30 cm de diámetro por 35 cm de alto. Los arbolitos se plantaron con al menos 10 cm de altura y el ensayo se dejó a cielo abierto, sin sombra o riego, para simular las condiciones de campo cuando se realiza el trasplante. El ensayo tuvo dos controles manuales de hierbas durante el experimento y una evaluación completa a finales de abril del 2004; se midieron: altura total, diámetro basal y sobrevivencia (Figura 1).



**Figura 1.** Ilustraciones del diseño experimental establecido en la sede del Instituto Tecnológico de Costa Rica en Santa Clara (Alajuela). a) Emplazamiento de 4 bloques experimentales; b) Efecto de sustratos en *Swietenia macrophylla* y c) en *Tectona grandis*.

### Selección de especies

Tres especies fueron seleccionadas para este ensayo: *Gmelina arborea* (L.) Roxb. (melina) y *Tectona grandis* L.f. (teca) por su importancia en la reforestación comercial (Weaver, 1993; Francis, 2003; Kijkar, 2003; Fonseca, 2004; Rojas *et al*, 2004; Arce y Barrantes, 2006) y *Swietenia macrophylla* King (caoba) por ser una especie de alto valor comercial y adaptada a sistemas agroforestales (Francis, 1991; Rodríguez, 1999; Calvo-Alvarado, 2000; Niembro, 2003). Los

arbolitos fueron adquiridos en el vivero comercial HERPA (Hernández Paniagua) en Horquetas de Sarapiquí (Heredia) y provenían de germoplasma de árboles semilleros seleccionados, en el caso de la caoba, o de semillas compradas al huerto semillero del Centro Agrícola Cantonal de Hojancha en el caso de la teca y la melina. También se adquirieron clones de melina producidos en “*pellets*” del vivero de CODEFORSA (Comisión de Desarrollo Forestal de San Carlos) y de teca del vivero del ITCR en Santa Clara (Proyecto GenFores). Ambos clones provienen de al menos cinco fuentes genéticas seleccionadas por crecimiento, forma y adaptabilidad.

### Selección de sustratos y análisis químicos

Tres sustratos básicos fueron empleados en este estudio: suelos Andisoles (volcánicos) de las faldas orientales del volcán Irazú, Ultisoles (residual) e Inceptisoles (aluviales). En cada sitio se colectó suficiente sustrato de los primeros 10 cm del suelo, el mismo fue mezclado hasta homogenizarlo antes de llenar cada maceta. De esta mezcla se colectó una muestra de 0.5 kg para los análisis químicos realizados en el Laboratorio de Suelos de la Universidad de Costa Rica (CIA-UCR). Los protocolos de los análisis químicos son los recomendados para suelos tropicales: pH en agua, acidez, Ca y Mg con KCl 1M; P, K, Zn, Fe, Mn y Cu con Olsen modificado a pH 8 (Laboratorio de Suelos de la Universidad de Costa Rica, Sánchez, 1976; Bertsch, 1995, 1986).

También se calcularon las siguientes variables: a) capacidad de intercambio catiónico efectivo (CICE) como la suma de las bases (Ca, Mg, K) y la acidez intercambiable (Al), b) la saturación de bases en porcentaje con la ecuación 1 y c) saturación intercambiable de acidez en porcentaje con la ecuación 2:

$$Sat - Bases\% = \frac{Ca + Mg + K}{CICE} \times 100 \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$SA\% = \frac{Acidez}{CICE} \times 100 \quad (\text{Ecuación 2})$$

Dos sustratos fueron preparados para evaluar el efecto de enmiendas en los suelos de baja fertilidad. En teoría, la aplicación de estas enmiendas debe de corregir las deficiencias nutricionales más significativas de estos dos suelos. Se aplicaron 75 g por maceta<sup>-1</sup> de NPK (10-30-10) al suelo Andisol y 75 g maceta<sup>-1</sup> de NPK (10-30-10) al suelo Ultisol, corrigiendo la saturación de acidez de un 50% al 10%. La aplicación realizada es equivalente a 1.7 tons ha<sup>-1</sup> de CaCO<sub>3</sub>. El cálculo de la cantidad de CaCO<sub>3</sub> por aplicar se realizó según la ecuación 3, de acuerdo con las recomendaciones de Cochrane *et al* (1980) y ajustada por la pureza del material CaCO<sub>3</sub> según Molina (1998), donde PRNT es el grado de pureza del CaCO<sub>3</sub>. En este caso se aplicó un material comercial con un PRNT del 99.9%.

$$CaCO_3(\text{ton} / \text{ha}) = \frac{1.5 \times (SA\% \text{ existente} - SA\% \text{ deseado}) \times CICE \times (100 / PRNT)}{CICE} \quad (\text{Ecuación 3})$$

### Análisis de contenido de nutrientes foliares

Al final del experimento, se colectó una muestra compuesta de hojas de 150 g por cada tratamiento, la misma se secó al horno a una temperatura constante de 70°C por 72 horas en los laboratorios del ITCR en Cartago. Los análisis foliares se realizaron en el Laboratorio de Suelos del CIA-UCR empleando los siguientes procedimientos: N por combustión seca; P, Ca, Mg, K, S, Fe, Cu, Zn, Mn y B por digestión húmeda por espectrofotometría de emisión atómica con plasma.

### Análisis de clorofila

A nivel exploratorio se empleó el analizador portátil SPAD 502 (Minolta—Osaka, Japan) para medir indirectamente la concentración de clorofila (en unidades SPAD) de las hojas adultas al final del experimento y analizar si sus datos pueden ser empleados en lo sucesivo para medir vigor de

planta. El sensor óptico del SPAD-502 tiene un área de  $0.06 \text{ cm}^2$  y calcula un índice de clorofila basado en la absorción de luz entre 650 y 940 nm. El instrumento tiene una precisión reportada de  $\pm 1$  unidades SPAD. Para la obtención de un valor SPAD por tratamiento se midió el promedio de cuatro hojas adultas (cinco lecturas SPAD por hoja) tomadas al azar de cada arbolito. Los valores SPAD son medidas indirectas de la concentración de clorofila (Markwell *et al*, 1995), donde los valores altos indican concentraciones altas de pigmentos fotosintéticos y del contenido de nitrógeno. Sin embargo, la absorción de luz del SPAD en el rango (650 y 940 nm) también puede ser afectado por el estrés hídrico de la hoja y por lo tanto los resultados se deben interpretar con cuidado (Calvo-Alvarado *et al*, 2008).

### **Análisis estadístico**

Para realizar comparaciones estadísticas se aplicó el Análisis de variancia (ANDEVA) y la Prueba de diferencia mínima significativa de Fisher con  $P < 0.05$ . Para estudiar si las diferencias en crecimiento tienen relación con los niveles de fertilidad y contenidos foliares de nutrimentos, se realizó un análisis de correlación simple (Pearson) con  $P < 0.05$  y  $P < 0.1$ . Para determinar las diferencias en las concentraciones de nutrimentos entre los arbolitos y clones de teca y melina se hizo uso del análisis factorial con  $P < 0.05$  y  $P < 0.1$  entre las variables especie y tipo de germoplasma (clon o arbolito de semilla). Para estos análisis se empleó el paquete STATISTICA (StatSoft Inc., 2001).

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN.**

### **Caracterización de los sustratos**

Los sustratos básicos se tomaron de tres suelos que representan una variedad de propiedades físicas y químicas que permiten realizar una evaluación compresiva del problema. Estos suelos son:

a) Inceptisol, clasificado como *Fluventic Eutropept* encontrados en los aluviones del río Térraba, cerca de Palmar Sur (Puntarenas, Costa Rica) (N  $8^{\circ}57'46''$  – O  $83^{\circ}29'10''$ ),. Estos suelos tienen una textura franca con alta fertilidad, tiene propiedades físicas y químicas óptimas para el desarrollo de los cultivos (Cuadro 1). En climas secos y/o periodos de sequías las plantas pueden experimentar fatiga hídrica debido a que tienen baja capacidad de retención de humedad debido a su textura.

b) Andisol, clasificado como *Typic Hapludands*, comunes en las faldas del volcán Irazú, alrededor de Tierra Blanca (Cartago, Costa Rica) (N  $9^{\circ}54'43''$  – O  $83^{\circ}53'59''$ ). Tienen texturas francas con fertilidades de media a alta. Enfrentan baja disponibilidad de P, N y K por la presencia de alófanos que acomplejan estos elementos. Debido a su textura franca y dado que aún no tienen un alto contenido de materia orgánica (MO) y fueron muy disturbados en este experimento, estos suelos pueden presentar una baja retención de agua y por lo tanto las plántulas pueden experimentar fatiga hídrica. La aplicación de fertilizantes NPK es una solución común para corregir las limitaciones químicas de estos suelos.

c) Ultisol, clasificado como *Ustic Kandihumult*, ubicados sobre terrazas antiguas del río Térraba, en los alrededores de Buenos Aires (Puntarenas, Costa Rica) (N  $9^{\circ}08'15''$  – O  $83^{\circ}22'45''$ ). La textura de estos suelos es arcillosa, aunque por la concentración de óxidos de hierro y aluminio tienen muy buena estructura. Son suelos ácidos con severas limitaciones químicas para el crecimiento de las plantas. Este suelo es bajo en bases (Ca, Mg, K), P y N. Tienen pH bajo y alta concentración de Al y Fe. La aplicación de  $\text{CaCO}_3$  para reducir la saturación de acidez al 10% favorece el crecimiento de las plantas al balancear el pH, precipitar el Al y hacer disponible de nuevo los pocos nutrientes del suelo. La aplicación de NPK, un mes después del encalado, es otra medida común para corregir las deficiencias químicas de este suelo. El cuadro 1 resume el análisis químico de los tres tipos de suelos y los dos sustratos preparados.

### **Relación sustratos y crecimiento de arbolitos de caoba**

El crecimiento fue significativamente menor en el Ultisol y mayor en el Andisol +NPK, seguido por el Ultisol +CaCO<sub>3</sub> +NPK, Inceptisol y el Andisol. Estos resultados indican que la caoba es muy sensible a la disponibilidad de NPK. Esta observación es apoyada además por la correlación positiva entre altura y el contenido en el suelo de P (0.9,  $P < 0.05$ ) y K (0.83,  $P < 0.1$ ). El diámetro de la planta se correlacionó también con los contenidos en el suelo de K (0.88,  $P < 0.05$ ) y P (0.87,  $P < 0.1$ ). Los niveles de mortalidad de esta especie confirman la sensibilidad al NPK en el suelo dado que la mortalidad fue menor en los sustratos fertilizados. Los valores relativos a concentración de clorofila (SPAD) dieron resultados inesperados con respecto al tipo de sustrato y crecimiento de las plantas. Los valores SPAD fueron significativamente altos en el peor sustrato (Ultisol) y fueron significativamente bajos en uno de los mejores sustratos (Inceptisol). Esto implica que el contenido de clorofila según la lectura del SPAD no necesariamente corresponde a un la calidad del sustrato.

Los valores SPAD se correlacionaron negativamente con Ca (-0.92), Mg (-0.9), CEC (-0.89), suma de bases (-0.9) y S (-0.9) con  $P < .05$ , en una evidente asociación negativa entre contenido de clorofila y fertilidad del sustrato. También contrario o lo esperado, los valores SPAD no tuvieron relación con ninguna variable de crecimiento de planta (diámetro y altura de planta). Caoba resultó poseer el rango más amplio de valores SPAD de 32.8 a 17.6 en comparación con las otras dos especies. Esto puede indicar que las lecturas SPAD en caoba pueden ser influenciadas por la capacidad de retención de agua de los sustratos. Esta especulación tiene algún fundamento, dado que los valores más bajos de SPAD se presentan en el sustrato Inceptisol, que tiene baja capacidad de retención de humedad.

### **Relación sustratos y crecimiento de arbolitos de teca**

El crecimiento fue significativamente menor en el Ultisol y mayor en el Andisol, seguido por el Ultisol +CaCO<sub>3</sub> +NPK. El Andisol +NPK y el Inceptisol fueron tratamientos con resultados intermedios. La buena respuesta de la teca en el Ultisol +CaCO<sub>3</sub> +NPK, corrobora que esta especie es muy sensible a la disponibilidad de Ca y Mg (Alvarado y Fallas, 2004). La alta mortalidad de la teca en el Inceptisol puede explicarse por el estrés hídrico causado durante los períodos sin lluvia que acontecieron durante el experimento. Del análisis de correlación de crecimiento con contenido de nutrientes del suelo, solo el diámetro tuvo una correlación positiva con P (0.87  $P < 0.1$ ), elemento importante en el desarrollo del sistema radical de la planta (Bertsch, 1995).

Los valores SPAD tienen igualmente una relación contradictoria con la fertilidad de los sustratos. Hay una relación significativamente menor de valores SPAD con el mejor sustrato (Inceptisol) y una relación alta con el tratamiento Ultisol +CaCO<sub>3</sub> +NPK. En los otros sustratos los resultados de los valores SPAD son similares. Como se aprecia en el cuadro 2, los valores medios de SPAD tienen muy poca variabilidad, el ámbito es muy pequeño de 27.9 a 31.8 valores SPAD, lo cual puede dificultar el detectar diferencias y correlaciones entre las variables medidas.

### **Relación sustratos y crecimiento de clones de teca**

El crecimiento fue significativamente mayor en el Ultisol +CaCO<sub>3</sub> +NPK, seguido del Inceptisol y el Andisol +NPK. Los sustratos de menor crecimiento fueron el Ultisol y el Andisol. A pesar de que estos resultados no son los mismos de los arbolitos de teca, la tendencia confirma que la teca es muy sensible a los problemas de la acidez del suelo (Alvarado y Fallas, 2004). Igual que en el caso de los arbolitos de teca, solo se logró una correlación positiva entre diámetro de planta y P del suelo (0.9  $P < 0.05$ ). Los niveles de mortalidad son muy altos en los dos Andisoles y muy bajos en el Ultisol +CaCO<sub>3</sub> +NPK. También es importante de notar que la mortalidad en el Inceptisol es baja si se compara con la mortalidad de los arbolitos de teca, lo cual complica aún más la posible explicación de esta mortalidad en este tratamiento.

**Cuadro 1.** Análisis químico para cinco sustratos y calificación de niveles fertilidad para un ensayo con tres especies forestales y dos clones. Santa Clara, Costa Rica.

Substrato	pH en H <sub>2</sub> O	Al	Ca	Mg	K	CICE	Suma de Bases	SA (%)
		cmol(+)/L						
Inceptisol	5.5 M	0.28 B	21.4 M	3.5 B	0.99 A	26.17 A	25.89 A	1 B
Andisol	5.6 M	0.3 B	9 M	1.57 B	0.69 A	11.56 M	11.26 M	3 B
Ultisol	5.0 B	1.4 A	0.83 B	0.18 B	0.13 B	2.54 B	1.14 B	55 A
Ultisol+CaCO <sub>3</sub> +NPK	5.5 B	0.25 B	2.53 M	0.18 B	0.58 M	3.54 B	3.29 B	10 B
Andisol+NPK	5.6 M	0.3 B	9 M	1.57 B	1.14 A	11.56 M	11.26 M	3 B

Substrato	P	Cu	Fe	Mn	Zn	S	Clasificación de fertilidad
	Mg/L						
Inceptisol	12.5 M	118 A	104 M	7.9 M	6.3 M	66,9	Alta
Andisol	12.4 M	27.3 A	22.5 M	10.1 M	5.7 M	35.5	Media - Alta
Ultisol	3.1 B	10.3 M	501 A	3.1 A	2.4 M	3.5	Baja
Ultisol+CaCO <sub>3</sub> +NPK	20 M	10.3 M	501 A	3.1 A	2.4 M	3.5	Baja
Andisol+NPK	20 M	27.3 A	22.5 M	10.1 M	5.7 M	35.5	Media - Alta

**Notas:**

- a) Las concentraciones o valores se califican como **A** por Alto, **M** por Medio y **B** por Bajo según Bertsch (1986).  
b) Al (Aluminio), Ca (Calcio), Mg (Magnesio), K (Potasio), CICE (Capacidad efectiva de intercambio catiónico), SA (Saturación de Aluminio o acidez), P (Fósforo), Cu (Cobre), Fe (Hierro), Mn (Manganeso), Zn (Zinc) y S (Azufre).  
c) Para el sustrato de Ultisol +CaCO<sub>3</sub> +NPK se recalcula la concentración de Ca, K, P y porcentaje de SA, asumiendo un 100% de eficiencia de encalado por la siembra en macetas durante los cuatro meses, esto implica sumar 1.7 cmol(+) L<sup>-1</sup> de Ca al suelo. La aplicación de NPK en este caso eleva sustancialmente el contenido de P del suelo, pero se asume un tope de 20 mg L<sup>-1</sup> y en el caso de K se asume una adición efectiva de 0.45 cmol(+) L<sup>-1</sup>. El pH del suelo Ultisol +CaCO<sub>3</sub> +NPK se asume que pasa al menos a 5.5 debido al efecto del encalado.

**Relación sustratos y crecimiento de arbolitos de melina**

El crecimiento fue significativamente mayor en el Andisol +NPK y el Ultisol +CaCO<sub>3</sub> +NPK y menor en el Ultisol; una clara indicación de como esta especie responde favorablemente al encalado, la fertilización con NPK y como es sensible a la acidez del suelo (Calvo-Alvarado *et al*, 2007; Calvo-Alvarado y Arias, 2007; Calvo-Alvarado y Camacho, 1992). A pesar de estas tendencias y siguiendo el patrón de comportamiento de teca (arbolitos y clones) solo P del suelo se correlacionó positivamente con altura total (0.96, P < 0.05) y diámetro de planta (0.95, P < 0.05). La mortalidad fue menor en el Inceptisol y muy similar en los otros cuatro tratamientos, lo cual indica que la melina es más resistente a las condiciones de campo que la teca (Cuadro 2).

**Cuadro 2.** Comparación estadística del efecto de cinco sustratos en las variables de crecimiento diámetro (cm), altura (cm) y contenido de clorofila (valores SPAD) en un ensayo con tres especies forestales y dos clones. Santa Clara, Costa Rica.

Especie	Variable	Tipo de Suelo				
		Ultisol	Ultisol + NPK + CaCO <sub>3</sub>	Andisol	Andisol + NPK	Inceptisol
Arbolitos de caoba (n=56)	Valores SPAD	32.8 (a)	26.5 (ab)	22.4 (bc)	25 (b)	17.6 (c)
	Altura total en cm	22.5 (d)	40.8 (ab)	29.1 (dc)	50.1 (a)	38.1 (bc)
	Diámetro en mm	10.4 (c)	16.5 (b)	13.0 (c)	20.7 (a)	16.7 (b)
	% Mortalidad	39	33	44	33	39
Arbolitos de teca (n=49)	Valores SPAD	31.3 (ab)	29.0 (ab)	31.0 (ab)	27.9 (b)	31.8 (a)
	Altura total en cm	12.8 (c)	26.1 (a)	33.8 (a)	15.7 (bc)	23.8 (ab)
	Diámetro en mm	6.8 (b)	14.6 (a)	15.1 (a)	9.2 (b)	15.2 (a)
	% Mortalidad	39	33	33	39	55
Clones de teca (n=46)	Valores SPAD	24.4 (b)	25.0 (b)	31.6 (a)	25.5 (b)	24.5 (b)
	Altura total en cm	11.2 (c)	31.6 (a)	13.6 (bc)	18.3 (bc)	22.2 (b)
	Diámetro en mm	4.40 (c)	12.3 (a)	8.2 (b)	10.6 (ab)	11.0 (ab)
	% Mortalidad	17	8	42	33	17
Arbolitos de melina (n=59)	Valores SPAD	34.9 (ab)	38.1 (a)	35.8 (ab)	36.1 (ab)	33.7 (b)
	Altura total en cm	39.0 (c)	85.0 (a)	54.7 (bc)	91.4 (a)	58.18 (b)
	Diámetro en mm	11.8 (b)	24.7 (a)	15.8 (b)	24.0 (a)	20.8 (a)
	% Mortalidad	33	33	33	39	11
Clones de melina (n=55)	Valores SPAD	35.8 (ab)	33.3 (b)	38.4 (a)	31.6 (b)	34.2 (ab)
	Altura total en cm	34.8 (c)	61.3 (b)	43.9 (bc)	96.7 (a)	50.6 (bc)
	Diámetro en mm	10.9 (c)	17.3 (b)	11.8 (c)	22.5 (a)	13.6 (bc)
	% Mortalidad	33	39	33	39	56

Notas:

a) Se indica el número de observaciones del análisis (n = \_\_)

b) La comparación entre tratamientos es empleando la prueba Fisher con alfa = 0.5. Letras desiguales indica que son resultados significativamente diferentes.

### Relación sustratos y crecimiento clones de melina

El crecimiento fue significativamente mayor en el Andisol +NPK y el Ultisol +CaCO<sub>3</sub> +NPK, el menor en el Ultisol. Los otros tratamientos se constituyen en un grupo intermedio. Estos resultados son idénticos a los obtenidos con los arbolitos de melina y por lo tanto los mismos confirman la sensibilidad de esta especie a la disponibilidad de Ca, Mg, N, P y K en el suelo (Calvo-Alvarado *et al*, 2007; Calvo-Alvarado y Camacho, 1992). Al igual que los arbolitos de teca y melina, el diámetro de planta de estos clones se correlacionó positivamente con P del suelo (0.81,  $P < 0.1$ ). Contrario a los resultados de los arbolitos de melina, los clones tuvieron una alta mortalidad en el Inceptisol (baja retención de humedad), mientras que los otros tratamientos resultaron en valores de mortalidad similares (Cuadro 2).

### Relación sustratos y contenido de nutrientes foliares en arbolitos de caoba

El K del suelo se correlacionó con las concentraciones foliares de P (0.94  $P < 0.05$ ), Ca (0.9  $P < 0.05$ ) y K (0.84  $P < 0.1$ ). El P del suelo se correlacionó a su vez con las concentraciones foliares de Ca (0.92  $P < 0.05$ ) y K (0.84  $P < 0.1$ ). Estas correlaciones están muy ligadas al crecimiento de la planta y se pueden explicar por el efecto del K del suelo que aumenta la absorción del P y Ca del suelo por las raíces de la planta (Bertsch, 1995; Hsiao y Lauchli, 1986). El diámetro de planta se correlacionó con P foliar (0.89), Ca foliar (0.88), Zn foliar (0.94) y Mn foliar (0.89) con  $P < 0.05$ . La

altura de planta se correlacionó con P foliar (0.86  $P < 0.1$ ) y Ca foliar (0.87  $P < 0.1$ ). Como se indicó al comentar el Cuadro 2, el mejor sustrato para la caoba fue el Andisol +NPK y el más bajo fue el Ultisol. Este contraste también se refleja al ver la concentración foliar tan baja de N-P-Ca-K en el Ultisol y tan alta en el Andisol +NPK. Los valores SPAD no tuvieron correlación con ningún nutriente foliar, inclusive con N o Mg, que son componentes importantes de la molécula de la clorofila.

#### **Relación sustratos y contenido de nutrientes foliares de arbolitos de teca**

El diámetro y la altura de la planta se correlacionaron solamente con el Fe foliar (-0.95 y -0.96 correspondientemente a  $P < 0.05$ ). El Ca foliar se correlacionó fuertemente con el pH del suelo (0.99,  $P < 0.05$ ) y el la saturación de acidez (-0.99,  $P < 0.05$ ). Ca foliar (0.82,  $P < 0.1$ ) y Mg foliar (0.84,  $P < 0.1$ ) resultaron correlacionadas con la suma de bases del suelo. Estos resultados confirman la sensibilidad de esta especie a los problemas de acidez del suelo y por tanto destacan la importancia de corregir la saturación de acidez del suelo para balancear el pH y mejorar la disponibilidad de las bases a la absorción de la planta. Los resultados indican que se debe estudiar al Fe foliar como un posible indicador del vigor de planta por sus buenas correlaciones con el crecimiento.

Los valores de SPAD se correlacionaron con N foliar (0.96) a  $P < .05$  y con S foliar (0.87) a  $P < .1$ . Estas correlaciones se relacionan con el efecto del N y S en la molécula de la clorofila; N es un elemento esencial mientras que S afecta directamente las tasas de fotosíntesis (Karmoker *et al.*, 1991). El contenido de Ca foliar se correlacionó con el pH del suelo (0.99,  $P < .05$ ) y el contenido SA% (-0.99,  $P < .05$ ). El contenido foliar Ca (0.82,  $P < .1$ ) y Mg (0.84,  $P < .1$ ) se correlacionaron con la suma total de bases. Estas correlaciones demuestran como el contenido foliar de Ca y Mg se relacionan íntimamente con las reservas de Ca y Mg del suelo y el efecto del pH y SA%, el cual regula la disponibilidad de estos nutrimentos en la solución del suelo (Sánchez, 1976; Bertsch, 1995).

#### **Relación sustratos y concentración de nutrientes foliares de clones de teca**

El P foliar (0.91  $P < 0.5$ ) se correlacionó con K del suelo, K foliar con pH del suelo (0.90  $P < 0.05$ ), Al del suelo (-0.92,  $P < 0.05$ ) y K del suelo (0.97,  $P < 0.05$ ). Estas son correlaciones esperables dado que el pH y el Al del suelo regulan la disponibilidad de las bases y el contenido de K del suelo tiene un papel importante en la absorción de agua y nutrientes de la planta (Bertsch, 1995; Sánchez, 1976; Hsiao y Lauchli, 1986). Por lo tanto, la corrección de la acidez y la aplicación de NPK resultan de vital importancia en el buen crecimiento de los clones de teca.

#### **Relación sustratos y contenido de nutrientes foliares de arbolitos de melina**

El diámetro de planta se correlacionó con nutrientes foliares N (0.81  $P < 0.1$ ), K (0.83,  $P < 0.1$ ) y B (-0.97,  $P < 0.05$ ). El crecimiento en altura se correlacionó con N foliar (0.85,  $P < 0.1$ ) y B foliar (-0.88,  $P < 0.1$ ). El nitrógeno foliar se correlacionó solamente con K del suelo (0.83,  $P < 0.1$ ), P foliar con P del suelo (0.92  $P < 0.05$ ) y Al del suelo (-0.83,  $P < 0.1$ ), K foliar con Al del suelo (-0.95,  $P < 0.05$ ), P del suelo (0.92,  $P < 0.05$ ) y K del suelo (0.82,  $P < 0.1$ ), y las bases foliares se correlacionaron con el Al del suelo (-0.82,  $P < 0.05$ ). Todas estas correlaciones se explican por el efecto negativo del pH y de Al, así como el efecto positivo del K del suelo en la disponibilidad de los nutrimentos a la planta (Sánchez, 1976; Hsiao y Lauchli, 1986; Bertsch, 1995). Estas correlaciones confirman también el efecto positivo de la aplicación de NPK y  $\text{CaCO}_3$  en la concentración de nutrientes foliares y en el crecimiento de las plantas, al regular el efecto de la acidez, aumentar la disponibilidad de las bases y otros nutrientes.

**Cuadro 3.** Concentración foliar de nutrimentos por tipo de sustrato y especie en un ensayo con tres especies forestales y dos clones. Santa Clara, Costa Rica.

Especie	Tipo de sustrato	Nutrimentos										
		(% )						(mg kg <sup>-1</sup> )				
		N	P	Ca	Mg	K	S	Fe	Cu	Zn	Mn	B
Arbolitos de caoba	Andisol +NPK	3.49	0.24	1.33	0.18	1.70	0.32	153	11	29	81	523
	Andisol	2.63	0.17	1.17	0.19	1.55	0.34	102	9	20	45	711
	Ultisol +CaCO <sub>3</sub> +NPK	2.34	0.20	1.22	0.21	1.79	0.36	82	9	23	56	708
	Ultisol	2.23	0.10	0.78	0.21	0.98	0.30	168	9	20	37	713
	Inceptisol	2.57	0.25	1.20	0.22	1.83	0.35	86	11	23	45	714
	<b>Promedio</b>	<b>2.65</b>	<b>0.19</b>	<b>1.14</b>	<b>0.20</b>	<b>1.57</b>	<b>0.33</b>	<b>118</b>	<b>10</b>	<b>23</b>	<b>53</b>	<b>674</b>
Arbolitos de teca	Andisol +NPK	2.63	0.41	1.26	0.19	2.07	0.18	255	18	57	90	703
	Andisol	3.00	0.41	1.25	0.27	2.41	0.21	567	19	44	134	853
	Ultisol +CaCO <sub>3</sub> +NPK	2.81	0.60	0.82	0.23	2.55	0.21	120	20	40	79	901
	Ultisol	3.20	0.41	0.84	0.18	1.94	0.22	575	23	39	195	1121
	Inceptisol	3.20	0.43	1.27	0.36	2.22	0.22	190	19	41	228	684
	<b>Promedio</b>	<b>2.97</b>	<b>0.45</b>	<b>1.09</b>	<b>0.25</b>	<b>2.24</b>	<b>0.21</b>	<b>341</b>	<b>20</b>	<b>44</b>	<b>145</b>	<b>852</b>
Clones de teca	Andisol +NPK	2.45	0.60	0.66	0.29	2.58	0.17	130	22	42	67	646
	Andisol	1.93	0.30	1.05	0.22	2.19	0.32	107	12	37	41	793
	Ultisol +CaCO <sub>3</sub> +NPK	2.00	0.37	0.73	0.29	1.60	0.14	139	15	32	51	857
	Ultisol	2.18	0.13	0.72	0.37	0.89	0.17	127	12	25	168	932
	Inceptisol	2.81	0.73	0.91	0.45	2.47	0.24	220	30	62	110	1375
	<b>Promedio</b>	<b>2.27</b>	<b>0.43</b>	<b>0.81</b>	<b>0.32</b>	<b>1.95</b>	<b>0.21</b>	<b>145</b>	<b>18</b>	<b>40</b>	<b>87</b>	<b>921</b>
Arbolitos de melina	Andisol +NPK	3.95	0.35	1.33	0.32	2.29	0.25	166	11	70	352	453
	Andisol	3.11	0.35	1.76	0.51	2.19	0.21	107	10	101	247	756
	Ultisol +CaCO <sub>3</sub> +NPK	3.39	0.39	1.19	0.41	2.24	0.20	168	9	62	398	510
	Ultisol	3.01	0.19	1.19	0.29	1.59	0.19	132	10	64	442	1020
	Inceptisol	3.43	0.30	1.50	0.41	2.13	0.19	132	9	82	293	541
	<b>Promedio</b>	<b>3.38</b>	<b>0.32</b>	<b>1.39</b>	<b>0.39</b>	<b>2.09</b>	<b>0.21</b>	<b>141</b>	<b>10</b>	<b>76</b>	<b>346</b>	<b>656</b>
Clones de melina	Andisol +NPK	3.25	0.19	1.51	0.35	1.93	0.18	88	9	52	346	236
	Andisol	2.85	0.24	1.75	0.37	1.68	0.17	94	7	95	205	604
	Ultisol +CaCO <sub>3</sub> +NPK	2.62	0.30	0.98	0.33	2.22	0.14	93	7	50	264	478
	Ultisol	4.38	0.25	1.78	0.45	2.62	0.25	115	11	125	575	460
	Inceptisol	3.13	0.37	1.26	0.37	2.13	0.19	92	8	82	269	796
	<b>Promedio</b>	<b>3.25</b>	<b>0.27</b>	<b>1.46</b>	<b>0.37</b>	<b>2.12</b>	<b>0.19</b>	<b>96</b>	<b>8</b>	<b>81</b>	<b>332</b>	<b>515</b>

### Relación sustratos y contenido de nutrientes foliares de clones de melina

Contrario a los otros tratamientos, en este caso no se encontró alguna correlación significativa entre crecimiento, contenido de nutrientes del suelo y foliares. Esto puede indicar que los clones de esta especie, al ser seleccionados genéticamente por su superioridad en forma y crecimiento; y al tener una variabilidad genética menor, tienen una respuesta más uniforme al contenido de nutrientes del suelo que los arbolitos.

### Comparación de concentración de nutrientes foliares entre clones y arbolitos

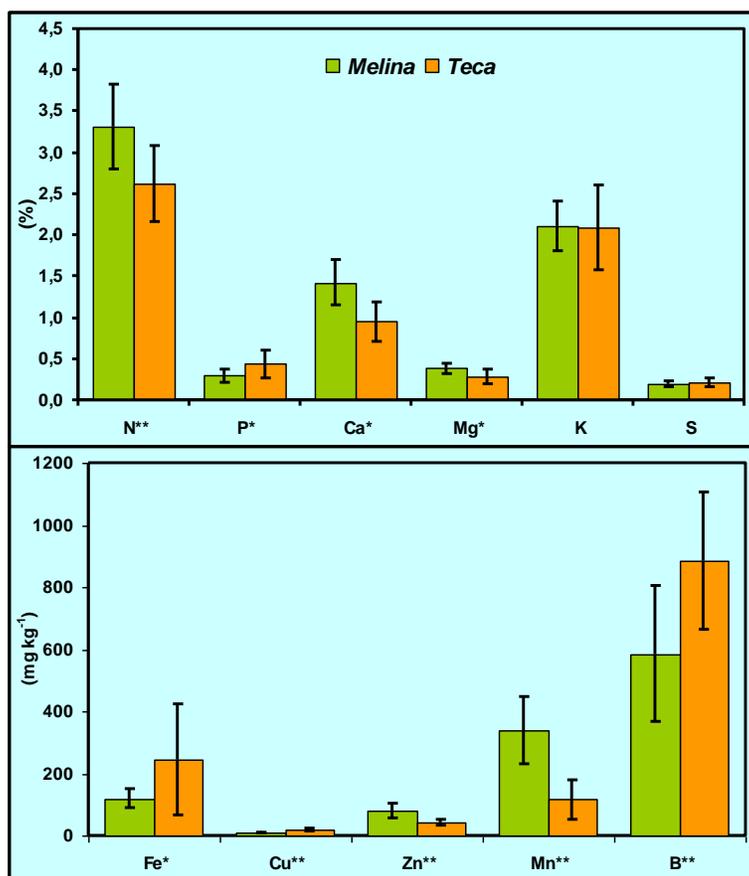
Del cuadro 3 es interesante notar como los clones de teca muestran menor concentración foliar de Ca, Fe y Mn que los arbolitos de teca. Similar resultado se obtiene con la melina, donde la concentración de Fe es notablemente menor en los clones que en los arbolitos. Estos resultados

apuntan a que los clones de teca no demandan tanto Ca del suelo como los arbolitos, y que a su vez, son más restrictivos en la absorción de Fe y Mn, elementos no necesariamente nutritivos y que se asocian más con la acidez del suelo. En el caso de la melina, solo se aplica la misma observación en el caso de Fe. En promedio también se puede observar que la melina es la especie con mayores concentraciones foliares de N y Ca. Si bien existen diferencias en la concentración de nutrientes entre clones y arbolitos de teca y melina, a excepción del Fe, estas no son estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ). Los clones de ambas especies fijaron menor cantidad de Fe ( $120.5 \pm 39.31 \text{ mg kg}^{-1}$ ) que las plántulas provenientes de semillas ( $241.2 \pm 178.86$ ).

La amplia gama de sustratos en los que crecieron las plántulas muestran la capacidad de las especies de almacenar en los tejidos foliares estos nutrimentos. La teca fijó una mayor cantidad de P, Fe, Cu y B; mientras que Melina mostró valores mayores en N, Ca, Mg, Zn y Mn (Figura 2). Los otros elementos no mostraron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ). Según los niveles de suficiencia de nutrimentos para teca dados por Mollinedo *et al* (2005) y Alvarado (2006) quienes se basan en la información recopilada por Drechsel y Zech (1991), las plantas de teca se encuentran dentro de los niveles óptimos de nutrimentos.

La literatura no muestra información exacta sobre los niveles críticos para plántulas de melina. No obstante, Stuhmann *et al* (1994) proveen niveles críticos para plantaciones de melina de tres años de edad establecidas en las tierras bajas de la costa atlántica de Costa Rica. Según esta información, las plántulas de melina se encuentran sobre los niveles críticos, por lo cual no muestran indicios de deficiencias nutricionales.

La funcionalidad fisiológica de la mayoría de los nutrimentos dentro de cada especie ha sido poco estudiada, sin embargo Stuhmann *et al* (1994) mencionan que el K es el nutrimento del suelo que restringe en mayor medida el crecimiento de las plantaciones jóvenes de melina en estas condiciones ambientales. Sujatha (2008) hace referencia a la importancia del Cu y Mo en el crecimiento de la teca, lo que podría explicar el hecho que la teca tenga mayores concentraciones de Cu ( $19 \text{ mg kg}^{-1}$ ) que la melina ( $9 \text{ mg kg}^{-1}$ ).



**Notas:**

\* son estadísticamente diferentes  $p < 0.05$ , \*\* son estadísticamente diferentes  $p < 0.01$ . Gráfico superior expresado en %, gráfico inferior expresado en  $\text{mg kg}^{-1}$ .

**Figura 2.** Promedio y desviación estándar de la concentración de nutrientes (% ,  $\text{mg kg}^{-1}$ ) de las plántulas de *Gmelina arborea* y *Tectona grandis* en un ensayo de sustratos en vivero (Santa Clara, Costa Rica).

**CONCLUSIONES**

- Las diferencias contrastantes entre los sustratos empleados han permitido establecer relaciones entre nivel de fertilidad, crecimiento y contenido de nutrientes foliares para las especies empleadas en este experimento.
- El ensayo confirma el impacto positivo del encalado y la fertilización con NPK en el establecimiento temprano de la melina y la teca.
- Se confirma que suelos Ultisoles de baja fertilidad con manejo apropiado pueden producir crecimientos similares o mejores que los suelos con óptimas condiciones para el crecimiento de especies forestales como los Andisoles o Inceptisoles. El encalado en estos suelos disminuye la acidez del suelo, sube ligeramente el pH del suelo, lo que mejora la disponibilidad de nutrientes para la planta. El Ca agregado con el encalado igualmente sirve de nutrimento para las plántulas. Si aparte del encalado se fertiliza con NPK el efecto es aún más positivo dado que debido a un pH más equilibrado todos los nutrimentos son más disponibles.

- Los clones de teca y melina fijaron en la biomasa foliar menos Fe que las plántulas provenientes de semilla. Este hecho merece más estudio dado que es posible que los clones logren mejor adaptación o crecimientos en suelos ácidos que los arbolitos restringiendo la absorción de Fe.
- Teca fue la especie que tuvo mayores concentraciones de P, Fe, Cu y B mientras que melina alojó más N, Ca, Mg, Zn y Mn en la biomasa foliar.
- Los datos aportados en este estudio pueden servir de referencia para estudiar el estado nutricional de las plantaciones de estas especies durante el primer año de establecimiento, haciendo comparaciones con los datos promedio y por sustratos aportados en este artículo. Los datos proveen información valiosa sobre la variabilidad natural de las especies y los germoplasmas en respuesta a una gradiente nutricional de sustratos de la región tropical.
- El uso del SPAD como opción para medir indirectamente la concentración de clorofila y el vigor de las plantas de las especies estudiadas no quedó demostrado, dado que los resultados no son tan consistentes con las variables de crecimiento o concentración de nutrimentos foliares.

## RECOMENDACIONES

- Establecer investigaciones para definir los niveles críticos foliares por especie para simplificar el análisis nutricional de las plantaciones en diferentes estados de crecimiento.
- Afinar las relaciones entre mejoramiento genético y nutrición forestal, dado que esto puede mejorar los rendimientos y el vigor de las plantas en suelos de baja fertilidad.
- Estudiar la relación de Fe en teca, debido que es un elemento que se manifiesta como indicador del vigor de planta.
- Establecer con mejor detalle si en efecto el germoplasma clonal de teca y melina, concentra menos nutrimentos foliares al tiempo que logran mejores tasas de crecimiento. Estos resultados son relevantes dado que la selección genética puede adaptar estas especies a sitios de menor fertilidad y degradados.
- Se debe indicar que este ensayo se realizó con clones o arbolitos con tamaños recomendados para llevar a plantación. El efecto de sustratos se ensayó con macetas y por tanto, debe quedar claro que las respuestas de las especies en terreno pueden variar ligeramente los resultados de este ensayo.
- Es importante continuar estudiando el empleo del SPAD u otros instrumentos similares, para lograr la concreción de un método indirecto para medir vigor en relación al nivel de estado nutricional de las plantas.

## RECONOCIMIENTOS

Este estudio fue parte de un proyecto de investigación que se realizó con recursos financieros del Instituto Tecnológico de Costa Rica, la Universidad de Alberta, del Consejo Nacional de Ciencias e Ingeniería de Canadá (NSERC), de la Fundación Discovery y del Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Global (IAI) bajo el programa CRN-2021 que es apoyado por la Fundación de Ciencias de Estados Unidos (Grant GEO-0452325).

Agradecemos la colaboración en el campo de Luis Coronado Chacón, Dorian Carvajal y Carolina Cascante. También agradecemos a los doctores Arturo Sánchez y Margaret Kalacska de la Universidad de Alberta por sus observaciones en los primeros manuscritos.

## BIBLIOGRAFÍA

- Arce, H; Barrantes, A. 2006. La madera en Costa Rica situación actual y perspectivas. San José, CR, FONAFIFO (Fondo Nacional de Financiamiento Forestal) y Oficina Nacional Forestal. 23 p.
- Alvarado, A. 2006. Nutrición y fertilización de la teca. *Informaciones Agronómicas* (61):1-8.
- Alvarado, A; Fallas, JL. 2004. Efecto de la saturación de acidez y encalado sobre el crecimiento de la teca (*Tectona grandis* L.f.) en suelos ácidos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 28(1):81-87.
- Bertsch, F. 1986. Manual para interpretar la fertilidad de los suelos de Costa Rica. San José, CR, Editorial Universidad de Costa Rica. 76 p.
- \_\_\_\_\_. 1995. La Fertilidad de los suelos y su manejo. San José, CR, Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo - UCR. 157 p.
- Calvo-Alvarado, JC. 2000. Diagnóstico de la caoba (*Swietenia macrophylla* King) en Mesoamérica Visión general. San José, CR, CCT (Centro Científico Tropical), Programa Ambiental Regional para Centro América-Central America Protected Areas System (PROARCA-CAPAS). 26 p.
- Calvo-Alvarado, JC; Arias, D; Richter, D. 2007. Early growth performance of native and introduced fast growing tree species in wet to sub-humid climates of the Southern region of Costa Rica. *Forest Ecology and Management* 242:227-235.
- \_\_\_\_\_; Kalacska, M; Sánchez-Azofeifa, GA; Arias, D; Bell, LS. 2008. Effect of soil type on plant growth, leaf chlorophyll concentration and leaf reflectance of tropical tree and grass species. En: M. Kalacska and A. Sánchez-Azofeifa (Eds.). *Hyperspectral remote sensing of tropical and sub-tropical forest*. US. CRC Press. Taylor and Francis Group. p. 87-124.
- Calvo-Alvarado, JC; Arias, D. 2007. Efecto de cinco sustratos en el crecimiento inicial de tres especies forestales a nivel de vivero. En: V Congreso Nacional de Suelos (Memoria en CD). Costa Rica.
- Calvo-Alvarado, JC; Camacho, D. 1992. Algunos factores relacionados con el crecimiento de *Gmelina arborea* Roxb. en la zona norte de Costa Rica. *Tecnología en Marcha* 11:15-33.
- Cochrane, T; Salinas, J; Sánchez, P. 1980. An equation for liming acid mineral soils to compensate crops aluminum tolerance. *Tropical Agriculture* 57(2):133-140.
- Drechsel, P; Zech, W. 1991. Foliar nutrient levels of broad-leaved tropical trees: A tabular review. *Plant and Soil* 131:29-46.
- Fonseca, W. 2004. Manual para productores de Teca (*Tectona grandis* L. f) en Costa Rica. (en línea) Fondo Nacional de Financiamiento Forestal. Heredia, CR. 121 p. (Disponible en: [www.fonafifo.com/text\\_files/proyectos/ManualProductoresTeca.pdf](http://www.fonafifo.com/text_files/proyectos/ManualProductoresTeca.pdf)).
- Francis, J. 1991. *Swietenia mahagoni* Jacq. West Indies mahogany. Meliaceae. Mahogany family. New Orleans, LA. US. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station, Institute of Tropical Forestry. 7 p. (SO-ITF-SM; 46).
- \_\_\_\_\_. 2003. *Tectona grandis* L.f. En: Vozzo, J.A. (Ed). *Tropical tree seed manual*. US. United States Department of Agriculture. Forest Service. p.745-747
- Holdridge, L. 1967. Life zone ecology. San José, CR. Centro Científico Tropical (CCT). 206 p.

- Hsiao, T; Lauchli, A. 1986. Role of potassium in plant water relations. En: Tinker B.; Lauchli, A. (Eds). Advances in plant nutrition. Praeger Scientific, New York, US. 281p.
- Karmoker, J; Clarkson, D; Saker, L; Rooney, J; Purves, J. 1991. Sulphate deprivation depresses the transport of nitrogen to the xylem and the hydraulic conductivity of barley (*Hordeum vulgare* L.) roots. Plants 185(2):269-278.
- Kijkar, S. 2003. *Gmelina arborea* Roxb. En: Vozzo, J.A. (Ed). Tropical tree seed manual. US. United States Department of Agriculture. Forest Service. 476-478.
- Markwell, J; Osterman, J; Mitchell, J. 1995. Calibration of the Minolta SPAD-502 leaf chlorophyll meter. Photosynthesis Research 46:467-472.
- Molina, E. 1998. Encalado para la corrección de acidez del suelo. CR. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo-UCR. 45 p.
- Mollinedo, M; Ugalde, L; Alvarado, A; Verjan, J; Rudy, L. 2005. Relación suelo-árbol y factores de sitio, en plantaciones jóvenes de teca (*Tectona grandis*), en la zona oeste de la cuenca del canal de Panamá. Agronomía Costarricense 29 (1): 67-75.
- Montagnini, F; Ugalde, L; Navarro, C. 2003. Growth characteristics of some native tree species used in silvopastoral systems in the humid lowlands of Costa Rica. Agroforestry Systems 59:163–170.
- Niembro-Rocas, A. 2003. *Swietenia macrophylla* King. En: Vozzo, J.A. (Ed). Tropical Tree Seed Manual. United States Department of Agriculture. Forest Service. US. p.722-725.
- Rodríguez-Chanto, L. 1999. Análisis de crecimiento de caoba *Swietenia macrophylla* King asociada con tres diferentes especies de *Inga* spp. en la región tropical húmeda de Costa Rica. Tesis Lic. Guácimo, CR. Escuela de Agricultura de la Región Tropical Húmeda (EARTH). 49p.
- Rojas, F; Arias, D; Moya, R; Meza, A; Murillo, O; Arguedas, M. 2004. Manual para productores de melina *Gmelina arborea* en Costa Rica. Fondo Nacional de Financiamiento Forestal. Cartago, CR. 314 p. [Disponible en: [www.fonafifo.com/text\\_files/proyectos/Manual%20Prod%20Melina.pdf](http://www.fonafifo.com/text_files/proyectos/Manual%20Prod%20Melina.pdf)].
- Sánchez, P. 1976. Properties and management of soils in the tropics. New York, US. John Wiley & Sons. 618 p.
- Sotomayor, A; Helmke, E; García, E. 2002. Manejo y mantención de plantaciones forestales. Documento de divulgación (CL) N° 23. 56 p. (INFOR.).
- StatSoft, Inc. 2001. STATISTICA (Data analysis software system), version 6. [www.statsoft.com](http://www.statsoft.com).
- Stuhrmann, M; Bergmann, C; Zech, W. 1994. Mineral nutrition, soil factors and growth rates of *Gmelina arborea* plantations in the humid lowlands of northern Costa Rica. Forest Ecology and Management 70:135-145.
- Sujatha, MP. 2008. Micronutrient deficiencies in teak (*Tectona grandis*) seedlings: foliar symptoms, growth performance and remedial measures. Journal of Tropical Forest Science 20(1):29-37.
- Weaver, P. 1993. *Tectona grandis* L.f. Teak. Verbenaceae. Verbena family. US. United States Department of Agriculture Forest Service, International Institute of Tropical Forestry. 18 p. (SO-ITF-SM; 64).