



Efectos de las actividades de labranza en el **índice de área foliar** en una plantación de *Tectona grandis* en la zona norte de Costa Rica

Effects of tillage activities on leaf area index in a *Tectona grandis* plantation in northern Costa Rica

Juan Carlos Valverde¹*, Mario Guevara-Bonilla¹, Dagoberto Arias¹, Elemer Briceño¹ y Edwin Esquivel¹

¹ Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal, Cartago, Costa Rica * Autor para Correspondencia: jcvalverde@itcr.ac.cr

RESUMEN

Tectona grandis es una de las especies más utilizadas en los proyectos de reforestación en Costa Rica y ha sido plantada en sitios con problemas de capas adensadas en el perfil del suelo que retrasan el crecimiento de las plantaciones; por esta razón se hace necesario el desarrollo de actividades de labranza que mejoren las condiciones del suelo y favorezcan la productividad. En el presente estudio se evaluaron los efectos en el diámetro, altura total e índice de área foliar (IAF) de ocho tratamientos de labranza (testigo, testigo con dolomita, labrado con uno, tres y cinco cinceles tanto a 25 cm como a 40 cm de profundidad en combinación con dolomita) aplicados durante 2013 en una plantación de *T. grandis*. Tres años después de la labranza, no se encontraron diferencias significativas en el diámetro y en altura de los árboles (en promedio 11,74 cm y 11,1 m respectivamente). En cambio, el IAF mostró la formación de dos agrupaciones de tratamientos, una conformada por el testigo y testigo con dolomita y otra por individuos con suelo labrado. La primera agrupación presentó IAF menores a 3,80 m² m⁻², con correlaciones de IAF-altura inferiores a 15% y modelos alométricos con errores estándar altos; esto se debió a la heterogeneidad de los individuos causada por el estrés generado por las condiciones de compactación en el suelo. En contraste, los individuos con suelo labrado presentaron IAF superiores a 4,5 m² m⁻², con correlaciones de IAF-altura superiores a 56% y modelos alométricos con errores estándar menores a 0,20; el aumento se atribuye al proceso de reactivación del crecimiento de los individuos producto del mejoramiento en las propiedades del suelo.

PALABRAS CLAVE: crecimiento de los árboles, fotografía hemisférica, labranza, plantación forestal, suelo.

ABSTRACT

Tectona grandis is one of the species most used in reforestation projects in Costa Rica, and it has been planted on sites with problems of soil compaction layers that delay plantation growth; for this reason it is necessary to develop activities that improve soil conditions and promote productivity. The present study evaluated the effects on diameter, total height and leaf area index (LAI) of eight tillage treatments (witness, witness with dolomite, tillage with one, three and five chisels both 25 cm and 40 cm deep in combination with dolomite) applied during 2013 in a *T. grandis* plantation. Results showed that three years after tillage no significant differences were found in diameter and tree height (in average 11,74 cm and 11,1 m respectively). Instead the LAI showed the formation of two groups of treatments, one formed by the witness and witness with dolomite and the other with the tillage treatments. The first group presented LAI less than 3,80 m² m⁻², with correlations of leaf area index-height below 15% and allometric models with high standard errors, this is due to the heterogeneity of the individuals caused by the stress generated by the conditions of soil compaction. On the other hand, individuals with soil tillage presented LAI superior to 4,5 m² m⁻², with correlations of LAI-height greater than 56% and allometric models with errors standard under 0,20; the increase is due to the recovery process of the individual growth caused by the improvement of soil properties.

KEYWORDS: tree growth, hemispherical photography, tillage, forest plantation, soil.

INTRODUCCIÓN

Tectona grandis (teca) en Costa Rica se ha utilizado en proyectos de reforestación con fines comerciales (Boley, Drew y Andrus, 2009), se caracteriza por tener una madera con excelentes propiedades físicas (Tewari, Sukumar, Kumar y Gadow, 2014), mecánicas (Aristide, Christophe, Sossou, Malahimi y Antoine, 2015) y atractivo estético (Boley *et al.*, 2009), lo que propicia que tenga un valor económico susceptible en los mercados internacionales de comercialización maderera (Tewari *et al.*, 2014). En el proceso de establecimiento de *T. grandis* es fundamental considerar las características edáficas, esta especie requiere de suelos con densidad y acidez baja, con niveles nutricionales elevados, drenajes profundos y poca pendiente (Khanduri, Lalnundanga y Vanlalremkimi, 2008; Zhou, Liang, Xu, Zhang y Huang., 2012). En Costa Rica es común encontrar plantaciones juveniles (menores a cinco años de edad) de *T. grandis* establecidas en sitios anteriormente dedicados a la ganadería (Boley *et al.*, 2009), presentando niveles de compactación de suelo elevados que afectan directamente el crecimiento y calidad de las plantaciones (Khanduri *et al.*, 2008; Vyas, Mehta, Dinakaran y Krishnayya, 2010; Fernández-Moya y Alvarado 2014).

Para contrarrestar la compactación se han desarrollado actividades como la labranza o mecanización de suelo (Aruga, Hiyamizu, Nakahata y Saito, 2013), que generan cambios en la estructura (Aruga *et al.*, 2013) y en la densidad (Engler, Becker y Hoffmann, 2016), mejoran la aeración (Aruga *et al.*, 2013) y generan variaciones en el movimiento superficial e interno del agua e inclusive en la disponibilidad de nutrientes y materia orgánica (Bottinelli, Hallaire, Goutal, Bonnaud y Ranger, 2014). Lo anterior estimula en el mediano plazo el crecimiento de *T. grandis* y con ello la reducción de los turnos de cosecha y el incremento en la calidad de la madera (Culshaw y Stokes, 1995).

Para evaluar los efectos de la labranza en el tiempo se han desarrollado múltiples pruebas como análisis de desarrollo radicular (Tewari *et al.*, 2014), análisis nutricionales foliares (Fernández-Moya y Alvarado, 2014),

pruebas de compactación, infiltración y estructura de suelo (Yoshifuji *et al.*, 2009) y análisis de índice de área foliar (IAF) (Vyas *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2011). Este último análisis es uno de los más efectivos por que cuantifica el nivel de crecimiento aéreo de un individuo (Aruga *et al.*, 2013) y el efecto de condiciones ambientales del sitio (Vyas *et al.*, 2010). Además, es una variable fisiológica clave para el desarrollo de modelos de crecimiento (Demarez, Duthoit, Baret, Weiss y Dedieu, 2008; Chianucci, Cutini, Corona y Puletti, 2014), fijación de carbono (Liu, Pattey y Admiral., 2013) y dinámica de desarrollo de especies y poblaciones (Poblete-Echeverría, Fuentes, Ortega-Farias, Gonzalez-Talice y Yuri, 2015; Vyas *et al.*, 2010). El IAF se define como la relación del área de tejido foliar vivo por unidad horizontal de superficie (Marshall y Waring, 1986; Arias, 2004). Es un parámetro que tiende a ser utilizado a nivel individuo (y no extrapolado a una unidad de área) tanto en plantaciones como en bosque natural, debido es un indicador que muestra el grado de desarrollo foliar y salud de un organismo y puede ser relacionado con mayor simplicidad a otras variables fisiológicas (Demarez *et al.*, 2008, Chianucci *et al.*, 2014).

La medición del IAF se puede realizar con método directo o indirecto; el método directo consiste en cosechar el individuo o parte de su copa y, a partir de relaciones alométricas, masa seca de las hojas y área foliar específica (el área promedio de las hojas), se genera el IAF (Mason, Diepstraten, Pinjuv y Lasserre, 2012); es un método de alta precisión, pero destructivo y de un costo económico elevado (Mason *et al.*, 2012; Leblanc y Fournier, 2014). En cambio, el método indirecto no altera al individuo de estudio, facilitando un monitoreo del IAF en el tiempo de una forma precisa y rápida, pero con la necesidad de crear factores de corrección en las mediciones de cada especie a estudiar (Vyas *et al.*, 2010). Entre las metodologías indirectas de más empleadas se destaca la fotografía digital hemisférica. Esta se basa en la utilización de lentes de tipo “ojo de pez” que se incorporan a cámaras fotográficas y teléfonos móviles (recientemente se han desarrollado aplicaciones que permiten recrear el ángulo del lente) y permi-



ten tomar una fotografía angular que es complementada con un software libre. Este software contiene modelos algorítmicos basados en la Ley de Beer-Lambert que simplifican el procesamiento de la información (Vyas *et al.*, 2010; Mason *et al.*, 2012) y genera el IAF de forma precisa.

Entre los estudios desarrollados para evaluar el efecto de la labranza en el IAF de cultivos forestales se destaca el realizado por Aruga *et al.* (2013), quienes evaluaron los efectos de la labranza con más de tres especies forestales en Japón, encontrando aumentos de IAF en suelos mecanizados. Por su parte Engler *et al.* (2016), con plantaciones dendroenergéticas de Eucalipto, encontró aumento en la productividad de biomasa y de IAF de 10% a 15% en suelos labrados. Bottinelli *et al.* (2014) con especies de eucalipto y pino obtuvieron aumento en la homogeneidad de las plantaciones y mejoras en el desarrollo diamétrico a siete años de la labranza del suelo a 30 cm de profundidad. Sin embargo, de los estudios realizados no se han encontrado investigaciones puntuales con *T. grandis* que relacionen la labranza del suelo y el IAF como indicador de desarrollo.

OBJETIVO

Evaluar, después de tres años de establecido el experimento, los efectos de ocho tratamientos de labranza en el crecimiento diamétrico, altura total e IAF en una plantación de 144 meses de edad de *T. grandis* en la zona norte de Costa Rica. La hipótesis nula del trabajo es que el crecimiento de las plantaciones es independiente del mejoramiento de las propiedades físicas y químicas del suelo en plantaciones que fueron establecidas sin labranza inicial del suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se evaluaron 48 individuos (seis individuos por tratamiento) de *T. grandis* de 144 meses de edad (cuando se realizaron las actividades de labranza la plantación tenía 72 meses de edad), con un espaciamiento de 3 m × 3 m, todos los individuos contaron con una poda a 2,5 m de altura a partir de la base, realizada a los 12 meses de edad.

Sitio de estudio

El sitio de estudio se ubicó en una plantación comercial con fines de producción de madera para exportación del Grupo de Reforestación Internacional en Pavón, Alajuela, Costa Rica (10°50'18,51" N; 84°39'40,12" O), a una altitud de 792 m, con una temperatura media anual de 29 °C y una precipitación anual promedio de 2700 mm (Instituto Meteorológico Nacional, 2016). El sitio no había tenido preparación previa del suelo al momento de la plantación, y anteriormente se había dedicado a actividades agrícolas y ganaderas.

Tratamientos

La operación de labranza se realizó en el año 2013 con un tractor marca Same de 65 caballos de fuerza y un arado de cincel. La velocidad del tractor al momento de la actividad fue constante en cada tratamiento, con el fin de obtener un subsolado homogéneo (Tabla 1). Los tratamientos consistieron en una combinación de dos profundidades de subsoleo (25 cm y 50 cm) y tres intensidades diferentes de labranza definidas por la cantidad de cinceles utilizados en el aditamento y la velocidad del tractor al momento de la actividad, formando un total de ocho tratamientos (Tabla 1). Adicionalmente, a todos los tratamientos exceptuando al testigo, se les adicionó una dosis de cal y magnesio (CO₃)₂ equivalente a 3 Mg ha⁻¹ para tener un suelo con un porcentaje de saturación de acidez inferior a 10%. Los tratamientos se aplicaron en parcelas de 8 árboles × 8 árboles y se acomodaron aleatoriamente dentro de un bloque de 16 árboles × 32 árboles. Antes de la labranza, el suelo presentó una densidad promedio de 1,18 g cm⁻³ y una alta resistencia a la penetración de 1,08 kg cm⁻², posterior a la labranza la densidad media bajó a 1,07 g cm⁻³ y la resistencia a la penetración a 0,80 kg cm⁻².

Mediciones alométricas

Se desarrollaron mediciones de altura total y diámetro tanto en el año 2013 como en el 2016; la medición diamétrica se realizó a una altura de 1,3 m sobre nivel del suelo con una cinta diamétrica marca Forestry Suppliers® graduada en milímetros. Mientras la altura total se evaluó con una vara telescópica de 15 m de altura máxima marca Hastings®.

TABLA 1. Tratamientos de labranza evaluados en una plantación de *T. grandis* en la zona norte de Costa Rica.

Tratamiento	Velocidad de labranza (m s ⁻¹)	Características
Testigo (T)	-	No se aplicó labranza ni enclado alguno al suelo
Testigo con cal dolomita (TD)	-	Suelo sin labranza pero con aplicación superficial de cal dolomita
1P25	1,33	Arado con un cincel a 25 cm de profundidad
3P25	0,75	Arado con tres cinceles a 25 cm de profundidad
5P25	0,56	Arado con cinco cinceles a 25 cm de profundidad
1P40	1,33	Arado con un cincel a 40 cm de profundidad
3P40	0,75	Subsolado con tres cinceles a 40 cm de profundidad
5P40	0,56	Arado con cinco cinceles a 40 cm de profundidad

Medición indirecta de IAF

Se consideró el índice de área de la planta (IAP, definido como la sumatoria del área foliar y leñosa aérea de la planta) como parámetro para obtener el IAF indirecto, generado a partir de imágenes fotográficas hemisféricas (obtenidas con la aplicación móvil). Las mediciones se desarrollaron en el mes de marzo de 2016 aplicando la metodología propuesta por Mougín *et al.* (2014) y Chianucci, Puletti, Giacomello, Cutini y Corona (2015), en clima totalmente nublado y sin presencia de viento.

Para la obtención de fotografías digitales hemisféricas se utilizó un teléfono móvil marca ASUS® Modelo Zenfone 5 con una cámara de 8MP (una resolución de 2024 píxeles × 2024 píxeles en formato RGB) y con la aplicación móvil Fisheye Pro versión 1.2 (R22 *software*) para Android. Todas las fotografías se tomaron niveladas (controlado con el uso un trípode) a una altura de 60 cm sobre nivel del suelo y con la dirección hacia el norte previamente marcada.

Las fotografías hemisféricas se procesaron con el *software* CAN_EYE versión 6.3.13 (Weiss *et al.*, 2004), previamente se calibraron según el método descrito en el manual del CAN_EYE (versión 6.3.6) (Weiss, Baret, Smith, Jockheere y Coppin, 2004). Se limitó el grado de visión de las imágenes a 60° y con la opción de recorte en CAN_EYE, se eliminaron las copas de los árboles que rodeaban a cada individuo de estudio con el fin de prevenir las distorsiones

y sesgos en el cálculo del IAP; igualmente se configuró un ángulo zenith de 2,5° y azimut de 5° (Chianucci *et al.* 2015), con un análisis de píxeles de tipo *No mixed pixels* (2 clases); el algoritmo seleccionado fue el IAF-2000 4 *rings* debido a que en estudios previos realizados por Chianucci *et al.* (2015) ha mostrado mayor precisión en especies tropicales.

Medición directa de IAF

En los árboles evaluados se tomaron muestras foliares siguiendo la metodología de Mason *et al.* (2012), las muestras se escanearon a color y con una calidad de 354 píxeles por centímetro (900 píxeles por pulgada), utilizando un escáner Epson® modelo TX-110. Se calculó el área foliar específica (AFE) con el *software* WINFOLIA® versión 2012 pro. Posteriormente, las hojas se secaron a 65 °C por 48 horas para determinar el peso seco y con este se determinó el IAF (Ec. 1).

$$IAF = \left(\left(\frac{\sum AFE}{\sum PS} \right) * NH \right) * UA \quad [1]$$

Donde,

$\sum AFE$ = sumatoria del área foliar específica (m²)

$\sum PS$ = sumatoria del peso seco de las hojas (g)

NH = número de hojas contabilizadas en la copa del árbol

UA = unidad de área del suelo (en este caso de 9 m²)



Análisis estadístico

La base de datos se sometió a pruebas de consistencia mediante la realización de gráficos *Box Plot*. Se evaluó si existían diferencias significativas en los valores de diámetro y en los de altura total de los períodos 2013 y 2016 y, posteriormente, se analizaron las diferencias en crecimiento obtenidas en dicho periodo. Además, se evaluó la existencia de diferencias entre el IAF directo y el indirecto (del año 2016) de cada uno de los tratamientos, para lo cual se aplicó un análisis de varianza de una vía (Andeva), con su respectiva comprobación de normalidad de los residuales y homogeneidad de las varianzas. En los tratamientos donde se obtuvieron diferencias, se procedió a realizar la prueba de comparación múltiple según Tukey ($\alpha = 0,05$). Además, se realizó un análisis de correlación de Pearson para valorar el grado de relación entre la altura total (del 2016) y el IAF indirecto; según mencionan Piayda *et al.* (2015), conforme mayor sea la correlación de IAF y altura total, mayor es la efectividad del tratamiento de mecanización. Se generaron modelos de regresión para relacionar las variables IAF indirecto con IAP, para lo cual se siguió la metodología de Mason *et al.* (2012), que consiste en regresiones lineales (Ec. 2) en las que el IAP es la variable

independiente y el IAF indirecto es la variable dependiente.

$$\text{IAF} = a + b \cdot \text{IAP} \quad [2]$$

Donde:

IAF = índice de área foliar

IAP = índice de área de la planta

a = ordenada al origen

b = pendiente

Estos análisis de regresión se realizaron con una significancia de 0,05 en el programa STATISTICA 9.0.

RESULTADOS

Efectos de las actividades de labranza en las variables dasométricas

Los resultados no mostraron diferencias significativas en los valores del diámetro (Tabla 2) tanto del año 2013 (con diámetros que variaron de 8,19 cm a 9,16 cm), como del 2016 (de 10,80 cm a 12,50 cm); con un aumento diamétrico anual de 0,67 cm a 1,27 cm. Con la altura total en el año 2013 se mostraron diferencias significativas en las

TABLA 2. Valores promedio y desviación estándar del diámetro, altura total e incrementos de crecimiento en individuos de una plantación de *T. grandis* en la zona norte de Costa Rica.

Tratamiento	2013		2016		Incremento anual	
	Diámetro (cm)	Altura Total (m)	Diámetro (cm)	Altura Total (m)	Diamétrico (cm)	Altura total (m)
T	9,16 ^a (1,06)	9,31 ^b (1,33)	11,80 ^a (1,22)	9,90 ^a (1,20)	0,99 ^a (0,12)	0,20 ^a (0,62)
DT	8,19 ^a (1,33)	9,17 ^{ab} (1,02)	11,83 ^a (1,37)	10,20 ^a (1,10)	1,21 ^a (0,41)	0,34 ^{ab} (0,77)
1P25	8,79 ^a (1,85)	9,25 ^{ab} (1,02)	10,80 ^a (0,77)	11,20 ^a (1,25)	0,67 ^a (0,20)	0,65 ^{ab} (0,72)
3P25	8,92 ^a (1,59)	9,20 ^{ab} (1,12)	12,03 ^a (1,69)	10,10 ^a (0,95)	1,03 ^a (0,29)	0,30 ^a (0,60)
5P25	8,71 ^a (1,89)	9,39 ^b (1,56)	11,55 ^a (1,16)	12,20 ^a (1,30)	0,95 ^a (0,33)	0,93 ^b (0,54)
1P40	9,09 ^a (1,45)	9,31 ^b (1,25)	11,40 ^a (1,37)	11,62 ^a (1,50)	0,77 ^a (0,24)	0,77 ^b (0,66)
3P40	8,81 ^a (1,95)	8,81 ^{ab} (1,56)	10,97 ^a (0,89)	12,31 ^a (0,94)	0,72 ^a (0,20)	1,17 ^b (0,74)
5P40	8,67 ^a (1,02)	8,64 ^a (1,44)	12,50 ^a (1,37)	10,60 ^a (1,23)	1,27 ^a (0,21)	0,65 ^{ab} (0,59)

Nota: datos entre paréntesis corresponden a la desviación estándar; letras distintas en cada columna muestran diferencias significativas (Tukey, $P < 0,05$).

alturas con variaciones de 8,64 m a 9,39 m sin un tratamiento claramente dominante; sin embargo, para el año 2016 no se encontraron diferenciaciones considerables en las alturas (variación de 9,90 m a 12,31 m) con incrementos anuales de 0,20 m a 1,17 m.

Efectos de la labranza en la estimación del IAF

Un primer resultado indica que se encontró diferencia entre el AFE del testigo (Tabla 3), que presentó un valor medio de 24,79 cm², en comparación con los seis tratamientos de labranza que mostraron AFE significativamente mayores (en promedio de 57,17 cm²). Al analizar el IAF de método directo se encontraron variaciones de 3,51 m²m⁻² a 5,88 m²m⁻², mostrando dos agrupaciones con diferenciaciones significativas entre sí. El primer grupo conformado por los testigos (T y TD) que arrojaron valores inferiores a 3,75 m²m⁻² y una segunda agrupación conformada por los tratamientos de labranza que mostraron valores superiores a 4,87 m²m⁻², pero sin tener diferenciaciones significativas entre los tratamientos de labranza.

El IAF de método indirecto, presentó valores de 3,40 m²m⁻² a 5,83 m²m⁻², con una subestimación de los valores de IAF de 15% a 35% con respecto a los IAF directos,

TABLA 3. Valores promedio y desviación del área foliar específica (AFE) e índice de área foliar (IAF) directo e indirecto de una plantación de *T. grandis* en la zona norte de Costa Rica.

Tratamiento	AFE (cm ²)	IAF directo (m ² m ⁻²)	
		Directo	Indirecto
T	23,69 ^a (11,21)	3,51 ^a (0,88)	3,40 ^a (0,94)
DT	25,89 ^a (10,01)	3,79 ^a (0,51)	3,75 ^a (0,63)
1P25	43,50 ^b (9,19)	5,69 ^b (0,49)	5,67 ^b (0,55)
3P25	49,99 ^b (12,49)	5,58 ^b (0,37)	5,52 ^b (0,40)
5P25	52,45 ^b (8,66)	5,88 ^b (0,42)	5,83 ^b (0,45)
1P40	59,99 ^b (10,05)	5,61 ^b (0,41)	5,57 ^b (0,49)
3P40	40,11 ^b (12,12)	4,92 ^b (0,41)	4,87 ^b (0,49)
5P40	44,53 ^b (9,78)	5,79 ^b (0,40)	5,75 ^b (0,52)

Nota: datos entre paréntesis corresponden a la desviación estándar; letras distintas en cada columna muestran diferencias significativas (Tukey, P < 0,05).

pero manteniendo la tendencia de agrupación de T y DT con los valores menores (3,30 m²m⁻² a 3,75 m²m⁻²) y con el grupo de tratamientos con labranza de suelo (superiores a 4,87 m²m⁻²), que no mostraron diferencias entre sí.

Correlación del IAF y la altura total

Al relacionar los valores de IAF indirecto con la altura total (Fig. 1) se encontró una correlación inferior a 15% para los tratamientos T y TD (Fig. 1a y 1b), mostrando que la variabilidad en IAF de los árboles de ambos tratamientos es amplia. En cambio, los árboles ubicados en el suelo labrado mostraron relaciones superiores a 59%, mostrando una tendencia inversamente proporcional: conforme aumenta la altura total, el IAF decrece. Esta tendencia se muestra con mayor claridad en los tratamientos con labranza superficial: 1P25 (Fig. 1c), 3P25 (Fig. 1d) y 5P25 (Fig. 1e) con correlaciones entre 65% y 81%; en comparación con los tratamientos de labranza profunda 1P40 (Fig. 1f), 3P40 (Fig. 1g) y 5P40 (Fig. 1h), que mostraron correlaciones moderadas entre 59% y 75%. Sin embargo, es relevante destacar que aun con esta tendencia en las correlaciones, la diferenciación entre tratamientos no es significativa.

Modelos de regresión del IAF a partir de IAP

De manera general, los modelos de IAF indirecto mostraron la tendencia hacia un aumento lineal de IAF en función del IAP (Fig. 2). Los tratamientos 1P40 y 3P40 tendieron a sobrestimar el IAF cuando los valores de IAF eran superiores a 5,0 m²m⁻² y a subestimarlo cuando los valores de IAP eran inferiores a 5,3 m²m⁻²; en cambio el comportamiento de los seis tratamientos restantes fue a subestimar el IAF entre 10% y 40% con respecto a los valores del IAP. Al evaluar los modelos considerados, se encontró que los modelos de T y TD (IAF=0,46·IAP+3,86 y IAF=0,46·IAP-0,54) mostraron la menor precisión, debido a que son los que más subestiman el IAF, presentan los coeficientes de determinación menores y tienen errores estándar superiores a 0,19 (Tabla 3); en cambio con los modelos de labranza a 25 cm de profundidad, se obtuvieron subestimaciones de IAF entre 5% y 15%,

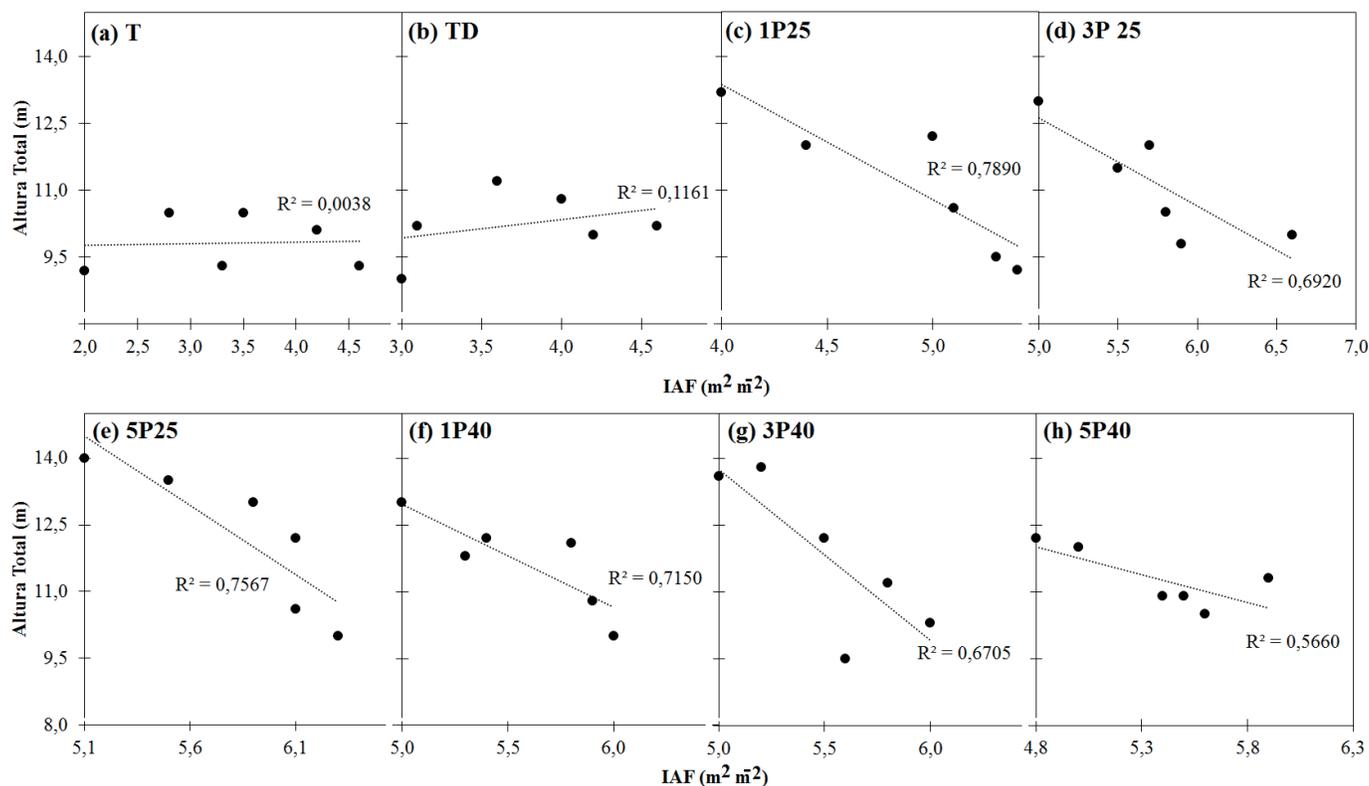


FIGURA 1. Correlación de la altura total y el índice de área foliar (IAF) indirecto en individuos juveniles de una plantación de *T. grandis* en la zona norte de Costa Rica.

siendo las menores en todos los tratamientos evaluados, con coeficientes de determinación ente 0,72 y 0,84 y errores estándar inferiores a 0,16. En cambio, los modelos con labranza a 40 cm presentaron una tendencia a subestimar el IAF especialmente en árboles de porte pequeño y de sobreestimarlos en árboles de mayores dimensiones, con coeficientes de determinación que variaron de 0,62 a 0,84 y errores estándar intermedios que oscilaron entre 0,09 y 0,16.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos (Tabla 2) no evidenciaron efectos de la labranza en el crecimiento diamétrico, esto se debe entre otros aspectos a dos factores principales: 1) el crecimiento de *T. grandis* en etapa juvenil (de tres a ocho años de edad) se enfoca en el desarrollo apical, como estrategia de sobrevivencia de la especie para mantenerse

en un sitio; por esto el crecimiento diamétrico se incrementa posterior al sexto año de vida (Khanduri *et al.*, 2008). 2) No ha transcurrido el suficiente tiempo para ver reflejado el efecto de la mejora del suelo (que se evidenció con la disminución de resistencia a la penetración y de densidad del suelo) en el crecimiento en el diámetro de los individuos; esto último se debe a que es un proceso de readaptación de los árboles y de su sistema radicular a los suelos mejorados. Según Tausz, Grulke, Richter y Kikuta (2014), las plantas inician con aumento radicular y foliar como promotores de crecimiento apical en primera instancia y el crecimiento diamétrico se evidencia de 24 a 60 meses después de la labranza (dependiendo de la edad y la especie), por cual no es de esperar cambios significativos a los 36 meses.

En el caso de la altura total, los resultados (Tabla 2) mostraron una homogeneización en esta variable, pro-

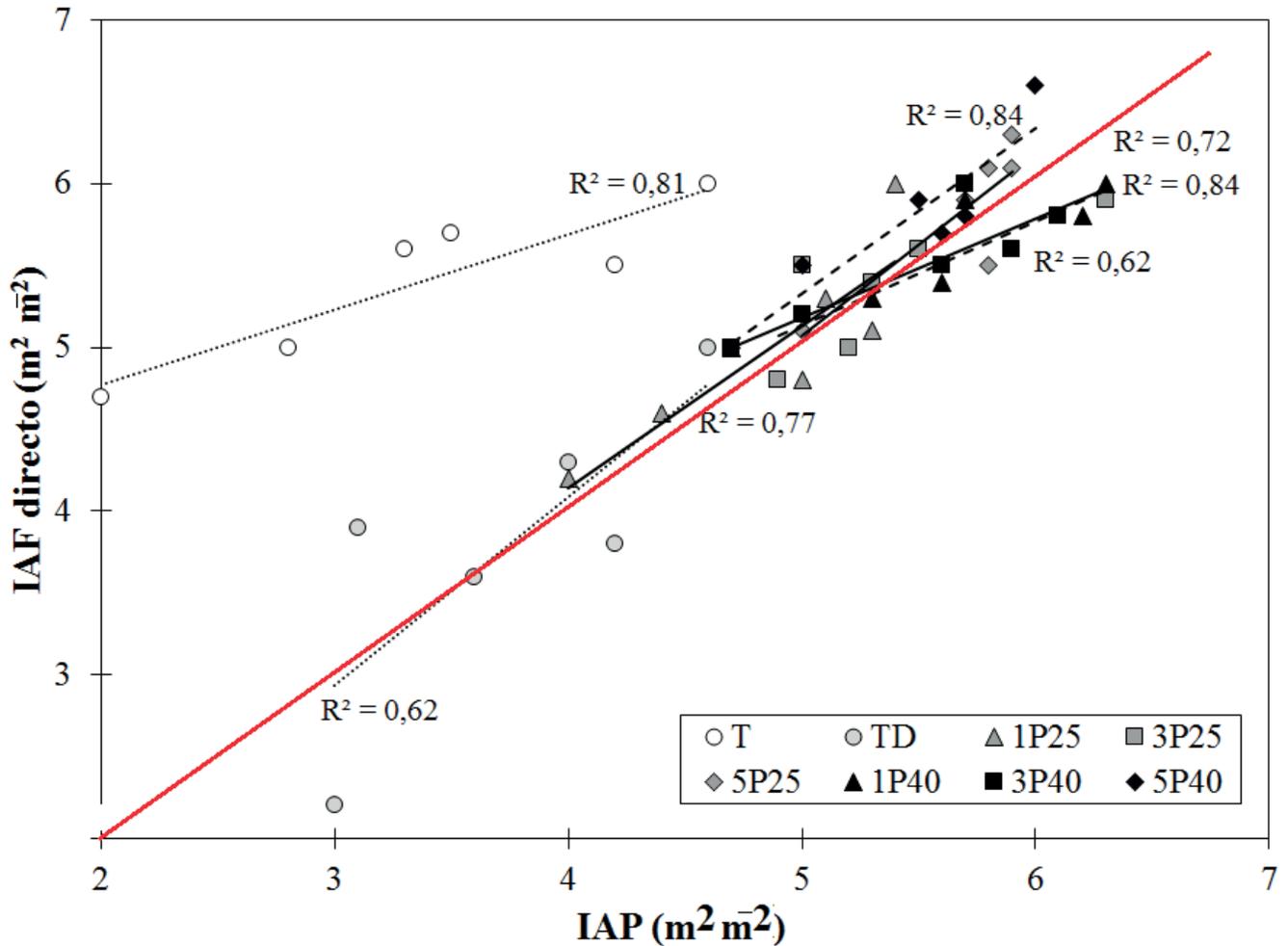


FIGURA 2. Comportamiento de los valores de índice de área foliar (IAF) indirecto en función del índice de área de la planta (IAP) de los ocho tratamientos de labranza de los individuos juveniles de una plantación de *T. grandis* en la zona norte de Costa Rica.

ducto de la labranza. Manchado y Silva (2001) mencionan que, en suelos compactados, el estrés fisiológico es elevado y limita el crecimiento por la falta de disponibilidad de nutrientes (mayor resistencia de liberación nutricional por parte del suelo) y por consiguiente la capacidad crecimiento radicular. En este contexto, la labranza genera una mejora en las condiciones que estimulan el desarrollo radicular, que permite mayor absorción de nutrientes y una reactivación apical, la cual resulta en un aumento de la altura. Bottinelli *et al.* (2014) mencionan, para dos especies de eucalipto, que la mejora del suelo proporcionó aumentos de 15% a 20% en el crecimiento apical y de 10% a 20% en el desarrollo foliar. Por su parte, Alvarado

(2016) destaca que se pueden encontrar cambios significativos de alturas en árboles en terrenos con labranza 24 meses después de la actividad; este debe ser el tiempo necesario para una recuperación de la micro fauna liberadora de los nutrientes en el suelo, cuyas poblaciones se pueden ver mermadas por los cambios físicos y la cantidad de biomasa radicular viva. Es importante destacar que los árboles de los tratamientos testigo, presentaron las tasas de crecimientos de altura menores debido a que el individuo continúa en un estado de estrés y, según destaca Pancel (2016), conforme el árbol tenga una edad mayor el estrés aumentará, el crecimiento disminuirá y se corre riesgo de muerte del individuo.



Se considera que las diferencias de IAF entre las unidades testigo (T y DT) y los seis tratamientos de labranza se debieron a la estimulación generada por la mecanización. Bottinelli *et al.* (2014) mencionan que el desarrollo foliar es altamente susceptible a cambios en el suelo, esto debido a que un aumento o reducción del sistema radicular incide en la capacidad de absorción de agua y macronutrientes por parte de la planta que son precursores en la formación foliar. Aquellos suelos con mejoras en sus propiedades físicas, pueden resultar en un aumento del área foliar de 20% a 65%, como lo obtenido por Culshaw y Stoke (1995) con dos especies de eucalipto, que a 12 meses poslabranza presentaron aumentos del IAF de 10% a 30%; estos autores resaltan que un aumento de área foliar y por consiguiente en los procesos de fotosíntesis, generaron un estímulo en el crecimiento de 10% durante primeros 18 meses poslabranza. El aumento foliar según mencionan Culshaw y Stoke (1995) y Bottinelli *et al.* (2014) es de los primeros indicadores de los efectos fisiológicos de las actividades de labranza, que se pueden explicar en tres fases: (i) recuperación radicular (en el que los árboles empiezan a recuperar volumen radicular y repoblar áreas del suelo; generalmente esto tarda de 6 a 12 meses en árboles con menos de tres años de edad), (ii) regeneración foliar (aumento del IAF a 18 meses poslabranza y una estimulación del crecimiento longitudinal del individuo) y (iii) crecimiento total (estimulación del crecimiento radial y formación de nuevos ejes en el individuo).

Las mejoras en la labranza del suelo y la estimulación en el crecimiento se evidenciaron claramente en los análisis de correlación (Fig. 1). La homogeneidad en los individuos con labranza en comparación con los testigos (T y DT) se debe a que los testigos muestran evidencia de una compactación mixta (Carballas *et al.*, 2015), que es resultado del uso anterior del suelo (ganadería). Por su parte, Srinivasa *et al.* (2017) mencionan que la labranza elimina el efecto de la compactación mixta generalmente en los primeros 40 cm de profundidad del suelo, permitiendo no solo homogeneizar la compactación del suelo sino aumentar la permeabilidad de la cal

y magnesio y con ello mitigar los efectos de la acidez; además promueve la recuperación de colonias bacterianas fijadoras de nitrógeno y eliminación de otras coberturas herbáceas que pueden limitar el desarrollo de la especie (Meinzer *et al.*, 2011).

Piayda *et al.* (2015) mencionan que, como producto de la mejora en las condiciones edáficas en las plantaciones, los árboles con mayor porte tienden a producir pocas hojas, pero con un AFE significativa mayor en comparación con los árboles de mediano y bajo porte, que presentarían una mayor cantidad de hojas pero de menor tamaño como respuesta a la competición por luminosidad y espacio. Este comportamiento no se da en condiciones de suelo con limitaciones tanto en propiedades físicas como químicas que generan en las plantaciones una alta variabilidad en altura, debido a que los individuos concentran su energía en adaptarse a la condición de estrés como medida de supervivencia (Pugnaire y Valladares, 1999; Pessaraki, 2014). Esto además incidió en los modelos de regresión (Tabla 4) que en los tratamientos testigo presentaron un error estándar mayor, menor precisión y por ende subestimación del IAF (Fig. 2) con respecto a los tratamientos de labranza. Estos, por la homogeneización de la plantación, mostraron modelos con menor error, mayor precisión y subestimaciones menores a 30%. Lo anterior es similar a lo encontrado por Mason *et al.* (2012), con árboles de pino, quienes justificaron que la mejoría en las condiciones de crecimiento se debieron a mejorías en las condiciones edáficas, que impactaron positivamente en el desarrollo de cada individuo en la plantación.

La no presencia de diferencias significativas entre los tratamientos de labranza se puede explicar por el periodo de evaluación que no ha sido suficientemente amplio. Mapa (1995) menciona que los procesos de mejora del suelo en especies tropicales son efectivos a 72 meses de la labranza y las diferencias en los árboles se producen después de los 84 meses; esto debido a que es la edad en que alcanzan la madurez y las leves mejorías en suelo pueden ser aprovechadas para su adaptación. En otras palabras, la reestructuración del suelo poslabranza no se ha dado en su totalidad; Clemens *et al.* (2010) destacan que la forma-

TABLA 4. Modelos de regresión del modelo $IAF=a \cdot IAP+b$ para determinar el IAF a partir del IAP de una plantación de *T. grandis* en la zona norte de Costa Rica una significancia de 0,05.

Tratamiento	Modelo regresión	r^2	Error estándar	t-Value	P_{res} -Value
T	$IAF=3,86+0,86 \cdot IAP$	0,61	0,23	7,8	0,011
DT	$IAF=-0,54+1,16 \cdot IAP$	0,62	0,21	9,66	0,014
1P25	$IAF=0,18+0,99 \cdot IAP$	0,77	0,11	7,91	<0,001
3P25	$IAF=2,14+0,61 \cdot IAP$	0,84	0,13	9,11	0,002
5P25	$IAF=1,11-0,48 \cdot IAP$	0,72	0,12	9,55	<0,001
1P40	$IAF=0,63+1,98 \cdot IAP$	0,62	0,14	9,74	0,004
3P40	$IAF=1,16+0,87 \cdot IAP$	0,84	0,10	9,67	<0,001
5P40	$IAF=1,01+0,30 \cdot IAP$	0,8	0,13	9,12	0,003

IAF = índice de área foliar; IAP = índice de área de la planta. Modelos de correlación realizados con un P de 0,05

ción de estructura y macroestructura y la incorporación de material orgánico en el suelo mecanizado son de lento desarrollo, debido a que es un proceso que depende de factores internos del suelo como son presencia de arcillas, limos y arcillas además de variables externas como precipitación y viento.

A pesar de que en este tipo de experimentos se esperan respuestas más inmediatas, la realidad y las experiencias de otros estudios indican que hay un período de reestructuración del suelo y, en este caso, del sistema radicular de los árboles, que requieren evaluaciones en períodos más prolongados. Definitivamente variables relacionadas con el área foliar son clave en la evaluación de este tipo de experimentos. No obstante, los aportes en el presente estudio ayudan en la toma de decisiones con respecto al manejo de las plantaciones establecidas. La principal recomendación a la luz de los resultados es que las acciones de corrección de los factores limitantes en el suelo, sean físicos, químicos o en combinación, deben formar parte de las labores previas al establecimiento de una plantación forestal.

CONCLUSIONES

Los árboles de *T. grandis*, tres años después de la labranza, no presentaron diferencias significativas en el crecimiento diámetro, debido principalmente al corto

período de la evaluación; la especie estudiada centra su desarrollo en el crecimiento apical. En cambio, se presentó una homogeneización de la altura total entre los tratamientos debido a que esta es una variable de respuesta a corto plazo.

EL IAF mostró diferencias significativas entre los tratamientos, obteniendo que la mecanización aumentó hasta en 20% el IAF en comparación con los testigos (T y TD); que presentaron un retardo del crecimiento debido al estrés producto de la compactación del suelo, que limita la disponibilidad de nutrientes y de agua, retardando el desarrollo radicular.

La no diferenciación entre los tratamientos de labranza se debe a que el periodo de evaluación es aún muy corto para evidenciar sus efectos en el desarrollo de los árboles. Sería ideal realizar la medición 60 meses después de la labranza y correlacionarse con la densidad y resistencia a la penetración del suelo.

RECONOCIMIENTOS

Agradecemos a la Dirección de Posgrados y la Vicerrectoría de Investigación y extensión (VIE) del Tecnológico de Costa Rica, al Ministerio de Ciencia, Tecnología y Telecomunicaciones (Micitt), al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (Conicit), por el apoyo financiero para el desarrollo de este proyecto, y a la



empresa Reforestación Grupo Internacional RGI S.A por todo el apoyo logístico, técnico y financiero brindado durante la ejecución del proyecto.

REFERENCIAS

- Alvarado, A. (2016). *Plant nutrition in tropical forestry*. Amsterdam, Netherlands: Springer.
- Arias, D. (2004). Validación del índice de densidad del rodal para el manejo de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. en el trópico. *Kurú: Revista Forestal*, 1(1), 1-9.
- Aristide, H. D., Christophe, A., Sossou, H., Malahimi, A. y Antoine, V. (2015). Mass diffusivity determination of teak wood (*Tectona grandis*) used as building material. *Procedia Engineering*, 127, 201-207. doi:10.1016/j.proeng.2015.11.327
- Aruga, K., Hiyamizu, G., Nakahata, C. y Saito, M. (2013). Effects of aggregating forests, establishing forest road networks, and mechanization on operational efficiency and costs in a mountainous region in Japan. *Journal of Forestry Research*, 24(4), 747-754. doi:10.1007/s11676-013-0414-1
- Boley, J. D., Drew, A. P. y Andrus, R. E. (2009). Effects of active pasture, teak (*Tectona grandis*) and mixed native plantations on soil chemistry in Costa Rica. *Forest Ecology and Management*, 257, 2254-2261. doi: 10.1016/j.foreco.2009.02.035
- Bottinelli, N., Hallaire, V., Goutal, N., Bonnaud, P. y Ranger, J. (2014). Impact of heavy traffic on soil macroporosity of two silty forest soils: Initial effect and short-term recovery. *Geoderma*, 217, 10-17. doi:10.1016/j.geoderma.2013.10.025
- Carballas, T., Rodríguez-Rastrero, M., Artieda, O., Gumuzzio, J., Díaz-Riviña, M. y Martín, Á. (2015). Soils of the temperate humid zone. Amsterdam, Netherlands: Springer.
- Chianucci, F., Cutini, A., Corona y P., Puletti, N. (2014). Estimation of leaf area index in understory deciduous trees using digital photography. *Agricultural and Forest Meteorology*, 198, 259-264. doi:10.1016/j.agrformet.2014.09.001
- Chianucci, F., Puletti, N., Giacomello, E., Cutini, A. y Corona, P. (2015). Estimation of leaf area index in isolated trees with digital photography and its application to urban forestry. *Urban Forestry & Urban Greening*, 14(2), 377-382. doi:10.1016/j.ufug.2015.04.001
- Clemens, G., Fiedler, S., Cong, N., Van Dung, N., Schuler, U. y Stahr, K. (2010). Soil fertility affected by land use history, relief position, and parent material under a tropical climate in NW-Vietnam. *Catena*, 81:87-96.
- Culshaw, D. y Stokes, B. (1995). Mechanization of short rotation forestry. *Biomass and Bioenergy*, 9(1-5), 127-140. doi:10.1016/0961-9534(95)00085-2
- Demarez, V., Duthoit, S., Baret, F., Weiss, M. y Dedieu, G. (2008). Estimation of leaf area and clumping indexes of crops with hemispherical photographs. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148(4), 644-655. doi:10.1016/j.agrformet.2007.11.015
- Engler, B., Becker, G. y Hoffmann, S. (2016). Process mechanization models for improved *Eucalyptus* plantation management in Southern China based on the analysis of currently applied semi-mechanized harvesting operations. *Biomass and Bioenergy*, 87, 96-106. doi:10.1016/j.biombioe.2016.02.021
- Fernández-Moya, J. y Alvarado, A. (2014). Forest nutrition and fertilization in teak (*Tectona grandis* Lf) plantations in Central America. *New Zealand Journal of Science*, 44, 1-8. doi:10.1186/1179-5395-44-S1-S6
- Huzsvai, L. y Rajkai, K. (2009). Modeling of plant adaptation to climatic drought induced water deficit. *Biologia* 64(3), 66-70. doi:10.2478/s11756-009-0092-9
- Instituto Meteorológico Nacional. (2016). *Datos históricos regionales de Costa Rica*. Recuperado de [http:// www.imn.ac.cr](http://www.imn.ac.cr)
- Jones, M. B. (1993). Plant microclimate. En D, Hall., J. M. Scurlock., H. R. Bolhàr-Nordenkampf., R. C. Leegood., S. P. Long. (Eds.), *Photosynthesis and production in a changing environment* (pp.530-560). Amsterdam, Netherlands: Springer. doi. 10.1007/978-94-011-1566-7_4
- Khanduri, V., Lalnundanga, L. y Vanlalremkimi, J. (2008). Growing stock variation in different teak (*Tectona grandis*) forest stands of Mizoram, India. *Journal of Forestry*

- Research*, 19(3), 204-208. doi:10.1007/s11676-008-0043-2
- Leblanc, S. G. y Fournier, R. A. (2014). Hemispherical photography simulations with an architectural model to assess retrieval of leaf area index. *Agricultural and Forest Meteorology*, 194, 64-76. doi:10.1016/j.agrformet.2014.03.016
- Liu, J., Pattey y E., Admiral, S. (2013). Assessment of in situ crop LAI measurement using unidirectional view digital photography. *Agricultural and Forest Meteorology*, 169, 25-34. doi:10.1016/j.agrformet.2012.10.009
- Machado, P. y Silva, A. (2001). Soil management under no-tillage systems in the tropics with special reference to Brazil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 61:119-130
- Mapa, R. (1995) Effects of reforestation using *Tectona grandis* on infiltration and soil water retention. *Forest Ecology and Management*, 77:119-125
- Marshall, J. y Waring, H. (1986). Comparison of methods of estimating leaf area index in old-growth Douglas-fir. *Ecology*, 67(4), 975-979
- Mason, E., Diepstraten, M., Pinjuv, G. y Lasserre, J. (2012). Comparison of direct and indirect leaf area index measurements of *Pinus radiata* D. Don. *Agricultural and Forest Meteorology*, 166, 113-119. doi:10.1016/j.agrformet.2012.06.013
- Meinzer, F., Lachenbruch, B. y Dawson, T. (2011). Tree physiology. En F. B. Meinzer. y T. Dawson (Eds.). *Size- and age-related changes in tree structure and function* (pp. 235-256). Amsterdam, Netherlands: Springer. doi:10.1007/978-94-007-1242-3
- Mougin, E., Demarez, F., Diawara, M., Hiernaux, P., Souma-guel, N. y Berg, A. (2014). Estimation of LAI, fAPAR and fCover of Sahel rangelands (Gourma, Mali). *Agricultural and Forest Meteorology* 198, 155-167. doi:10.1016/j.agrformet.2014.08.006
- Pancel, L. (2016). Basic outline of tree plantations in the tropics. Amsterdam, Netherlands: Springer.
- Pessaraki, M. (2014). Handbook of plant and crop physiology. Amsterdam, Netherlands: Springer.
- Piayda, A., Dubbert, M., Werner, C., Correia, A., Pereira, A. y Cuntz, M. (2015). Influence of woody tissue and leaf clumping on vertically resolved leaf area index and angular gap probability estimates. *Forest Ecology and Management*, 340, 103-113. doi:10.1016/j.foreco.2014.12.026
- Poblete-Echeverría, C., Fuentes, S., Ortega-Farías, S., González-Talice, J. y Yuri, J. (2015). Digital cover photography for estimating leaf area index (LAI) in apple trees using a variable light extinction coefficient. *Sensors*, 15(2), 566-571. doi:10.3390/s150202860
- Pugnaire, F. y Valladares, F. (1999). Handbook of functional plant ecology. Amsterdam, Netherlands: Springer.
- Sofo, A., Dichio, B., Montanaro, G. y Xiloyannis, C. (2009). Shade effect on photosynthesis and photoinhibition in olive during drought and rewatering. *Agricultural Water Management*, 96(8), 1201-1206. doi:10.1016/j.agwat.2009.03.004
- Srinivasa, C., Gopinath, K., Rama, C., Raju, B., Rejani, R., Venkatesh, G. y Visha, V. (2017). Dryland agriculture in South Asia: experiences, challenges and opportunities. Amsterdam, Netherlands: Springer.
- Tausz, M., Grulke, N., Richter, H. y Kikuta, S. (2014). Plant ecophysiology. En M. Tausz., N. Grulke (Eds.), *Trees in a changing environmental* (pp. 108-126). Amsterdam, Netherlands: Springer. doi:10.1007/978-94-017-9100-7_6
- Tewari, V. P., Sukumar, R., Kumar, R. y Gadow, K. (2014). Forest observational studies in India: past developments and considerations for the future. *Forest Ecology and Management*, 316, 32-46. doi: 10.1016/j.foreco.2013.06.050
- Torres-Ruiz, J., Diaz-Espejo, A., Morales-Sillero, A., Martín-Palomo, M., Mayr, S., Beikircher, S. y Fernández, J. (2013). Shoot hydraulic characteristics, plant water status and stomatal response in olive trees under different soil water conditions. *Plant and Soil*, 373(1-2), 77-87. doi:10.1007/s11104-013-1774-1
- Van Wijk, M., Williams, M. y Shaver, G. (2004). Tight coupling between leaf area index and foliage N content in arctic plant communities. *Oecologia*, 142(3), 421-427. doi:10.1007/s00442-004-1733-x
- Vyas, D., Mehta, N., Dinakaran, N. y Krishnayya, K. (2010). Allometric equations for estimating leaf area index (LAI)



- of two important tropical species (*Tectona grandis* and *Dendrocalamus strictus*). *Journal of Forestry Research*, 21(2), 197-200. doi:10.1007/s11676-010-0032-0
- Weiss, M., Baret, F., Smith, G., Jonckheere, I. y Coppin, P. (2004). Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination. Part II. Estimation of LAI, error and sampling. *Agriculture and Forest Meteorology*, 121, 37-53.
- Xiao, CW., Janssens, C., Yuste, C. y Ceulemans, C. (2006). Variation of specific leaf area and upscaling to leaf area index in mature Scots pine. *Trees*, 20(3), 304-310. doi:10.1007/s00468-005-0039-x
- Yoshifuji, N., Kumagai, T., Tanaka, K., Tanaka, N., Komatsu, H., Suzuki, M. y Tantasirin, C. (2009). Inter-annual variation in growing season length of a tropical seasonal forest in northern Thailand. *Forest Ecology and Management*, 229, 333-339. doi:10.1016/j.foreco.2006.04.013
- Zhang, W., Yu, D., Shi, X., Wang, H., Gu, Z., Zhang, X. y Tan, M. (2011). The suitability of using leaf area index to quantify soil loss under vegetation cover. *Journal of Mountain Science*, 8(4), 564-570. doi:10.1007/s11629-011-1121-z
- Zhou, Z., Liang, K., Xu, D., Zhang, Y. y Huang, G. (2012). Effects of calcium, boron and nitrogen fertilization on the growth of teak (*Tectona grandis*) seedlings and chemical property of acidic soil substrate. *New Forests*, 43(2), 231-243. doi:10.1007/s11056-011-9276-6

Manuscrito recibido el 6 de junio de 2016.

Aceptado el 14 de marzo de 2017.

Este documento se debe citar como:

Valverde, J. C., Guevara-Bonilla, M., Arias, D., Briceño, E. y Esquivel, E. (2017). Efectos de las actividades de abranza en el índice de área foliar en una plantación de *Tectona grandis* en la zona norte de Costa Rica. *Madera y Bosques*, 23(2), 7-19. doi: 10.21829/myb.2017.232498.