



DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i63.808>

Artículo

Medición del índice de área foliar y su dinámica estacional en plantaciones de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake

Measurement of the leaf area index and its seasonal dynamics in *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake plantations

Adrián Hernández Ramos¹, José René Valdez Lazalde^{2*}, Gregorio Ángeles Pérez², Héctor Manuel de los Santos Posadas², Jonathan Hernández Ramos³, Alicia Peduzzi⁴ y Omar Carrero⁵

Abstract

Leaf area index (IAF , $m^2 m^{-2}$) is an indicator of productivity in forest plantations and can be used to describe the response of trees to the application of silvicultural practices. The objective of the study was to identify a precise and efficient method to estimate the IAF in commercial forest plantations of *Eucalyptus urophylla*. At the same time, the seasonal dynamics of the IAF was analyzed for one year. 28 sampling units were established in which monthly IAF measurements were made using the litter ($IAF_{Hojarasca}$) and optical ($IAF_{Óptico}$) collection methods. Additionally, a destructive sampling of 93 trees was implemented to estimate the IAF through allometry ($IAF_{Alométrico}$). The estimated average values of IAF were 2.7, 2.6 and 1.6 for the allometric, litter collection, and optical methods, respectively. This implied an average underestimation of 39 and 37 % of the optical method compared to the allometric and litter collection methods, respectively. A correlation analysis of the IAF estimates, obtained through the three methods applied, allowed to identify a high association ($r = 0.75$, Pearson's correlation coefficient) between the values estimated with the litter collection and optical methods. Based on this result (association), a regression model was adjusted to calibrate $IAF_{Óptico}$ values (indirect measurements) to more precise estimates, $IAF_{Calibrado}$. The maximum value of IAF was recorded during July and August, months of greatest growth for *E. urophylla* under commercial plantation conditions in Mexico.

Key words: Allometry, leaf area, hemispheric photography, gaps fraction, leaf litter, commercial forest plantations.

Resumen

El índice de área foliar (IAF , $m^2 m^{-2}$) es un indicador de productividad en las plantaciones forestales y puede usarse para describir la respuesta de los árboles a la aplicación de prácticas silvícolas. El objetivo del estudio fue identificar un método preciso y eficiente para estimar el IAF en plantaciones forestales comerciales de *Eucalyptus urophylla*. Paralelamente, se analizó la dinámica estacional del IAF durante un año. Se establecieron 28 unidades de muestreo en las que se realizaron mediciones mensuales de IAF , con los métodos de recolección de hojarasca ($IAF_{Hojarasca}$) y óptico ($IAF_{Óptico}$). Además, se implementó un muestreo destructivo de 93 árboles para estimar el IAF mediante alometría ($IAF_{Alométrico}$). Los valores promedio estimados de IAF fueron 2.7, 2.6 y 1.6 para el método alométrico, recolección de hojarasca y óptico, respectivamente. Esto implicó una subestimación promedio de 39 y 37 % del método óptico, en comparación con los métodos alométrico y de recolección de hojarasca. Un análisis de correlación de las estimaciones de IAF , obtenidas con los tres métodos aplicados, permitió identificar una alta asociación ($r = 0.75$, coeficiente de correlación de *Pearson*) entre los valores estimados con los métodos de recolección de hojarasca y óptico. Con base en este resultado (asociación) se ajustó un modelo de regresión, a fin de calibrar las mediciones indirectas ($IAF_{Óptico}$) a un valor más preciso, $IAF_{Calibrado}$. El valor máximo de IAF se registró en julio y agosto, meses del mayor crecimiento para *E. urophylla* en condiciones de plantación comercial en México.

Palabras clave: Alometría, área foliar, fotografía hemisférica, fracción de huecos, hojarasca, plantaciones forestales comerciales.

Fecha de recepción/Reception date: 26 de junio de 2020

Fecha de Aceptación/Acceptance date: 4 de noviembre de 2020

¹Campo Experimental Saltillo. INIFAP. México.

²Posgrado en Ciencias Forestales. Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo. México.

³Campo Experimental Chetumal, INIFAP. México.

⁴Woods Hole Research Center. Gilman Ordway Campus. USA.

⁵GRANFLOR. Brasil.

*Autor de correspondencia; correo-e: valdez@colpos.mx

Introducción

El área foliar (*AF*) es la superficie en la que se intercambia energía y materia entre una planta y la atmósfera; se considera una variable clave para modelar el crecimiento de los árboles y de las condiciones de un bosque (Guangjian *et al.*, 2019). Su dinámica puede analizarse mediante parámetros como el Índice de Área Foliar (*IAF*), definido como la cantidad de hojas presentes por unidad de superficie ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) (Sun *et al.*, 2019). El *IAF* se emplea como un indicador para evaluar la productividad de ecosistemas y de plantaciones forestales (Papamija y García, 2012).

Los métodos para estimar el *IAF* son de tipo directo o indirecto. Los primeros requieren de un muestreo destructivo e implican la medición directa del follaje del árbol o la recolección de hojarasca durante un tiempo, por ello son costosos y de lenta aplicación (Muñoz *et al.*, 2008), lo que limita su uso a gran escala. Los métodos indirectos se basan en la medición de la radiación solar que penetra al piso forestal a través del dosel arbóreo (Hu *et al.*, 2014). Estos métodos son una alternativa eficiente para la medición del *IAF* en diferentes tipos de vegetación forestal (Martínez *et al.*, 2006; Chen *et al.*, 2018). Sin embargo, a pesar de su eficiencia, los indirectos suelen presentar sesgo en las estimaciones, por lo que es frecuente que se recurra al uso de métodos mixtos que establecen con precisión relaciones matemáticas entre estimaciones alométricas (directas) y mediciones ópticas (indirectas) (Aguirre-Salado *et al.*, 2011; Guangjian *et al.*, 2019).

La estimación del *IAF* en plantaciones forestales comerciales (PFC) es importante para determinar su potencial productivo y para establecer posibles respuestas de crecimiento a causa del manejo silvícola (Papamija y García, 2012). Por ello, es justificable determinar el método más eficiente y de mayor precisión para estimar este índice para cada especie utilizada.

En México, el género *Eucalyptus* es el segundo más frecuente en las PFC (Conafor, 2014), en particular *E. urophylla* S. T. Blake, una especie bien adaptada y de rápido crecimiento en regiones tropicales (Wright, 1997).

El objetivo principal de este estudio fue estimar el *IAF* mediante métodos directos e indirectos en plantaciones forestales comerciales de *E. urophylla*, a partir de la hipótesis de que las

mediciones indirectas del *IAF* pueden dar información confiable y con menor esfuerzo de medición, respecto a la dinámica de crecimiento y del estado de las plantaciones forestales. Paralelamente, se analizó la dinámica estacional del *IAF* durante un año.

Materiales y Métodos

Área de estudio

El estudio se realizó en plantaciones forestales comerciales de *E. urophylla* establecidas en Huimanguillo, Tabasco, México (17°55' N, 94°06' O) (Figura 1), donde la altitud promedio del terreno es de 30 m. El clima es cálido húmedo ($A_m(f)$), con lluvias en verano, precipitación media anual de 2 500 mm y temperatura media anual alrededor de 26 °C (García, 1998). Los suelos son de tipo Feozem (INEGI, 2005). La vegetación circundante está compuesta de relictos de selva alta perennifolia y vegetación secundaria (Conafor, 2012). Las plantaciones tienen entre uno y siete años de edad y fueron establecidas a espaciamiento promedio de 2.5 m × 3.5 m entre plantas e hileras, a una densidad promedio de 1 367 árboles ha⁻¹ con plantas clonales de *E. urophylla*.

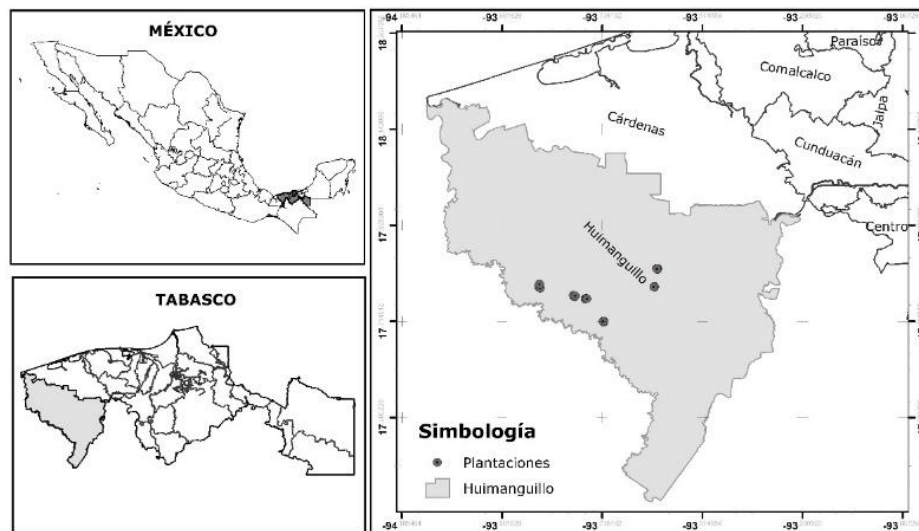


Figura 1. Ubicación de las plantaciones forestales comerciales de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake.

Levantamiento de datos en campo. Mediante un muestreo selectivo, con especial atención a respetar la densidad de plantación original o con la menor pérdida de individuos posible, se demarcaron cuatro sitios rectangulares de 500 m² por plantación. En total se establecieron 28 sitios de muestreo distribuidos en siete plantaciones, cada una con una edad diferente, de uno a siete años de edad. Al inicio y al final del estudio (julio 2014 y agosto 2015, respectivamente) se midió el diámetro normal (D_n , cm) con una forcípula *Mantax Black* de 95 cm y la altura total (A_t , m) con un clinómetro *SUUNTO* de todos los árboles dentro de los sitios de muestreo.

Para estimar el *IAF* con el método de recolección de hojarasca, se colocaron trampas de captura circulares de 1 m² de superficie, a 1 m sobre el suelo. El total se fue de 112 trampas (16 por plantación, 4 por sitio de muestreo). Mensualmente, de agosto 2014 a julio 2015, se recolectó la hojarasca presente en las trampas y se deshidrató hasta alcanzar peso constante (aproximadamente 72 h) en una estufa de secado *SHELL LAB SMO14-2* a 70 °C. A continuación, se obtuvo el peso seco (g) en una báscula con precisión de 0.01 g *OHAUS Navigator*TM.

El método óptico implicó obtener cinco fotografías hemisféricas (FH) en cada sitio de muestreo, para ello se utilizó una cámara *Nikon Coolpix D3100* (Figura 2), equipada con lente tipo "ojo de pescado" de 5 mm. Las FH se obtuvieron de acuerdo al tamaño de muestra mínimo definido por Whitford *et al.* (1995). Cada sitio de muestreo se dividió en cuatro secciones para tomar una FH por sección y una más en el centro del sitio. La muestra mensual fue de 140 FH, mismas que se analizaron con la aplicación *Hemisfer*[©] *Patrick Schleppe* versión 2.13, aplicación que integra una gran variedad de metodologías para estimar el *IAF* (Schleppe *et al.*, 2007).



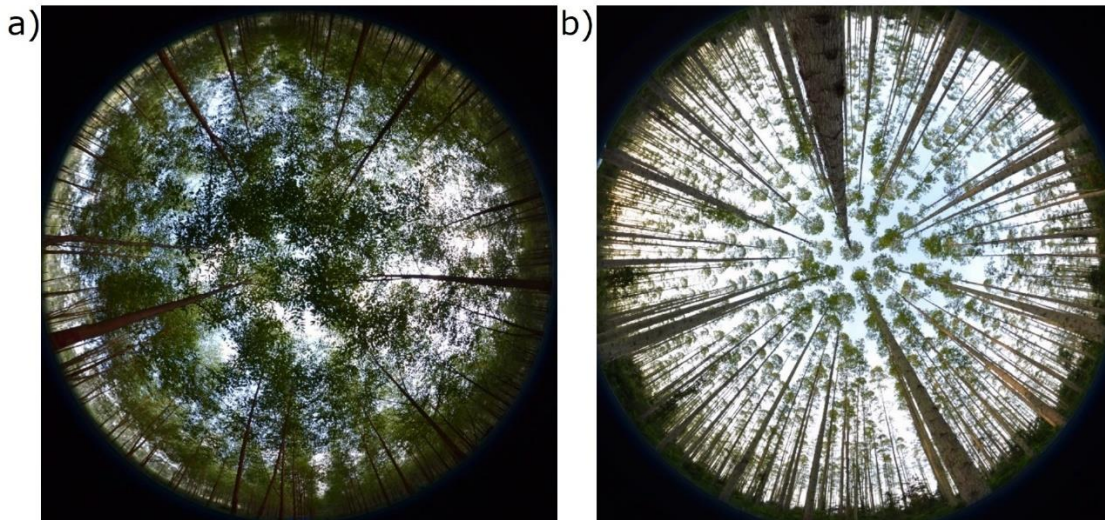


Figura 2. Ejemplos de fotografías hemisféricas tomadas en plantaciones de un año (a) y siete años (b) de edad.

La estimación alométrica del *IAF* implicó el muestreo destructivo de 93 árboles seleccionados de siete plantaciones de edad diferente (15, 13, 12, 12, 12, 15 y 14 individuos en las plantaciones de uno a siete años, respectivamente), distribuidos en un intervalo de diámetro normal de 7.8 a 33.2 cm y en altura total entre 8.5 y 33.3 m. Según Jonckheere *et al.* (2004), la muestra obtenida es representativa para estimar el área foliar específica (*AFE*, $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$) y el área foliar proyectada (*AFP*, m^2). Se registró el peso total del follaje verde de cada árbol derribado y se extrajo una muestra (0.5 kg) de follaje de diferentes partes de la copa por individuo, la cual se deshidrató a 72 °C para determinar su peso seco en una báscula de precisión de 0.01 g *OHAUS Navigator*TM. A los árboles derribados se les midió el diámetro del tocón (*Dt*, cm) y el diámetro normal (*Dn*, cm) con una forcípula *Mantax Black*[®] de 95 cm; además de la altura total (*At*, m) con un flexómetro *Truper* 12639 de 30 m. Con estos datos se generaron ecuaciones alométricas para estimar el *AFE* y el *AFP*.

Estimación del área foliar específica. El *AFE* se estimó a nivel de árbol ($AFE_{\text{Individual}}$, $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$), a partir del cálculo aritmético empleado por Cano *et al.* (1996) y Muñoz *et al.* (2008). En una submuestra de 60 hojas, de la muestra inicial de follaje colectada

de cada árbol derribado, se midió el área foliar adaxial de cada hoja (AF_{Hoja}) (m^2) con un integrador foliar (*Li-COR 3000C*). Después, se secaron y se pesaron para obtener la biomasa seca por hoja (BS_{Hoja}) (kg). Mediante el cociente de AF_{Hoja} y BS_{Hoja} (Ecuación 1) se estimó el $AFE_{Individual}$ de cada individuo. Posterior a ello, se promediaron los valores para calcular un valor por edad de plantación:

$$AFE_{Individual} = \frac{\sum_{i=1}^n AF_{Hoja}}{\sum_{i=1}^n BS_{Hoja}} \quad (1)$$

Estimación del área foliar proyectada. El $AFP_{Individual}$ (m^2) por árbol se estimó como el producto del $AFE_{Individual}$ y la biomasa foliar seca (BFS_{Total}) (kg) (Ecuación 2). La BFS_{Total} se calculó siguiendo la metodología recomendada por Muñoz *et al.* (2008), la cual resulta de multiplicar el peso foliar verde ($PFV_{Individual}$) por el cociente ($R_{Muestra}$) peso seco/peso verde de hojas de la muestra de follaje por árbol derribado (Ecuación 3).

$$AFP_{Individual} = (AFE_{Individual}) (BFS_{Total}) \quad (2)$$

$$BFS_{Total} = (PFV_{Individual}) (R_{Muestra}) \quad (3)$$

Estimación del índice de área foliar. El IAF se estimó con los métodos alométrico, recolección de hojarasca y óptico. Para el primero, inicialmente se calculó la BFS_{Total} para cada árbol presente en los sitios de muestreo con las ecuaciones recomendadas por Hernández-Ramos *et al.* (2017) para la especie, se emplearon las variables alométricas. Posterior a ello, con la BFS_{Total} calculada se estimó el $AFP_{Individual}$ para cada árbol en el sitio, a partir del modelo ajustado en el presente documento y descrito en los resultados. Estas estimaciones permitieron obtener el $IAF_{Alométrico}$ ($m^2 m^{-2}$)

(Ecuación 4) a nivel sitio para las dos fechas de medición (inicial: julio de 2014 y final: agosto de 2015).

$$IAF_{Alométrico} = \frac{\sum_{i=1}^n AFP_{Individual}}{AS} \quad (4)$$

Donde:

$IAF_{Alométrico}$ = Índice de Área Foliar por sitio calculado mediante relaciones alométricas

$AFP_{Individual}$ = Área foliar proyectada estimada por árbol (m²)

AS = Superficie del sitio (m²)

n = Número de árboles presentes en el sitio

La estimación del IAF mediante recolección de hojarasca ($IAF_{Hojarasca}$) por sitio de muestreo resultó del peso de la hojarasca seca acumulada durante un año en una trampa y el valor del $AFE_{Individual}$ promedio para una plantación de la misma edad; al final se promediaron los cuatro valores obtenidos por trampa para tener un valor de IAF por sitio (Liu *et al.*, 2015).

El IAF óptico ($IAF_{Óptico}$) se calculó mensualmente con el programa *Hemisfer*®*Patrick Schleppi* versión 2.13, a partir del procesamiento individual de las FH tomadas en cada sitio, con el método de Thimonier *et al.* (2010) que consiste en ponderar los valores del IAF estimados a partir del método Elipsoidal de *Norman y Campbell* con un modelo de regresión que integra el ángulo de inserción de la hoja y la radiación solar bajo el dosel como variables predictivas (Lang y Yueqin, 1986). Al resultado del proceso anterior, se le aplicó un factor de corrección por agrupamiento del dosel y follaje no distribuido al azar, para reducir la subestimación del IAF causado por una mayor entrada de radiación solar (Chen y Cihlar, 1995; Liu *et al.*, 2015). El valor de $IAF_{Óptico}$ por sitio corresponde al promedio de los valores calculados para las cinco FH tomadas en el sitio.

A pesar de las correcciones realizadas al método óptico, los valores calculados tienden a subestimar los valores reales de IAF (Weiss *et al.*, 2004). Para reducir ese sesgo, se aplicó la calibración propuesta por Aguirre-Salado *et al.* (2011), que consiste en ajustar modelos de regresión en los cuales el $IAF_{Alométrico}$ o $IAF_{Hojarasca}$ son variables dependientes y el $IAF_{Óptico}$ es la variable independiente. El resultado es un valor calibrado de IAF ($IAF_{Calibrado}$).

Análisis estadístico. Los valores de $AFE_{Individual}$ y $AFP_{Individual}$, calculados a partir de los datos del muestreo destructivo, se analizaron mediante un ANDEVA, en el cual se definió como factor primario la edad de plantación. Las diferencias entre medias se evaluaron con la prueba de Tukey. La correlación entre las variables AFP y AFE con las variables Dn , At y BFS_{Total} se analizó mediante el coeficiente de correlación de Pearson. Las variables relacionadas en mayor grado con el AFP y el AFE sirvieron de base para ajustar los modelos de regresión no lineal (Cuadro 1) (Cano *et al.*, 1996; Aguirre-Salado *et al.*, 2011).

Cuadro 1. Modelos ajustados para estimar el área foliar proyectada (AFP) y el índice de área foliar calibrado en plantaciones de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake.

Modelo	Tipo de modelo	Estructura
1	Chapman-Richards	$y = \beta_0(1 - e^{(-\beta_1 X_1)})^{\beta_2}$
2	Monserud y Sterba	$y = X_1 e^{(\beta_0 X_1^{\beta_1} X_2)}$
3	Potencia	$y = \beta_0 X_1^{\beta_1}$
4	Schumacher Cobb-Webb	$y = \beta_0 X_1^{\beta_1} X_2^{\beta_2}$
5	Schumacher exponencial	$y = \beta_0 e^{(-\beta_1/X_1)}$

y = Variable dependiente; X_n = Diámetro normal (Dn); At = Altura total; Ab = Área basal; Vt = Volumen total; BFS_{Total} = Biomasa foliar seca; B_n = Parámetros del modelo.

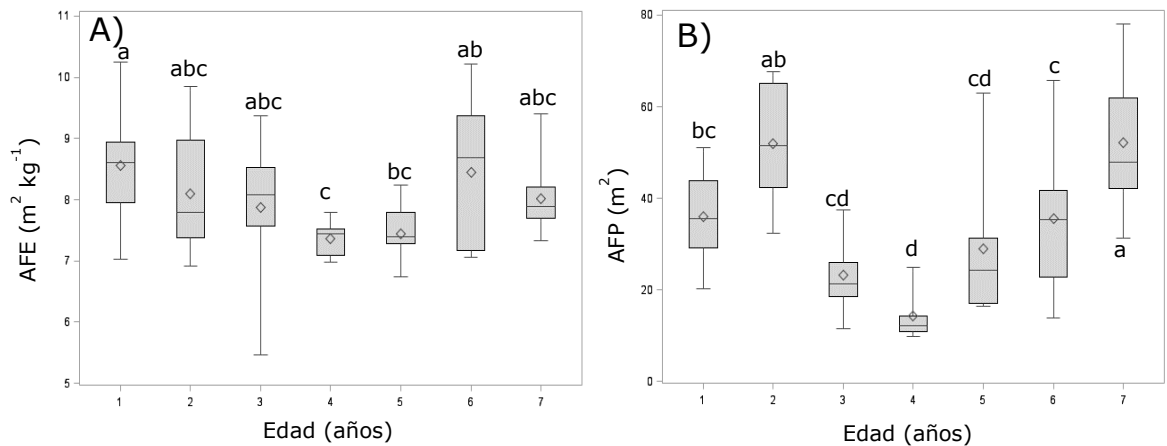
Los valores estimados del *IAF* con los tres métodos empleados, se graficaron y compararon mediante un análisis de correlación de *Pearson*. Cabe aclarar que para la comparación del *IAF* alométrico y óptico se emplearon los valores y FH correspondientes a la misma fecha de medición, para evitar error de temporalidad. Los métodos directos e indirectos mayormente relacionados, se emplearon para generar un *IAF*_{Calibrado} a partir de un modelo de regresión no lineal, con los modelos del Cuadro 1. La selección de los modelos con mejor ajuste se realizó considerando el valor mayor de $R^2_{ajustada}$ y el valor menor de la raíz del error cuadrático medio (*RECM*), además de la significancia de sus parámetros. Los modelos seleccionados se analizaron para corroborar el cumplimiento de los supuestos de regresión mediante la prueba de *Shapiro-Wilk* para la normalidad y la de *White* para detectar la heterocedasticidad ($p \geq 0.05$). Dado que los datos presentaron este último problema, específicamente el *IAF*, se aplicó una corrección de residuales mediante la variable *AFP/RAÍZ* (*BFS*²). Por último, se aplicó la prueba de *Durbin-Watson* para detectar colinealidad entre variables. El análisis se realizó con el procedimiento *PROC MODEL* de SAS 9.4 *Institute Inc.* (SAS, 2014).

Resultados y Discusión

Área foliar específica y área foliar proyectada. El valor promedio de *AFE*_{Individual} y *AFP*_{Individual} fue de 8.024 m² kg⁻¹ y 35.995 m², respectivamente, para la muestra. Ambas variables mostraron diferencias significativas ($P = 0.0001$) entre los promedios de los árboles con diferente edad (Figura 3). La comparación de medias evidenció un valor mayor de *AFE* (8.56 m² kg⁻¹) en la plantación de un año de edad. En contraste, la plantación de cuatro años registró el valor menor (7.36 m² kg⁻¹). El valor más alto de *AFP*_{Individual} correspondió a la plantación de siete años (52.23 m²) y el más bajo (14.18 m²) se calculó para las plantaciones de cuatro años, que coincidió con el valor menor de *AFE*. El *AFE* es menor en la edad de cuatro y cinco años de plantación (Figura 3A). Esta tendencia puede explicarse por la adaptación de las hojas a la competencia por luz, estrés hídrico y a

prácticas de manejo en edades intermedias de crecimiento (Vega *et al.*, 2010). Otras especies presentan tendencia semejante; por ejemplo, *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. evidenció una reducción de 6 % al pasar de uno a dos años edad, lo cual se atribuyó al aumento de componentes estructurales y sustancias en el follaje de mayor edad que lo hace más pesado (Cano *et al.*, 1996).

Por otro lado, los valores de *AFE* obtenidos en este estudio que variaron entre 7.36 y 8.56 m² kg⁻¹ son elevados, lo cual se relaciona con la alta densidad de las plantaciones (1 367 árboles ha⁻¹), como lo demuestran Muñoz *et al.* (2008) para *Eucalyptus nitens* H. Deane & Maiden, quienes calcularon los valores más altos de *AFE* en las plantaciones con densidades mayores.



Letras diferentes indican diferencia estadística (*Tukey*, $p \leq 0.05$) en su media.

Figura 3. Tendencia del (A) área foliar específica (*AFE*, m² kg⁻¹) y (B) área foliar proyectada (*AFP*, m²) con respecto a la edad de la plantación.

En el *AFP* se presentó un comportamiento irregular, pues aumentó en los primeros años de crecimiento, posteriormente disminuyó para luego incrementarse de nuevo (Figura 3B); esta variación se debe a la mortalidad que se registra en las plantaciones; en las cuales, al perder individuos disminuye el *AFP* en el corto plazo y después aumenta

por el incremento en la disponibilidad de nutrientes, agua y luz, lo que permite generar mayor follaje por unidad de superficie (Rodríguez-Ortiz *et al.*, 2011); y con ello, se favorece la captación de mayor radiación solar para incrementar la tasa fotosintética.

Relación del AFE y AFP con variables estructurales de la plantación. Para el caso del AFE, la relación fue negativa y no significativa, por lo que no se ajustaron modelos de regresión. Para el AFP, la correlación resultó positiva (BFS_{Total} [0.97] y Dn [0.50]), lo que indica una mayor cantidad de follaje a medida que las dimensiones del árbol aumentan, sobre todo la amplitud del diámetro normal y en consecuencia del diámetro de copa (Rodríguez-Ortiz *et al.*, 2011).

El modelo 3 presentó valores altos de $R^2_{ajustada}$, bajos de $RCME$; parámetros altamente significativos: normalidad (*Shapiro-Wilk* con un valor 0.95), inexistencia de colinealidad (prueba de *Durbin-Watson* (1.67); y estimaciones lógicas de AFP para los sitios bajo estudio (Cuadro 2). Sin embargo, ocurrieron problemas de heterocedasticidad, que se solucionaron con una corrección por ponderación de residuales con la variable $AFP/RAÍZ$ (BFS^2). La corrección del modelo mejoró los estadísticos de ajuste ($R^2_{ajustada} = 0.9526$, $RECM = 0.9077$ y su estructura: $AFP_{Individual} = 7.952315(BFS_{Total})^{1.006678}$) y lo hizo estadísticamente estable y confiable para estimar el AFP en plantaciones de *E. urophylla*.



Cuadro 2. Estadísticos y valores de los parámetros estadísticos de los modelos ajustados para estimar el área foliar proyectada.

Mo	RECM	$R^2_{ajustada}$	Parámetro	Estimador	EE	Valor t	Pr > t
			B_0	163.6677	78.6830	2.08	0.0410
1	4.2141	0.943	B_1	0.072823	0.0512	1.42	0.1591
			B_2	1.169669	0.1657	7.06	<0.0001
2	8.1996	0.784	B_0	3.972913	0.8064	4.93	<0.0001
			B_1	-1.14553	0.0731	-15.67	<0.0001
3	4.2394	0.942	B_0	8.508989	0.4954	17.18	<0.0001
			B_1	0.964571	0.0320	30.19	<0.0001
4	4.2404	0.942	B_0	9.244596	0.9333	9.91	<0.0001
			B_1	-0.03867	0.0389	-0.99	0.3238
			B_2	0.982786	0.0367	26.76	<0.0001
5	5.2332	0.912	B_0	103.333	4.1930	24.64	<0.0001
			B_1	4.322394	0.2083	20.75	<0.0001

RECM = Raíz del error cuadrático medio; $R^2_{ajustada}$ = Coeficiente de determinación ajustado; *EE* = Error estándar; B_n = Parámetros del modelo; Valor t = Valor de la distribución de t Student; Pr > | t | = Significancia.



Índice de área foliar. Los valores estimados de *IAF* promedio que incluyeron las siete plantaciones fueron 2.7, 2.6 y 1.6 $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$, dentro de los intervalos 1.8 a 3.7, 1.3 a 4.2 y 1.0 a 2.6 $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$, para *IAF*_{Alométrico}, *IAF*_{Hojarasca} e *IAF*_{Óptico}, respectivamente. El método alométrico estimó el valor mayor de *IAF* en la plantación de un año y el menor se registró para la edad de tres años (Figura 4). El valor más alto del *IAF*_{Hojarasca} se registró en la plantación de siete años y el más bajo en la de cuatro años. El valor del *IAF*_{Óptico} fue superior en las plantaciones de siete y uno años de edad y el resto presentaron valores homogéneos inferiores a 1.7 $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$.

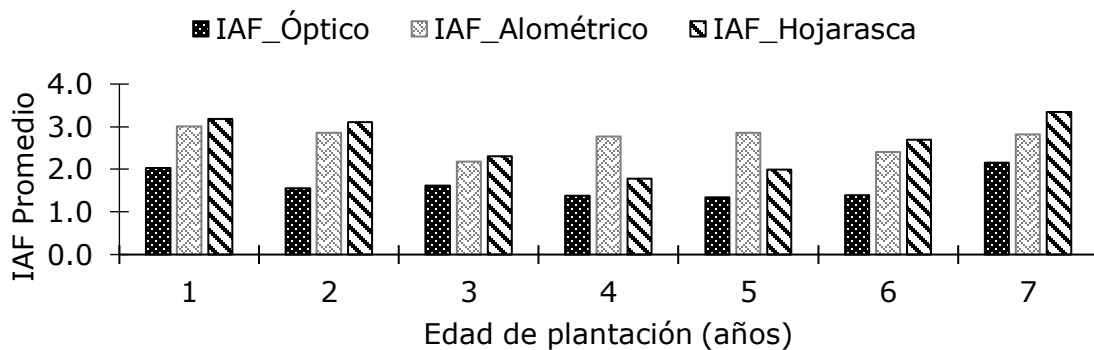


Figura 4. Índice de área foliar (*IAF*) estimado por métodos directos e indirecto para las plantaciones de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake.

Si se consideran a los métodos directos como referencia, el *IAF*_{Óptico} presentó una subestimación promedio de -39 y -37 % en las plantaciones evaluadas, con el *IAF*_{Alométrico} y el *IAF*_{Hojarasca}, respectivamente. Aunque entre los métodos directos se verificó una diferencia porcentual promedio de 8 %, para todas las plantaciones, el valor del *IAF*_{Hojarasca} fue el parámetro de referencia; ya que además de estimar el *IAF* con precisión, permite describir su dinámica durante un ciclo de crecimiento. Asimismo, la medición del arbolado no es destructiva, como lo demuestran Castellanos y León (2010) al modelar la producción foliar mensual de *Acacia mangium* Willd. Es decir, el valor de *IAF*_{Hojarasca} se consideró la base para las comparaciones

entre métodos y para la calibración de los valores obtenidos mediante el método indirecto ($IAF_{\text{Óptico}}$), debido a que este método predice la variabilidad media y espacial de IAF con mayor precisión (Iwamoto e Hiura, 2011).

La correlación de los valores de $IAF_{\text{Alométrico}}$ con el $IAF_{\text{Óptico}}$ y el $IAF_{\text{Hojarasca}}$ fue de 0.30 y 0.33, respectivamente; las cuales son inadecuadas para ajustar un modelo de regresión. No obstante, la correlación entre el $IAF_{\text{Óptico}}$ e $IAF_{\text{Hojarasca}}$ fue de 0.75. Por ello, se ajustaron los modelos presentados en el Cuadro 1 para calibrar el $IAF_{\text{Óptico}}$ empleando el $IAF_{\text{Hojarasca}}$. La época de medición del método alométrico correspondió al inicio de producción de hojas, lo que seguramente influyó en los valores bajos del $IAF_{\text{Alométrico}}$, en comparación al $IAF_{\text{Hojarasca}}$.

A excepción del modelo tipo potencia (Cuadro 1, modelo 3), los modelos ensayados para calibrar el IAF evidenciaron ajustes bajos. El modelo 3 tuvo un ajuste razonable en la calibración del $IAF_{\text{Óptico}}$ con relación al $IAF_{\text{Hojarasca}}$ (Cuadro 3). Estas dos técnicas pueden compararse a nivel de sitio, debido a que la recolección de hojarasca y las fotografías hemisféricas se realizaron sin diferencia espacial (Figura 5). El modelo seleccionado mostró normalidad con un estadístico de $W = 0.94$, la prueba de *White* indicó homocedasticidad y el estadístico de *Durbin-Watson* fue de 1.78, lo que supone que no existe colinealidad entre variables.

Cuadro 3. Estadísticos de ajuste del modelo de potencia (modelo 3) para calibrar las estimaciones del índice de área foliar de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake.

IAF	M_0	B_0	B_1	B_2	$RECM$	R^2_{ajustada}
Hojarasca vs Óptico	3	1.650636	0.956617	-	0.428	0.55

$RECM$ = Raíz del error cuadrático medio; R^2_{ajustada} = Coeficiente de determinación ajustado; B_n = Parámetros de la ecuación.

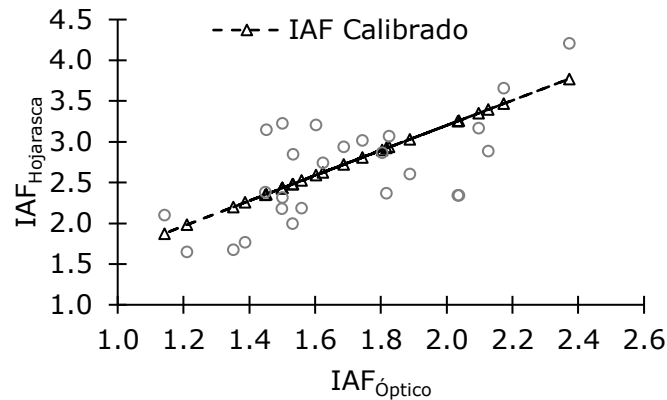


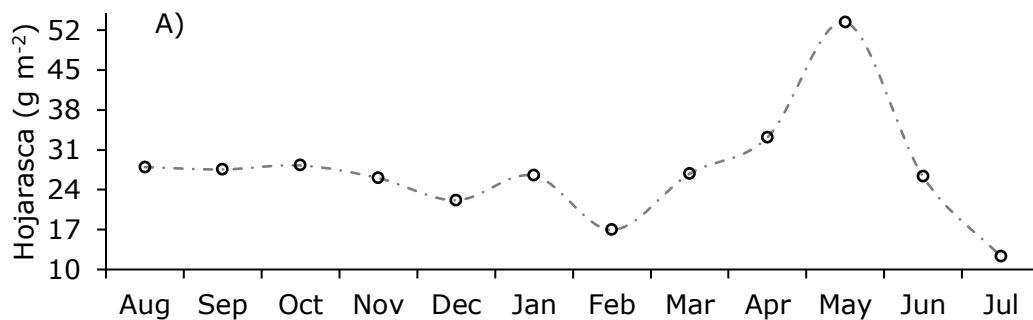
Figura 5. Diagrama de dispersión del índice de área foliar, datos reales (recolección de hojarasca) y estimados ($IAF_{Calibrado}$) ($IAF_{Calibrado} = 1.650636 * IAF_{Óptico}^{0.956617}$) para *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake.

Los valores de IAF estimados son similares a los de plantaciones de *E. nitens* en la Zona Central de Chile, con valores + entre 1.63 y 2.55 $m^2 m^{-2}$ para densidades de 1 100 árboles ha^{-1} . Al mismo tiempo, estos son bajos con respecto a plantaciones de menor densidad, debido a la competencia por espacio entre los árboles para el desarrollo de la copa (Muñoz *et al.*, 2008). Papamija y García (2012) registraron valores de $IAF_{Alométrico}$ de 2.30 a 3.20 $m^2 m^{-2}$ para plantaciones de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden establecidas en Colombia, y aún superiores con el método óptico, de 2.42 a 3.64 $m^2 m^{-2}$; resultados que difieren a lo calculado en este estudio, cuyo $IAF_{Óptico}$ subestima el valor obtenido mediante alometría; además de, obtener un coeficiente de correlación entre los dos métodos igual a 0.011.

Macfarlane *et al.* (2007) determinaron un IAF de 3.0 $m^2 m^{-2}$ para plantaciones de *Eucalyptus marginata* Donn ex Sm. de 12 años de edad, con el método alométrico y 1.77 $m^2 m^{-2}$ mediante el óptico con corrección por aglutinamiento de FH, lo que representa una subestimación de 41 %. De forma similar, Chen y Cihlar (1995) registraron subestimaciones del IAF en un intervalo de 15 a 25 %, cuando usaron el método óptico, por el aglutinamiento del follaje; por lo que recomendaron aplicar una corrección para reducir el error, mediante la integración de un parámetro de índice

de área de ramas. Esta variación en las estimaciones bajas del $IAF_{\text{Óptico}}$ se debe a factores como la exposición automática del lente hacia la luz (Thimonier *et al.*, 2010), el efecto de aglutinamiento de las copas de los árboles (Weiss *et al.*, 2004) y la elección subjetiva del umbral al momento de analizar las imágenes con cualquier programa (Coops *et al.*, 2004).

Dinámica mensual del índice de área foliar. Con el modelo ajustado ($IAF_{\text{Calibrado}}$) y las mediciones del $IAF_{\text{Óptico}}$ se calcularon los valores mensuales de IAF (Figura 6). Como era de esperarse, estos valores presentaron una relación negativa con la caída de hojarasca; es decir, los picos máximos de recolección de hojas concuerdan con valores bajos de IAF en las plantaciones. Durante los meses de febrero a mayo se registró un aumento de caída de hojarasca y por consiguiente una disminución del IAF en *E. urophylla* (Figura 6); los valores variaron entre 2.14 y 2.20 $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ en la época de menor producción. En junio y julio se observó un aumento del IAF , correspondiente a la época de máxima producción de hojas e inicio de la etapa de crecimiento, cuando alcanzaron valores máximos, de julio a septiembre, de 2.65 a 2.71 $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$.



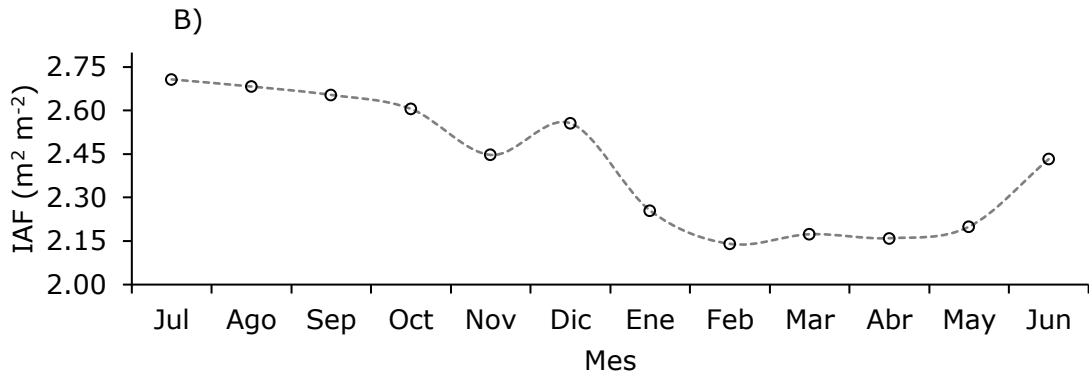


Figura 6. Dinámica mensual de caída de hojarasca (A) e índice de área foliar (B) para las plantaciones de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake.

En noviembre se registró una disminución pronunciada del valor de *IAF*, que se generó por un aumento en la caída de hojarasca en octubre; no obstante, al mes siguiente se observó una recuperación foliar; lo cual indica que durante la época de lluvias o de crecimiento, *E. urophylla* presenta una reposición continua de follaje de acuerdo a la disponibilidad hídrica. Este comportamiento es similar a lo descrito por Castellanos y León (2010) para plantaciones forestales de *Acacia mangium*, en las que el pico más alto de producción foliar se observa al inicio y durante la temporada de lluvias (julio a octubre).

Teóricamente, plantaciones de edad mayor deben tener un *IAF* alto; sin embargo, para el caso estudiado, el valor más alto de *IAF* se estimó en las plantaciones de edad menor, con tendencia decreciente a medida que aumenta la edad. Si se considera lo citado por Peduzzi *et al.* (2010) respecto a que el *IAF* es un indicador de la productividad del terreno, los valores determinados indican que las plantaciones evaluadas de cuatro y cinco años son las de menor producción, al registrar los valores más bajos de *IAF* en comparación con las plantaciones de otras edades. Es de esperarse una mayor eficiencia de actividades como la fertilización, el control de malezas y los aclareos cuando se realizan en plantaciones jóvenes, debido a la mayor cantidad de follaje que poseen.

Conclusiones

El método de recolección de hojarasca ($IAF_{Hojarasca}$) se considera el más preciso para el propósito, debido a que implica la recolección mensual de la hojarasca durante un ciclo anual de crecimiento de la especie; lo que además, permite describir con detalle la dinámica del índice de área foliar. Con base en los resultados obtenidos por este método, y con el fin de recomendar una alternativa para estimar el IAF de manera eficiente y precisa, se generó un modelo de regresión que calibra mediciones iniciales de IAF obtenidas mediante un método indirecto ($IAF_{Óptico}$), fácil de obtener pero con baja precisión, para hacer una estimación de índice de área foliar más adecuada y de manera más eficiente ($IAF_{Calibrado}$).

Respecto a la dinámica del IAF , a partir del análisis realizado se concluye que la mayor producción de hojas se presenta en la época de lluvias (de junio a octubre), lo cual corresponde a la temporada de mayor crecimiento de *E. urophylla*. Por lo tanto, es razonable suponer que la aplicación de prácticas de manejo silvícolas como la fertilización y el deshierbe tendrían una mayor efectividad, si se aplican en el mismo periodo.

Agradecimientos

Esta investigación fue financiada, parcialmente, por la Oficina de Programas Internacionales del Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de EEUU., a través del *Northern Research Station* y el Programa de Paisajes Sustentables de la Agencia para el Desarrollo Internacional de EEUU. y por la empresa *PROTEAK*, dueña de las plantaciones de investigación.

Conflicto de interés

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución por autor

Adrián Hernández Ramos, José René Valdez Lazalde, Gregorio Ángeles Pérez, Héctor Manuel de los Santos Posadas y Jonathan Hernández Ramos: diseño y delimitación del experimento, toma de datos de campo, análisis de datos y obtención de resultados; Alicia Peduzzi y Omar Carrero: contactos y organización de los trabajos de campo en el área de estudio; Adrián Hernández Ramos y José René Valdez Lazalde: redacción del documento; todos los autores revisaron y editaron el documento final.

Referencias

- Aguirre-Salado, C. A., J. R. Valdez-Lazalde, G. Ángeles-Pérez, H. M. Santos-Posadas and A. I. Aguirre-Salado. 2011. Mapping leaf area index and canopy cover using hemispherical photography and spot 5 HRG data: regression and k-nn. *Agrociencia* 45(1): 105-119. <https://agrociencia-colpos.mx/index.php/agrociencia/article/view/863> (10 de julio de 2020).
- Cano M., E. E., A. Velázquez M., J. J. Vargas H., C. Rodríguez F. y A. M. Fierros G. 1996. Área foliar específica en *Pinus patula*: efecto del tamaño del árbol, edad del follaje y posición de la copa. *Agrociencia* 30(1): 117-122. <https://agrociencia-colpos.mx/index.php/agrociencia/article/view/1350> (10 de julio de 2020).
- Castellanos B., J. y J. D. León P. 2010. Caída de hojarasca y dinámica de nutrientes en plantaciones de *Acacia mangium* (Mimosaceae) de Antioquia, Colombia. *Acta Biológica Colombiana* 15(2): 8 p. <https://www.redalyc.org/pdf/3190/319027885020.pdf> (17 de septiembre de 2020).
- Chen, Y., W. Zhang, R. Hu, J. Qi, J. Shao, D. Li, P. Wan, C. Qiao, A. Shen and G. Yan. 2018. Estimation of forest leaf area index using terrestrial laser scanning data and path length distribution model in open-canopy forests. *Agricultural and Forest Meteorology* 263: 323-333. Doi: 10.1016/j.agrformet.2018.09.006.

Chen, J. M. and J. Cihlar. 1995. Quantifying the effect of canopy architecture on optical measurements of leaf area index using two gap size analysis methods. *Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 33: 777-787. Doi: 10.1109/36.387593.

Comisión Nacional Forestal (Conafor). 2012. Situación actual y perspectivas de las plantaciones forestales comerciales en México.
<http://www.conafor.gob.mx:8080/biblioteca/ver.aspx?articulo=434> (10 de julio de 2020).

Comisión Nacional Forestal (Conafor). 2014. Superficies de plantaciones forestales comerciales establecidas por año con apoyos de la Conafor.
<http://www.conafor.gob.mx/web/temas-forestales/plantaciones-forestales/>
(17 de marzo de 2019).

Coops, N. C., M. L. Smith, K. L. Jacobsen, M. Martin and S. Ollinger. 2004. Estimation of plant and leaf area index using three techniques in a mature native eucalypt canopy. *Austral Ecology* 29: 332-341. Doi: 10.1111/j.1442-9993.2004.01370.x.

García, E. 1998. Climas (clasificación de Köppen, modificado por García). Escala 1:1000000. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad México. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/> (15 de septiembre de 2020).

Guangjian, Y., H. Ronghail, L. Jinghuil, W. Marie, J. Hailan, M. Xihan, X. Donghui and Z. Wuming. 2019. Review of indirect optical measurements of leaf area index: Recent advances, challenges, and perspectives. *Agricultural and Forest Meteorology* 265: 390-411. Doi: 10.1016/j.agrformet.2018.11.033.

Hernández-Ramos, J., H. M. Santos-Posadas, J. R. Valdez-Lazalde, J. C. Tamarit-Urias, G. Ángeles-Pérez, A. Hernández-Ramos, A. Peduzzi and O. Carrero. 2017. Aboveground biomass and expansion factors in commercial forest plantations of *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. *Agrociencia* 51(8): 921-938. <https://agrociencia-colpos.mx/index.php/agrociencia/article/view/1336> (10 de julio de 2020).

Hu, R., G. Yan, X. Mu and J. Lou. 2014. Indirect measurement of leaf area index on the basis of path length distribution. *Remote Sensing of Environment* 155: 239-247. Doi: 10.1016/j.rse.2014.08.032.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2005. Marco Geoestadístico Municipal 2005, versión 3.1. <https://www.inegi.org.mx/temas/mg/> (10 de julio de 2020).

Iwamoto I., M. and T. Hiura. 2011. Modeling leaf area index from litter collection and tree data in a deciduous broadleaf forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 151: 1016-1022. Doi: 10.1016/j.agrformet.2011.02.007.

Jonckheere, I., S. Fleck, K. Nackaerts, B. Muys, P. Coppin, M. Weiss and F. Baret. 2004. Review of methods for in situ leaf area index determination, Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology* 121: 19-35. Doi: 10.1016/j.agrformet.2003.08.027.

Lang, A. R. G. and X. Yueqin. 1986. Estimation of leaf area index from transmission of direct sunlight in discontinuous canopies. *Agricultural and Forest Meteorology* 37: 229-243. Doi: 10.1016/0168-1923(86)90033-X.

Liu, Z., G. Jin and M. Zhou. 2015. Evaluation and correction of optically derived leaf area index in different temperate forests. *iForest: Biogeosciences and Forestry* 9: 55-62. Doi: 10.3832/ifor1350-008.

Macfarlane, C., M. Hoffman, D. Eamus, N. Kerp, S. Higginson, R. McMurtrie and M. Adams. 2007. Estimation of leaf area index in eucalypt forest using digital photography. *Agricultural and Forest Meteorology* 143: 176-188. Doi: 10.1016/j.agrformet.2006.10.013.

- Martínez, B., F. Camacho C. y F. J. García H. 2006. Estimación de parámetros biofísicos de vegetación utilizando el método de la cámara hemisférica. *Revista de Teledetección* 26: 5-17. <http://www.aet.org.es/revistas/revista26/AET26-01.pdf> (10 de julio de 2020).
- Muñoz, F., M. Espinosa, J. Cancino, R. Rubilar y M. Herrera. 2008. Efecto de la poda y raleo en el área foliar de *Eucalyptus nitens*. *Bosques* 29: 44-51.
Doi: 10.4067/S0717-92002008000100005.
- Papamija, M. D. y S. C. García. 2012. Estimación del índice de área foliar en plantaciones de *Eucalyptus grandis* W. Hill. *Colombia Forestal* 15: 261-271.
Doi: 10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2012.2.a09.
- Peduzzi, A., A. H. Lee and R. H. Wynne. 2010. Leaf area of overstory and understory in pine plantations in the flatwoods. *Southern Journal of Applied Forestry* 34: 154-160. Doi: 10.1093/sjaf/34.4.154.
- Rodríguez-Ortíz, G., V. A. González-Hernández, A. Aldrete, H. M. De Los Santos-Posadas, A. Gómez-Guerrero y A. M. Fierros-González. 2011. Modelos para estimar crecimiento y eficiencia de crecimiento en plantaciones de *Pinus patula* en respuesta al aclareo. *Revista Fitotecnica Mexicana* 34(3): 105-212.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802011000300012 (17 de septiembre de 2020).
- Schleppi, P., M. Conedera, I. Sedivy and A. Thimonier. 2007. Correcting non-linearity and slope effects in the estimation of the leaf area index of forests from hemispherical photographs. *Agricultural and Forest Meteorology* 144: 236-242.
Doi: 10.1016/j.agrformet.2007.02.004.

Statistical Analysis System (SAS). 2014. SAS/ETS® 13.2 User's Guide The MODEL Procedure. SAS Institute Inc. Cary, NC, USA. 1783 p.

Sun, Q., X. Gu, L. Sun, G. Yang, L. Zhou and W. Gou. 2019. Dynamic change in rice leaf area index and spectral response under flooding stress. *Paddy and Water Environment*. Doi: 10.1007/s10333-019-00776-5.

Thimonier, A., I. Sedivy and P. Schleppei. 2010. Estimating leaf area index in different types of mature forest stands in Switzerland: a comparison of methods. *European Journal of Forest Research* 129: 543-562. Doi: 10.1007/s10342-009-0353-8.

Vega, M., M. Pizano y S. Barth. 2010. Variación del área foliar específica en *Pinus elliottii* var. *elliottii* Engelm. X *Pinus caribaea* var *hondurensis* Morelet. y su extrapolación al cálculo del área foliar proyectada. 14^{as} Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales. Facultad de Ciencias Forestales, UNaM - EEA Montecarlo, INTA. Eldorado, Misiones, Argentina. 8 p. https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-variacion_area_foliar_pinus.pdf (17 septiembre de 2020).

Weiss, M., F. Baret, G. J. Smith, I. Jonckheere and P. Coppin. 2004. Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination Part II. Estimation of LAI, errors and sampling. *Agricultural and Forest Meteorology* 121: 37-53. Doi: 10.1016/j.agrformet.2003.08.001.

Whitford, K. R., I. J. Colquhoun, A. R. G. Lang and B. M. Harper. 1995. Measuring leaf area index in a sparse eucalypt forest: a comparison of estimates from direct measurement, hemispherical photography, sunlight transmittance and allometric regression. *Agricultural and Forest Meteorology* 74: 237-249. Doi: 10.1016/0168-1923(94)02189-Q.

Wright, J. A. 1997. A review of the worldwide activities in tree improvement for *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus urophylla* and hybrid *urograndis*. In: White, T., Huber, D., & Powell, G. (comps.). Proceedings of the 24th Biennial Southern Forest Tree Improvement Conference. Orlando, FL, USA. pp. 96-102.



Todos los textos publicados por la **Revista Mexicana de Ciencias Forestales** –sin excepción– se distribuyen amparados bajo la licencia *Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional)*, que permite a terceros utilizar lo publicado siempre que mencionen la autoría del trabajo y a la primera publicación en esta revista.