



Efecto del espaciamiento en la estimación indirecta del índice de área foliar en plantaciones dendroenergéticas de Eucalipto

Effect of Spacing on the Indirect Estimation of the Leaf Area index in Eucalyptus Wood Energy Plantations

Juan Carlos Valverde¹

Valverde, J. C. (2022). Efecto del espaciamiento en la estimación indirecta del índice de área foliar en plantaciones dendroenergéticas de Eucalipto. *Colombia Forestal*, 25(2), 17-29.

Recepción: 2 de julio 2021

Aprobación: 1 de marzo 2022

Resumen

Se evaluó la influencia del espaciamiento en la estimación del índice de área foliar (IAF) en plantaciones de *Eucalyptus tereticornis* y *Eucalyptus saligna*. Por especie se analizaron tres espaciamientos: 1.0 x 2.0 m, 1.0 x 1.0 m y 1.0 x 0.5 m. Se midieron variables dasométricas y el IAF con dos métodos indirectos (LICOR 2000 y fotografía digital hemisférica, FDH) y un método directo. Los resultados no mostraron diferencias entre especies. En cambio, el espaciamiento influyó significativamente en el diámetro (a menor espaciamiento, menor diámetro) y en el IAF (a menor espaciamiento, mayor IAF), con variaciones de 2.11 a 3.96 m².m⁻². La evaluación de los métodos indirectos mostró que la reducción del espaciamiento incrementó el sesgo en la estimación. La FDH fue más exacta, con una tendencia a subestimar el IAF del 8 %. En cambio, LICOR 2000 mostró un sesgo elevado, con tendencia a sobrestimar el IAF hasta en un 31 %.

Palabras clave: Fotografía hemisférica, LICOR-2000, ecuación alométrica, espaciamiento, Costa Rica.

Abstract

The influence of spacing on the estimation of the leaf area index (LAI) in *Eucalyptus tereticornis* and *Eucalyptus saligna* plantations was evaluated. Three spacings per species were analyzed: 1.0 x 2.0 m, 1.0 x 1.0 m, and 1.0 x 0.5 m. Dasometric variables and the LAI were measured with two indirect methods (LICOR 2000 and digital hemispheric photography, DHP) and a direct method. The results showed no differences between species. On the other hand, spacing significantly influenced the diameter (less spacing, less diameter) and the LAI (less spacing, higher LAI), with variations from 2.11 to 3.96 m².m⁻². An evaluation of the indirect methods showed that, by reducing the spacing, the bias in the estimation increased. FDH showed greater accuracy and tended to underestimate the LAI by 7%. In contrast, LICOR 2000 showed a high bias, with a tendency to overestimate the LAI by up to 30%.

Keywords: hemispheric photography, LICOR-2000, allometric equation, spacing, Costa Rica.

1 Universidad de Ciencias Forestales, Universidad de Concepción. Concepción, Chile. jvalverde@udec.cl

<https://doi.org/10.14483/2256201X.18229>

INTRODUCCIÓN

El índice de área foliar (IAF) se define como la relación del área del tejido foliar por área de superficie (Chen & Cihlar, 1995; Dovey & Du Toit, 2006). Es una variable funcional para el análisis de especies y ecosistemas debido a su alta correlación con la fotosíntesis, la transpiración y el intercambio de materia y energía que realiza una planta con la atmósfera (Demarez *et al.*, 2008; Valverde & Arias, 2020). Esto ha permitido el desarrollo de modelos productivos, indicadores de manejo silvicultural y ecuaciones que facilitan la estimación de los flujos de carbono y agua de los individuos y/o ecosistemas bajo distintas condiciones de desarrollo o manejo (Vyas *et al.*, 2010; Wei *et al.*, 2020).

La estimación del IAF es compleja, dada la variabilidad que puede presentar la copa en cuanto a la orientación, la distribución del follaje, y la relación fuste-ramas, las cuales pueden generar errores en la estimación (Valverde & Arias, 2020; Valverde *et al.*, 2017). Por tanto, ha sido necesario crear metodologías que simplifiquen la estimación del IAF y permitan disponer de datos con el menor error posible (Yan *et al.*, 2019). En la actualidad, se disponen dos líneas metodológicas de estimación del IAF: directa e indirecta (Mason *et al.*, 2012). El método directo consiste en cosechar la copa del árbol y calcular el IAF a partir de la relación entre el peso y el área foliar específica de las hojas (Dovey & Du Toit, 2006; Facchi *et al.*, 2010). La ventaja de este método es su exactitud en las estimaciones. No obstante, este método tiene un costo económico elevado e implica una pérdida de continuidad de monitoreo en el tiempo (Chianucci *et al.*, 2015).

En cambio, el método indirecto no afecta el crecimiento y desarrollo de la copa de los individuos de estudio, permitiendo monitoreos continuos en el tiempo, con metodologías simples y de poca duración (Junior *et al.*, 2016). Entre las metodologías indirectas más desarrolladas y aceptadas para especies arbóreas se destaca la evaluación óptica basada en la ley de Beer-Lambert, una relación

empírica que permite analizar el comportamiento de la luz que traspasa la copa y disminuir el sesgo en el IAF con coeficientes de corrección que consideran la proyección del follaje que en función del ángulo de distribución foliar, el ángulo cenital y la distribución de ramas y fuste (Jonckheere *et al.*, 2005; Lang, 1986).

La implementación de los principios de la ley de Beer-Lambert ha permitido el desarrollo de instrumentos especializados como el LICOR 2000 y el LICOR 2200 que estiman el IAF de forma automática debido a que integran los algoritmos de estimación (Chen *et al.*, 2022) y la fotografía digital hemisférica (FDH), la cual destaca como una alternativa de bajo costo que permite la utilización de cámaras de dispositivos móviles. Estas se combinan con programas de análisis como CAN-EYE, Winscanopy y HemiView y permiten una estimación exacta del IAF al realizar una clasificación guiada de píxeles y eliminar áreas no deseadas en la fotografía, lo que permite una mayor diferenciación entre hojas y ramas y una minimización del efecto de variables ambientales como la angulación del sol y el viento (Chianucci *et al.*, 2014; Mougín *et al.*, 2014; Qu *et al.*, 2021).

Es importante destacar que el IAF es influenciado de manera significativa por el manejo silvicultural del cultivo. Por tanto, se deben considerar aspectos como el espaciamiento, las podas y los raleos al momento de analizar el IAF con métodos indirectos (Yang *et al.*, 2019). En el caso específico del espaciamiento, se ha encontrado una influencia significativa en la arquitectura de la copas de los árboles, con cambios en la angulación de ramas y el área foliar específica (Schwerz *et al.*, 2020). La reducción del espaciamiento aumenta la competencia por luz, generando un incremento del IAF y una mayor probabilidad de traslape de copas, la supresión de árboles en el dosel y un incremento en la cantidad de ramas (Schwerz *et al.*, 2019), aspectos que afectan el sesgo en la estimación del IAF (Valverde & Arias, 2020).

En el caso de plantaciones con espaciamiento inferior a 2.0 x 2.0 m, el IAF es un indicador clave

para desarrollar ecuaciones de crecimiento y productividad y evaluar el grado de estrés fisiológico del cultivo, así como un buen criterio para determinar la edad óptima de cosecha (Valverde & Arias, 2018). El IAF ha sido una variable tradicionalmente subutilizada en las regiones tropicales, debido a que las plantaciones se han enfocado en maximizar la producción de biomasa maderable, minimizar la pérdida nutricional en el suelo y aumentar la viabilidad financiera del cultivo, dejando en un segundo plano los aspectos fisiológicos (Meinzer et al., 2001). Solo en la última década se ha iniciado la incorporación del IAF como indicador de los cultivos con espaciamiento reducido, destacando el trabajo de Junior et al. (2016) con plantaciones de Eucalipto, el cual identificó correlaciones entre crecimiento e IAF en árboles con distintos espaciamientos. En cambio, Broeckx et al. (2012), con plantaciones clonales de polar (*Populus* sp.), desarrollaron ecuaciones de productividad anual de madera en función del IAF, encontrando un efecto significativo del espaciamiento. Por su parte, Tenorio et al. (2019) identificaron los espaciamientos óptimos para dos clones de *Gmelina arborea*, maximizando la producción anual de biomasa con el mínimo IAF posible. Finalmente, Wengert et al. (2021) determinaron el espaciamiento óptimo para el establecimiento de sistemas agroforestales que optimicen la relación IAF-crecimiento en especies arbóreas tropicales.

Sin embargo, hay una escasez de estudios enfocados en analizar el efecto de los espaciamientos en la exactitud los métodos indirectos de IAF. Ariza-Carricondo et al. (2019) recomiendan realizar calibraciones entre métodos indirectos de IAF en especies arbóreas, dado que la disminución del espaciamiento aumenta la tendencia de sobrestimar el IAF por el traslape de copas, y se genera además una mayor sensibilidad a factores ambientales como la nubosidad y el viento, los cuales pueden aumentar el sesgo de las estimaciones (Wei et al., 2020). Por tanto, el estudio planteó como objetivos: i) analizar el efecto del espaciamiento en el IAF y ii) definir el método indirecto de estimación

del IAF con mayor adaptabilidad a espaciamientos reducidos en plantaciones dendroenergéticas de *Eucalyptus tereticornis* SM. y *Eucalyptus saligna* SM. a partir de investigaciones previas desarrolladas por Valverde et al. (2017), Tenorio et al. (2019) y Valverde y Arias (2020). Se planteó como hipótesis que la reducción del espaciamiento produce un aumento significativo del IAF. Independientemente de la especie, este comportamiento afecta significativamente la exactitud de los métodos indirectos, dado el incremento del sesgo por traslape de copas en las estimaciones, donde el método FDH tuvo la mayor capacidad de minimizar los errores.

MATERIALES Y MÉTODO

Especies y sitio de estudio

El estudio se realizó en plantaciones dendroenergéticas con un diseño experimental factorial que consideró dos especies: *Eucalyptus tereticornis* y *E. saligna* (factor 1) y tres espaciamientos, a saber: 1.0 x 2.0 m (5000 árboles.ha⁻¹), 1.0 x 1.0 m (10 000 árboles.ha⁻¹) y 1.0 x 0.5 m (20 000 árboles.ha⁻¹) (factor 2). Se consideraron seis tratamientos en total. Por combinación especie-espaciamiento, se evaluaron tres parcelas compuestas por nueve individuos cada una (3 x 3 árboles). Los individuos analizados presentaron un desarrollo uniforme con cada tratamiento, evitando así el muestreo de individuos bifurcados, afectados por manejo o patógenos y que se encontraran en los bordes de cada tratamiento.

Las plantaciones se establecieron en Cartago, Costa Rica (9°50'58"N; 83°54'38"W) a 1392 m de altitud, con una temperatura anual de 24 °C y una precipitación anual de 2100 mm distribuida en siete meses lluviosos (IMN, 2021). El clima del sitio se clasificó según el sistema de Köppen-Geiger como clima oceánico subtropical de alta montaña. El sitio presenta una topografía plana, con una pendiente inferior a los 10°, un suelo franco

arcilloso y condiciones nutricionales ideales para el cultivo de ambas especies de Eucalipto. Al cultivo se le dio un manejo silvicultural mínimo enfocado en maximizar la producción de biomasa. Por tanto, se las recomendaciones de [Arias-Aguilar et al. \(2020\)](#) para cultivos energéticos en Costa Rica.

Aspectos dasométricos de las plantaciones

En las parcelas analizadas de cada combinación especie-espaciamiento se evaluaron el diámetro a 1.3 m sobre nivel de suelo, la altura general y la altura de inicio de la copa. Estas variables se analizaron en cada uno de los nueve individuos de cada parcela (27 árboles por espaciamiento-especie).

Evaluación del IAF

El IAF se estimó cuando las plantaciones alcanzaron los 26 meses de edad, previo a la cosecha del cultivo. La evaluación consideró dos métodos indirectos basados en la ley de Beer-Lambert, LICOR 2000 y la fotografía digital hemisférica (FDH), así como un método directo. Ambas mediciones se realizaron a los mismos individuos y entre las 06:30 y 08:30 (GMT-6 América central), con un cielo completamente nublado, de acuerdo con la metodología de [Valverde y Arias \(2020\)](#). Por parcela se colectaron 15 mediciones en el punto medio entre filas de árboles (45 mediciones por especie-espaciamiento), considerando una altura de 60 cm sobre nivel del suelo y una distancia mínima entre árboles de 50 cm.

Medición con LICOR 2000

Las mediciones con LICOR 2000 se desarrollaron con una unidad PCA, modelo LICOR 2000 ([LICOR Biosciences, Inc., 2010](#)). Se empleó la configuración de dos varas: una colocada fuera del dosel con monitoreo automatizado cada 30 segundos (ubicada en un área libre de objetos u elementos que pudieran generar sesgo en las estimaciones) y una segunda vara que recolectó datos bajo el dosel

en cada especie-espaciamiento. A ambas varas se les colocó una máscara de 90° y, posteriormente, se recalcularon los datos con el algoritmo integrado en el instrumento, con la opción de restricción de cuatro anillos que reduce la visión del equipo en 30°.

Medición con FDH

La evaluación mediante FDH se realizó con un dispositivo móvil marca Huawei, modelo 30 Pro, con una cámara de 21 MP (una resolución de 2024 x 2024 píxeles en formato RGB). El efecto de distorsión visual que genera el lente ojo de pez se logró mediante la aplicación móvil Fisheye Pro, versión 1.2 (R22 software) para Android, empleando los parámetros de calibración recomendados por [Valverde y Arias \(2020\)](#) para el Eucalipto.

Posteriormente, las fotografías se analizaron con el programa CAN_EYE, versión 6.49 ([Weiss & Baret, 2017](#)). El programa utilizó la calibración recomendada por [Weiss et al. \(2004\)](#) para imágenes hemisféricas en especies arbóreas. Se utilizaron los parámetros de corrección de [Valverde et al. \(2017\)](#) con grado de visión de las imágenes (COI) de 60°, un ángulo cenital de 2.5° y un azimut de 5°. Se implementó el método de análisis de píxeles del tipo *no mixed pixels* (2 clases) con el algoritmo de LICOR-2000 de 4 anillos.

Medición directa del IAF. La evaluación directa del IAF se realizó con la cosecha de tres individuos por parcela (nueve árboles por combinación especie-espaciamiento). Se utilizó la metodología de [Mason et al. \(2012\)](#). En cada individuo, la copa se dividió (entre ramas y hojas) y se pesó en condición verde. Posteriormente, se extrajo una muestra de 500 g de hojas, la cual se escaneó en color y con una resolución de 900 DPI para la estimación del área foliar específica, que se determinó con el programa WINFOLIA®, versión 2012 pro ([Regent Instrument, 2012](#)). Finalmente, las hojas se secaron a 65 °C por un periodo de 48 horas para determinar el peso seco y, con ello, estimar el IAF mediante las Ecuaciones 1 y 2.

$$AH = \frac{PH \times AFm}{PSm} \quad 1$$

donde AH es el área de las hojas en m^2 , PH el peso de las hojas en kg, AFm el área de la muestra de las hojas en m^2 y PSm el peso seco de la muestra de las hojas en kg.

$$IAF = \frac{AH}{AD} \quad 2$$

donde IAF es el índice de área foliar, AH el área de las hojas en m^2 y AD el área en que se desarrolló el árbol en m^2 .

Análisis estadístico

Inicialmente se realizaron análisis de normalidad (prueba Shapiro-Wilks) y homocedasticidad (prueba de Levene) de los datos dasométricos y de IAF para confirmar su análisis con pruebas paramétricas. Posteriormente, a cada variable dasométrica y de IAF estimado se le aplicó un análisis de varianza (Andeva) de tipo factorial con el fin de identificar si la interacción especie-espaciamiento o los factores especie y espaciamiento mostraron alguna diferencia en cada variable, en cuyo caso se aplicó la prueba de Tukey.

Posterior a la identificación y agrupación con los tratamientos según las interacciones o factores significativos, se realizaron regresiones lineales de estimación del IAF a partir de los dos métodos de IAF indirecto, por lo cual se empleó la ecuación lineal simple (Ecuación 3) propuesta por Mason *et al.* (2012) para especies arbóreas.

$$IAF = a + b IAF_{ind} \quad 3$$

donde IAF es el índice de área foliar corregido, a y b son los coeficientes de la ecuación y IAF_{ind} es la estimación indirecta del índice de área foliar.

Posteriormente, se compararon las ecuaciones entre ambos métodos y, a partir de los indicadores estadísticos (el coeficiente de determinación, R^2 ; el error medio del modelo, Error; y el P -value), se

determinó método con mejor ajuste. Finalmente, se realizó la validación de las ecuaciones con el método de Jackknife (*leave-one-out*), que permite realizar validaciones en un set de datos con limitaciones para tener un set independiente de datos. La validación consideró el sesgo y el error estándar porcentual de las ecuaciones para definir la opción con mayor precisión. Además se analizó, en cada espaciamiento, la distribución del sesgo según las clases diamétricas de los individuos considerados en las parcelas.

Todos los análisis se realizaron en el programa R, versión 3.6.2 (R Core Team, 2013). Se utilizaron los paquetes *LeaveArea* (Katabuchi, 2015) y *lavan* (Oberski, 2014). La significancia aplicada en el estudio fue de $\alpha=0.05$.

RESULTADOS

Caracterización de las plantaciones

Se obtuvo que ambas especies de Eucalipto mostraron similitudes en las variables dasométricas evaluadas (Tabla 1). Con respecto al diámetro, se encontró una tendencia a disminuir conforme el espaciamiento se redujo, obteniendo los mayores diámetros en el espaciamiento de 1.0 x 2.0 m (promedio de 6.6 cm) y los mínimos en el espaciamiento de 1.0 x 0.5 m (promedio de 4.7 cm). Con respecto a la altura total y altura de inicio de copa, no se encontraron diferencias significativas entre los espaciamientos en ambas especies, presentando una altura total promedio de 7.2 m y altura de copa promedio de 6.2 m.

Efecto de las variables especie-espaciamiento en el IAF

No se encontró un efecto significativo en la interacción especie-espaciamiento y el factor especie en la estimación del IAF para los tres métodos analizados, obteniendo P -values superiores a 0.10 (Tabla 2).

Tabla 1. Diámetro a 1.3 m sobre suelo, altura total y altura de inicio de copa en plantaciones dendroenergéticas de dos especies de Eucalipto establecidas con tres espaciamientos diferentes

Variable	<i>E. tereticornis</i>			<i>E. saligna</i>		
	1.0 x 2.0 m	1.0 x 1.0 m	1.0 x 0.5 m	2.0 x 2.0 m	1.0 x 1.0 m	1.0 x 0.5 m
Diámetro (cm)	6.9 ^a (2,8)	5.8 ^b (2.9)	4.9 ^c (1.6)	6.3 ^a (1.8)	5.1 ^b (1.8)	4.5 ^c (1.9)
Altura total (m)	7.6 ^a (1.5)	7.2 ^a (1.8)	7.3 ^a (1.5)	7.3 ^a (1.7)	6.6 ^a (1.2)	6.9 ^a (1.7)
Altura de copa (m)	5.9 ^a (1.8)	6.5 ^a (0.7)	6.4 ^a (0.8)	6.1 ^a (1.6)	5.9 ^a (0.5)	6.1 ^a (0.6)

Nota. Valores entre paréntesis corresponden a la desviación estándar. Letras diferentes muestran diferencias significativas a $\alpha=0.05$.

Por tanto, se consideró que ambos factores no influyeron significativamente en los resultados del estudio y, por ende, la división de información según estos factores no generaría incremento significativo en la precisión de los resultados. En contraste, el factor espaciamiento mostró un efecto significativo en el IAF en los tres métodos evaluados, con *P-values* inferiores a 0.001.

Al evaluar la diferencia del IAF entre espaciamientos (Tabla 3), se encontró la misma tendencia en los tres métodos de estimación. Conforme el espaciamiento se redujo, el IAF se incrementó, obteniendo IAF menores a 2.5 m².m⁻² en el espaciamiento de 1.0 x 2.0 m. En cambio, el

espaciamiento de 1.0 x 0.5 m presentó los IAF más altos (promedio de 3.26 m².m⁻²) y, finalmente, el espaciamiento de 1.0 x 1.0 m mostró valores intermedios significativamente diferentes a los otros dos espaciamientos, con un valor promedio de 2.82 m².m⁻².

Determinación del método indirecto óptimo para estimar IAF

La comparación del IAF estimado mediante el método directo con el de los dos métodos indirectos (Tabla 3) mostró la misma tendencia de resultados para los tres espaciamientos. El método LICOR

Tabla 2. Diferencias significativas (*P-values*) de los factores especie, espaciamiento e interacción especie-espaciamiento en la estimación del IAF con método directo e indirectos LICOR-2000 y fotografía digital hemisférica (FDH) en plantaciones energéticas de Eucalipto

Método de estimación IAF	Factor (<i>P-values</i>)		
	Interacción especie-espaciamiento	Especie	Espaciamiento
Directo	0.11 ^{ns}	0.19 ^{ns}	0.01*
Indirecto (LICOR 2000)	0.16 ^{ns}	0.20 ^{ns}	0.01*
Indirecto (Fotografía digital hemisférica)	0.16 ^{ns}	0.21 ^{ns}	0.02*

Nota. ^{ns} es no significativo, * es significativo al $\alpha=0.05$.

Tabla 3. Estimación del índice de área foliar (IAF) con método directo, los métodos indirectos LICOR-2000 y fotografía digital hemisférica (FDH) en plantaciones energéticas de Eucalipto establecidas con tres espaciamientos

Espaciamiento (m)	IAF (m ² m ⁻²)		
	Directo	Indirecto (LICOR-2000)	Indirecto (FDH)
1.0 x 2.0	2.13 ^a (0.06)	2.51 ^b (0.10)	2.11 ^a (0.07)
1.0 x 1.0	2.80 ^a (0.11)	2.99 ^b (0.15)	2.69 ^a (0.10)
1.0 x 0.5	3.09 ^a (0.07)	3.69 ^b (0.39)	2.99 ^a (0.09)

Nota. Los valores entre paréntesis corresponden a la desviación estándar. Letras diferentes muestran diferencias significativas al 0.05.

2000 sobrestimó el IAF, y dicha sobrestimación incrementó conforme el espaciamiento se redujo, llegando a 20.43 % para el espaciamiento de 1.0 x 0.5 m. En cambio, el método de FDH mostró una mayor exactitud en las estimaciones del IAF, con una subestimación máxima del 3.34 % en los tratamientos con menor espaciamiento.

Al evaluar las ecuaciones de estimación indirecta del IAF (Tabla 4), nuevamente se confirmó que el método FDH mostró una mayor exactitud en las estimaciones con respecto al LICOR 2000. Las ecuaciones de FDH mostraron un R^2 superior a 0.81 y un error inferior a 0.07, valores significativamente mejores que los obtenidos con LICOR 2000, el cual presentó un R^2 menor de 0.64 y un error superior a 0.09. Este comportamiento se mantuvo en la validación de las ecuaciones, obteniendo un sesgo inferior a 0.08 y un error estándar promedio del 7.55 % en el método FDH. En cambio, con LICOR 2000, el sesgo aumentó a un valor promedio de 0.16 y un error estándar del 21.82 %.

El análisis de la distribución del sesgo del IAF según las clases diamétricas de cada espaciamiento (Figura 1) evidenció las tendencias de sobrestimación del IAF con LICOR 2000 y de subestimación con la FDH. En el espaciamiento de 1.0 x 2.0 m (Figura 1a), el sesgo de ambos métodos fue muy homogéneo en los árboles con un diámetro inferior a 6.7 cm; fue en los individuos de mayor tamaño que el sesgo aumentó significativamente con LICOR 2000, llegando a

tener sobrestimaciones de 0.1 $m^2.m^{-2}$. En cambio, la FDH mantuvo una mayor exactitud, con una subestimación del 0.03 $m^2.m^{-2}$ en los árboles de 7.3 cm de diámetro. Este comportamiento se mantuvo en el espaciamiento de 1.0 x 1.0 m (Figura 1b). LICOR 2000 nuevamente mostró un incremento de la sobrestimación conforme el diámetro del individuo aumentó, llegando a ser de 0.13 $m^2.m^{-2}$. En cambio, la FDH mostró una uniformidad del sesgo en individuos menores a 5.4 cm. Los individuos con diámetros superiores mostraron una subestimación máxima de 0.03 $m^2.m^{-2}$. Finalmente, con el espaciamiento de 1.0 x 0.5 m (Figura 1c), ambos métodos presentaron el mayor sesgo: con LICOR 2000, la sobrestimación se mantuvo en todas las clases diamétricas analizadas, con un valor promedio de 0.12 $m^2.m^{-2}$. Por su parte, con la FDH, el sesgo se mantuvo uniforme entre los 4.1 y 4.5 cm. La subestimación aumentó en los individuos con diámetros superiores, llegando a tener un sesgo máximo de 0.09 $m^2.m^{-2}$.

DISCUSIÓN

Efecto del espaciamiento en el IAF

Se observó el mismo comportamiento en ambas especies. Conforme el espaciamiento disminuyó, el IAF tendió a aumentar (Tablas 1 y 2),

Tabla 4. Coeficientes ajustados y valores de los criterios estadísticos de ajuste y validación para la estimación del índice de área foliar con el método indirecto LICOR y fotografía digital hemisférica (FDH) en plantaciones dendroenergéticas de Eucalipto establecidas con tres espaciamientos

Método indirecto	Espaciamiento (m)	Coeficientes			Ajuste			Validación	
		a	B	R^2	Error	P-value	Sesgo	Error estándar (%)	P-value
LICOR-2000	1.0 x 2.0	-0.51	0.86	0.60	0.10	>0.001	0.11	10.33	>0.001
	1.0 x 1.0	-0.41	0.84	0.62	0.09	>0.001	0.19	21.90	>0.001
	1.0 x 0.5	-0.32	0.80	0.64	0.10	>0.001	0.20	30.22	>0.001
FDH	1.0 x 2.0	-0.02	0.99	0.84	0.08	>0.001	0.05	6.55	>0.001
	1.0 x 1.0	0.01	0.64	0.82	0.07	>0.001	0.06	7.11	>0.001
	1.0 x 0.5	-0.01	0.56	0.81	0.07	>0.001	0.08	8.99	>0.001

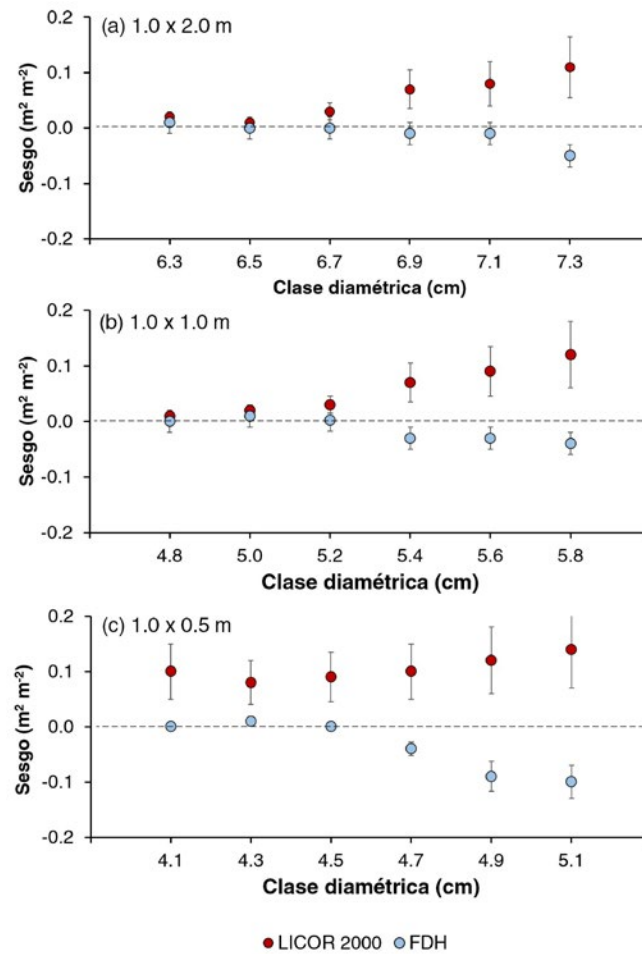


Figura 1. Variación del sesgo del IAF estimado por el método indirecto LICOR-2000 y fotografía digital hemisférica (FDH) en función de las clases diamétricas de los espaciamientos analizados en plantaciones dendroenergéticas de Eucalipto .

obteniendo el mismo resultado de [Tenorio et al. \(2019\)](#) con dos variedades clonales de *Gmelina arborea*, en las que se determinó que el aumento de IAF por disminución del espaciamiento se debe al incremento de la competencia de los árboles por espacio, luz y nutrientes. Conforme la cantidad de árboles aumenta, la disponibilidad de espacio se reduce. Esto hace que los árboles tiendan a desarrollar copas compactas y a reducir la angulación de las ramas, un aspecto que afecta directamente la estructura de la copa. [Breda \(2003\)](#), [Liu et al. \(2012\)](#) y [Tustin et al. \(2022\)](#) mencionan que es común en cultivos de alta densidad que el IAF aumente con distanciamientos menores como estrategia

de sobrevivencia para aumentar la captura de luz en el sitio. Las copas pequeñas tienden a generar una menor capacidad fotosintética, lo cual afecta directamente la generación de los azúcares necesarios para el crecimiento primario y secundario, aspecto que afecta directamente la capacidad de crecimiento ([Arias-Aguilar et al., 2020](#)).

Otro aspecto pertinente es la arquitectura de la copa, la cual se compactó conforme el espaciamiento disminuía. Además, los árboles de mayor espaciamiento presentaron un IAF menor, debido a que el área de desarrollo fotosintético era mayor, por lo que el individuo tenía una mayor intercepción de luz, lo que implica una menor eficiencia

de uso de radiación (Confalonieri *et al.*, 2013; Liu *et al.*, 2012). La reducción del espaciamiento genera un aumento en la copa, por lo que el árbol desarrolla una mayor eficiencia fotosintética en vías de aumento de la altura para poder expandir el área de la copa y ser más dominante (Lecomte *et al.*, 2022; Valverde *et al.*, 2020). Los estudios desarrollados por Facchi *et al.* (2010) determinaron que el espaciamiento influye directamente en la competitividad de los árboles, generando reducciones del 40 al 60 % en el diámetro de la copa y del 20 al 40 % en el IAF. Por su parte, Vyas *et al.* (2010), en plantaciones de especies tropicales, determinaron que la eficiencia fotosintética en altas densidades es mayor que en individuos sembrados en menores espaciamientos, pues la distribución de las hojas tiende a ser más concentrada, las hojas tienden tener un tamaño menor y, por su distribución en la copa, son más eficientes para desarrollo de fotosíntesis y transpiración.

Método óptimo para estimar el IAF

La evaluación de los métodos indirectos de IAF con respecto al directo (Tablas 2 y 3) evidenció que la FDH es la de mayor adaptabilidad a cultivos con espaciamientos reducidos, dado que con ella se puede lograr una reducción del traslape de copas. Este resultado es similar al determinado por Valverde y Arias (2020) en plantaciones con espaciamiento de 1.0 x 1.0 m de *E. tereticornis*. Dicho estudio determinó que la predicción del IAF mediante FDH mostró un mejor resultado en comparación con el LICOR-2000 (Tabla 3), debido a que el sistema fotográfico permite un proceso de clasificación de píxeles, lo que a su vez permite afinar la diferenciación de fuste, hojas, ramas y cielo, además de que considera la ubicación espacial del estudio y la angulación total. Esto mejora el análisis de la información a pesar de que se use el mismo algoritmo del otro equipo. En cambio, con el LICOR-2000, no se pueden realizar correcciones ambientales, y su uso en campo es muy reducido, pues las condiciones climáticas despejadas reducen la exactitud del equipo y lo hacen únicamente

funcional en el rango de horas cercano al amanecer y al atardecer, lo cual limita su uso. Además, el método de FDH permite evaluar diferentes algoritmos de corrección de datos e imágenes; a partir de ello se puede escoger la mejor clasificación de píxeles de acuerdo con el estudio. Esto es imposible para el LICOR-2000, pues este trae un único algoritmo preinstalado, el cual, combinado con un sistema de clasificación monocromático, tiende a ser menos preciso (Raj *et al.*, 2021), un aspecto que Mason *et al.* (2012) y Panda *et al.* (2019) encontraron en plantaciones juveniles y adultas de Eucalipto; el equipo LICOR-2000 es susceptible a sobrestimar el IAF en condiciones de baja nubosidad y angulación solar inferior a 15°, además de que cuenta con un algoritmo limitado en la diferenciación de hojas y ramas. Esto incrementa el sesgo en condiciones ambientales adversas, por lo que debe usarse en climas nublados homogéneos, evitando que el ángulo del sol sea superior a 45°.

Por su parte, Weiss *et al.* (2004) y Hosseini *et al.* (2021) mencionan que la FDH presenta ventajas como una menor dependencia a la angulación solar y a sombras para la estimación, una menor dependencia a la nubosidad y una facilidad de postedición de fotografías para poder afinar el cálculo del IAF. Sin embargo, es importante destacar que se debe considerar el efecto de variables como el viento, que genera sesgos importantes en la estimación del IAF (Xiao *et al.*, 2006). Los estudios desarrollados por Valverde y Arias (2020) evidenciaron que vientos superiores a los 5 km.h⁻¹ pueden generar hasta un 30 % de subestimaciones o sobrestimaciones del IAF, por lo que se puede considerar una variable clave para disminuir el sesgo en las mediciones de campo. También es importante calibrar correctamente la apertura del lente y la velocidad de la fotografía a realizar, con un ISO ajustado y con la resolución necesaria para que las imágenes cuenten con una calidad que permita la caracterización (Valverde *et al.*, 2020).

En el caso de cultivos con espaciamiento reducido, la estimación de IAF se vuelve complicada por el traslape de copas y la reducción de la

luminosidad debajo del dosel, además de que se genera una jerarquización de árboles con individuos dominantes de rápido crecimiento y copa de gran tamaño, así como de árboles suprimidos con copa pequeña y bajo ritmo crecimiento. Esto genera variaciones importantes en el IAF según el punto de muestreo. Por eso es importante de realizar mediciones en múltiples puntos de la plantación y evaluar la distribución del sesgo en función del diámetro para identificar los puntos de mayor error (Liang *et al.*, 2016). El cambio de angulación de ramas, el incremento de ramas muertas y una mayor oscuridad influyen en el aumento del sesgo del equipo LICOR-2000, dado que este no cuenta con un método robusto de corrección. Por su parte, la FDH se puede configurar y adaptar a la condición del dosel y permite dar una idea en tiempo real, por lo que las fotografías a realizar pueden repetirse si hay algún error, aspecto que permite que la distribución de dicho error sea menor. La tendencia a la subestimación se debe al efecto borde, que se da según el tipo de borde y el área foliar específica de cada especie, lo cual deriva en un error en la clasificación de píxeles, aspecto puede ser corregido con un entrenamiento de píxeles más robusto y una condición climática tan homogénea como sea posible (Wang *et al.*, 2021).

CONCLUSIONES

Se determinó que el factor especie y la interacción especie-espaciamiento no mostraron influencia significativa es las estimaciones del IAF; únicamente el factor espaciamiento influyó en las variaciones del IAF (independientemente del método de estimación) y el diámetro de la plantación, lo cual muestra que la disminución del espaciamiento produjo un aumento en el IAF, pero con valores diamétricos menores. El espaciamiento de 1.0 x 2.0 m presentó IAF menores, pero diámetros máximos; y el espaciamiento de 1.0 x 0.5 m, los máximos valores de IAF con mínimos de diámetro diferentes a la especie de Eucalipto. Las alturas

total y de copa no mostraron diferencias debido a ninguno los factores analizados.

Al analizar el efecto del espaciamiento en el cálculo indirecto del IAF, se encontró que el método de FDH presentó el mejor desempeño en cuanto a exactitud y ajuste de los datos en los tres espaciamientos analizados, con una leve tendencia de subestimación inferior al 7 % del valor real, caso distinto al método LICOR-2000, que obtuvo ecuaciones con bajo ajuste y un sesgo significativamente mayor con tendencia a sobrestimar el IAF conforme el espaciamiento se redujo, llegando a sobrestimaciones del 30 %. Por lo tanto, se recomienda el uso de FDH para el análisis de IAF en plantaciones con espaciamientos iguales o menores de 1.0 x 2.0 m en regiones tropicales.

CONTRIBUCIÓN DEL AUTOR

El autor de este artículo es el único responsable por el diseño, la recolección de datos, el análisis estadístico y la redacción del manuscrito.

REFERENCIAS

- Arias-Aguilar, D., Valverde, J. C., & Campos, R. (2020). Effect of planting density and tree species selection on forest bioenergy systems: tree growth, nutrient storage and wood chemical properties. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 10(6), 1165-1175. <https://doi.org/10.1002/ghg.2008>
- Ariza-Carricondo, C., Di Mauro, F., de Beeck, M. O., Roland, M., Gielen, B., Vitale, D., Ceulemans, R., & Papale, D. (2019). A comparison of different methods for assessing leaf area index in four canopy types. *Central European Forestry Journal*, 65(2), 67-80. <https://doi.org/10.2478/forj-2019-0011>
- Breda, N. J. (2003). Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. *Journal of Experimental Botany*, 54(392), 2403-2417. <https://doi.org/10.1093/jxb/erg263>

- Broeckx, L., Verlinden, M., Vangronsveld, J., & Ceulemans, R.** (2012). Importance of crown architecture for leaf area index of different *Populus* genotypes in a high-density plantation. *Tree Physiology*, 32(10), 1214-1226. <https://doi.org/10.1093/treephys/tps083>
- Chen, J. M., & Cihlar, J.** (1995). Plant canopy gap-size analysis theory for improving optical measurements of leaf-area index. *Applied Optics*, 34(27), 6211-6222. <https://doi.org/10.1364/AO.34.006211>
- Chen, Y., Liu, J., Yao, X., Deng, Y., Hao, Z., Lin, L., Wu, N., & Yu, K.** (2022). Effect of layer thickness and voxel size inversion on leaf area density based on the voxel-based canopy profiling method. *Journal of Forestry Research*, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11676-021-01440-7>
- Chianucci, F., Cutini, A., Corona, P., & Puletti, N.** (2014). Estimation of leaf area index in understory deciduous trees using digital photography. *Agricultural and Forest Meteorology*, 198, 259-264. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.09.001>
- Chianucci, F., Puletti, N., Giacomello, E., Cutini, A., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.04.001>
- Confalonieri, R., Foi, M., Casa, R., Aquaro, S., Tona, E., Peterle, M., Boldini, A., De Carli, G., Ferrari, A., & Finotto, G.** (2013). Development of an app for estimating leaf area index using a smartphone. Trueness and precision determination and comparison with other indirect methods. *Computers and Electronics in Agriculture*, 96, 67-74. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.04.019>
- Demarez, V., Duthoit, S., Baret, F., Weiss, M., & Dedieu, G.** (2008). Estimation of leaf area and clumping indexes of crops with hemispherical photographs. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148(4), 644-655. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2007.11.015>
- Dovey, S. B., & Du Toit, B.** (2006). Calibration of LAI-2000 canopy analyser with leaf area index in a young eucalypt stand. *Trees*, 20(3), 273-277. <https://doi.org/10.1007/s00468-005-0038-y>
- Facchi, A., Baroni, G., Boschetti, M., & Gandolfi, C.** (2010). Comparing optical and direct methods for leaf area index determination in a maize crop. *Journal of Agricultural Engineering*, 41(1), 33-40. <https://doi.org/10.4081/jae.2010.1.33>
- Hosseini, M., McNairn, H., Mitchell, S., Robertson, L. D., Davidson, A., Ahmadian, N., Bhattacharya, A., Borg, E., Conrad, C., & Dabrowska-Zielinska, K.** (2021). A comparison between support vector machine and water cloud model for estimating crop leaf area index. *Remote Sensing*, 13(7), 1348. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.08.027>
- IMN** (2021). *Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica*. <https://www.imn.ac.cr>
- Jonckheere, I., Nackaerts, K., Muys, B., & Coppin, P.** (2005). Assessment of automatic gap fraction estimation of forests from digital hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology*, 132(1-2), 96-114. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2005.06.003>
- Junior, H. J. E., de Melo, R. X., Sartori, M. M. P., Guerra, S. P. S., & Ballarin, A. W.** (2016). Sustainable use of eucalypt biomass grown on short rotation coppice for bioenergy. *Biomass and Bioenergy*, 90, 15-21. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.03.037>
- Katabuchi, M.** (2015). LeafArea: an R package for rapid digital image analysis of leaf area. *Ecological Research*, 30(6), 1073-1077. <https://doi.org/10.1007/s11284-015-1307-x>
- Lang, A.** (1986). Leaf-area and average leaf angle from transmission of direct sunlight. *Australian Journal of Botany*, 34(3), 349-355. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.03.037>
- Lecomte, X., Paulo, J., Tomé, M., Veloso, S., Firmino, P., Faias, S., & Caldeira, M.** (2022). Shrub understory clearing and drought affects water status and growth of juvenile *Quercus suber* trees. *Forest Ecology and Management*, 503, 119760. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119760>
- Liang, L., Qin, Z., Zhao, S., Di, L., Zhang, C., Deng, M., Lin, H., Zhang, L., Wang, L., & Liu, Z.** (2016). Estimating crop chlorophyll content

- with hyperspectral vegetation indices and the hybrid inversion method. *International Journal of Remote Sensing*, 37(13), 2923-2949. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1186850>
- Liu, Z., Jin, G., & Qi, Y.** (2012). Estimate of leaf area index in an old-growth mixed broadleaved-Korean Pine Forest in Northeastern China. *PLoS one*, 7(3), e32155. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.10.009>
- Mason, E. G., Diepstraten, M., Pinjuv, G. L., & Lasserre, J.-P.** (2012). Comparison of direct and indirect leaf area index measurements of *Pinus radiata* D. Don. *Agricultural and Forest Meteorology*, 166, 113-119. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.06.013>
- Meinzer, F., Goldstein, G., & Andrade, J.** (2001). Regulation of water flux through tropical forest canopy trees: do universal rules apply? *Tree Physiology*, 21(1), 19-26. <https://doi.org/10.1093/treephys/21.1.19>
- Mougin, E., Demarez, V., Diawara, M., Hiernaux, P., Soumaguel, N., & Berg, A.** (2014). Estimation of LAI, fAPAR and fCover of Sahel rangelands (Gourma, Mali). *Agricultural and Forest Meteorology*, 198, 155-167. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.08.006>
- Oberski, D.** (2014). lavaan. survey: An R package for complex survey analysis of structural equation models. *Journal of Statistical Software*, 57, 1-27. <https://doi.org/10.18637/jss.v057.i01>
- Panda, S. S., Amatya, D. M., Muwamba, A., & Chescheir, G.** (2019). Estimation of evapotranspiration and its parameters for pine, switchgrass, and intercropping with remotely-sensed images based geospatial modeling. *Environmental Modelling & Software*, 121, 104487. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.07.012>
- Qu, Y., Gao, Z., Shang, J., Liu, J., & Casa, R.** (2021). Simultaneous measurements of corn leaf area index and mean tilt angle from multi-directional sunlit and shaded fractions using downward-looking photography. *Computers and Electronics in Agriculture*, 180, 105881. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105881>
- R Core Team** (2013). *R: A language and environment for statistical computing* [Computer software]. The R Foundation.
- Raj, R., Walker, J. P., Pingale, R., Nandan, R., Naik, B., & Jagarlapudi, A.** (2021). Leaf area index estimation using top-of-canopy airborne RGB images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 96, 102282. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102282>
- Regent Instrument** (2012). *WinFOLIA pro 2012* [Computer software]. Regent Instrument Inc.
- Schwerz, F., Eloy, E., Elli, E. F., & Caron, B. O.** (2019). Reduced planting spacing increase radiation use efficiency and biomass for energy in black wattle plantations: Towards sustainable production systems. *Biomass and Bioenergy*, 120, 229-239. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.11.034>
- Schwerz, F., Neto, D. D., Caron, B. O., Nardini, C., Sgarbossa, J., Eloy, E., Behling, A., Elli, E. F., & Reichardt, K.** (2020). Biomass and potential energy yield of perennial woody energy crops under reduced planting spacing. *Renewable Energy*, 153, 1238-1250. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.02.074>
- Tenorio, C., Moya, R., Valverde, J. C., & Arias-Aguilar, D.** (2019). Biomass production and characteristics of short rotation plantations of clones of in three spacings. *Silvae Genetica*, 68(1), 92-100. <https://doi.org/10.2478/sg-2019-0017>
- Tun, T. N., Guo, J., Fang, S., & Tian, Y.** (2018). Planting spacing affects canopy structure, biomass production and stem roundness in poplar plantations. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 33(5), 464-474. <https://doi.org/10.1080/02827581.2018.1457711>
- Tustin, D., Breen, K., & van Hooijdonk, B.** (2022). Light utilisation, leaf canopy properties and fruiting responses of narrow-row, planar cordon apple orchard planting systems—A study of the productivity of apple. *Scientia Horticulturae*, 294, 110778. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110778>
- Valverde, J. C., & Arias, D.** (2018). Variation of physiological parameters in juvenile treetops of *Eucalyptus tereticornis* from a three-dimensional perspective. *Espirales Revista Multidisciplinaria de Investigación*, 2(23), 399. <https://doi.org/10.31876/re.v2i23.399>
- Valverde, J. C., & Arias, D.** (2020). Evaluación del índice de área foliar con método indirecto y

- directo en distintas condiciones ambientales en plantaciones dendroenergéticas de *Eucalyptus tereticornis* Sm. *Madera y Bosques*, 26(2), e2621953. <https://doi.org/10.21829/myb.2020.262195>
- Valverde, J. C., Guevara-Bonilla, M., Arias, D., Briceño, E., & Esquivel, E.** (2017). 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. *Madera y bosques*, 23(2), 7-19. <https://doi.org/10.21829/myb.2017.232498>
- Valverde, J. C., Quesada, R., Soto, C., & Arias, D.** (2020). Validación de un protocolo fotográfico para la digitalización de muestras de herbario de especies tropicales. *Revista Científica*, 38(2), 147-159. <https://doi.org/10.14483/23448350.15362>
- Vyas, D., Mehta, N., Dinakaran, J., & Krishnaya, N.** (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. <https://doi.org/10.1007/s11676-010-0032-0>
- Wang, P., Tong, L., Zhou, X., Gang, X., Gao, B., Li, Y., & Sun, Y.** (2021, July 11-16). *Estimation of leaf area index based on hemispherical canopy photography* [Conference presentation]. 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS, Bruselas, Bélgica. <https://doi.org/10.1109/IGARSS47720.2021.9554699>
- Wei, S., Yin, T., Dissegna, M. A., Whittle, A. J., Ow, G. L. F., Yusof, M. L. M., Lauret, N., & Gastellu-Etcheberry, J.-P.** (2020). An assessment study of three indirect methods for estimating leaf area density and leaf area index of individual trees. *Agricultural and Forest Meteorology*, 292, 108101. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108101>
- Weiss, M., & Baret, F.** (2017). *CAN_EYE, version 6.4.91* [Computer software]. IRAE. <https://www6.paca.inrae.fr/can-eye/>
- Weiss, M., Baret, F., Smith, G., Jonckheere, I., & Coppin, P.** (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(1-2), 37-53. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.08.027>
- Wengert, M., Piepho, H.-P., Astor, T., Graß, R., Wijesingha, J., & Wachendorf, M.** (2021). Assessing spatial variability of barley whole crop biomass yield and leaf area index in silvoarable agroforestry systems using UAV-borne remote sensing. *Remote Sensing*, 13(14), 2751. <https://doi.org/10.3390/rs13142751>
- Xiao, C.-W., Janssens, I., Curiel Yuste, J., & Ceulemans, R.** (2006). Variation of specific leaf area and upscaling to leaf area index in mature Scots pine. *Trees*, 20(3), 304-310. <https://doi.org/10.1007/s00468-005-0039-x>
- Yan, G., Hu, R., Luo, J., Weiss, M., Jiang, H., Mu, X., Xie, D., & Zhang, W.** (2019). Review of indirect optical measurements of leaf area index: Recent advances, challenges, and perspectives. *Agricultural and Forest Meteorology*, 265, 390-411. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.11.033>
- Yang, T., Duan, Z., Zhu, Y., Gan, Y., Wang, B., Hao, X., Xu, W., Zhang, W., & Li, L.** (2019). Effects of distance from a tree line on photosynthetic characteristics and yield of wheat in a jujube tree/wheat agroforestry system. *Agroforestry Systems*, 93(4), 1545-1555. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0267-x>

