

CARACTERÍSTICAS DEL DOSEL ASOCIADAS AL RENDIMIENTO AGRÍCOLA DE LA CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum spp.*)
CHARACTERISTICS OF THE CANOPY ASSOCIATED WITH THE AGRICULTURAL YIELD OF SUGAR CANE

Maira Ferrer Reyes, Lázaro Pardo Mora, Javier Delgado Padrón

Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar Carretera a la CUJAE, Km1^{1/2}
Boyereros, CP19390

email: maira.ferrer@inica.azcuba.cu

Resumen

Gran interés despierta en Cuba, la estimación por teledetección del índice de área foliar de la caña de azúcar por su estrecha relación con los rendimientos agrícolas, sin embargo, se desconoce el momento apropiado para su estimación (edad fenológica) así como la influencia del área foliar específica en la variabilidad de este indicador. El objetivo del presente trabajo es conocer la relación del índice de área foliar y el área foliar específica con el rendimiento agrícola de la caña de azúcar. Los datos para correlacionar el índice de área foliar con los rendimientos agrícolas fueron obtenidos a partir de treinta experimentos desarrollados con anterioridad a la ejecución del presente trabajo. La relación entre el área foliar específica y el índice de área foliar se estudió en seis cultivares que ocupaban el mayor porcentaje del área agrícola cañera en Cuba. Se obtuvo una correlación significativa positiva entre el índice de área foliar y los rendimientos agrícolas en la etapa comprendida entre finales del periodo de gran crecimiento y los inicios de la maduración de las plantaciones. La edad fenológica no aportó diferencias significativas en el índice de área foliar entre los cultivares en los meses finales del periodo de gran crecimiento. Los valores bajos del área foliar específica tuvieron correspondencia con bajos valores del índice de área foliar. Se estima que los cultivares pueden presentar relaciones similares entre el índice de área foliar y los rendimientos agrícolas, teniendo en cuenta el desarrollo del área foliar específica

Palabras claves: índice de área foliar, área foliar específica, rendimientos agrícolas

Abstract

Estimation by remote sensing of the sugarcane leaf area index arouses great interest in Cuba due to its close relationship with agricultural yields, however, the appropriate moment for its estimation (phenological age) is unknown, as well as the influence of the area. specific foliar in the variability of this indicator. The objective of this work is to know the relationship of the leaf area index and the specific leaf area with the agricultural yield of sugarcane. The data to correlate

the leaf area index with the agricultural yields were obtained from thirty experiments carried out prior to the execution of the present work. The relationship between the specific leaf area and the leaf area index was studied in six cultivars that occupied the highest percentage of sugarcane agricultural area in Cuba. A significant positive correlation was obtained between the leaf area index and the agricultural yields in the stage between the end of the period of great growth and the beginning of the maturation of the plantations. The phenological age did not contribute significant differences in the leaf area index among the cultivars in the final months of the period of great growth. The low values of the specific leaf area corresponded with low values of the leaf area index. It is estimated that cultivars may present similar relationships between the leaf area index and agricultural yields, taking into account the development of the specific leaf area.

Keywords: leaf area index, specific leaf area, agricultural yields.

Introducción

En las últimas décadas, la teledetección se ha convertido en una herramienta fundamental para el desarrollo de la agricultura de precisión. Por medio de ella se puede censar el estado de los cultivos a través de imágenes capturadas desde sensores remotos ubicados en plataformas satelitales o vehículos aéreos tripulados y no tripulados (Rodríguez *et al.*, 2019, Apolo *et al.*, 2019, Álvarez, 2022)

Entre los índices espectrales que estudian diferentes aspectos de la cubierta vegetal se encuentran, el índice de área foliar (LAI, por sus siglas en inglés) (Valverde *et al.*, 2020), el índice de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI, por sus siglas en inglés) (Robinson *et al.*, 2017) y el índice de estrés hídrico en cultivo (CWSI, por sus siglas en inglés) (Camino *et al.*, 2018) El LAI es una variable útil para caracterizar la dinámica, productividad y requerimientos hídricos de cultivos (Mendoza *et al.*, 2017)

En Cuba existe gran interés en utilizar la teledetección para estimar el LAI de la caña de azúcar por su conocida relación con los rendimientos agrícolas. Sin embargo, no existen estudios previos donde se haya relacionado el LAI con el rendimiento agrícola de las plantaciones cañeras. Por lo general, el LAI y los rendimientos agrícolas han sido tratados por separado en las investigaciones cañeras. A excepción se reportan correlaciones positivas entre duración de la biomasa, tasa de asimilación neta, tasa de crecimiento del cultivo y duración del área con el rendimiento agrícola y negativas entre la razón de área foliar, la razón de peso foliar con el porcentaje de pol en caña (Torres *et al.*, 2017)

Otro indicador de trascendencia funcional y ecológica es el área foliar específica (SLA, por sus siglas en inglés) (Blasiak *et al.*, 2021). Este rasgo aparentemente simple de la planta, es el cociente entre la superficie y el peso de la hoja, caracteriza la utilización de las sustancias plásticas en la formación de la hoja y

puede explicar en ocasiones hasta el 80% de la variación en las tasas de crecimiento (Valladares F., 2008).

El objetivo del presente trabajo es conocer la relación del LAI y el SLA con el rendimiento agrícola de la caña de azúcar (*Sacharum, spp*)

Materiales y Métodos

Se realizaron dos estudios: El primero consistió en la búsqueda de datos de experimentos realizados en el Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar que aportaran resultados sobre el índice de área foliar y los rendimientos agrícolas

El otro estudio se llevó a cabo en la Caña Planta de Agosto de 2018 en áreas de la Estación Experimental de la Caña de Azúcar Mayabeque- Artemisa, donde se utilizaron los seis cultivares que ocupan actualmente el mayor porcentaje del área cañera en Cuba, C1051-73, CP52-43, C90-469, C86-12, C86-56 y C323-68 Las determinaciones del LAI se realizaron en dos metros al azar por cultivar a los 120, 240, 300, 360 y 480 días de plantación, por la expresión propuesta por Escalante & Kohashi (1993),

$$LAI = \frac{\text{Área foliar} * \text{Densidad de población}}{\text{Área sembrada}} (\text{m}^2/\text{m}^2) (1)$$

Primeramente se determinó el área foliar, que representó la suma del área de cada tallo presente en el metro lineal, por lo que el área individual de los tallos se determinó mediante el método propuesto por Ferrer M (2018).

$$Aft = \frac{(Afh+1 + Afhn) * \text{No hojas} * 0.995}{2} (2)$$

Donde Aft-área foliar del tallo

Afh+1-área foliar de la hoja +1

Afhn-área foliar de la última hoja verde

Nº hojas- número de hojas del tallo

0.995- coeficiente de corrección

La Densidad de población es el número de tallos presente en el metro y el Área de siembra fue de 1.6 m²

Para el estudio del Área específica de la hoja +1 (SLA en inglés) fueron muestreadas 10 hojas +1 por cultivar a los 120, 300 y 480 días.

A cada hoja por separado se le midió el ancho y el largo del limbo para determinar su área por la siguiente fórmula:

$$Ah = L * A * 0.73, \text{ donde}$$

Ah- es el área

L y A son el largo y el ancho respectivamente y 0.73 es el coeficiente de corrección Con posterioridad las hojas se llevaron a la estufa para su secado, donde se mantuvieron hasta obtener un peso constante y determinar su peso seco (Ms).

Con los valores de área foliar de las hojas (Af) y el peso seco de estas (Ms) se determinó el área específica de las hojas (SLA) con el uso de la siguiente fórmula:

$$SLA = \frac{Ah}{Ms} (3) \text{ (Vile, et al., 1996)}$$

Para conocer el comportamiento del LAI y el SLA con la edad en los cultivares se realizó un análisis de varianza con el programa INFOSTAT.2016 La significación fue valorada con la prueba LSD Fisher. Previamente el LAI fue transformado por la función raíz cuadrada para que cumpliera con los preceptos de distribución normal. A las variables raíz LAI y SLA se comprobó la normalidad con la prueba de Shapiro-Wilks y la homogeneidad de varianza con Kolmogorov-Smirnov.

Resultados y Discusión

La Tabla 1 refleja las ecuaciones lineales resultantes entre el índice de área foliar y los rendimientos agrícolas. Como se puede apreciar (tabla 1), los coeficientes de determinación (R^2) fueron aumentando en la medida que la edad fenológica se incrementó, desde los 140 hasta los 280 días, para luego ligeramente disminuir a los 300 días. El máximo valor de R^2 se obtuvo a los 280 días con $R^2=0.858$.

Tabla 1. Ecuaciones lineales obtenidas entre el índice de área foliar y los rendimientos agrícolas para diferentes edades de la plantación en el cultivar Ja60-5

Edad de plantación(días)	Ecuación lineal	R^2
100	$Y=-0.012x-3.223$	0.083
140	$y=0.003x+3.032$	0.004
160	$y=0.016x+1.768$	0.084
180	$y=0.017x+2.046$	0.166
200	$y=0.276+1.773$	0.276
260	$y=0.035-0.247$	0.809
280	$y=0.03x+0.304$	0.858
300	$Y=0.028+0.256$	0.734

Este resultado constituye, el primer reporte de una relación lineal entre el LAI y los rendimientos agrícolas en Cuba. Un resultado similar fue obtenido por Sandhu *et al.* . 2012, en Florida quien informó un $R^2 =0.87$, para una relación lineal entre los datos del LAI y los rendimientos agrícolas del cultivar CP78-1628 a los 274 días de la plantación.

En maíz (*Zea mays*) también se ha verificado una relación directa del LAI, el rendimiento y la acumulación de biomasa (densidad de 71 000 plantas ha^{-1}), la relación fue directa al incrementarse una unidad de LAI con aumento de producción hasta 567 $kg ha^{-1}$ (Zavala *et al.*, 2022).

Como se puede observar (Figura 1), para valores del LAI iguales a 2.3 se obtuvieron 66.96 t/ha^{-1} y 5,3 se correspondió con 166.96 t/ha^{-1} a los 280 días de plantación, prácticamente a tres meses de la cosecha de las plantaciones de retoño. Precisamente, en igual periodo de tiempo Bryan *et al.*, 2021 confirmó la posibilidad de estimar el rendimiento del cultivo de la caña de azúcar a partir de fotogrametría con vehículos aéreos no tripulados (VANT).

Como la fórmula para determinar el LAI, incluye el número de tallos, es importante referir que el número de estos por metro fue 12 y estos contaban con aproximadamente 3 m de longitud (Fonseca, 1984).

De igual forma, en la figura 1 se muestra también la relación lineal encontrada entre el LAI y los rendimientos agrícolas a los 280 días.

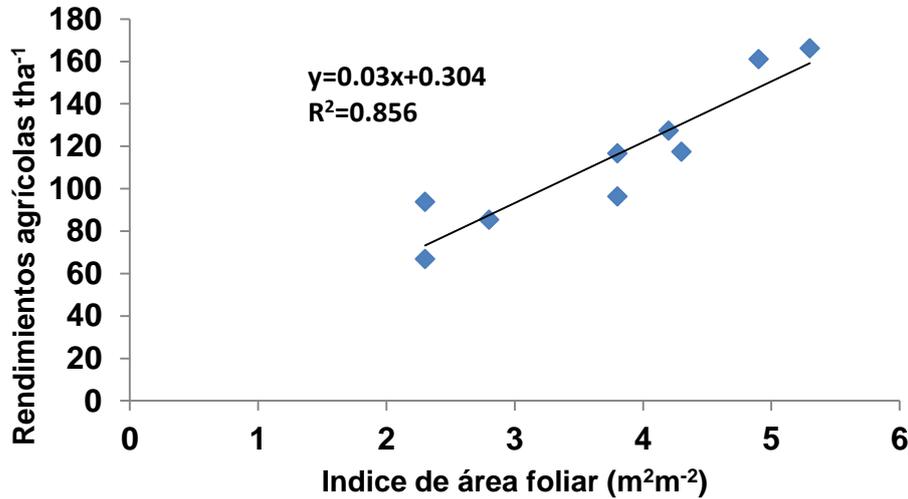
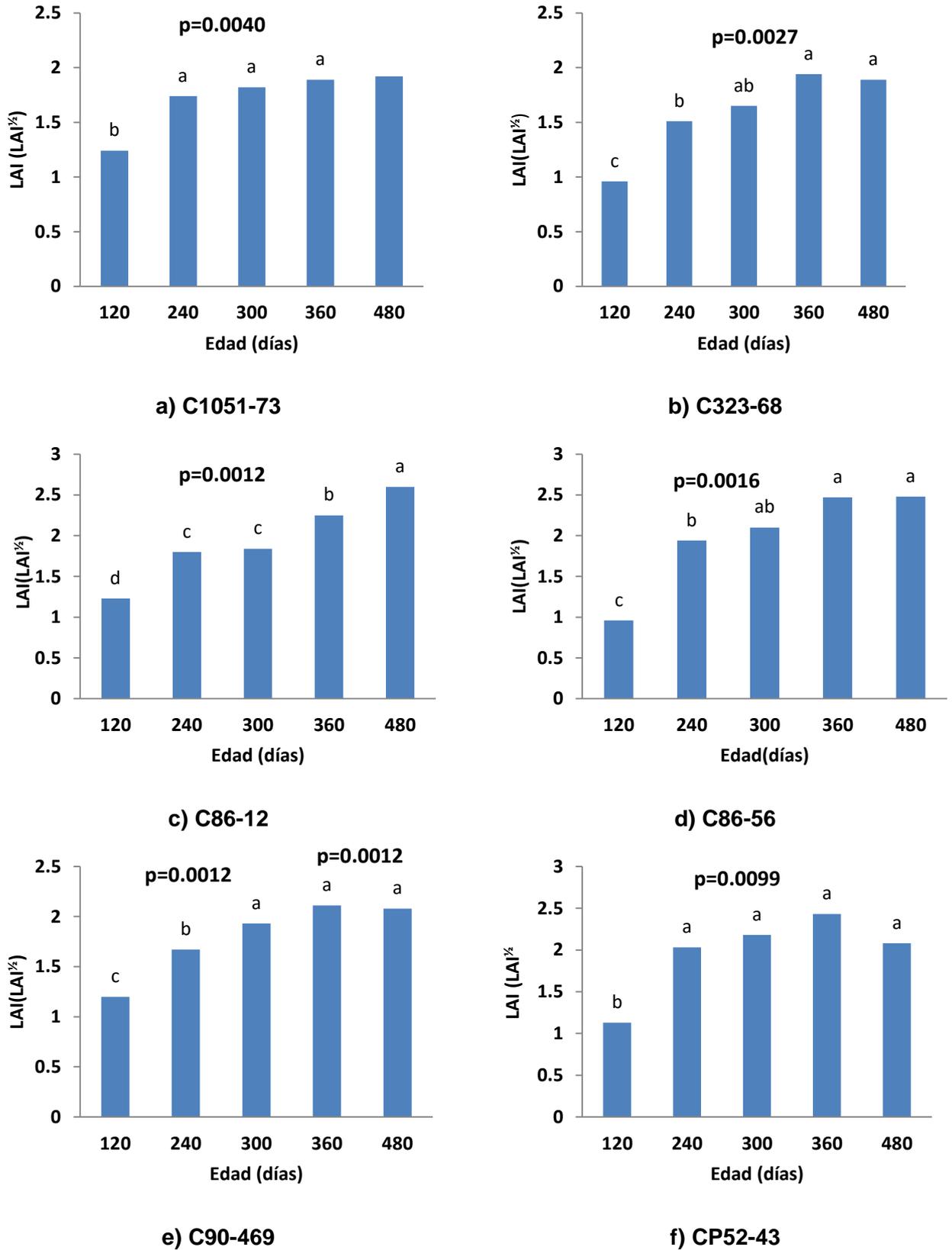


Figura 1. Relación entre el LAI y los rendimientos agrícolas de la caña de azúcar (*Saccharum spp*) cultivar Ja60-5 a los 280 días de plantación.

Lamentablemente en los estudios realizados por Fonseca (Fonseca, 1985) no fue valorada el SLA, sin embargo, Ortega *et al* en 1989 combinó el LAI, el SLA y la distribución de la luz en el follaje para explicar la productividad de cinco cultivares de caña de azúcar, entre ellos Ja60-5, donde se estableció como límite del LAI el valor arbitrario de 4 y reportaron que Ja60-5 inició su crecimiento con valores bajos de LAI, aunque este se incrementó con la edad, no superó el valor de 4, mientras que los cultivares: POJ2878, C374-72, B63118, C187-68 y C87-51 sobrepasaron este valor desde los 180 días y el porcentaje de la radiación incidente que llegó a la parte basal fue superior al de los cultivares C374-72 y C87-51, que se caracterizan por tener un SLA de $100\text{cm}^2\text{ g}^{-1}$ entre los 100 y 250 días, con la posterior disminución hasta cerca de los $90\text{cm}^2\text{ g}^{-1}$

El comportamiento del LAI a diferentes edades fenológicas en los seis cultivares de caña de azúcar, se muestra en la Figura 2, este siguió la tendencia ya reportada para este cultivo por otros investigadores, es decir crecer hasta un punto, para luego descender ligeramente. A partir de los 240 días el análisis de varianza no reportó diferencias significativas del LAI con las edades para los.



Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Figura 2. Variación del índice de área foliar con la edad de la plantación en seis cultivares de caña de azúcar (*Saccharum spp.*).

cultivares: C1051-73, C323-68, C86-56, C90-469 y CP52-43, mientras que para C86-12 estos valores se incrementaron linealmente con la edad. El menor valor del LAI se presentó en C323-68 de 3.78 a los 360 días y el mayor de 5.77 en C86-12 a los 480 días de la plantación.

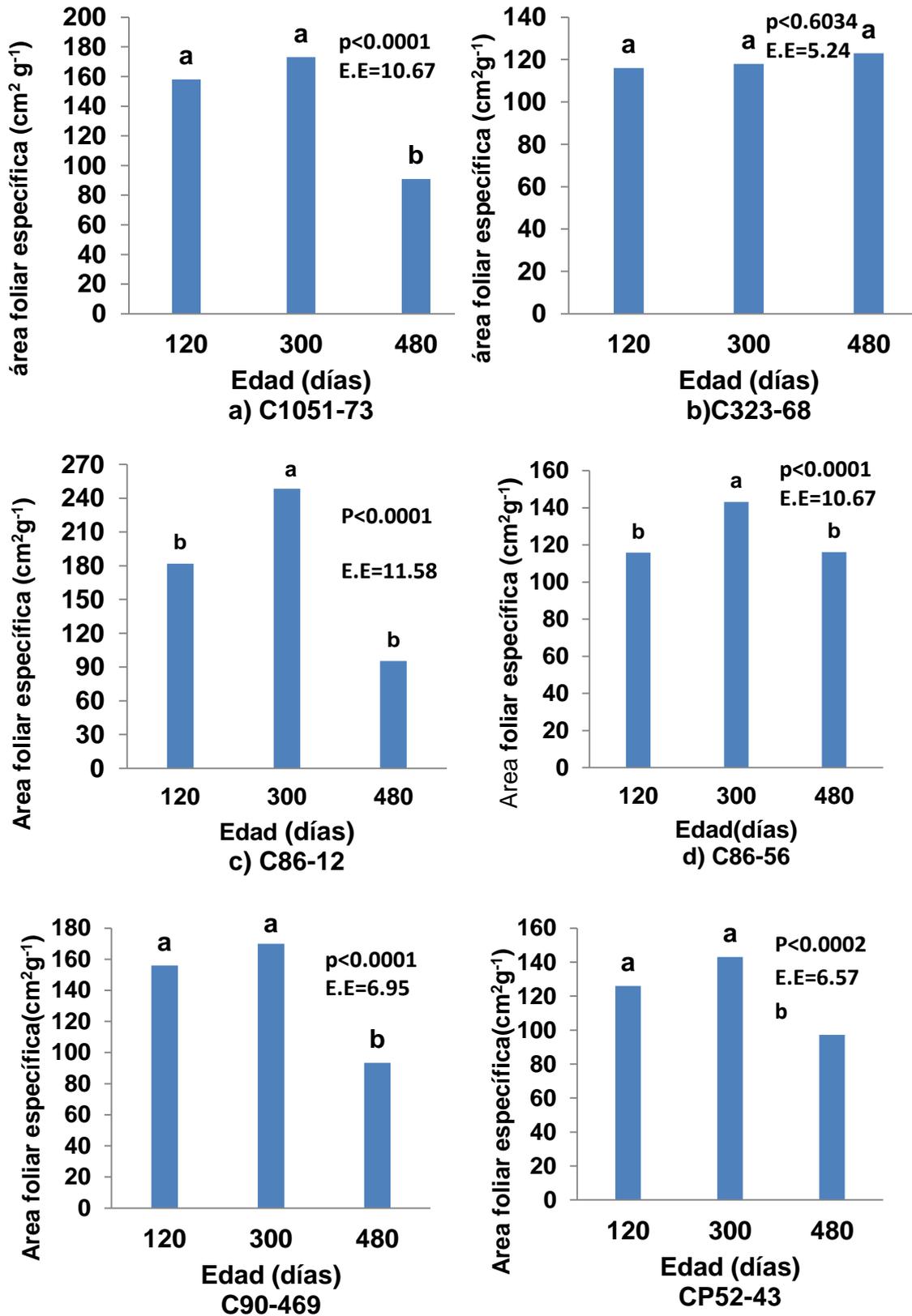
La Figura 3 muestra el comportamiento del SLA a los 120, 300 y 480 días en los seis cultivares analizados anteriormente. Como se puede observar, los valores del SLA ligeramente incrementaron de 120 a 300 días. En los cultivares C86-12 y C86-56 las diferencias fueron significativas (Fig. 3_{c y d})

Los valores máximos y mínimos del SLA se obtuvieron a los 300 y 480 días, respetivamente, para los cultivares C1051-73, C86-12, C86-56, CP52-43 y

C90-469 (Fig. 3_(a, c, d, e y f)). Sin embargo C323-68 mantuvo para las tres fechas valores similares que no fueron significativamente diferentes. Este cultivar coincidió con la menor SLA, $118.35 \text{ cm}^2\text{g}^{-1}$. Los valores más elevados para este indicador fueron nuevamente alcanzados por C86-12 con $248.47 \text{ cm}^2\text{g}^{-1}$

El análisis del SLA y el LAI ha dejado ver, cierta correspondencia entre ambos, de modo que bajos valores del SLA se armonizan con también bajos valores del LAI y viceversa, dada la relación alométrica que se establece entre el área foliar y su peso seco (Zhang *et al.*, 2020). De lo anterior se deduce que el SLA se incrementa hasta que la plantación logra obtener el LAI óptimo, aquel que permite la absorción del mayor volumen de la radiación incidente.

Se puede estimar que C323-68 al tener un SLA y un LAI similar a Ja60-5, para iguales densidades de plantación y distancias de siembra la energía solar llegue a las partes inferiores de sus parcelas en igual cuantía. No obstante sería conveniente recomendar el estudio independiente de los cultivares.



Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Figura.3. Variación del área foliar específica con la edad de la plantación en seis cultivares de caña de azúcar (*Saccharum spp.*).

Conclusiones

Los datos del LAI correlacionaron con los rendimientos agrícolas aportando una relación lineal positiva $R^2 = 0.85$. Se estima que Ja60-5 y C323-68 pueden presentar una relación LAI vs rendimientos agrícolas análoga, por la similitud entre los valores del LAI (inferiores a 4) y SLA 100 y 118 cm^2g^{-1} , respectivamente

Agradecimientos

Al Dr. Jesús Fonseca Arteaga por brindarnos datos de su tesis doctoral para la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

Álvarez, E. 2020. Desarrollo de un método de estimación de rendimiento de cultivos agrícolas utilizando imágenes satelitales ópticas en la provincia de Buenos Aires Presentado en opción al grado de maestro en aplicaciones de información espacial Universidad Nacional de Córdoba <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>.

Apolo, O., Pérez, M., Martínez, J., Egea, G. 2019. Estimación de parámetros biofísicos de interés para la mejora de trigo usando inteligencia artificial X Congreso Ibérico de Agroingeniería Huesca, 3-6 septiembre 2019 doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3398

Blasiak, A., Wegiel, A., Sulkowski, S and Turski, M. 2021. The Effects of Tree and Stand Traits on the Specific Leaf Area in Managed Scots Pine Forests of Different Ages Forests, 12, 396. <https://doi.org/10.3390/f12040396>

Bryan, A., Henríquez, C., Ramírez, T., Largaespada. 2021. Estimación de rendimiento en el cultivo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) a partir de fotogrametría con vehículos aéreos no tripulados (VANT) Agronomía Costarricense 45(1): 67-80. ISSN: 0377-9424

Camino, C., Zarco, P., & González, V. 2018. Effects of heterogeneity within tree crown on airborne-quantified SIF and the CWSI as indicators of water stress in the context of precision agriculture. Remote Sensing, 10(4), 604. <https://doi.org/10.3390/rs10040604>

Escalante EJA, Kohashi SJ (1993) El rendimiento y crecimiento del frijol. Manual para la toma de datos. Colegio de Posgraduados, Montecillo. 84 pp
Ferrer, M. 2018. Comparación de cuatro métodos para la estimación del área foliar de la caña de azúcar. Revista Cuba Caña. Enero- Junio vol. 21 no 1, ISSN1028-6527 rpn 0605.

Fonseca.J. 1984. Necesidades de agua de la caña de azúcar plantada en diferentes épocas de siembra en el occidente de Cuba (tesis de doctorado) Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar (INICA) La Habana, 241 pp

Ortega, E.1989. Bases fisiológicas de la productividad de la caña de azúcar. La Habana Editorial Academia 43p

Torres, I., Valladares, F., Ortega, E., Montalván, J., Fernández, Y., Noy, A., Padrón, M., Pousa, I., Díaz, C, Quiñones, I., León, P., Cervantes, J.2017. Indicadores fisiológicos como herramienta para la selección de cultivares en caña de azúcar www.atmexico.com.mx/wp-content/uploads/2017/11/3

Mendoza, C., Ramírez, C., Ojeda, W., Flores, H. 2017. Estimación de índice de área foliar y rendimiento de chile poblano cultivado en invernadero Ing. agric.biosist. vol.9 no.1 Chapingo ene./jun. 2017 <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2017.04.009>

Robinson, N., Allred, B., Jones, M., Moreno, A., Kimball, J., Naugle, D., & Richardson, A. 2017. A dynamic Landsat derived normalized difference vegetation index (NDVI) product for the conterminous United States. Remote Sensing,9(8), 863. <https://doi.org/10.3390/rs9080863>

Rodríguez, R.; Sánchez; M., Fajardo, D., Zepeda, . 2019 Metodología para obtener mapas del índice de área foliar en cultivos de caña de azúcar Revista Ingeniantes Año 6 No. 2 Vol. 2 ISSN 2395-9452

Sandhu, H., Gilbert, R., McCray, J., Perdomo R., Eiland B. 2012. Relationships among Leaf Area Index, Visual Growth Rating, and Sugarcane Yield Journal American Society of Sugar Cane Technologists, Vol. 32

Valladares, F. 2008. Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante (Segunda edición). Páginas 193-230. Ministerio de Medio Ambiente. EGRAF, S. A., Madrid. ISBN: 978-84-8014-738-5.

Valverde, J., 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 bosques vol.26 no.2 Xalapa <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2621953>

Vile, D., Garnier ,E., Shipley, B., Laurent, G., Navas, M., Roumet, C., Lavorel, S., Díaz, S., Hodgson, J., Lloret, F., Midgley, G., Poorter, H., Rutherford, M., Wilson, P., Wright, I.2005 Specific Leaf Area and Dry Matter Content Estimate Thickness in Laminar Leaves, Annals of Botany, Volume 96, Issue Pages 1129–1136, <https://doi.org/10.1093/aob/mci264>

Zhang, M., Zhang, S., Ye, M., Jiang, L., Vallejos, E., Wu, R. 2020. The genetic control of leaf allometry in the common bean, *Phaseolus vulgaris* BMC Genetics , 21:29 <https://doi.org/10.1186/s12863-020-00838-2> DOI: <https://doi.org/10.47864>

Zavala, F., Reyes, A., Álvarez, V., Cano, P., Rodríguez, M. 2022. Efecto de la tasa de evapotranspiración en área foliar, potencial hídrico y rendimiento de maíz forrajero Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas DOI: 10.29312/remexca.v13i3.2294