

ARTÍCULO CIENTÍFICO

Julio Ricardo Galindo¹ y Jairo Clavijo²

ABSTRACT

Allometric models for estimating the area of leaflets of pea (*Pisum sativum* L.)

The estimation of foliar area of plants from leaf dimensions, without using destructive methods, allows evaluation of the factors that affect the growth of crops in an precise manner and in short time intervals. In order to establish a model to calculate the foliar area of pea (*Pisum sativum* L.) in high tropical environments typical of the Sabana of Bogota, two 2-ha plots of 'Santa Isabel' variety peas were sown in each of two different semesters.

In each plot 32 points were marked for sampling and at each point 20 leaves were chosen and all leaflets from each leaf were measured for length and width using image analysis. In one plot evaluations were made at 42 and 62 days after sowing; in the other plot only one evaluation was made at 72 days after sowing. It was established that the area of the pea leaflets and stipules can be efficiently calculated using conventional allometric models (length and width) during the vegetative and reproductive stages of the crop. The area of these organs can also be estimated based solely on the length of the lamina (under the formula, $0.336 L^2$), a model with only one factor that reduced in half the time of evaluation and was applicable equally to both growth cycles and crop ages.

Key words: predictive model, image analysis, compound leaves, stipular area.

Recibido: abril 12 de 2007
Aceptado: junio 2 de 2007

1. Investigador especialista, Centro de Investigación Tibaitatá, Mosquera (Cundinamarca), CORPOICA. e-mail: jgalindo@corpoica.org.co
2. Profesor catedrático, Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. e-mail: jairocla@yahoo.com

Modelos alométricos para estimar el área de los folíolos de arveja (*Pisum sativum* L.)

RESUMEN

La estimación del área foliar de la plantas a partir de las dimensiones de las hojas, sin recurrir a métodos destructivos, permite evaluar los factores que afectan el crecimiento de los cultivos de una manera precisa y en intervalos cortos de tiempo. Con el fin de establecer un modelo para calcular el área foliar de la arveja (*Pisum sativum* L.) en ambientes de trópico alto propios de la Sabana de Bogotá, se sembraron dos lotes de arveja v. 'Santa Isabel' cada uno con 2 ha de extensión en dos semestres diferentes. En cada lote se marcaron 32 puntos para la toma de muestras, de cada punto se escogieron 20 hojas y de cada hoja se tomaron todos los folíolos para medir el largo y el ancho mediante análisis de imágenes. En uno de los lotes se hicieron evaluaciones a los 42 y 62 días después de la siembra; en el otro lote se hizo una única evaluación 72 días después de la siembra. Se estableció que el área de los folíolos y las estípulas de arveja se puede calcular eficientemente mediante modelos alométricos convencionales (largo y ancho) durante las etapas vegetativa y reproductiva del cultivo. El área de estos órganos también se puede estimar con base únicamente en la longitud de la lámina (bajo la forma $0,366L^2$), modelo con un solo factor que redujo a la mitad el tiempo de evaluación y fue aplicable por igual a los dos ciclos de crecimiento y las dos edades de cultivo.

Palabras clave: modelo predictivo, análisis de imágenes, hojas compuestas, área de las estípulas.

INTRODUCCIÓN

LA ESTIMACIÓN DEL ÁREA FOLIAR constituye un índice importante para establecer la capacidad de las plantas para interceptar la luz, realizar fotosíntesis y producir bienes agrícolas. En general, una alta productividad requiere una interceptación adecuada que aproveche al máximo la radiación solar incidente (Herbert, 2004). Los métodos para calcular el área foliar en especies forestales se clasifican en dos categorías principales: métodos directos e indirectos. Los primeros miden el área foliar propiamente sobre el material, mientras que los segundos derivan el área foliar de parámetros más fácilmente medibles (Jonckheere *et al.*, 2004).

La estimación del área foliar a partir de la medida directa de las dimensiones de los órganos implicados (especialmente el largo y ancho de las hojas) tiene aún hoy aplicabilidad. Entre las ventajas de este método se menciona su bajo costo de implementación (Serdar y Demirsoy, 2006), una mayor precisión en la evaluación del crecimiento de la planta respecto de los métodos destructivos (Uzun y Celik, 1999), facilidad de aplicación para hojas de formas aciculadas o tubulares (Balci y Kennedy, 2003; Gamiely *et al.*, 1991), posibilidad de evaluación *in situ* sin destruir hojas de plantas muy costosas

(De Sousa *et al.*, 2005) y consistencia frente a otros métodos indirectos, como es el uso del analizador del dosel vegetal LAI-2000® (De Jesús *et al.*, 2001).

De esta metodología se encuentran muchos otros ejemplos recientes para diferentes especies, como el durazno (Demirsoy *et al.*, 2004), lino (Kurt, Uysal y Uzun, 2005), pimienta (Kandiannan *et al.*, 2002), calabacín (Rouphael *et al.*, 2006), papa (Fleisher y Timlin, 2006), maíz (Lizaso, Batchelor y Westgate, 2003), palma de aceite (Awal *et al.*, 2004), vid (Williams y Martinson, 2003), fresa (Demirsoy, Demirsoy y Öztürk, 2005) y flores del género *Zinnia* (Rossini *et al.*, 2004), entre otras.

La arveja ocupó en Colombia un área sembrada de 25.658 ha en el año 2004, la mayor extensión entre las hortalizas comerciales (MADR, 2006). El diagnóstico de la agrocadena hortícola indica que es necesario mayor nivel de investigación en este especie, pues se requiere aumentar su nivel de productividad que actualmente es muy bajo a nivel nacional ($1,2 t \cdot ha^{-1}$).

El objetivo de esta investigación fue desarrollar un modelo de predicción del área foliar con base en las dimensiones de la planta de arveja que sea aplicable en primer término a ecosistemas de trópico

alto propios de la Sabana de Bogotá o zonas aledañas con condiciones similares aptas para el cultivo de hortalizas.

MATERIALES Y MÉTODOS

En el Centro Agropecuario Marengo (CAM) de la Universidad Nacional de Colombia, ubicado en el km 15 de la carretera Occidente, latitud norte 4°42', longitud oeste 74°12', a una altitud de 2.543 m.s.n.m., temperatura media anual de 13,64°C, 649 mm de precipitación promedio anual, formación ecológica 'bosque seco montano bajo' y con suelo franco arcilloso, se estableció un cultivo de arveja v. 'Santa Isabel' con semilla proveniente de FENALCE (Federación Nacional de Cultivadores de Cereales y Leguminosas) durante dos ciclos semestrales. En ambos ciclos se utilizó una extensión de 2 ha (100 x 200 m) de terreno, sobre la cual se aplicó un muestreo en malla o red que consistió en dividir el terreno en cuadrículas de 25 x 25 m para un total de 32 unidades con el fin de ubicar los puntos de muestreo en las intersecciones de la cuadrícula.

Para conocer las propiedades químicas del suelo y corregir posibles deficiencias de nutrientes que pudieran afectar el desarrollo de las plantas, por tratarse de lotes independientes se tomaron muestras en cada uno de los semestres. En el primer semestre los resultados fueron: pH 4,88, carbono orgánico 2,76%, fósforo disponible 137,39 ppm, las bases K 0,41 meq·100g⁻¹, Ca 9,70 meq·100g⁻¹, Mg 2,72 meq·100g⁻¹, Na 0,90 meq·100g⁻¹, y los elementos menores Fe 481 ppm, Mn 12,57 ppm, Cu 2,53 ppm y Zn 23,76 ppm. Para el segundo semestre, los resultados fueron: pH 5,23, carbono orgánico 3,01%, fósforo disponible 102,89 ppm, las bases K 0,90 meq·100g⁻¹, Ca 10,68 meq·100g⁻¹, Mg 2,93 meq·100g⁻¹, Na 1,08 meq·100g⁻¹, y los elementos menores Fe 395,00 ppm, Mn 6,44 ppm, Cu 1,53 ppm y Zn 17,54 ppm. Se concluyó que no había limitación por nutrientes para el cultivo de arveja; no obstante, se realizó una aplicación de fertilizantes para mantenimiento del suelo. Adicionalmente, se dispuso de agua para el cultivo proveniente de las lluvias y del riego por aspersión, con el fin de reducir al mínimo el estrés hídrico durante el desarrollo del cultivo.

En el primer semestre se hicieron dos evaluaciones que se describen a continua-

ción: en la primera, a los 42 días después de la siembra (dds), se tomó una muestra destructiva de 24 plantas para evaluar el tamaño de las láminas foliares por fitómetro a lo largo del tallo. La segunda se llevó a cabo los 62 dds y se tomó una muestra de 20 hojas por sitio de la cuadrícula (32 puntos), del nudo anterior del primer nudo con flor (nudo 16 o cercanos) para la evaluación del área foliar y la relación con las dimensiones de los folíolos.

En el segundo semestre se hizo una sola toma de muestra de 20 hojas de diferentes plantas por cuadrícula, extraídas del nudo anterior al primer nudo con flor, a los 72 días después de la siembra. Se evaluaron todos los folíolos precisando la hoja de la cual procedían.

De cada folíolo se midió la longitud (*L*; cm) por la vena central y el ancho máximo (*A*; cm) perpendicular a la vena. El área foliar (*S*) de los folíolos y las estípulas se midió mediante el escaneo de las láminas foliares y el análisis de la imagen (Igathinathane *et al*, 2006) en mapa de bits se llevó a cabo mediante el programa Microsoft QBASIC®. La relación entre *S* y las dimensiones *L* y *A* se hizo con varios modelos, para seleccionar el de mejor ajuste. En este caso, el área foliar constituye la variable dependiente, mientras que *L* y *A* son las variables independientes. En la práctica, se mide *L* y *A* sin error (a no ser del propio de

la medición), y se estima *S* con un nivel de error dado por el modelo.

Se aplicó el análisis de regresión para determinar las relaciones de las dimensiones de la hoja para cada evaluación y cada modelo propuesto por separado (Serdar y Dermisoy, 2006). La estimación de los parámetros de regresión se hizo por mínimos cuadrados. Se realizaron pruebas de homogeneidad de pendientes con el Modelo Lineal General (proceso GLM del SAS®), con el fin de evaluar los efectos del tipo de lámina foliar (folíolo o estípula), punto de muestreo en el espacio, piso foliar, edad del cultivo y semestre de siembra. Se hizo el chequeo de los supuestos de aleatoriedad de los residuales y normalidad con la prueba de Shapiro-Wilks al 5% de significancia y se probaron otros modelos de distribución para los residuales con el fin de facilitar la construcción de intervalos de confianza para los modelos propuestos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las plantas a los 42 días después de la siembra del primer semestre tenían en promedio 7,52 ± 0,3007 nudos formados. En estos primeros nudos las estípulas fueron más pequeñas que los folíolos, como se puede apreciar en la Figura 1. Poste-

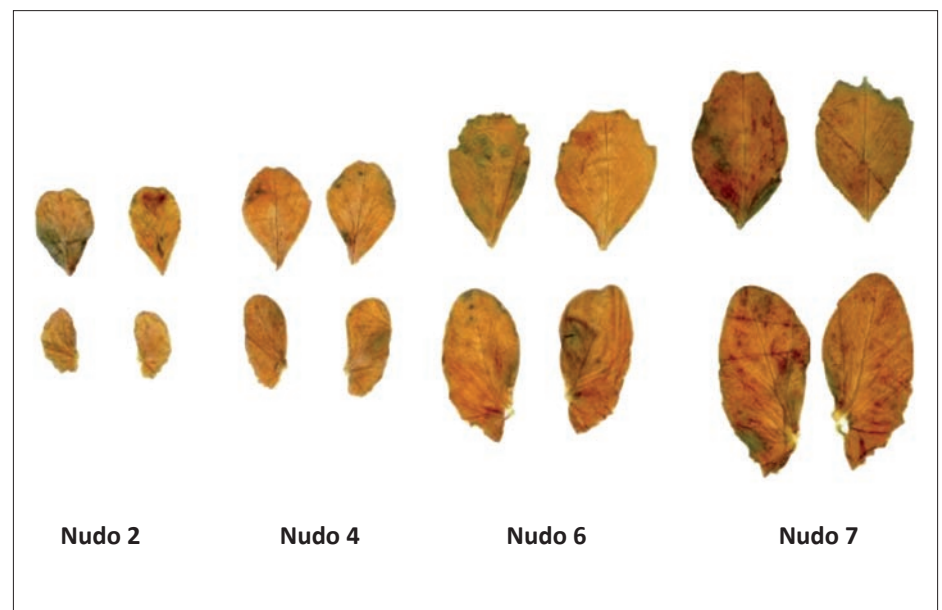


Figura 1. Variación relativa del tamaño de los folíolos (arriba) y las estípulas (abajo) para los primeros nudos de la planta de arveja; obsérvese que los nudos 2 y 4 presentan folíolos de mayor tamaño que las estípulas.

riormente, con el desarrollo de nuevos fitómeros, las estípulas se hicieron progresivamente más grandes y superaron en tamaño a los folíolos de su respectivo fitómero. Los primeros ocho nudos presentaron hojas con sólo un par de folíolos, ya que las hojas con más folíolos sólo aparecieron después, a partir de los nudos 10 y 12. Para el cálculo del área foliar, se prefirieron los nudos 4, 5 y 6 que presentaban láminas foliares desarrolladas (estípulas y folíolos) con un área promedio de $3,99 \pm 0,3230$ cm². No se tomaron las hojas de los nudos superiores porque aún no estaban completamente desarrolladas, ni tampoco se tomaron las hojas de los primeros tres nudos porque generalmente estaban en mal estado debido a la realización de aporque que se practica en este cultivo.

La prueba de homogeneidad de coeficientes de regresión (*bs*) para los diferentes modelos de predicción del área foliar que se presenta en la Tabla 1, permite concluir que el efecto del tipo de lámina (folíolo o estípula) o del nudo foliar no afecta significativamente el valor *b* si se utiliza un modelo adecuado. En este sentido, sobresale el modelo $S = (LA)^b$ por su alto coeficiente de determinación ($r^2 = 0,981$) y bajo error estándar (SE = $0,094$ cm²). Este modelo permite reconocer las diferencias de área entre pisos foliares ($P = 0,005$). El modelo $S = bLA$ tiene el mismo valor de r^2 anterior, pero no hay homogeneidad de *bs* entre tipos de lámina (interacción $b \times T$ significativa, $P = 0,042$). El modelo $S = bL^2$ también cumple con la homogeneidad deseada para tipos de lámina y nudos foliares, pero el coeficiente r^2 se baja a $0,909$. Sin embargo, por tratarse de un modelo simplificado, es conveniente analizar si la reducción de los costos de evaluación compensa la pérdida de cierto nivel de precisión.

En la segunda evaluación de área foliar del primer ciclo de cultivo, cuando se tomaron hojas de los nudos 15 y 16 de la planta de arveja, 64,2% de los folíolos provinieron de hojas con cuatro folíolos, 20,6% provino de hojas con seis folíolos, y el restante 15,2% procedió de hojas de cinco folíolos. En los casos de hojas de cinco folíolos, el último par foliar no estaba completo y en su lugar se encontró un zarcillo. La forma de los folíolos de la planta de arveja en esta fase fue aproxima-

madamente elíptica, aunque el extremo basal era apuntado. El área promedio de los folíolos fue de $8,24 \pm 0,0485$ cm² con $n = 2950$.

En la Tabla 2 se analizan de nuevo los modelos de regresión propuestos para comparar los coeficientes de regresión entre las evaluaciones en las dos edades del cultivo evaluadas. Además se compararon la edad, el efecto de los puntos de muestreo, como un reflejo de la variabilidad espacial (posibles efectos del suelo en cuanto a contenidos de nutrientes y humedad, entre otros). Idealmente, el coeficiente de regresión debe ser el mismo para las dos edades y los diferentes puntos o, lo que es lo mismo, no debe haber interacción de $b \times E$ o de $b \times P$, lo cual facilita el seguimiento del crecimiento del cultivo en la práctica. Los modelos que cumplieron con este requisito fueron dos: $S = bLA$, y $S = bL^2$, con los coeficientes de determinación $r^2 = 0,9695$ y $r^2 = 0,9436$, respectivamente.

Cuando se tomó una nueva muestra de follaje en el segundo ciclo de cultivo, de la forma descrita para el primer ciclo, se

obtuvo un resultado muy similar en cuanto al área promedio de los folíolos: $8,26 \pm 0,0476$ cm², para $n = 2.756$. No obstante, para efectos de la homogeneidad de los coeficientes de regresión *b* en los modelos de predicción de área foliar se probó que hay diferencias por efecto del semestre de cultivo cuando se considera la variación entre puntos de muestreo como fuente de error, a excepción de los modelos $S = bL^2$ y $S = L^b$, tal como se aprecia en la Tabla 3. Sin embargo, se observa en general que las varianzas son muy pequeñas, lo cual indica una gran consistencia de los modelos para arrojar valores similares entre puntos de muestreo y entre semestres, como se confirma más adelante con la estimación de los parámetros.

En la Tabla 4 se presentan los coeficientes resultado de los análisis de regresión de los modelos de predicción del área foliar, a partir de la longitud y el ancho de las láminas foliares, para las tres evaluaciones: dos que corresponden a las edades de cultivo de un mismo lote y otra para la evaluación del segundo semestre. En general, se observa que todos los modelos presentan altos

Tabla 1. Comparación de coeficientes de regresión *b* entre pisos foliares (nudos 4, 5 y 6) y tipos de lámina foliar (estípula o folíolo) para los modelos propuestos de predicción del área foliar (*S*; cm²), con base en la longitud (*L*) y ancho (*A*) de los folíolos, en plantas de arveja con 10 nudos desarrollados.

F. de V. ¹	gl	$S = (LA)^b$		$S = bLA$		$S = L^b$		$S = bL^2$		$S = bA^2$	
		CM	P > F	CM	P > F	CM	P > F	CM	P > F	CM	P > F
Piso, P	2	0,048	0,005	0,340	0,035	0,120	0,031	0,017	0,966	0,477	0,609
Tipo, T	1	0,009	0,328	0,106	0,304	0,407	0,001	0,064	0,714	0,001	0,973
P x T	2	0,013	0,244	0,005	0,946	0,025	0,483	1,237	0,077	0,545	0,567
<i>b</i>	1	84,846	<,001	785,719	<,001	79,794	<,001	692,760	<,001	644,335	<,001
<i>b</i> x P	2	0,018	0,128	0,223	0,109	0,078	0,105	0,092	0,825	1,845	0,148
<i>b</i> x T	1	0,000	0,957	0,417	0,042	0,498	0,000	0,744	0,214	0,626	0,420
<i>b</i> x P x T	2	0,016	0,167	0,041	0,663	0,004	0,879	0,575	0,302	1,326	0,253
Error	239	0,009		0,100		0,034		0,478		0,959	
r^2		0,981		0,981		0,926		0,909		0,817	
SE 2		0,094		0,316		0,185		0,692		0,979	

¹ Fuente de variación

² Error estándar del modelo

Tabla 2. Cuadrados medios y valores P del análisis de varianza para la comparación de los coeficientes de regresión *b* entre dos edades de cultivo y 23 puntos de muestreo espacial, para los modelos propuestos de predicción del área foliar (*S*; cm²) en función del largo (*L*) y ancho (*A*) de los folíolos en hojas de la planta de arveja.

F. de V.	gl	Modelos de predicción del área foliar <i>S</i>									
		$S = (LA)^b$		$S = bLA$		$S = L^b$		$S = bL^2$		$S = bA^2$	
		CM	P > F	CM	P > F	CM	P > F	CM	P > F	CM	P > F
Edad, E	1	0,0142	0,062	1,7432	0,009	0,0056	0,440	1,6691	0,062	22,1125	<,001
Punto, P	22	0,0108	<,001	0,1516	0,934	0,0329	<,001	0,5271	0,332	1,2868	0,000
E x P	22	0,0181	<,001	0,1794	0,847	0,0309	<,001	0,6086	0,175	1,4138	<,001
<i>b</i>	1	41,9028	<,001	329,7793	<,001	37,7854	<,001	279,6013	<,001	604,5294	<,001
<i>b</i> x E	1	0,0000	0,971	0,0311	0,728	0,0025	0,604	0,0006	0,972	45,3857	<,001
<i>b</i> x P	22	0,0083	0,003	0,1890	0,808	0,0410	<,001	0,4672	0,487	1,2510	0,000
<i>b</i> x E x P	22	0,0121	<,001	0,1856	0,822	0,0338	<,001	0,3574	0,790	0,9160	0,013
Error	2256	0,0041		0,2576		0,0094		0,4768		0,5117	
r^2		0,9818		0,9695		0,9583		0,9436		0,9395	
SE modelo		0,0639		0,5076		0,0967		0,6905		0,7153	

coeficientes de determinación r^2 , algunos muy cercanos a la unidad. De acuerdo con Serdar y Demirsoy (2006), los modelos más adecuados se pueden escoger entre los que presenten el menor error estándar (SE) de la estimación, siempre y cuando se conserven las unidades de medida. A este concepto se le puede agregar que entre dos modelos que presenten un nivel similar de SE de la estimación, se debe preferir el que utilice menos parámetros para su evaluación. Aún más, se debe escoger el modelo más económico para su implementación práctica, aún si es necesario sacrificar un mínimo de precisión con la reducción de parámetros (términos en el modelo), siempre y cuando no se violen los supuestos básicos del análisis de regresión. Finalmente, es conveniente que el modelo sea aplicable al máximo número de situaciones sin cambios apreciables en los valores de sus parámetros.

Siguiendo estos principios, los modelos que incluyen el largo (L) y el ancho (A) de los folíolos tienden hacia un menor SE de la estimación. Sin embargo, no siempre fue el mismo modelo el que presentó la menor SE de la estimación. Con la forma $S = bLA$, se logró un buen ajuste en la segunda evaluación ($SE = 0,5928 \text{ cm}^2$), similar a la que se obtuvo en la tercera ($SE = 0,5977 \text{ cm}^2$), aunque el coeficiente de regresión b varió significativamente de 0,68 a 0,66, respectivamente, lo que representó una variación del 3% en la estimación por efecto del semestre. Para las dos evaluaciones del mismo ciclo, el efecto de la edad del cultivo no afectó significativamente el valor del coeficiente de regresión ($b = 0,69$, y $b = 0,68$, respectivamente para la primera y segunda evaluaciones). Como el valor b varía entre las estípulas y los folíolos (Tabla 1), se debe evaluar el área foliar por piso incluyendo ambos tipos de estructura.

En la Figura 2 se aprecia el grado de ajuste entre los valores observados y predichos por el modelo, para cada evaluación. El valor de $b = 0,68$, difiere del que se ha obtenido para otras especies vegetales.

A manera de referencia, si la hoja de arveja fuera una elipse perfecta, el valor del coeficiente de regresión en el modelo propuesto deducible matemáticamente sería $\pi/4 = 0,78$. En la medida en que las puntas del folíolo se alarguen y la forma difiera de la elipse, el coeficiente disminuye.

Tabla 3. Cuadrados medios del análisis de varianza para la comparación de los coeficientes de regresión b entre dos semestres del cultivo para los modelos propuestos de predicción del área foliar (S) en cm^2 en función del largo L y ancho A de los folíolos en plantas de arveja var. Santa Isabel.

F. de V.	gl	$S=(LA)^b$		$S=bLA$		$S=L^b$		$S=bL^2$		$S=bA^2$	
		CM	P > F	CM	P > F	CM	P > F	CM	P > F	CM	P > F
Semestre	1	2,95E-04	0,039	4,08E-03	<,001	2,21E-03	0,130	1,55E-04	0,250	4,30E-02	<,001
Punto	62	6,60E-05		4,10E-05		9,41E-04		1,15E-04		9,66E-04	

Tabla 4. Valores del coeficiente de regresión b y estadísticas asociadas para la evaluación de los diferentes modelos de predicción del área S en cm^2 de los folíolos de la hoja compuesta de arveja a partir del largo L y el ancho A de los mismos en cm .

Evaluación	n	Modelo	SE de la estimación	r^2	b	SE del parámetro	P > t
1	251	$S = (LA)b$	0,18025	0,9829	0,80079	0,006680	<,0001
		$S = bLA$	0,32295	0,9950	0,68812	0,003080	<,0001
		$S = Lb$	0,31929	0,9464	1,19863	0,018050	<,0001
		$S = bL^2$	0,72881	0,9747	0,38450	0,003920	<,0001
		$S = bA^2$	1,07577	0,9448	1,10442	0,016880	<,0001
2	2950	$S = (LA)b$	1,07106	0,9989	0,84841	0,000515	<,0001
		$S = bLA$	0,59276	0,9953	0,67893	0,000859	<,0001
		$S = Lb$	1,12358	0,9969	1,35343	0,001400	<,0001
		$S = bL^2$	0,81567	0,9911	0,36035	0,000628	<,0001
		$S = bA^2$	0,80636	0,9913	1,26344	0,002180	<,0001
3	2757	$S = (LA)b$	0,07065	0,9989	0,83992	0,000542	<,0001
		$S = bLA$	0,59776	0,9952	0,66281	0,000876	<,0001
		$S = Lb$	0,12336	0,9965	1,35156	0,001524	<,0001
		$S = bL^2$	0,94942	0,9879	0,35825	0,000755	<,0001
		$S = bA^2$	0,80755	0,9912	1,20566	0,002158	<,0001

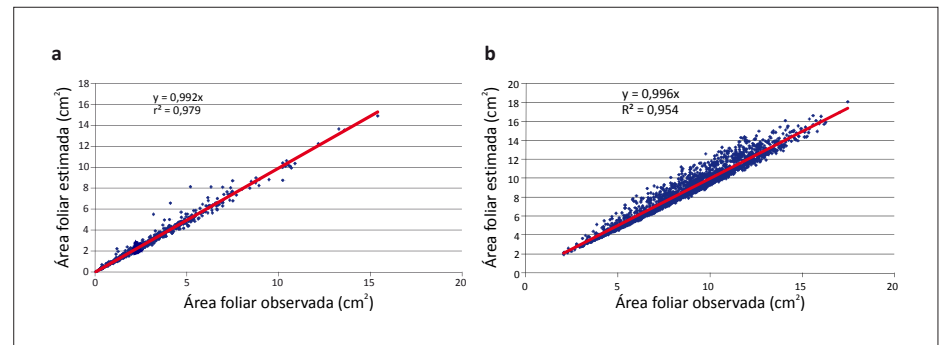


Figura 2. Relación entre el área foliar observada y estimada con el modelo $S = 0,6789 LA$, para dos edades de cultivo: a) 42 d.d.s. y b) 62 d.d.s.

En palma de aceite (*Elaeis guineensis*), Awal *et al.* (2004) estimaron el área foliar de los folíolos a partir de la longitud L y el ancho medio A en cm , con la fórmula: $S = 0,80 (LA)$. Los resultados fueron comparados con las mediciones que arrojó el medidor de área foliar LI-3000A. El coeficiente de correlación fue de $r^2 = 0,99$ y el SE de la estimación fue 0,7477.

En papa, Fleisher y Timlin (2006) tomaron una muestra de hojas para estimar la relación del área foliar S en función de la longitud L y el ancho A , de la forma: $S = 0,872LA$ ($r^2 = 0,93$, $SE = 0,003$). En maíz, Lizaso *et al.* (2003) encontraron que el área foliar de la hoja expandida de maíz se podía estimar a partir del largo L y el ancho A con la ecuación $S = 0,765 LA$.

La variación de los valores de los parámetros entre evaluaciones semestrales coincide con la apreciación que hicieron Bange *et al.* (2000) cuando evaluaron diferentes modelos para estimar el área foliar del girasol (*Helianthus annuus* L.), con base en el largo y ancho de la hoja. Ellos observaron variaciones en el modelo por efecto de la fecha de siembra y el desarrollo del cultivo, pero no por los diferentes genotipos. Sin embargo, propusieron un modelo general ($S = 11,2L + 12,3A + 0,66 LA$, con $r^2 = 0,94$), con el fin de facilitar la operatividad del modelo en campo.

En los modelos probados para arveja no se incluyó en general el intercepto, el cual se asume cero, por cuanto un folíolo sin dimensiones no posee área.

Algunos investigadores han desarrollado modelos lineales para estimar el área foliar, los cuales arrojan un valor de intercepto muy cercano a cero. Rossini *et al.* (2004) obtuvieron diferentes modelos para estimar el área foliar (cm^2) de las especies ornamentales *Zinnia elegans* (vars. 'Liliput' y 'Thumbeliana'), *Zinnia haageana* (v. 'Carpet Persa') y *Z. elegans x Z. angustifolia* ('Profusion Cherry'), para los estados de botón floral y floración, con base en la longitud L y el ancho A de las hojas (cm). Los modelos para el estado de botón floral fueron: $S=0,0009+0,7765 LA$ ('Profusion Cherry'), $S=0,0021+0,8156 LA$ ('Thumbelina'), $S=0,0031+0,8003 LA$ ('Liliput'), $S=0,0036+0,7719 LA$ ('Carpet Persa'). Para el estado de floración, los modelos fueron: $S=0,0029+0,7899 LA$ ('Profusion Cherry'), $S=0,8318 LA$ ('Thumbelina'), $S=0,001+0,8417 LA$ ('Liliput'), $S=0,0042+0,7230 LA$ ('Carpet Persa'). Se observa que los valores del intercepto en todos los modelos aportan muy poco a la estimación del área, menos de 1 mm^2 . Por su parte, el modelo $S= L^b$ presentó el inconveniente de heterogeneidad del coeficiente b según el tipo de lámina foliar (Tabla 1) o incluso según el piso y el tipo de lámina (Tabla 2).

Se concluyó que el modelo con una sola variable mostró buen comportamiento para estimar el área de los folíolos de la arveja, especialmente por la consistencia de los valores del coeficiente de regresión a través de las diferentes evaluaciones:

$$S= bL^2 \quad (1)$$

La curva correspondiente al modelo de la ecuación 1 se presenta en la Figura 3; éste, presenta una ventaja práctica respecto de los modelos que consideran el largo y ancho de los folíolos al reducir a la mitad el tiempo de evaluación, por cuanto que no es necesario medir el ancho. Además, el coeficiente b no difiere significativamente entre las evaluaciones de las dos edades de cultivo, ni entre los dos ciclos de siembra. El valor ponderado de b para las tres evaluaciones realizadas es de 0,3660, el cual se recomienda de manera general para la estimación del área de los folíolos de arveja en trópico alto.

Como lo mencionan Williams y Martinson (2003), los modelos de una sola variable evitan los problemas de colinea-

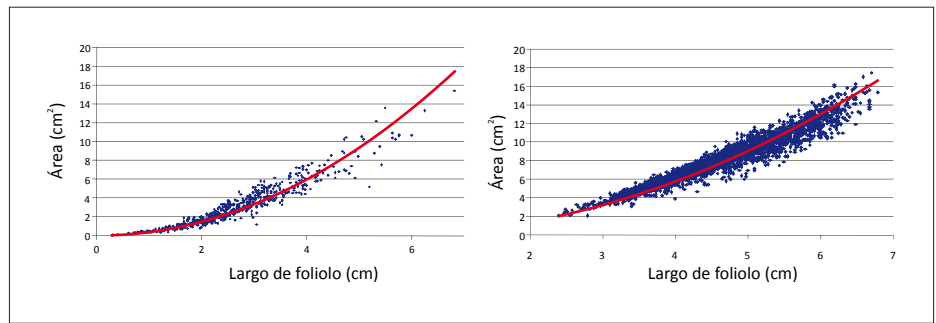


Figura 3. Relación entre el área S (cm^2) y la longitud L (cm) del foliolo de arveja para evaluaciones a los 42 y 62 días después de la siembra. La curva corresponde al modelo $S= bL^2$ con el coeficiente de regresión b que se presenta en la Tabla 4 para cada caso.

ridad entre el ancho y largo de la hoja, y simplifican el procedimiento de medición. Ellos encontraron que para estimar el área foliar S en (cm^2) en la vid (*Vitis labruscana* Bailey cv. 'Niagara' y el híbrido interespecífico 'DeChaunac'), a partir del ancho A en (cm), se pueden usar las siguientes ecuaciones: $S= 0,637 A^{1,995}$, $r^2= 0,9821$ y $SE= 10,58$ para 'Niagara' y $S= 0,672 A^{1,963}$, $r^2= 0,9632$ y $SE= 5,67$ para 'DeChaunac'. Aunque en este análisis la longitud del foliolo muestra mejor comportamiento como predictor del área foliar, respecto al ancho del mismo, no siempre ocurre lo mismo en otras especies. Tsiatas y Maslaris (2005) observaron diferencias en el valor del coeficiente de determinación de los modelos de predicción del área foliar en remolacha azucarera v. 'Rizor' para dos años de cultivo, con base en la longitud de la vena media foliar, aunque el comportamiento fue más estable cuando se tomó como parámetro el ancho foliar.

En algunas especies, los modelos seleccionados son más complejos, lo cual aparentemente tiene que ver con la forma de la hoja. Serdar y Demirsoy (2006) obtuvieron un modelo para estimar el área foliar S (cm^2) en castaño (*Castanea sativa*) con base en la longitud L y el ancho A de las hojas (cm), de la forma: $S= 3,36 + 0,11L^2 - 0,26L^2/A^2 + 1,10A^2$, con $r^2= 0,988$ para 18 genotipos y árboles entre 7 y 70 años de edad. La hoja del castaño tiene bordes aserrados lo cual seguramente obligó a un modelo más complejo.

Para finalizar, el análisis de residuales del modelo propuesto con una sola variable para arveja, indica que la distribución normal no se ajusta bien a los datos observados según la prueba de Kolmogorov-Smirnov ($P= 0,01$). Este resultado se debe

en parte a la presencia de sesgo negativo, en cuanto que la ecuación tiende a arrojar en algunos casos una estimación de área foliar mayor a la real. La presencia de sesgo negativo en los residuales se explica por la existencia de algunos folíolos que no tienen la forma elíptica típica, sino que poseen algunas salientes que terminan hacia la parte media del foliolo las cuales aumentan el ancho pero no así mismo el área. Posiblemente, una estimación más precisa del área foliar en estos casos se puede lograr con una medida de ancho adicional (ancho sobre y bajo la saliente) (Figura 4).

En hojas irregulares pueden proponerse más de una forma de medir las dimensiones de la hoja. Lu *et al.* (2004) evaluaron diferentes modelos para estimar el área foliar del taro o mafafa (*Colocasia esculenta* L. Schott) con métodos no destructivos. Debido a la forma acorazonada de la hoja, existen tres puntos de referencia para tomar medidas de largo y ancho: los extremos apical y basal, la base sinusal (corresponde a la parte hendida del corazón), y el punto de inserción del peciolo (que se hace un poco por debajo de la base sinusal). Los modelos que presentaron las estimaciones más precisas usaron conjuntamente la longitud y ancho



Figura 4. Algunas formas irregulares de los folíolos de arveja en las que estimar el área foliar presenta algunas dificultades.

de la hoja, de la forma como se explica a continuación. La longitud se expresó de una de tres formas: la máxima de la hoja, la longitud desde la base sinusal al ápice (L_{as}), o la longitud del punto de inserción del pecíolo al ápice de la hoja (L_{ap}). El ancho también se midió de una de tres formas: ancho máximo, ancho foliar que pasa por el punto de inserción del pecíolo y perpendicular a L_{ap} , o el ancho de la hoja pasando por la base sinusal y perpendicular a L_{as} . En general todos los modelos, incluso los que usaron una sola dimensión de la hoja, presentaron coeficientes de determinación altos ($r^2 > 0,90$). Por ejemplo, cuando se tomó la longitud desde la base sinusal hasta el ápice para estimar el área foliar con un modelo lineal, el coeficiente de regresión fue de $0,70 \pm 0,025$ (promedio \pm SE).

Para resolver el problema de la distribución asimétrica de los residuales sin complicar las medidas de campo, y considerando que las formas irregulares de los folíolos de arveja no ocurren sistemáticamente, se puede utilizar la distribución de valores extremos de Weibull, que permite ajustarse a formas asimétricas. Aunque el resultado de la prueba de bondad de ajuste no es favorable (Cramer-von Mises, $P < 0,01$), el nivel de error en que incurre es pequeño y no tiene importancia a nivel práctico. Como se aprecia en la Tabla 5, en el cuantil del 5% la diferencia entre el valor observado y el propuesto por el modelo Weibull es de $0,21 \text{ cm}^2$. La importancia de ajustar un modelo a los residuales reside en la posibilidad de construir intervalos de confianza adecuados.

En general, los resultados obtenidos confirman las apreciaciones de varios investigadores que utilizan medidas de la longitud y ancho de las hojas para estimar el área foliar, en cuanto a las ventajas que tiene este método por su sencillez (no se

requieren costosos equipos), seguimiento no destructivo del crecimiento vegetal y precisión respecto de los métodos destructivos.

CONCLUSIONES

El área de los folíolos y de las estípulas en arveja se puede estimar con base en el largo y ancho de los mismos, lo cual permite hacer un seguimiento no destructivo al crecimiento foliar. El modelo correspondiente presentó un coeficiente de regresión prácticamente invariable en las dos etapas de crecimiento del cultivo: vegetativa y reproductiva.

El área de éstos órganos también se puede calcular con base en la longitud de la lámina únicamente, lo cual, aunque disminuye la precisión de la estimación, también reduce a la mitad el tiempo de evaluación, lo cual es importante para reducir costos de investigación o facilitar la toma de otras variables de interés para la evaluación y seguimiento de los cultivos de arveja.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo brindado por el profesor Fabio R. Leyva B. para el desarrollo de esta investigación dentro de sus proyectos con la Universidad Nacional de Colombia y COLCIENCIAS. También la colaboración de la ingeniera agrónoma Jeannette Amparo Español para la evaluación de los ensayos de campo.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

Awal, M.A., W. Ishak, J. Endan y M. Haniff. 2004. Regression model for computing leaf area and assessment of total leaf area variation with frond ages in oil palm. *Asian J. Plant Sci.* 3: 642-646.

Balci, P. y J.H. Kennedy. 2003. Measures of plant surface-areas for eurasian watermilfoil and water stargrass. *J. Aquat. Plant Man.* 41: 119-122.

Bange, M.P., G.L. Hammer, S.P. Milroy y K.G. Rickert. 2000. Improving estimates of individual leaf area of sunflower. *Agronomy* 92: 761-765.

De Jesús Jr., W.C., F.X.R. do Vale, R.R. Coelho y L.C. Costa. 2001. Comparison of two methods for estimating leaf area index on common bean. *Agron. J.* 93: 989-991.

De Sousa, E.F., M.C. Araujo, R.P. Posse, E. Detmann, S. Bernardo, P.A. Berbert y P.A. Dos Santos. 2005. Estimating the total leaf area of the green dwarf coconut tree (*Cocos nucifera* L.). *Science Agriculture (Piracicaba, Brazil)* 62: 597-600.

Demirsoy, H., L. Demirsoy, S. Uzun y B. Ersoy. 2004. Non-destructive leaf area estimation in peach. *Eur. J. Hort. Sci.* 69:144-146.

Demirsoy, H., L. Demirsoy y A. Öztürk. 2005. Improved model for the non-destructive estimation of strawberry leaf area. *Fruits* 60:69-73.

Fleisher, D.H. y D.J. Timlin. 2006. Modeling expansion of individual leaves in the potato canopy. *Agric. For. Met.* 139:84-93.

Gamiely, S., W.M. Randle, H.A. Mills y D.A. Smittle. 1991. A rapid and nondestructive method for estimating leaf area of onions. *HortScience* 26: 206.

Herbert, T.J. 2004. A simple model of canopy photosynthesis. University of Miami. College of Arts and Sciences. Department of Biology. En: http://www.bio.miami.edu/tom/bil160/bil160goods/plantform/13b_plantform.html; consulta: septiembre de 2006.

Igathinathane, C., V.S. Prakash, U. Padma, G. Ravi y A.R. Womac. 2006. Interactive computer software development for leaf area measurement. *Computers and Electronics in Agriculture* 51: 1-16.

Jonckheere, I., S. Fleck, K. Nackaerts, B. Muys, P. Coppin, M. Weiss y F. Baret. 2004. Review of methods for in situ leaf area index determination. Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agric. For. Meteorol.* 121: 19-35.

Kandiannan, K., C. Kailasam, K.K. Chandargiri y N. Sankaran. 2002. Allometric model for leaf area estimation in black pepper (*Piper nigrum* L.). *J. Agron. Crop Sci.* 188: 138-140.

Kurt, O., H. Uysal y S. Uzun. 2005. Non-destructive leaf area estimation of flax (*Linum usitatissimum* L.). *Pakistan J. Bot.* 37: 837-841.

Lizaso, J.I., W.D. Batchelor, M.E. Westgate. 2003. A leaf area model to simulate cultivar-specific expansion and senescence of maize leaves. *Field Crops Res.* 80:1-17.

Tabla 5. Cuantiles para la distribución observada y esperada con las distribuciones normal y Weibull en el error de estimación del área foliar (cm^2) con base en el largo L del folíolo (cm) según el modelo $S = bL^2$ ($n = 2.950$).

%	Observado	Normal	Weibull
1	-2,37695	-1,75949	-2,02557
5	-1,48862	-1,20947	-1,28257
10	-0,98554	-0,91625	-0,91166
25	-0,25007	-0,42630	-0,34485
50	0,26400	0,11807	0,20298
75	0,64763	0,66243	0,67195
90	0,96169	1,15238	1,03757
95	1,17753	1,44560	1,23502
99	1,60290	1,99562	1,56963

- Lu, H.Y., C.T. Lu, M.L. Wei y L.F. Chan. 2004. Comparison of different models for non-destructive leaf area estimation in Taro. *Agron. J.* 96: 448.
- MADR - Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. 2006. Acuerdo de competitividad de la cadena de hortalizas. Observatorio Agrocadenas Colombia. 53 p. En: [http:// www.agrocadenas.gov.co/acuerdo_competitividad_hortalizas.pdf](http://www.agrocadenas.gov.co/acuerdo_competitividad_hortalizas.pdf); consulta: septiembre de 2006.
- Rossini, A.C., T. de J. Deléo, J.C. Barbosa y I.C. Leite. 2004. Leaf area prediction models for *Zinnia elegans* JACQ., *Zinnia haageana* REGEL and 'Profusion cherry'. *Scientific Agriculture (Piracicaba, Brazil)* 61: 47-52.
- Rouphael, Y., C.M. Rivera, M. Cardarelli, S. Fanascas y G. Colla. 2006. Leaf area estimation from linear measurement in zucchini plants of different ages. *J. Hort. Sci. Biotech.* 81: 238-241.
- Serdar, Ü. y H. Demirsoy. 2006. Non-destructive leaf area estimation in chestnut. *Scientia Horticulturae* 108: 227-230.
- Tsialtas, J.T. y N. Maslaris. 2005. Leaf area estimation in a sugar beet cultivar by linear models. *Photosynthetica* 43: 477-479.
- Uzun, S. y C. Hüseyin 1999. Leaf area prediction models (Uzcelik-I) for different horticultural plants. *J. Agric. For.* 23: 645-650.
- Williams III, L. y T.E. Martinson. 2003. Non-destructive leaf area estimation of 'Niagara' and 'DeChaunac' grapevines. *Scientia Horticulturae* 98: 493-498.