

Autores: Díaz, Gastón Mauro<sup>1</sup> y José Daniel Lencinas<sup>1,2</sup>

# Fotografía hemisférica del dosel forestal

## para estimar el índice de área foliar

### RESUMEN

Las fotografías hemisféricas tomadas desde el interior del bosque se utilizan para estimar la estructura del dosel y el régimen de radiación solar. Mediante esta técnica se mide directamente la fracción de claros, de la que puede derivarse el índice de área foliar (IAF). Éste índice es el cociente entre la mitad de la superficie total de los tejidos fotosintéticos de un área determinada de vegetación y la superficie proyectada en el plano horizontal que ésta cubre. Nuestro objetivo es explicar, desde un punto de vista teórico, cómo utilizar fotografías hemisféricas de doseles forestales para medir indirectamente el IAF.

### INTRODUCCIÓN

Las lentes hemisféricas, también llamadas “ojo de pez”, tienen un campo visual cercano a los 180°. Las fotografías hemisféricas tomadas desde el interior del bosque se utilizan para estimar la estructura del dosel y el régimen de radiación solar (Rich, 1990). La estructura del dosel hace referencia a la disposición espacial, superficie y forma de los órganos aéreos de las plantas (Welles y Cohen, 1996). El régimen de radiación solar cuantifica la transmisión de luz al interior del dosel (Promís y Cruz, 2009).

Mediante la fotografía hemisférica se mide directamente la fracción y el tamaño de claros. El término “claro del dosel” se refiere a un espacio en el dosel a través del cual una sonda o haz de luz puede penetrar, sin obstáculos, hasta un punto dado de la superficie del suelo. La fracción de claros es el porcentaje de cielo que puede verse desde debajo del dosel en una dirección determinada (Chen et al., 1997).

El régimen de radiación solar se mide indirectamente a partir de la fracción de claros. De igual manera, a partir de estas mediciones directas

pueden estimarse otros parámetros estructurales, como el índice de área foliar (IAF). El IAF es el cociente entre la mitad de la superficie total de los tejidos fotosintéticos de un área determinada de vegetación y la superficie proyectada en el plano horizontal que ésta cubre (Chen y Black, 1992; Walter y Torquebiau, 2000; Gonsamo, 2009).

Díaz et al. (2013) realizaron una introducción a la fotografía hemisférica en ciencias forestales, centrándose en explicar el principio de funcionamiento en estimación de parámetros estructurales de bosques.

Previamente, Promís y Cruz (2009) realizaron una introducción a la fotografía hemisférica de doseles forestales, centrándose principalmente en la cuantificación del régimen de radiación solar; mientras que Martínez y García-haro (2006) realizaron una explicación más detallada del principio de funcionamiento del equipo, pero aplicada a cultivos agrícolas. Ésta es la literatura en castellano más actualizada sobre este tópico. Por otro lado, el recurso en inglés más completo y de acceso libre es la documentación del software CIMES (Gonsamo et al., 2011; <http://jmnw.free.fr/>).

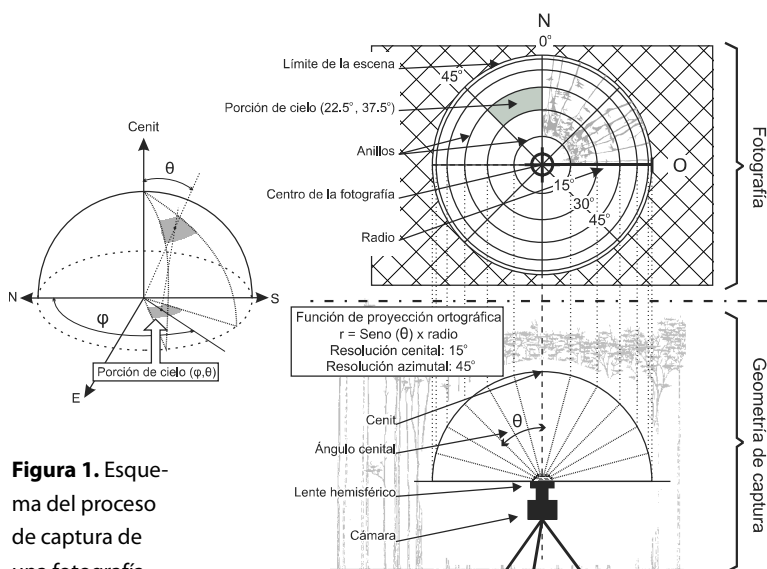
Nuestro objetivo es explicar, desde un punto de vista teórico, cómo utilizar fotografías hemisféricas de doseles forestales para medir indirectamente el IAF. Dividimos el trabajo en los subtítulos: “La fotografía hemisférica en ciencias forestales” y “Medición indirecta del índice de área foliar”. El primer subtítulo consiste en un resumen de la publicación de Díaz et al. (2013), cuyo fin es brindar al lector el contenido esencial para comprender el siguiente subtítulo.

### LA FOTOGRAFÍA HEMISFÉRICA EN CIENCIAS FORESTALES

Las fotografías digitales son imágenes en formato raster, que pueden entenderse como una matriz de  $n$  filas por  $m$  columnas, donde cada elemento es un píxel. Éste se trata de un valor digital o varios, con la restricción de que todos los píxeles del raster deben tener igual cantidad de valores digitales, siendo cada capa de valores una banda. El extensamente utilizado formato JPG es un archi-

1. Centro de Investigación y Extensión Forestal Andino Patagónico (CIEFAP). cc 14 (9200) Esquel, Chubut, Argentina / Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina / [gdiaz@ciefap.org.ar](mailto:gdiaz@ciefap.org.ar)

2. Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco (UNPSJB).



**Figura 1.** Esquema del proceso de captura de una fotografía hemisférica.

vo raster con tres bandas: rojo, verde y azul. Las fotografías hemisféricas más utilizadas en Ciencias Forestales tienen proyección equidistante (también llamada polar o equiangular). En la Figura 1 se utiliza la proyección ortográfica solamente a modo ilustrativo, ya que ésta no se encuentra disponible en lentes comerciales. En la proyección equidistante la distancia entre anillos es constante porque el ángulo cenital se traduce linealmente en la distancia desde el centro de la fotografía.

Para extraer información de la fotografía es necesario separar los claros de la vegetación. Esto consiste en clasificar cada píxel como "cielo" o "no-cielo", lo que se realiza asignando el valor 0 a la vegetación (no-cielo) y 1 a los claros (cielo). Para ello, la técnica que se aplica actualmente es simple, pero adecuada para discriminar dos clases con alto contraste. Para clasificar cada píxel se utiliza la banda del azul porque ésta suele presentar el mayor contraste. La técnica de clasificación consiste en establecer un valor umbral para separar entre cielo y no-cielo, suponiendo que los píxeles que pertenecen a la clase cielo son los más brillantes, es decir, que tienen el valor digital más alto.

La fracción de claros puede medirse directamente con la fotografía hemisférica bajo el supuesto de que los elementos del dosel se comportan como objetos oscuros en la banda del azul (i.e. no

transmiten luz). Se calcula según la Ecuación 1, donde  $\varphi$  es el ángulo azimutal medio y  $\theta$  es el ángulo cenital medio (ambos de un segmento del hemisferio proyectado en el plano),  $P_N$  es el número de píxeles negros y  $P_B$  es el número de píxeles blancos [ambos referidos al segmento del hemisferio ( $\varphi, \theta$ )].

#### MEDICIÓN INDIRECTA DEL ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR

El fundamento para estimar el IAF con los métodos ópticos indirectos tiene su origen en un método indirecto de contacto conocido como *inclined point quadrat* (Warren-Wilson, 1963a; Nilson, 1971). Éste consiste en penetrar el dosel con una sonda y registrar el número de contactos entre la sonda y las hojas. La sonda es una aguja con sección idealmente cero, i.e. el punto matemático (Warren-Wilson, 1963b; Caldwell et al., 1983), que atraviesa el dosel en una dirección determinada por el ángulo cenital ( $\theta$ ) y el ángulo azimutal ( $\varphi$ ). Si la sección de la sonda no es próxima a cero, se debería registrar el porcentaje de la punta que hace contacto con la hoja, lo que complicaría, no solamente la colección de datos, sino el posterior tratamiento matemático. Por restricciones prácticas, este método no es aplicable a doseles forestales.

El cociente entre el número de contactos registrado y la distancia recorrida por la sonda es la frecuencia de contactos. Para obtener una muestra de esta variable se debe introducir la sonda desde distinto punto de inicio pero con idéntica inclinación (Ross, 1981). A partir de la muestra puede calcularse la media y la varianza de la frecuencia de contactos.

La media de la frecuencia de contactos está matemáticamente relacionada con la densidad de área foliar y el ángulo de inclinación de las hojas con respecto a la horizontal ( $\alpha$ ). La densidad de área foliar ( $F$ ) se define como el área de hoja de una sola faz por unidad de volumen del dosel.

Conceptualmente, el número de contactos aumentará en la medida que la densidad sea mayor, pero dependiendo de  $\alpha$ . Véase la Ecuación 2 (Ross, 1981; Welles, 1990) donde  $v(\theta)$  es la frecuencia media de contactos para la inclinación  $\theta$ ,  $G(\theta, \alpha)$  es la fracción de área foliar proyectada en un plano perpendicular a la inclinación  $\theta$ , considerando hojas inclinadas en un ángulo  $\alpha$  con respecto a la horizontal y con la pendiente orientada aleatoriamente con respecto al azimut (Figura

2). Esto último permite expresar la frecuencia media de contactos para una inclinación ( $\theta$ ) en vez de para una dirección ( $\theta, \varphi$ ), ya que G no varía con el azimut.

Para traducir la densidad de área foliar en el IAF es necesario considerar la altura del dosel. Si observamos  $v(\theta)$  en un dosel herbáceo de altura  $z$ , el producto entre  $z$  y  $F$  es igual al IAF.

Sin embargo, puede utilizarse la Ecuación 3 (Nilson, 1971; Weiss et al., 2004) si se obtiene el número medio de contactos ( $k$ ) en vez de la frecuencia media de contactos. Esta variable consiste en contabilizar el número de contactos independientemente de la distancia recorrida por la sonda. El término  $\cos \theta$  sirve para ponderar la distancia recorrida. Cuando la sonda está vertical, el denominador es la unidad, pero disminuye en la medida que la distancia relativa a la posición vertical aumenta con la inclinación.

De la Ecuación 3 se desprende que es necesario conocer  $\alpha$  para medir indirectamente el IAF. Conociendo  $\alpha$  se puede deducir la fracción de área foliar proyectada. Sin embargo, las soluciones más simples a este problema evitan la estimación de  $\alpha$ . Una de ellas es utilizar  $G = 0,5$  para  $\theta = 57,5^\circ$ . Se ha demostrado que, independientemente de cual sea  $\alpha$ ,  $G$  tiene aproximadamente ese valor para esa inclinación (Warren-Wilson, 1963a). Otra posibilidad es utilizar el teorema de Miller (1967):

$$IAF = 2 \int_0^{\pi/2} k(\theta) \sin \theta d\theta$$

Conceptualmente, el teorema establece que  $G$  es igual a 0,5 si se integra  $k$  para todo el rango de inclinaciones  $\theta$ . El número dos es el valor de  $G$  luego de despejar el IAF. Desde el punto de vista computacional, esta ecuación se resuelve aritméticamente utilizando la Ecuación 4.

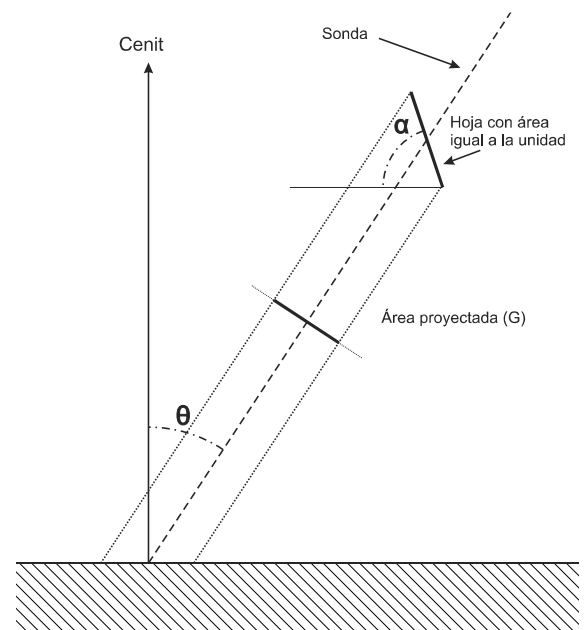
La dispersión de las hojas en el plano horizontal puede ser aleatoria, regular o agrupada (Nilson, 1971). Suponer una dispersión aleatoria es equivalente a asumir una distribución de probabilidad de Poisson. En este tipo de distribución la media es igual a la varianza. Por lo tanto, si el cociente entre la varianza del número de contactos y  $k$  es igual a la unidad, la dispersión del follaje es aleatoria. En caso de ser mayor, la dispersión es agrupada; en caso de ser menor, la dispersión es regular (Nilson, 1971).

**Tabla 1.** Ecuaciones.

Ecuación 1	$FC(\varphi, \theta) = P_B / (P_N + P_B)$
Ecuación 2	$v(\theta) = F \times G(\theta, \alpha)$
Ecuación 3	$k(\theta) = \frac{IAF \times G(\theta, \alpha)}{\cos \theta}$
Ecuación 4	$IAF = 2 \frac{\sum_{i=1}^n k(\theta) \sin \theta_i \Delta \theta_i}{\sum_{i=1}^n \sin \theta_i \Delta \theta_i}$
Ecuación 5	$P_0 = e^{-k} = e^{-IAF \times G(\theta, \alpha) / \cos(\theta)}$
Ecuación 6	$IAF = -\ln[P_0(\theta)] \times \cos \theta / G(\theta, \alpha)$
Ecuación 7	$IAF_{efectivo} = LAI \times \Omega$

Sin embargo, los métodos ópticos, entre ellos la fotografía hemisférica, no miden directamente  $k$  sino la fracción de claros. Para salvar esta dificultad, una de las alternativas más utilizadas es asumir una distribución de probabilidad de Poisson para el número de contactos.

**Figura 2.** Geometría de la sonda, las hojas y su proyección. Ángulo cenital ( $\theta$ ), ángulo foliar ( $\alpha$ ).



Esto es equivalente a asumir un dosel compuesto de una capa horizontalmente homogénea en la cual la densidad del follaje varía solamente en el eje vertical (modelo del dosel de una dimensión) (Nilson, 1971; Walter, 2011). En este tipo de modelo, la desviación de la distribución aleatoria en el plano horizontal puede ser expresada mediante un factor de corrección.

Asumiendo una distribución de probabilidad de Poisson se puede calcular la probabilidad de ningún contacto ( $P_0$ ), i. e. un claro del dosel, utilizando la Ecuación 5 (Nilson, 1971; Leblanc et al., 2005).

Por lo tanto, si consideramos que el dosel es horizontalmente homogéneo, la fracción de claros de un anillo puede considerarse como la medición de  $P_0(\theta)$ , siendo  $\theta$  el ángulo cenital medio del anillo. De esta manera, operando sobre la Ecuación 5 puede obtenerse la Ecuación 6.

La Ecuación 6 podrá resolverse utilizando  $G = 0,5$  y extrayendo la fracción de claros para un anillo entre aproximadamente  $55$  y  $60^\circ$  de  $\theta$ , o extrayendo la fracción de claros entre  $0$  y  $90^\circ$  de  $\theta$ , con una resolución angular entre  $1$  y  $15^\circ$ , para poder emplear el teorema de Miller (1967).

La solución aritmética del teorema de Miller (1967) (Ecuación 4) permite utilizar rangos entre, por ejemplo,  $10$  y  $80^\circ$  de  $\theta$ . Esto permite evitar los ángulos cercanos al cenit y al horizonte, donde el error en la medición de la fracción de claros es mayor (Gonsamo, 2009).

Los doseles forestales reales difícilmente se ajustan al modelo de Poisson. Los órganos aéreos de los árboles no son solamente hojas, y pocas veces se distribuyen homogéneamente en el plano horizontal; en las ecuaciones se debiera reemplazar "IAF" por "IAF efectivo". Conceptualmente, este último es el IAF que tendría un modelo del dosel de una dimensión con la misma fracción de claros que el dosel real. Para corregir el IAF efectivo del efecto de agrupamiento se utiliza un índice de agrupamiento ( $\Omega$ ) (Ecuación 7) (Leblanc et al., 2005; Gonsamo y Pellikka, 2009).

Sin embargo, es necesario advertir que aún no se corrige el efecto de los órganos aéreos que no son hojas, por lo tanto, sería más adecuado utilizar el término "índice de área de planta" (Weiss et al., 2004).

Para calcular el  $\Omega$  con fotografías hemisféricas existen diferentes aproximaciones que no abordaremos en éste artículo, se recomienda la lectura de Gonsamo y Pellikka (2009).

## Bibliografía

- Caldwell, M.M., Harris, G.W., Dzurec, R.S., 1983. A fiber optic point quadrat system for improved accuracy in vegetation sampling. *Oecologia* 59, 417–418.
- Chen, J.M., Black, T.A., 1992. Defining leaf area index for non-flat leaves. *Plant, Cell and Environment* 15, 421–429.
- Chen, J.M., Rich, P.M., Gower, S.T., Norman, J.M., Plummer, S., 1997. Leaf area index of boreal forests: theory, techniques, and measurements. *Journal of Geophysical Research* 102, 29429–29443.
- Díaz, G.M., Lencinas, J.D., del Valle, H., (2013). Introducción a la fotografía hemisférica en ciencias forestales. Madera y bosques. En prensa.
- Gonsamo, A., 2009. Remote sensing of leaf area index: enhanced retrieval from close-range and remotely sensed optical observations.
- Gonsamo, A., Pellikka, P., 2009. The computation of foliage clumping index using hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology* 149, 1781–1787.
- Gonsamo, A., Walter, J.-M.N., Pellikka, P., 2011. CIMES: A package of programs for determining canopy geometry and solar radiation regimes through hemispherical photographs. *Computers and Electronics in Agriculture* 79, 207–215.
- Leblanc, S.G., Chen, J.M., Fernandes, R.A., Deering, D., Conley, A., 2005. Methodology comparison for canopy structure parameters extraction from digital hemispherical photography in boreal forests. *Agricultural and Forest Meteorology* 129, 187–207.
- Martínez, B., García-haro, F.C.C.F.J., 2006. Estimación de parámetros biofísicos de vegetación utilizando el método de la cámara hemisférica. *Revista de teledetección* 26, 5–17.
- Miller, J.B., 1967. A formula for average foliage density. *Australian Journal of Botany* 15, 141–144.
- Nilson, T., 1971. A theoretical analysis of the frequency of gaps in plant stands. *Agricultural Meteorology* 8, 25–38.
- Promís, A., Cruz, G., 2009. Fotografías Hemisféricas: un método para estimar estructuras del dosel arbóreo e iluminación en el interior del bosque. *Revista bosque nativo* 44, 12–15.
- Rich, P.M., 1990. Characterizing Plant Canopies with Hemispherical Photographs. *Remote Sensing Reviews* 5, 13–27.
- Ross, J., 1981. The radiation regime and architecture of plant stands. Springer Netherlands, Dordrecht.
- Walter, J.-M.N., 2011. CIMES-FISHEYE. Hemispherical Photography of Forest Canopies. A package of Programs for the Assessment of Canopy Geometry and Solar Radiation Regimes through Hemispherical Photographs. Manual.
- Walter, J.-M.N., Torquebiau, E.F., 2000. The computation of forest leaf area index on slope using fish-eye sensors. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series III-Sciences de la Vie* 323, 801–813.
- Warren-Wilson, J., 1963a. Estimation of foliage denseness and foliage angle by inclined point quadrats. *Australian journal of botany* 3, 95–105.
- Warren-Wilson, J., 1963b. Errors resulting from thickness of point quadrats. *Australian Journal of Botany* 11, 178.
- Weiss, M., Baret, F., Smith, G.J., 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, 37–53.
- Welles, J.M., 1990. Some indirect methods of estimating canopy structure. *Remote Sensing Reviews* 5, 31–43.
- Welles, J.M., Cohen, S., 1996. Canopy structure measurement by gap fraction analysis using commercial instrumentation. *Journal of experimental botany* 47, 1335–1342.