

ESTIMACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN FOLIAR USANDO PARAMETRIZACIÓN DIRECTA ALBEDO/ABSORTANCIA DE HOJAS

Estimation of Foliar Concentration of Vegetation Canopy Using Direct Albedo/Absortance Parametrizations of Leaves

Fernando Paz Pellat^{1‡} y Marco Aurelio Roitberg²

RESUMEN

El establecimiento de relaciones directas entre la información accesible por sensores remotos y las propiedades ópticas y bioquímicas de las hojas requiere primero de convertir medios heterogéneos, a escala de parcela, rodal o píxel, a homogéneos (radiativamente turbios). En este trabajo se plantea un esquema de conversión operacional para estimar las reflectancias en el infinito (medios ópticamente densos) y de éstas los albedos foliares. Con los albedos foliares estimados es posible utilizar modelos radiativos de transferencia en hojas para estimar las concentraciones bioquímicas de sus constituyentes. Esto establece bases sólidas para el desarrollo de índices espectrales bioquímicos. Adicionalmente, los medios homogéneos convertidos tienen la propiedad de frontera de suelo negro, permitiendo su relación con la teoría de invariantes espectrales o teoría-p.

Palabras clave: *reflectancias en el infinito, PROSPECT, escalamiento follaje-hoja-componentes bioquímicos, teoría-p.*

SUMMARY

Developing direct relationships between information available from remote sensing and leaf optical and biochemical properties requires first converting heterogeneous media, at the plot, stand or pixel scale, into homogenous ones (radiatively turbid). This paper proposes a schema for operational conversion to estimate infinite reflectances (optically dense media) and, from

these, estimate foliar albedos. With the estimation of foliar albedos, it is possible to use radiative transfer models in leaves in order to estimate the biochemical concentrations of their components. This approach gives solid bases for developing biochemical spectral vegetation indexes. In addition, converted homogenous media have properties of a black soil limit, thus relating this condition with the spectral invariants theory or p-theory.

Index words: *infinite reflectances, PROSPECT, scaling foliage-leaf-biochemical components, p-theory.*

INTRODUCCIÓN

La tecnología de los sensores remotos, en plataformas espaciales o a nivel terrestre, muestra un alto potencial para determinar el estado nutrimental de la vegetación. Esto implica un escalamiento de las reflectancias, obtenidas en los sensores remotos, desde el nivel de parcela, rodal o píxel al de constituyentes bioquímicos en células de las hojas. La tarea no es fácil y no puede ser determinada en forma directa.

Al considerar que los procesos ecológicos que intervienen en la transferencia de energía y masa entre el sistema suelo-vegetación-atmósfera (fotosíntesis, evapotranspiración, respiración, producción primaria y descomposición), están relacionados con el estado nutrimental y factores de crecimiento de la vegetación (Peterson y Hubbard, 1992), las concentraciones de clorofilas, agua, proteína, celulosa y lignina; principalmente, definen estos acoplamientos. La estimación de las concentraciones bioquímicas de las hojas es fundamental para obtener parámetros que permitan caracterizar y modelar los procesos ecológicos. Por ejemplo, la descomposición del mantillo orgánico sobre el suelo está gobernada por los contenidos foliares de lignina y nitrógeno (Melillo *et al.*, 1982). La disponibilidad de nitrógeno en la vegetación condiciona fuertemente la producción primaria neta (Vitousek, 1982)

¹ Grupo de Gestión de Riesgos y Recursos Naturales Asistida por Sensores Remotos. Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Montecillo, Estado de México.

[‡] Autor responsable (pellat@colpos.mx)

² Facultad de Ciencias Agropecuarias. Av. Valparaíso y Av. Rogelio Martínez s/n, Ciudad Universitaria. Córdoba, Argentina.

y la evapotranspiración por el acoplamiento fotosíntesis y transpiración (Dickinson *et al.*, 2002). La relación carbono-nitrógeno (C/N) es un parámetro básico en la dinámica de los procesos ecológicos. El nitrógeno tiene una relación lineal estable con la proteína en las hojas; lo mismo sucede con el carbono para la lignina y la celulosa (Jacquemoud *et al.*, 1996), por lo que se pueden usar en términos intercambiables.

La estimación de las concentraciones bioquímicas usando reflectancias R o absortancias A [aproximadas por $\log(R^{-1})$] ha sido evaluada en términos estadísticos (Curran, 1989; Curran *et al.*, 1992; Jacquemoud *et al.*, 1995b; Fourty y Baret, 1998), usando generalmente técnicas de regresión lineal por pasos para seleccionar bandas espectrales óptimas que se correlacionen fuertemente con las concentraciones bioquímicas. Aunque los resultados obtenidos por las técnicas estadísticas han sido buenos (clorofilas, agua, proteína, celulosa y lignina) (Curran, 1989), las bandas espectrales definidas no coinciden con los picos de absorción de los constituyentes bioquímicos y no son estables al usarse en un conjunto amplio de espectros de hojas (Grossman *et al.*, 1996). Ante esto, se ha planteado el uso de modelos radiativos para estimar las concentraciones bioquímicas (Jacquemoud *et al.*, 1995b; Grossman *et al.*, 1996).

La modelación de la transferencia radiativa se ha desarrollado para hojas anchas (Jacquemoud *et al.*, 1990, 1995c y 1996) y aciculares (Dawson *et al.*, 1998). La discusión en lo siguiente está focalizada en hojas anchas, aunque los desarrollos son válidos para hojas aciculares (que incluyen un factor de escala de agrupamiento de las acículas en los racimos; Smolander y Stenberg, 2005).

La estimación de las concentraciones bioquímicas foliares ha sido aproximada al utilizar índices espectrales (le Maire *et al.*, 2004), con resultados poco satisfactorios para ser usados en un conjunto más amplio de datos bioquímicos-espectrales que los de calibración. Los modelos radiativos foliares se han invertido con más o menos éxito (Fourty *et al.*, 1996), como consecuencia del esquema de calibración usado en estos modelos. En el caso del follaje de la vegetación, se han utilizado con poco éxito modelos radiativos de medios turbios (homogéneos) acoplados a modelos de las hojas para invertirlos (Jacquemoud *et al.*, 1995a, 2000); ya que las estimaciones son dependientes del acoplamiento bioquímico-estructural del follaje. También, se han realizado algunos esfuerzos usando índices espectrales de la vegetación (Broge y Leblanc, 2000) con resultados

similares. En el caso de medios radiativos heterogéneos (tri-dimensionales) (Gastellu-Etchegorry y Bruniquel-Pinel, 2001), los problemas del acoplamiento bioquímico-estructural han estado presentes, limitando las estimaciones.

En la actualidad, usando el marco teórico de los invariantes espectrales (Huang *et al.*, 2007), Lewis y Disney (2007) y Knyazikhin *et al.* (2013) demostraron en términos más o menos generales que, dado el acoplamiento de las propiedades estructurales del follaje (índice de área foliar o IAF y cobertura o f_v) con la bioquímica foliar, no es posible realizar estimaciones robustas de ambas propiedades, sin importar lo angosto de las bandas espectrales usadas o el número de ellas. Cualquier estimación que se realice de ambas propiedades contendrá un error muy grande, además de ser espuria (Knyazikhin *et al.* 2013), y representa un problema matemáticamente indeterminado (muchas soluciones al mismo problema). Así, la perspectiva de estimar las propiedades bioquímicas de las hojas usando datos espectrales del follaje de la vegetación parece tener una limitación fundamental e intrínseca.

En este trabajo se presenta un esquema de modelación que permite evitar la restricción establecida por Lewis y Disney (2007) y Knyazikhin *et al.* (2013), de tal forma que para estimar las concentraciones bioquímicas se pueden invertir de forma directa los modelos radiativos foliares. Considerando la accesibilidad de la información espectral usando sensores remotos, se establece un enfoque de modelación radiativa foliar acoplado a los sensores remotos, que permite evitar problemas de calibraciones independientes de las componentes radiativas del albedo foliar. Al final se muestra la relación de los desarrollos con la teoría de invariantes espectrales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Conversión de Medios Radiativos Heterogéneos a Homogéneos

El caso de la evolución temporal del cubrimiento aéreo de un cultivo sembrado en surcos se muestra en la Figura 1, para ejemplificar la situación de como diferentes aproximaciones teóricas de modelación (desde un esquema unidimensional a uno tridimensional de transferencia radiativa) son requeridas. Al principio de la etapa de crecimiento se observa un suelo desnudo (caso 1-D) y después un patrón de plantas individuales,

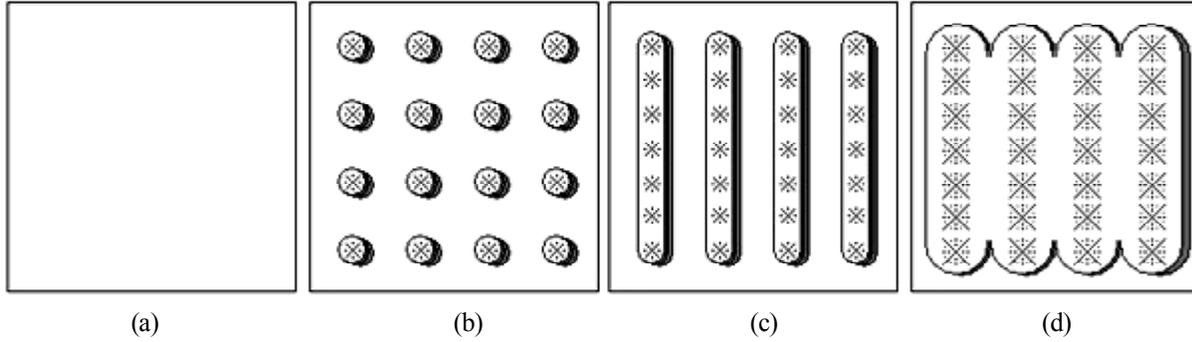


Figura 1. Geometría asociada a un cultivo sembrado en surcos. (a) suelo desnudo; (b) plantas individuales sin traslape; (c) plantas traslapadas en surcos; (d) vegetación densa traslapada.

donde las plantas no se tocan entre sí (caso 3-D). Al avanzar el crecimiento, las plantas en un mismo surco se tocan entre sí y forman un cultivo en hileras o surcos (caso 2-D). Cuando las plantas de diferentes surcos se tocan, tenemos la situación de cobertura total del suelo (caso 1-D). Esta dinámica de crecimiento requiere de un esquema de modelación que haga equivalentes, en términos radiativos, a las diferentes geometrías observadas en la Figura 1, donde muestran medios homogéneos que pueden ser aproximados por medios radiativos turbios (Figura 1a y 1d).

Para focalizar las discusiones, en lo siguiente se usará R para denotar la reflectancia en la banda del rojo e IRC para la banda del infrarrojo cercano.

El espacio R - IRC asociado con la dinámica del crecimiento de la vegetación (medio turbio) representada por el índice de área foliar se muestra en la Figura 2a, donde se usaron cuatro suelos con propiedades ópticas

(reflectancias) diferentes (Paz *et al.*, 2005). En esta figura las líneas iso-IAF ($IRC = a_0 + b_0R$) representan la misma cantidad de vegetación, pero con suelos ópticamente diferentes; donde el caso de $IAF = 0$ representa la línea del suelo desnudo ($IRC = a_s + b_sR$). Si el suelo (reflectancia) permanece constante, entonces el crecimiento de la vegetación sigue una curva iso-suelo. El atrayente de la dinámica del crecimiento de la vegetación para la banda del R es el punto de convergencia de todas las curvas iso-suelo. En este punto la banda del R se satura (no cambia de valor al incrementarse el IAF) y representa a un medio ópticamente denso o infinito (Ross, 1981), por lo que se le denomina como R_∞ . El valor del IRC asociado al R de saturación es IRC_{R_∞} . La banda del IRC sigue creciendo hasta alcanzar su propio punto de saturación definido por IRC_∞ . Las reflectancias en el infinito están en función de las propiedades ópticas de las hojas y su

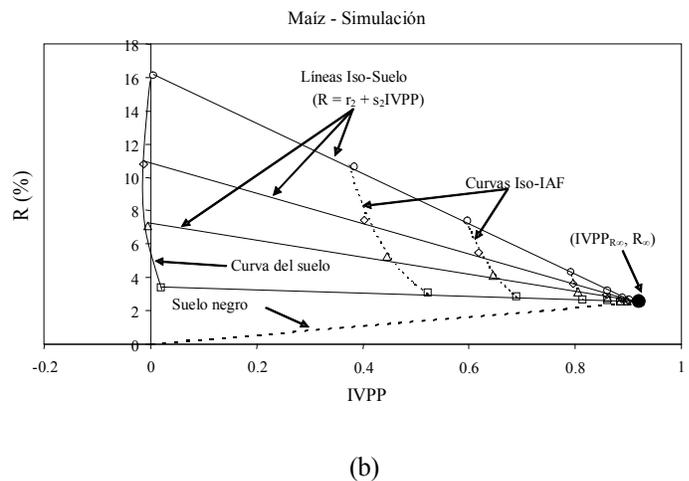
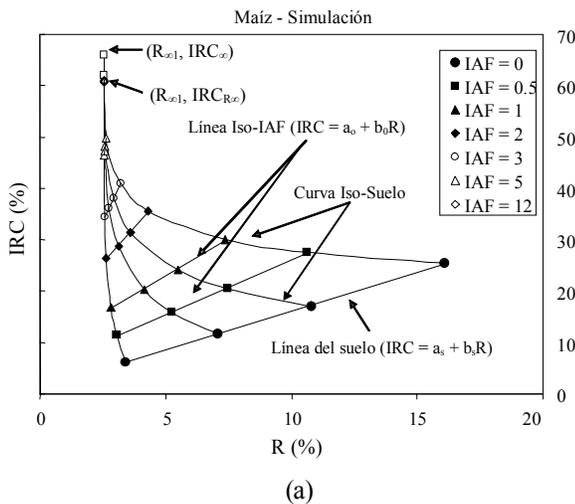


Figura 2. Dinámica espectral del crecimiento de la vegetación, (a) Espacio R - IRC y (b) espacio $IVPP$ - R .

distribución angular, y geometría sol-sensor, principalmente (Ross, 1981; Zarco *et al.*, 2008; Paz *et al.*, 2009a y 2013). Las concentraciones de los constituyentes bioquímicos foliares están en función de las propiedades ópticas de las hojas (reflectancia y transmitancia) (Jacquemoud *et al.*, 1996), por lo que determinadas éstas es posible realizar estimaciones desacopladas de los parámetros estructurales del follaje, puesto que la reflectancia en el infinito es invariante por efecto del *IAF* o *fv* (los valores superiores de estos parámetros no cambian las reflectancias en el infinito).

Una forma de evitar los patrones no lineales de las curvas iso-suelos de la Figura 2a es usar el espacio espectral IVPP-R (Paz *et al.*, 2009a y 2013), donde $IVPP = dIRC/IRC$ ($IVPP =$ índice de vegetación de proporciones pareadas; Paz *et al.*, 2009a y b), Figura 2b, con $dIRC = IRC - (a_s + b_s R)$ (Paz *et al.*, 2005 y 2006).

En el espacio IVPP-R, las líneas iso-*IAF* son curvas no lineales (Figura 2b) contrastando con la linealidad de las curvas iso-suelo ($R = r_2 + s_2 IVPP$). Por definición de utilizar a *R* sin transformación, el uso de cualquier valor de los parámetros a_s y b_s de la línea del suelo no cambia la estimación de R_∞ y solo los valores de $IVPP_{R_\infty}$ (Figura 3), ya que la intersección del conjunto de líneas iso-suelo en la figura permanece invariante en términos de la banda del *R*.

Usando el espacio IVPP- *R* podemos estimar R_∞ para poder usarlo en la estimación del albedo de las hojas. El caso de la estimación de IRC_∞ requiere de un esquema de estimación diferente y se discute en otros trabajos (Casiano *et al.*, 2012 y Paz *et al.*, 2013). El método de estimación del R_∞ es válido para las bandas del verde o *V* y azul o *A* del espectro visible, así como para los infrarrojos medios (Paz *et al.*, 2009b y 2013). El procedimiento es general, ya sea que la curva del

suelo sea lineal o no lineal e independiente de sus parámetros (Paz *et al.*, 2009b).

Estimación del Albedo Foliar en Medios Homogéneos

Los atrayentes (puntos de convergencia de las líneas o curvas iso-suelo) de la dinámica del crecimiento de los cultivos asociada a los espacios espectrales analizados en la sección anterior, (R_∞, IRC_{R_∞}) y (R_∞, IRC_∞), permiten estimar las propiedades ópticas y geométricas del follaje (medio equivalente con parámetros efectivos) al convertir un medio heterogéneo (reflectancias no en el infinito) a uno homogéneo (caracterizado por reflectancias en el infinito) (Paz *et al.*, 2009a y 2013)

La reflectancia en el infinito para hojas no horizontales, puede aproximarse razonablemente (Goudriaan y van Laar, 1994) usando la relación:

$$R_\infty = qR_{\infty, h}$$

$$q = \frac{2K_{dir}}{K_{dir} + K_{dif}} \quad (1)$$

donde: *K* es un coeficiente de extinción, *dir* se refiere a radianza directa, *dif* a radianza difusa y *h* a hojas con distribución angular horizontal. *R* se refiere a cualquier banda espectral.

Para evaluar el coeficiente de extinción *Kdir* es necesario conocer la distribución de probabilidad angular de las hojas (Ross, 1981):

$$K_{dir} = \frac{G(\theta_s)}{\cos(\theta_s)} \quad (2)$$

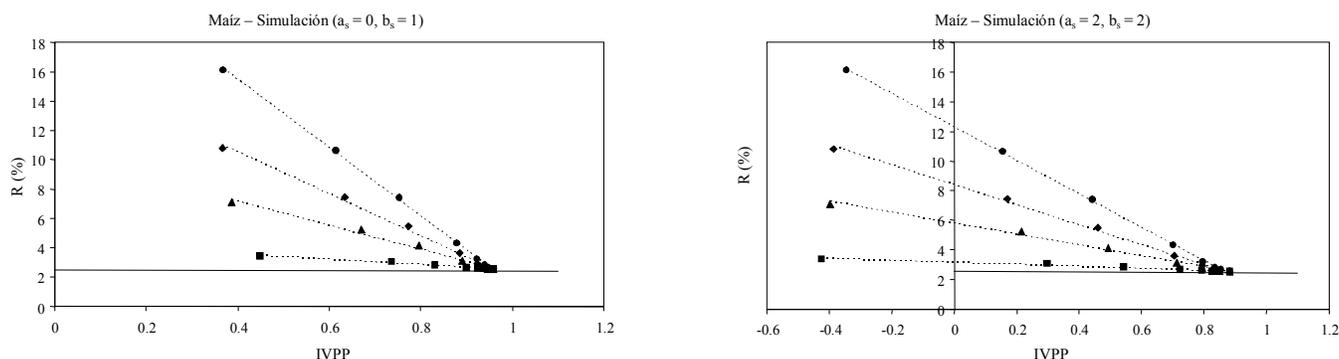


Figura 3. Efecto de a_s y b_s en la estimación R_∞ e $IVPP_{R_\infty}$.

donde: θ_s es el ángulo cenital de iluminación y $G(\theta_s)$ es la proyección del área foliar de las hojas en la dirección θ_s (Ross, 1981).

Usando el modelo de radiación difusa de “cielo nublado estándar” (Moon y Spencer, 1942), Sinoquet *et al.* (2000) usaron datos obtenidos por Bonhomme y Varlet-Grancher (1977) para generar la relación:

$$K_{dif} = 0.988 \cos\left(\frac{\bar{\theta}_l}{2}\right)^{2.4} \quad (3)$$

donde: $\bar{\theta}_l$ es el ángulo promedio de las hojas.

Goudriaan (1977) y Ross (1981) propusieron una serie de simplificaciones para estimar la reflectancia en el infinito para hojas horizontales. Así, para hojas horizontales, con $\rho = \tau$, donde ρ es la reflectancia foliar y τ la transmitancia, que es una buena aproximación (Gausman *et al.*, 1973 y Ross, 1981) y bi-Lambertianas (isotrópicas), la reflectancia en el infinito está dada por:

$$R_{\infty, h} = \frac{1 - [1 - \omega]^{1/2}}{1 + [1 - \omega]^{1/2}} \quad (4)$$

donde: $\omega (= \rho + \tau)$ es el albedo foliar simple.

De esta forma, conocidos los coeficientes de extinción, podemos invertir las relaciones 1 y 4 para obtener el albedo foliar, conocida la reflectancia en el infinito, como:

$$\omega = 1 - \left[\frac{q - R_{\infty}}{q + R_{\infty}} \right]^2 \quad (5)$$

La relación 5, requiere de conocer la distribución angular de las hojas, y podemos estimarla en forma indirecta usando propiedades de invarianza asociadas a la geometría sol-sensor (Paz *et al.*, 2009a). Todas las distribuciones de probabilidad angulares de las hojas tienen un valor aproximado de $G(\theta_s) \approx 0.5$ cuando $\theta_s \approx 57^\circ$ (ángulo de visión a nadir) (Ross, 1981). Así, bajo esta condición, aproximada por una distribución angular esférica, se obtiene el valor $q = 1.046$. Paz *et al.* (2009a) introducen un modelo de geometría sol-sensor que permite hacer las transformaciones de las reflectancias a la geometría especificada:

$$R_{\cos\{90 - (57 - \theta_{sx})\}} = \frac{R_{\cos\{90 - (\theta_s - \theta_{sx})\}} [57 - \theta_{sx}]}{[\theta_s - \theta_{sx}]} \quad (6)$$

donde: R puede ser la banda del R o del IRC y θ_{sx} es el ángulo cenital mínimo en el día de medición.

En el caso de mediciones multi-temporales de las reflectancias, las proporciones de radiación directa y difusa en la iluminación solar durante el crecimiento de la vegetación pueden variar substancialmente. En este caso, los atrayentes (reflectancias en el infinito) de la dinámica espectral permanecen invariantes (son iguales para el caso de solo radiación directa, solo radiación difusa o para radiación total – cualquier proporción de directa a difusa) bajo variaciones en las componentes de la radiación solar (Ross, 1981).

Modelo PROSPECT de Transferencia Radiativa

El modelo radiativo PROSPECT (Jacquemoud *et al.*, 1990, 1995c y 1996), ha sido utilizado en numerosas publicaciones. Dicho modelo utiliza la relación entre la hoja y sus constituyentes foliares i :

$$k = \sum_{i=1}^m \frac{c_i k_i}{N} \quad (7)$$

donde: k es el coeficiente de absorción (o absorptancia α) de la hoja, c_i y k_i son las concentraciones (masa por unidad de área foliar) y los coeficientes de absorción específicos de los constituyentes bioquímicos $i = 1, 2, \dots, m$. N es un parámetro que depende de la estructura del mesófilo foliar (número de capas). En la relación 7 solo se ha considerado el espectro electromagnético de 500 a 2500 nm (región del verde al infrarrojo medio lejano). Para la región del azul (400-500 nm) debe agregarse un coeficiente de extinción correspondiente a una hoja albina (Jacquemoud *et al.*, 1990).

En la versión inicial de PROSPECT (Jacquemoud *et al.*, 1990) sólo se consideraron los coeficientes específicos del agua (k_w) y de la clorofila $a+b$ (k_{ab}). En versiones posteriores (Jacquemoud *et al.*, 1996), al considerar los problemas asociados a la estimación de la proteína y celulosa+lignina (los picos de absorción están enmascarados por los del agua; Fourty *et al.*, 1996), se incluyó a k_m (materia seca). La materia seca incluye

a todos los componentes bioquímicos, con excepción de los lípidos y las cenizas. La Figura 4 muestra los coeficiente de absorción específicos de esta última versión (hay varias además de ésta) mencionada en el modelo PROSPECT.

Se observa, en la Figura 4, que k_{ab} tiene valores nulos más allá de 750 nm y que desde 800 nm en adelante solo hay contribuciones de k_m (valor constante) y k_w . Adicionalmente, en la misma Figura se observa la dependencia espectral del índice de refracción n (interfase aire-células), el cual es requerido por el modelo PROSPECT al ser un modelo de placas de transferencia radiativa.

Se muestran en la Figura 5 los coeficientes de extinción específicos de la proteína (k_p) y de la celulosa+lignina (k_{cl}) de la versión del modelo PROSPECT discutida en Jacquemoud *et al.* (1995c).

La relación entre k_{cl} y k_p con k_m se muestra en la Figura 6, donde se observa una alta correlación en diferentes regiones espectrales.

Como se mencionó anteriormente, es importante estimar la relación C/N para caracterizar los procesos ecológicos de intercambio de masa y energía, además de los factores asociados al crecimiento de las plantas. La concentración c_m (peso foliar específico o PFE) nos permite convertir las estimación del *IAF* a valores de biomasa foliar aérea seca, el cual es un parámetro

requerido en modelos de crecimiento de la vegetación (Goudriaan y van Laar, 1994). c_m y $c_{carbono}$ están altamente correlacionados ($c_{carbono} = 0.5065 \times c_m$, $R^2 = 0.995$; Fourty y Baret, 1998), lo mismo para c_p y $c_{nitrogeno}$ ($c_{nitrogeno} = 0.1584c_p$, $R^2 = 0.963$; Fourty y Baret, 1998). Una alta correlación también se presenta para c_{cl} y $c_{carbono}$ (Jacquemoud *et al.*, 1995c y 1996). La existencia de altas correlaciones discutidas implica que los modelos radiativos no pueden discriminar adecuadamente componentes bioquímicos particulares, pero las relaciones establecidas empíricamente pueden ser usadas para estimar estos componentes. En el caso de la estimación de las concentraciones de proteínas, dado el enmascaramiento de los picos de absorción por el agua, es posible establecer relaciones entre el contenido de las clorofilas y el nitrógeno foliar y, por lo tanto, con la fotosíntesis (Field y Mooney, 1986; Evans, 1989; Ercolli *et al.*, 1993). Las proteínas fotosintéticas representan una gran proporción del N foliar total (Field y Mooney, 1986; Evans, 1989). Lawlor (2002) revisa las bases fisiológicas de esta relación. Cerca del 75 % del nitrógeno foliar está involucrado en los procesos fotosintéticos (Evans, 1989), donde la partición del nitrógeno dentro del follaje se ha descrito en forma extensiva (Grindlay, 1977). El acoplamiento IAF-N foliar puede modelarse en forma razonable (Yin *et al.*, 2003), permitiendo reproducir patrones temporales del N foliar

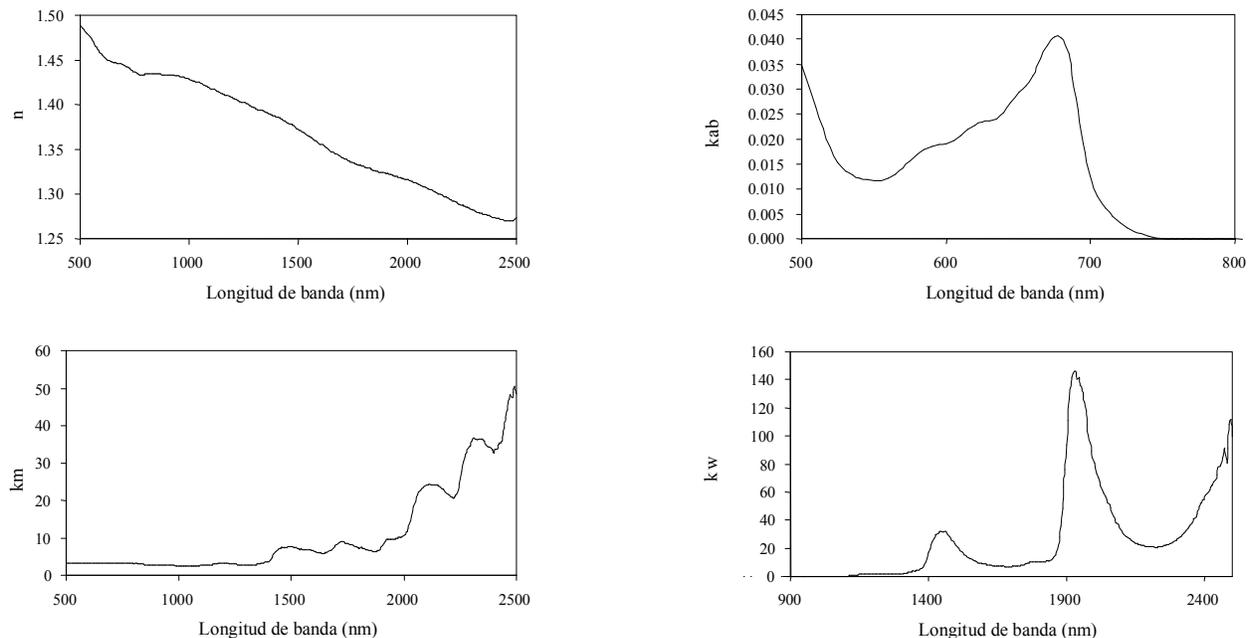


Figura 4. Funciones espectrales de las componentes del modelo PROSPECT Versión 3.01 (Fuente: <http://teledetection.ipgp.jussieu.fr/opticleaf/models.htm>, verificada el 20 de octubre de 2008)

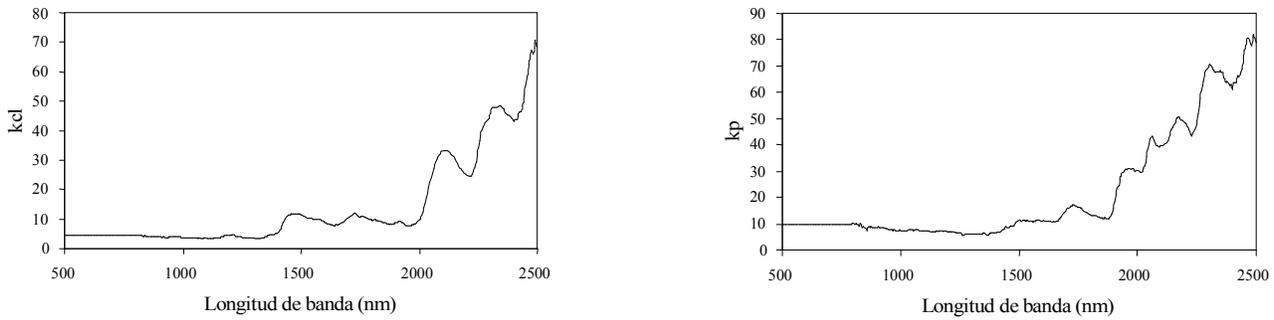


Figura 5. Funciones espectrales de k_{cl} y k_p del modelo PROSPECT Versión 2.01 (Fuente: <http://teledetection.ipgp.jussieu.fr/opticleaf/models.htm>, verificada el 20 de octubre de 2008).

congruentes con las bases fisiológicas, como los descritos por Gitelson *et al.* (2005).

Le Maire *et al.* (2004) han criticado la calibración indirecta del modelo PROSPECT, donde primero se calibra el parámetro N usando dos o tres bandas espectrales en el IRC y después se determinan los coeficientes de absorción específica (no se miden en forma directa; con excepción de k_{wv} , sino que se estiman por ajustes estadísticos). El índice de refracción también es estimado en forma independiente. Feret *et al.* (2008) recalibraron los coeficientes de absorción específicos usando mejoras en la determinación del índice de refracción y en el comportamiento de la superficie de las hojas, además de la utilización de métodos estadísticos conjuntos de ajustes (estimaciones simultáneas de parámetros). Un nuevo coeficiente de absorción específico propuesto es el k_c de los carotenoides totales; aunque éstos presentan una alta correlación lineal con las clorofilas a+b (Gitelson *et al.*, 2003; Feret *et al.*, 2008). Esta mejoría del modelo PROSPECT no será considerada en este trabajo.

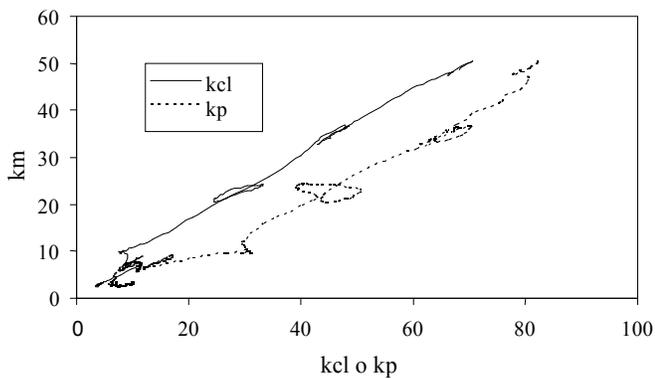


Figura 6. Relaciones entre k_{cl} y k_p con k_m .

Parametrización Directa del Modelo PROSPECT y Esquema Generalizado de Estimaciones Bioquímicas

Recientemente, Lewis y Disney (2007) desarrollaron una aproximación directa al modelo PROSPECT ($R^2 > 0.9997$ con relación al original de Jacquemoud *et al.*, 1996) que simplifica fuertemente la inversión del modelo. En esta aproximación el parámetro N se dejó fijo ($N = 1$), ya que el PROSPECT fue parametrizado en función del albedo foliar y no de sus componentes de reflectancia y transmitancia foliares, tal como es el caso del modelo original. El parámetro N afecta solo la razón ρ/τ , que en la región del IRC implica un coeficiente de dispersión s más o menos constante.

La aproximación del modelo PROSPECT en función del albedo foliar ω puede ser puesta como (Lewis y Disney, 2007):

$$\sum_{i=1}^m c_i k_i = -\frac{1}{a} \ln \left[\frac{\omega_\infty - \omega_i}{p_h (1 - \omega_i) - (1 - \omega_\infty)} \right] \quad (8)$$

$$a = 1.3168 - 0.02294n + 0.01299n^2$$

$$\omega_\infty = -0.0492 - 0.00618n + 0.04836n^2$$

$$p_h = -1.2523 + 2.2307n - 0.6094n^2$$

donde: ω_∞ es el albedo foliar en el infinito asociado con la dispersión de la superficie de la hoja (no interactúa con los constituyentes bioquímicos foliares internos) y p_h es la probabilidad de recollisión dentro de la hoja.

La relación 8, muestra que el modelo PROSPECT puede ser puesto en función sólo del índice de refracción n , el cual es función de las bandas espectrales (Figura 4).

Aun usando un valor de n fijo, $n = 1.39$, la aproximación resulta excelente ($R^2 > 0.995$ con relación al original).

La formulación aproximada del modelo PROSPECT tiene implícitos los esquemas empíricos de calibración usados y refleja una estrategia desagregada (ρ y τ) de modelación, la cual fue replanteada por Lewis y Disney (2007) como agregada (ω). Desde el punto de vista de la utilización de las reflectancias en el infinito, relación 5, las relaciones 8 establecen el escalamiento del follaje con las hojas y de allí a sus componentes bioquímicos. Esto puede formularse de manera directa, para el desarrollo de un modelo de transferencia radiativa en hojas acoplado a la información espectral accesible por sensores remotos (R^∞ y ω) sin necesidad de recurrir a hipótesis de medios turbios o de condiciones de suelo negro (el suelo absorbe todos los fotones que chocan con él), tal como se discute en la sección siguiente.

Una forma directa de eliminar el parámetro N de la relación 7 es usar la función de remisión de medios turbios, $f(R^\infty) = k/s$ y así desarrollar un esquema de modelación directo:

$$\frac{k}{s} = \sum_{i=1}^m c_i \left(\frac{k_i}{s_i} \right) \quad (9)$$

donde: s_i es un coeficiente de dispersión específico (dos direcciones).

La relación entre el albedo foliar ω , y la absortancia foliar $\alpha = 1 - \omega$ con k/s está dada por:

$$\omega = 1 - \alpha = \frac{s}{s+k} = \frac{1}{1 + \frac{k}{s}} \quad (10)$$

$$\frac{k}{s} = \frac{1 - \omega}{\omega} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

Así, la relación 9 puede ser puesta como:

$$\frac{1 - \omega}{\omega} = \sum_{i=1}^m c_i \left(\frac{1 - \omega_i}{\omega_i} \right) \quad (11)$$

$$\frac{\alpha}{1 - \alpha} = \sum_{i=1}^m c_i \left(\frac{\alpha_i}{1 - \alpha_i} \right) \quad (12)$$

que pueden calibrarse de forma directa con la información espectral asociada a las hojas, reduciendo las incertidumbres de los esquemas actuales de calibración usados en el PROSPECT. De las reflectancias en el infinito, relación 5 y 10, podemos establecer:

$$\frac{k}{s} = \frac{q^2 + (R^\infty)^2}{2qR^\infty(q + R^\infty)^2} \quad (13)$$

que se puede usar en la formulación propuesta en las relaciones 11 y 12.

Un planteamiento similar al uso de una relación 13 la hicieron Schmuck *et al.* (1993), en la 9, pero utilizaron la hipótesis limitada de $(k/s) \approx \alpha$, además de que solo plantearon el modelo para el caso de una distribución angular uniforme (medio turbio). En forma similar, Gitelson *et al.* (2005), usaron un enfoque tipo empírico (índices espectrales) bajo la misma hipótesis que Schmuck *et al.* (1993). De las relaciones 10, resulta claro que la aproximación entre k/s y α utilizada por estos autores implican una constante aditiva y multiplicativa adicionales que permanece aún después de los intentos de filtrarla (véase a Gitelson *et al.*, 2005). Los autores mencionados utilizan un coeficiente de retrodispersión $s' = s/2$.

Invariantes espectrales y escalamiento de las estimaciones

La teoría-p o de invariantes espectrales (Knyazikhin *et al.*, 1998; Panferov *et al.*, 2001; Smolander y Stenberg, 2005; Stenberg, 2007; Huang *et al.*, 2007; Lewis y Disney, 2007; Knyazikhin *et al.*, 2013) plantea en forma físicamente coherente (respecto de la ley de conservación de energía) que la ecuación tri-dimensional de la transferencia radiativa tiene simetrías (escalamientos) que permiten simplificar en forma fuerte su solución. Esta idea de escalamiento y simetría ha sido planteada previamente por van de Hulst (1980) y desarrollada por Mitrescu y Stephens (2004) para

la función de fase anisotrópica y así generar relaciones iguales a las del grupo mencionado, pero en el contexto de modelaciones atmosféricas. La similaridad implicada en la ecuación de transferencia radiativa establece simplemente que diferentes problemas radiativos, asociados a diferentes funciones de fase, pueden ser hechos equivalentes unos con los otros usando diferentes pares del espesor óptico (parámetro estructural, fundamentalmente) y el albedo foliar simple (dependiente de la banda espectral).

La teoría-p, caso de suelo negro, plantea el escalamiento entre el follaje de la vegetación y las hojas que lo componen:

$$W(\lambda) = \left[\frac{(1-p)\omega(\lambda)}{1-p\omega(\lambda)} \right]$$

$$\frac{K(\lambda)}{S(\lambda)} = \left[\frac{1-\omega(\lambda)}{\omega(\lambda)} \right] \left[\frac{1}{1-p} \right] \quad (14)$$

donde: p es la probabilidad de recoliación de los fotones chocando con la vegetación; es decir, es la probabilidad media de que un fotón dispersado por una hoja del follaje de la vegetación interactúe de nuevo dentro del follaje. W es el albedo de dispersión simple, K es el coeficiente de absorción (absortancia) y S es el coeficiente de dispersión, todos a nivel del follaje de la vegetación y no de las hojas. En las relaciones 14 se ha supuesto p como constante para todos los órdenes de interacción, por lo que los valores p corresponden a valores efectivos p_{ef} (Huang *et al.*, 2007). En el caso de la absorbancia, p alcanza su valor teórico después de solo una interacción, por lo que se puede establecer una relación de escalamiento entre el follaje y la vegetación (Knyazikhin *et al.*, 1998):

$$A(\lambda) = \left[\frac{1-p\omega(\lambda_0)}{1-p\omega(\lambda)} \right] \left[\frac{1-\omega(\lambda)}{1-\omega(\lambda_0)} \right] A(\lambda_0) \quad (15)$$

que puede también ponerse en función del albedo de dispersión simple W , ya que la absortancia del follaje es definida como $A = 1 - W$. La relación 15 establece en forma clara que la información espectral asociada a cualquier banda espectral (λ), ancha o angosta, está relacionada con cualquier otra (λ_0) a través de los albedos

foliares (que son función de λ) y el parámetro p que es función de la estructura de la vegetación (independiente de λ). Así, la discusión de bandas “óptimas” de los sensores remotos para alguna estimación específica debe estar relacionada con los albedos foliares y sus constituyentes bioquímicos.

Los desarrollos analíticos de la teoría-p son solo válidos para el caso de suelo negro, por lo que es necesario desarrollar un esquema de conversión de las reflectancias de un suelo cualquiera a uno negro (Figura 2b.) En el caso de las reflectancias en el infinito, la condición de suelo negro se satisface, por lo que pueden usarse las relaciones 14 en forma directa para relacionar mediciones del follaje con las de las hojas. En el caso de medios ópticamente densos, el valor de p es de alrededor de 0.9 para el caso asociado a $\theta_s \approx 57^\circ$ (Lewis y Disney, 2007), discutido al inicio de este trabajo.

En el caso de los desarrollos de similaridad y escalamiento en el contexto de las aplicaciones atmosféricas, una función de fase altamente anisotrópica puede descomponerse en dos partes: una en la dirección contraria a la iluminación y otra en la dirección de retro-iluminación. Así, definiendo a f como la fracción (probabilidad) de la energía incidente dispersada en la dirección contraria a la iluminación, Mitrescu y Stephens (2004) establecieron:

$$\tau_p = (1-f\omega)\tau \quad (16)$$

$$\omega_p = \frac{(1-f)\omega}{1-f\omega} \quad (17)$$

donde: τ es el espesor óptico.

Para un medio con dispersores isotrópicos iluminados por radiación isotrópica, este se vuelve ópticamente denso (reflectancias en el infinito) cuando (van de Hulst, 1980):

$$\tau = KxIAF > 2(1-\omega)^{-1/2} \quad (18)$$

donde: K es un coeficiente de extinción.

Las relaciones 16 y 17 representan las relaciones de similaridad introducidas por van de Hulst (1980), que establecen que la solución de la ecuación de transferencia para funciones de fase compleja puede ser aproximada en términos de soluciones con funciones de fase más simple; esto es, se puede resolver

la ecuación de transferencia radiativa usando valores escalados del albedo de dispersión simple y el espesor óptico al utilizar funciones de fase más simétricas. Esta representación es una propiedad de la ecuación de transferencia radiativa y no de la función de fase. Este esquema de similaridad y escalamiento ha sido usado en forma semi-empírica por Bolaños *et al.* (2007) para aproximar la función de distribución bi-direccional de reflectancias en la vegetación.

CONCLUSIONES

- Los desarrollos mostrados en este trabajo plantean un esquema integrado de escalamiento de las propiedades ópticas y geométricas del follaje de la vegetación, medios homogéneos y heterogéneos, con las propiedades ópticas y bioquímicas de las hojas. El esquema de conversión de medios heterogéneos a homogéneos permite acceder el albedo foliar en términos de la información espectral disponible en los sensores remotos, además de generar una condición de frontera de suelo negro y medio ópticamente denso (con reflectancias en el infinito asociadas), que pueda usarse para establecer relaciones escalantes basadas en la teoría-p o de invariantes espectrales. De esta forma, el parámetro foliar fundamental albedo puede ser estimado en términos desacoplados de las propiedades estructurales (índice de área foliar y cobertura de la vegetación). El marco teórico introducido abre un nuevo paradigma para asociar mediciones de sensores remotos, en campo o en plataformas espaciales, con estimaciones de las componentes bioquímicas foliares en forma directa, evitando los problemas asociados a los múltiples enfoques empíricos que han intentado aproximar estas estimaciones.

- De acuerdo a los desarrollos mostrados, es posible relacionar directamente el albedo foliar estimado con modelos de transferencia radiativa en hojas, tales como el PROSPECT, con las estimaciones de las componentes bioquímicas foliares. Así, la estimación, sin el enmascaramiento estructural (IAF), de las concentraciones de los componentes bioquímicos de las hojas puede hacerse en forma estable y congruente con el marco teórico de la transferencia radiativa. Alternativamente, es posible replantear la construcción de un modelo de transferencia radiativa en hojas parametrizándolo en forma directa en función de los albedos o absortancias foliares, reduciendo así las incertidumbres asociadas a las calibraciones del modelo

cuando se usan calibraciones basadas en reflectancias y transmitancias foliares por separado.

LITERATURA CITADA

- Bolaños-González, M., F. Paz-Pellat, E. Palacios-Velez, E. Mejía-Sáenz y A. Huete. 2007. Modelación de los efectos de la geometría sol-sensor en la reflectancia de la vegetación. *Agrociencia* 41: 527-537.
- Bonhomme, R. and C. Varlet-Grancher. 1977. Application aux couverts végétaux de lois rayonnement en milieu diffusant. I. Etablissement des lois et vérifications expérimentales. *Ann. Agron.* 28: 567-582.
- Broge, N. H. and E. Leblanc. 2000. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. *Remote Sens. Environ.* 76: 156-172.
- Casiano, M., F. Paz, A. Zarco, M. Bolaños y E. Palacios. 2012. Escalamiento espacial de medios heterogéneos espectrales usando invariantes temporales. *Terra Latinoamericana* 30: 315-326.
- Curran, P. J. 1989. Remote sensing of foliar chemistry. *Remote Sens. Environ.* 26: 271-278.
- Curran, P. J., J. L. Dungan, B. A. Macler, S. E. Plummer, and D. L. Peterson. 1992. Reflectance spectroscopy of fresh whole leaves for the estimation of chemical concentration. *Remote Sens. Environ.* 39: 153-166.
- Dawson, T. P., P. J. Curran, and S. E. Plummer. 1998. LIBERTY - modeling the effects of leaf biochemical concentration on reflectance spectra. *Remote Sens. Environ.* 65: 50-60.
- Dickinson, R. E., J. A. Berry, G. B. Bonan, G. J. Collatz, C. B. Field, I. Y. Fung, M. Goulden, W. A. Hoffmann, R. B. Jackson, R. Myneni, P. J. Sellers, and M. Shaikh. 2002. Nitrogen controls on climate model evapotranspiration. *J. Clim.* 15: 278-295.
- Ercolli, L., M. Mariotti, A. Masoni, and F. Massantini. 1993. Relation between nitrogen and chlorophyll content and spectral properties in maize leaves. *Eur. J. Agron.* 2: 113-117.
- Evans, J. R. 1989. Photosynthesis and nitrogen relationships in leaves of C₃ plants. *Oecologia* 78: 9-19.
- Feret, J. B., C. Francois, G. P. Asner, A. A. Gitelson, R. E. Martin, L. P. R. Bidel, S. L. Ustin, G. le Maire, and S. Jacquemoud. 2008. PROSPECT-4 and 5: Advances in the leaf optical properties model separating photosynthetic pigments. *Remote Sens. Environ.* 112: 3030-3043.
- Field, C. B. and H. A. Mooney. 1986. The photosynthesis-nitrogen relationship in wild plants. pp. 25-55. *In*: T. J. Givnish (ed.). *The economy of plant form and function*. Cambridge University Press. UK.
- Fourty, Th., F. Baret, S. Jacquemoud, G. Schmuck, and J. Verdebout. 1996. Leaf optical properties with explicit description of its biochemical composition: Direct and inverse problems. *Remote Sens. Environ.* 56: 104-117.
- Fourty, Th. and F. Baret. 1998. On spectral estimates of fresh leaf biochemistry. *Int. J. Remote Sens.* 19: 1283-1297.
- Gastellu-Etchegorry J. P. and V. Bruniuel-Pinel. 2001. A modeling approach to assess the robustness of spectrometric predictive equations for canopy chemistry. *Remote Sens. Environ.* 76: 1-15.

- Gausman, H. W., W. A. Allen, C. L. Wiegand, D. E. Escobar, R. R. Rodriguez, and A. J. Richardson. 1973. The leaf mesophylls of twenty crops, their light spectra, and optical and geometrical parameters. Technical Bulletin 1465. United States Department of Agriculture. Washington, DC, USA.
- Gitelson, A. A., Y. Gritz, and M. N. Merzlyak. 2003. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. *J. Plant Physiol.* 160: 271-282.
- Gitelson, A. A., A. Viña, V. Ciganda, D. C. Rundquist, and T. J. Arkebauer. 2005. Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. *Geophys. Res. Lett.* 32: L08403. doi:10.1029/2005GL022688.
- Goudriaan, J. 1977. Crop micrometeorology. A simulation study. Simulation Monographs. PUDDOC. Wageningen, The Netherlands.
- Goudriaan, J. and H. M. van Laar. 1994. Modelling potential crop growth processes. Textbook with exercises. (Current issues in production ecology). Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, Netherlands.
- Grindlay, D. J. C. 1977. Towards an explanation of crop nitrogen demand based on the optimization of leaf nitrogen per unit leaf area. *J. Agric. Sci. (Cambridge)* 128: 377-396.
- Grossman, Y. L., S. L. Ustin, S. Jacquemoud, E. W. Sanderson, G. Schmuck, and J. Verdebout. 1996. Critique of stepwise multiple linear regression for the extraction of leaf biochemistry information from leaf reflectance data. *Remote Sens. Environ.* 56: 182-193.
- Huang, D., Y. Knyazikhin, R. E. Dickinson, M. Rautiainen, P. Stenberg, M. Disney, P. Lewis, A. Cescatti, Y. Tian, W. Verhoef, J. V. Martonchik, and R. B. Myneni. 2007. Canopy spectral invariants for remote sensing and model applications. *Remote Sens. Environ.* 106: 106-122.
- Jacquemoud, S. and F. Baret. 1990. PROSPECT: a model of leaf optical properties spectra. *Remote Sensing of Environment* 34: 75-91.
- Jacquemoud, S., F. Baret, B. Andrieu, F. M. Danson, and K. Jaggard. 1995a. Extraction of vegetation biophysical parameters by inversion of the PROSPECT + SAIL models on sugar beet canopy reflectance data: application to TM and AVIRIS data. *Remote Sens. Environ.* 52: 163-172.
- Jacquemoud, S., J. Verdebout, G. Schmuck, G. Andreoli, and B. Hosgood. 1995b. Investigation of leaf biochemistry by statistics. *Remote Sens. Environ.* 54: 180-188.
- Jacquemoud, S., S. L. Ustin, J. Verdebout, G. Schmuck, G. Andreoli, and B. Hosgood. 1995c. PROSPECT redux. pp. 99-103. *In*: R. O. Green (ed.). Summaries of the 5th Annual JPL Airborne Earth Science Workshop. Volume 1. AVIRIS Workshop. Pasadena, CA, USA.
- Jacquemoud, S., S. L. Ustin, J. Verdebout, G. Schmuck, G. Andreoli, and B. Hosgood. 1996. Estimating leaf biochemistry using the PROSPECT leaf optical properties model. *Remote Sens. Environ.* 56: 194-202.
- Jacquemoud, S., C. Bacour, H. Poilve, and J. P. Frangi. 2000. Comparison of four radiative transfer models to simulate plant canopy reflectance: direct and inverse mode. *Remote Sens. Environ.* 74: 471-481.
- Knyazikhin, Y., J. V. Martonchik, R. B. Myneni, D. J. Diner, and S. W. Running. 1998. Synergistic algorithm for estimating vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from MODIS and MISR data. *J. Geophys. Res.* 103: 32257-32276.
- Knyazikhin, Y., M. Schull, P. Stenberg, M. Möttus, M. Rautiainen, Y. Yang, A. Marshak, P. Carmona, R. Kaufmann, P. Lewis, M. Disney, V. Vanderbilt, A. Davis, F. Baret, S. Jacquemoud, A. Lyapustin, and R. Myneni. 2013. Hyperspectral remote sensing of foliar nitrogen content. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America.* 110: 811-812.
- Lawlor, D. W. 2002. Carbon and nitrogen assimilation in relation to yield: Mechanisms are the key to understanding production systems. *J. Exp. Bot.* 53: 773-787.
- Le Maire, G., C. Francois, and E. Dufrène. 2004. Towards universal broad leaf chlorophyll indices using PROSPECT simulated database and hyperspectral reflectance measurements. *Remote Sens. Environ.* 89: 1-28.
- Lewis, P. and M. Disney. 2007. Spectral invariants and scattering across multiple scales from within-leaf to canopy. *Remote Sens. Environ.* 109: 196-206.
- Melillo, J. M., J. D. Aber, and J. F. Muratore. 1982. Nitrogen and lignin control of hardwood leaf litter decomposition dynamics. *Ecology* 63: 621-630.
- Mitrescu, C. and G. L. Stephens. 2004. On similarity and scaling of the radiative transfer equation. *J. Quant. Spect. Radiat. Trans.* 86: 387-394.
- Moon, P. and D. E. Spencer. 1942. Illumination from a non-uniform sky. *Trans. Illumin. Engineer. Soc.* 37: 707-726.
- Panferov, O., Y. Knyazikhin, R. B. Myneni, J. Szarzynski, S. Engwald, K. G. Schnitzler, and G. Gravenhorst. 2001. The role of canopy structure in the spectral variation of transmission and absorption of solar radiation in vegetation canopies. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 39: 241-253.
- Paz P., F., E. Palacios V., E. Mejía S., M. Martínez M. y L. A. Palacios S. 2005. Análisis de los espacios espectrales de la reflectividad del follaje de los cultivos. *Agrociencia* 39: 293-301.
- Paz, F., E. Palacios, E. Mejía, M. Martínez y L. A. Palacios. 2006. Determinación del estado de crecimiento de cultivos usando la transformada de Hough de las reflectividades del follaje. *Agrociencia* 40: 99-108.
- Paz P., F., A. Zarco H., A. Cano G., M. Bolaños G. y M. Odi L. 2009a. Un método simple para estimar las propiedades geométricas y ópticas de las hojas de la vegetación. *Agrociencia* 43: 417-425.
- Paz P., F., M. I. Marin, E. López B., A. Zarco H., M. Bolaños G., J. L. Oropeza M., M. Martínez M., E. Palacios V. y E. Rubiños P. 2009b. Elementos para el desarrollo de una hidrología operacional con sensores remotos: mezcla suelo-vegetación. *Ing. Hidrául.* 24: 69-80.
- Paz, F., M. Casiano, A. Zarco y M. Bolaños. 2013. Estimación de las propiedades óptica de la vegetación usando medios radiativos equivalentes y espacios n-paramétricos. *Terra Latinoamericana* 31: 119-134.
- Peterson, D. L. and G. S. Hubbard. 1992. Scientific issues and potential remote-sensing requirements for plant bio-chemical content. *J. Imag. Sci. Technol.* 36: 446-456.

- Ross, J. 1981. The radiation regime and architecture of plant stands. W. Junk. Norwell, MA, USA.
- Schmuck, G., J. Verdebout, S. L. Austin, A. J. Sieber, and S. Jacquemoud. 1993. Vegetation and biochemical indices retrieved from a multitemporal AVIRIS data set. pp. 273-281. *In*: Proceedings of the 25th International Symposium on Remote Sensing and Global Environment Change. Graz, Austria.
- Sinoquet, H., M. Rakocevic, and C. Varlet-Grancher. 2000. Comparison of models for daily light partitioning in multispecies canopies. *Agric. For. Meteorol.* 101: 251-263.
- Smolander, S. and P. Stenberg. 2005. Simple parameterization of the radiation budget of uniform broadleaved and coniferous canopies. *Remote Sens. Environ.* 94: 355-363.
- Stenberg, P. 2007. Simple analytical formula for calculating average photon recollision probability in vegetation canopies. *Remote Sens. Environ.* 109: 221-224.
- Van de Hulst, H. C. 1980. Multiple light scattering. Academic Press. New York, NY, USA.
- Vitousek, P. M. 1982. Nutrient cycling and nutrient use efficiency. *Nature* 119: 553-572.
- Yin, X., E. A. Latinga, Ad. H. C. M. Schapendonk, and X. Zhong. 2003. Some quantitative relationships between leaf area index and canopy nitrogen content and distribution. *Ann. Bot.* 91: 893-903.
- Zarco H., A. F. Paz P., E. Palacios V., A. Cano G., M. Bolaños G., F. Pascual R., L. A. Palacios S., O. Palacios V. y J. L. Oropeza M. 2008. Modelación del efecto de escala espectral en el sistema suelo-vegetación. *Agrociencia* 42: 193-204.