Correcciones atmosféricas usando patrones invariantes en el espacio del rojo e infrarojo cercano

Fernando Paz*, Enrique Palacios, Luis A. Palacios, Leonardo Tijerina y Enrique Mejía

Programa de Hidrociencias, Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados, km 36.5 carretera México-Texcoco, Montecillo, C.P. 56230, Estado de México, México

Recibido 13 Marzo 2005, revisado 20 Junio 2005, aceptado 3 Octubre 2005

Atmospheric corrections using invariant patterns in the red and infrared space

Abstract

Using invariant patterns of bare soil and dense vegetation in the red and near infrared space, several approaches for relative atmospheric correction between pairs of satellite images are presented. Methods proposed are reviewed considering temporal changes in the reflectance of bare soil and dense vegetation in short periods of time using radiative transfer simulations. Also, the use of isolines of vegetation, any coberture, is used in a general method to correct the atmospheric effect in satellite images. The methods introduced in this paper are exemplified using radiative simulations with the 6S model, under generic atmosphere profiles. The results of the different approaches are discussed in regards to real applications found in the field.

Keywords: Atmospheric correction, invariant patterns, red-nir space, soil line, dense vegetation line

Introducción

El uso operacional de la tecnología de los sensores remotos en el manejo de los recursos naturales, está restringido por la distorsión sufrida en la señal espectral captada por los sensores en plataformas espaciales. Dos de los principales factores que perturban las señales son la atmósfera y el fondo de los cultivos sin cobertura completa. El caso del fondo de los cultivos no es discutido en este trabajo; aunque la metodología de correcciones atmosféricas presentada usa en forma útil estas distorsiones de las reflectancias en los cultivos.

Las aplicaciones de los sensores remotos en tiempo cuasi-real (1-3 días) requieren del análisis multi-temporal de los patrones temporales de la reflectancia de los cultivos. Así, es necesario reducir o eliminar las perturbaciones introducidas por la atmósfera en las reflectancias, para poder de esta forma realizar análisis que sean representativos de solo la señal de interés: los cultivos. En este contexto, el uso de la información espectral de las imágenes satelitales debe ser explorado a detalle, para el desarrollo de metodologías económicas y confiables de corrección de los efectos atmosféricos, sin recurrir a estrategias de uso de información del terreno o de perfiles atmosféricos; los cuales generalmente no están disponibles en su dimensión espacial y temporal.

Los diferentes esquemas de corrección atmosfé-

* Autor para correspondencia
E-mail: pellat@colpos.mx; Tel: +52-595-9520200; Fax: +52-595-9520237

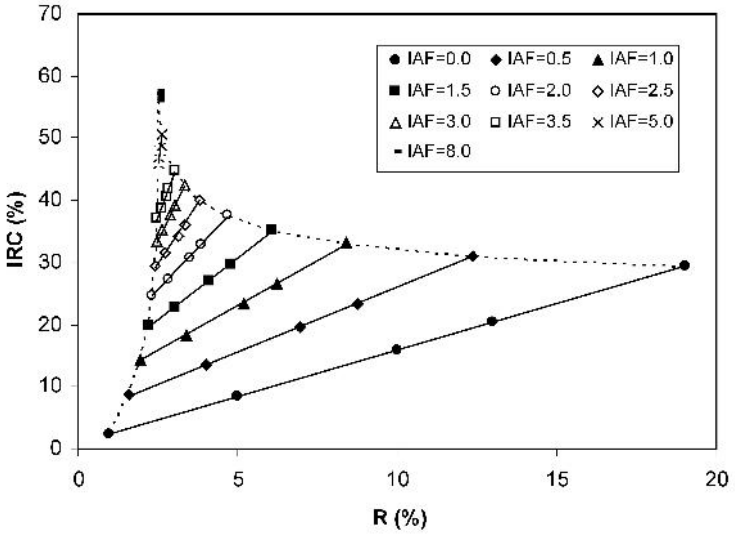


Figura 1. Patrones espectrales del R-IRC del sistema suelo-vegetación del maíz.

rica utilizados actualmente pueden ser clasificados como: Método de objetos invariantes (Moran et al., 1992; Chavez, 1996 y Fox et al., 2003); Método del objeto oscuro (Kaufman y Sendra, 1988; Teillet y Fedosejevs, 1995; Kaufman et al., 1997; Liang et al., 1997; Wen et al., 1999 y Kaufman, 2002); Método del ajuste de histogramas (Richter, 1996a y b); y, Método de reducción del contraste (Tanre et al., 1988 y Tanre y Legrand, 1991). A excepción del método del objeto oscuro, que usa patrones de invarianza relativos, el resto de los métodos se basa en hipótesis de invarianza absoluta de los objetos terrestres, por lo que su confiabilidad es limitada a la validez de esta hipótesis fundamental.

Los métodos discutidos requieren de identificar los objetos terrestres en forma adecuada. En especial, los objetos suelo desnudo, vegetación densa y cuerpos de agua son necesario en muchos métodos de corrección atmosférica, incluyendo los propuestos en este trabajo. Usando índices y patrones de las firmas espectrales de los objetos terrestres es posible caracterizarlos en forma adecuada (Palacios et al., 2005). Las discusiones de este trabajo, están acotadas a las bandas espectrales del rojo (R) y del infrarrojo cercano (IRC); aunque las metodologías desarrolladas pueden ser fácilmente extendidas a todas las bandas del espectro electromagnético del visible.

El objetivo principal de este trabajo es la presentación de diferentes esquemas de corrección atmosférica relativa, entre pares de imágenes satelitales, que usen los patrones espectrales de la mezcla suelo-vegetación y que se basen solamente en la información contenida en el espacio del R-IRC.

Material y métodos

Para analizar y validar los esquemas propuestos de corrección atmosférica, se realizaron simulaciones radiativas de efectos atmosféricos sobre los patrones de la reflectancia de mezclas de suelo-vegetación. Las simulaciones realizadas tienen las mismas características que los patrones reales observados en imágenes de satélite, con la ventaja de contar con datos controlados para validar los

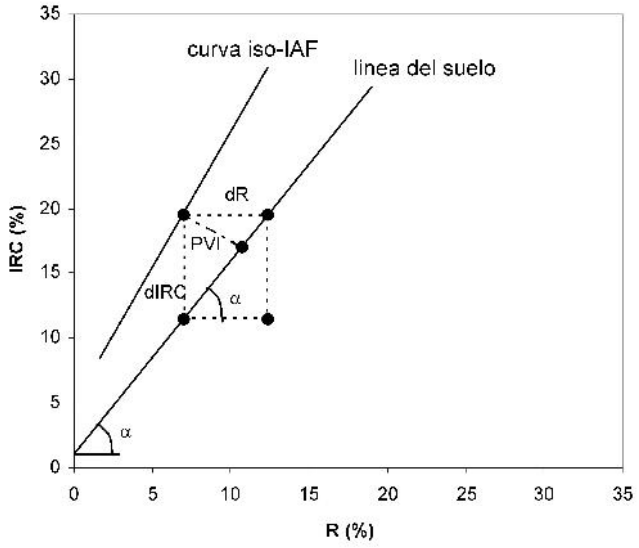


Figura 2. Relación entre índices en el espacio R-IRC

esquemas propuestos. Este enfoque de validación ha sido ampliamente usado en la literatura sobre el tema (de Haan et al., 1993; Richter, 1996a, b y c; Liang et al., 1997 y 2001; Thome, 2001; entre otros).

Simulación del efecto atmosférico

El efecto atmosférico puede ser modelado por un sistema de capas en paralelo usando una aproximación de medio turbio semi-infinito unidimensional (Chandrasekhar, 1960) como:

$$\rho_{EXO}(\theta_s,\theta_v,\phi_s-\phi_v)=\rho_a(\theta_s,\theta_v,\phi_s-\phi_v)+\frac{\rho_{sv}\tau(\theta_s)\tau(\theta_v)}{1-\rho_{sv}S} \quad (1)$$

donde:

ρ_{EXO} = Reflectancia exo atmosférica

ρ_a = Reflectancia de trayectoria de la atmósfera

ρ_{sv} = Reflectancia del sistema suelo-vegetación

S = Albedo esférico

τ = Transmitancia atmosférica

θ_s = Ángulo cenital solar

θ_v = Ángulo cenital de visión del sensor

ϕ_s = Ángulo acimutal solar

ϕ_v = Ángulo acimutal de visión

En las secciones siguientes se presentan simulaciones del proceso de transferencia radiativa de la atmósfera utilizando el modelo 6S (Vermote et al., 1997), definido por:

$$\rho_{\mathrm{EXO}}(\theta_s,\theta_v,\phi_s-\phi v)=\tau_g(\theta_s,\theta_v)\left[\rho_{R+A}+\frac{\rho_{sv}\tau(\theta_s)\tau(\theta_v)}{1-\rho_{sv}S}\right] (2)$$

donde:

τ_g = Transmisión total de gases

ρ_{R+A} = Reflectancia de trayectoria (Rayleigh + Aerosoles)

El modelo 6S simula dos procesos atmosféricos de la radianza solar reflejada por el sistema suelo-vegetación, al ser captada por un sensor en una plataforma espacial: la absorción por los gases y la dispersión por aerosoles y moléculas (de Rayleigh). Si la absorción de los gases es desacoplada de la

dispersión, como si los agentes absorbentes estuvieran localizados arriba de las capas de absorción, la ecuación (2) modela la transferencia radiativa para un píxel homogéneo lambertanio de reflectancia ρ_{sv}, a nivel del mar, visto por un sensor afuera de la atmósfera e iluminado por el sol.

La ecuación (2) puede ser simplificada, quitando los argumentos angulares, como:

$$\rho_{\mathrm{EXO}} = a_{\lambda} + b_{\lambda}\rho_{sv} \quad (3)$$

donde λ representa una banda espectral (R ó IRC). La constante a es la radianza de trayectoria y b es una constante multiplicativa que considera la segunda parte del término de la derecha de la ecuación (2). El error asociado al uso de la ecuación (3) es menor al 4 % en relación al uso de la ecuación (2).

Simulación de la reflectancia del sistema suelo-vegetación

La figura 1, muestra los patrones espectrales, en el espacio del R-IRC, de diferentes mezclas del sistema suelo-vegetación (Paz et al., 2005a), caracterizados por el IAF (Índice de Área Foliar). Los datos fueron obtenidos con el modelos SAIL de transferencia radiativa (Verhoef, 1984) y representan un cultivo con distribución angular foliar erectófila (predominantemente vertical) y propiedades ópticas (reflectancia y transmitancia) de maíz (Gausman et al., 1973). El ángulo cenital solar es de 30° y el ángulo de visión es a nadir. En las simulaciones de la figura 1, se usaron las reflectancias de seis tipos diferentes de suelos para las mezclas analizadas, observándose que las reflectancias de los suelos caen sobre una "línea de suelo" (Baret et al., 1983), definida como:

$$\mathrm{IRC} = a_s + b_s R \quad (4)$$

donde el subíndice s es por suelo. Para la figura 2 a_s= 1.0 y b_s= 1.5.

En este trabajo se plantea la hipótesis de que existe una sola línea del suelo en la región de una escena satelital a analizar (zona agrícola o pradera). Los cambios en las propiedades de los suelos implica que las reflectancias se mueven sobre la línea del suelo (e.g., Fox y Sabbagh, 2002), por lo que el patrón relativo de la línea del suelo (sus parámetros) se conservan y no así los valores absolutos de las reflectancias. En el caso de las zonas agrícolas, en un ciclo, generalmente la única propiedad que cambia de los suelos es su contenido de humedad, producto de los riegos aplicados o de las precipitaciones.

En la figura 1 se observa también que los patrones espectrales de la mezcla suelo-vegetación, con igual IAF, es del tipo lineal (líneas iso-IAF). Este patrón ha sido verificado experimentalmente (Huete et al., 1985; Price, 1992 con datos de Huete y Jackson, 1987; Bausch, 1993; Gilabert et al., 2002; Meza-Diaz y Blackburn, 2003) y por modelos de transferencia radiativa (Richardson y Wiegand; 1991, Baret y Guyot, 1991; Qi et al., 1994; Yoshioka et al., 2000).

Para un mismo suelo como fondo de un cultivo (curva iso-Suelo), la figura 1 muestra un patrón no-lineal (curvas punteadas envolventes). A la envolvente se le llama "sombrero de tres picos" ("Tasseled Cap", Kauth y Thomas, 1976).

La figura 1 muestra la línea iso-IAF para un IAF=8.0, representando la condición donde la banda del R se satura (no cambia de valor). En lo general, la mayoría de los cultivos llegan al punto de saturación del R en un IAF de 2-3, que representa a la vegetación densa (objeto oscuro).

Los patrones de la figura 1 son del tipo lineal, por lo que conservan esta propiedad al ser transformados linealmente, ecuación (3), por los efectos atmosféricos. Esta propiedad de invarianza en los patrones de las reflectancias para el suelo y las mezclas suelo-vegetación, incluyendo la vegetación densa, es usada intensivamente en las secciones siguientes para analizar correcciones atmosféricas. Para analizar las propiedades de invarianza de los efectos atmosféricos, es necesario introducir los siguientes índices:

$$\mathrm{dIRC} = \mathrm{IRC} - (a_s + b_s R) \quad (5)$$

$$dR = \left(\frac{IRC - a_s}{b_s} \right) - R \quad (6)$$

que están relacionados por:

$$dIRC = (\tan\alpha)\, dR = b_s dR \quad (7)$$

donde tan α es la pendiente de la línea del suelo.

El índice de vegetación PVI (Perpendicular Vegetation Index) introducido por Richardson y Wiegand (1977) está definido por:

$$PVI = \frac{dIRC}{\sqrt{1 + b_s^2}} \quad (8)$$

La figura 2 muestra gráficamente los índices introducidos y su relación. El índice dIRC es la distancia proyectada sobre el eje IRC de un punto sobre una línea iso-IAF hasta la línea del suelo. El índice dR es la proyección sobre el eje R y el índice PVI es la distancia perpendicular del punto hasta la línea del suelo (figura 2).

Resultados

Corrección atmosférica usando la línea del suelo

La línea del suelo puede ser usada para realizar correcciones atmosféricas relativas entre dos escenas sobre la misma región; esto es, se puede normalizar o estandarizar los efectos atmosféricos de la escena 2 a una escena 1 de referencia.

Suponiendo que las líneas del suelo en las dos escenas están dadas por:

$$IRC_1 = a_{s1} + b_{s1} R_1 \quad (9)$$

$$IRC_2 = a_{s2} + b_{s2} R_2 \quad (10)$$

donde los subíndices 1 y 2 se refieren a las escenas 1 y 2 respectivamente.

De acuerdo con la relación (3), las reflectancias entre la escena 1 y la 2, están definidas por:

$$R_2 = a_R + b_R R_1 \quad (11)$$

$$IRC_2 = a_{IRC} + b_{IRC} IRC_1 \quad (12)$$

Ahora bien, si se sustituyen las ecuaciones (11) y (12) en la ecuación (10) y se compara con la ecuación (9), se tiene que:

$$\frac{b_{s2}}{b_{s1}} = \frac{b_{IRC}}{b_R} \quad (13)$$

$$a_{IRC} = (a_{s2} - a_{s1} b_{IRC}) + b_{s2} a_R \quad (14)$$

Las ecuaciones (13) y (14) forman los requerimientos básicos que deben cumplirse si hacemos un proceso de búsqueda en matrices de efectos atmosféricos simulados. Este enfoque no será explorado en este trabajo.

Para poder reducir la incertidumbre en los procesos de búsqueda o para realizar estimaciones directas de los parámetros atmosféricos es necesario considerar la relación entre las líneas del suelo (referencia) y las líneas iso-IAF, para cada escena analizada. Si sustituimos las ecuaciones (11) y (12) en la definición del índice dIRC para la escena 2, tenemos que:

$$dIRC_2 = (a_{IRC} + b_{IRC} IRC_1) - \{a_{s2} + b_{s2}(a_R + b_R R_1)\} \quad (15)$$

Despejando a_{s2} y b_{s2} de las ecuaciones (14) y (13), respectivamente, y sustituyendo este resultado en la ecuación (15), después de algo de álgebra, tenemos que:

$$dIRC_2 = dIRC_1 b_{IRC} \quad (16)$$

Así, la constante multiplicativa b_{IRC} puede obtenerse de:

$$b_{IRC} = \frac{dIRC_2}{dIRC_1} \quad (17)$$

Algo similar puede hacerse para el índice dR:

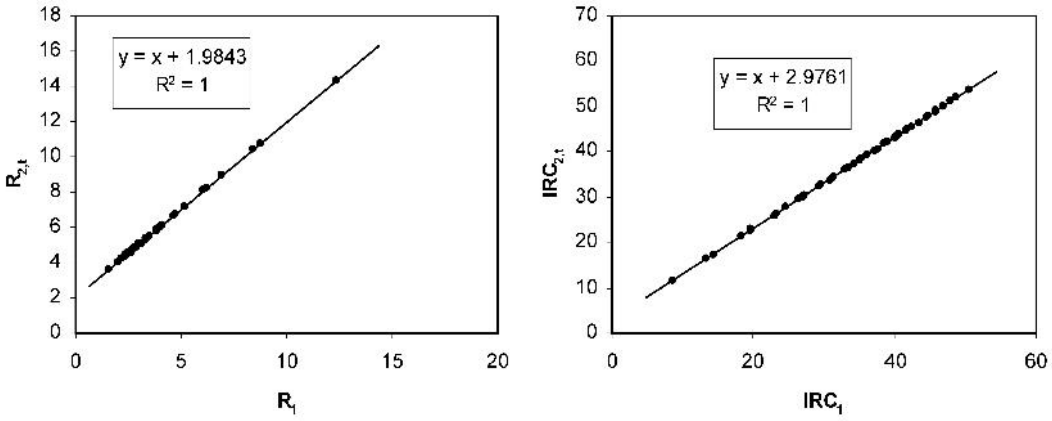


Figura 3. Reflectancias del suelo e IAF similares en ambas escenas: regresión lineal entre la escena 2 transformada y la escena 1 para R e IRC.

$$b_R = \frac{dR_2}{dR_1} \qquad (18)$$

El índice PVI, ecuación (8), es invariante bajo efectos atmosféricos, siguiendo la lógica de la ecuación (17).

Para analizar las relaciones (17) y (18) en el proceso de normalización de imágenes, podemos considerar cuatro situaciones: a) las reflectancias del suelo e IAF son similares entre ambas imágenes; b) las reflectancias del suelo son similares y los IAF son diferentes entre ambas imágenes; c) las reflectancias del suelo son diferentes y los IAF son similares en ambas imágenes; y d) las reflectancias del suelo son similares en ambas imágenes y los IAF son diferentes.

Para revisar los esquemas de corrección discutidos, a los datos mostrados en la figura 2 se les simularon efectos atmosféricos con el modelo 6S usando una atmósfera de verano de latitud media, un aerosol continental y una visibilidad de 10 km. Las simulaciones fueron para una altitud a nivel del mar, un ángulo cenital solar de 30° y el sensor ETM+. Las constantes atmosféricas estimadas fueron (reflectancias en porcentajes): a_R= 3.67, b_R = 0.7594, a_{IRC} = 1.86 y b_{IRC} = 0.8035

a) Reflectancias del suelo e IAF similares en ambas escenas

En este caso, lo único que cambia en los píxeles de la escena 1 y 2 es el efecto atmosférico. Las constantes b_R y b_{IRC} son obtenidas de las ecuaciones (17) y (18), siendo los mismos valores en todos los píxeles de la mezcla suelo-vegetación (excluidos los de suelos desnudo).

Para poder estimar a_R y a_{IRC} podemos realizar una transformación inversa, ecuaciones (11) y (12), en la imagen 2 definida por:

$$IRC_{2,t} = \frac{(IRC_2 - a_{IRC,t})}{b_{IRC}} \qquad (19)$$

$$R_{2,t} = \frac{(R_2 - a_{R,t})}{b_R} \qquad (20)$$

donde $a_{R,t}$ es cualquier valor arbitrario (un valor de 1.0, por ejemplo) y $a_{IRC,t}$ es calculado de la ecuación (14).

Los valores transformados de la imagen 2 tiene una relación con los valores de la imagen 1 dada por:

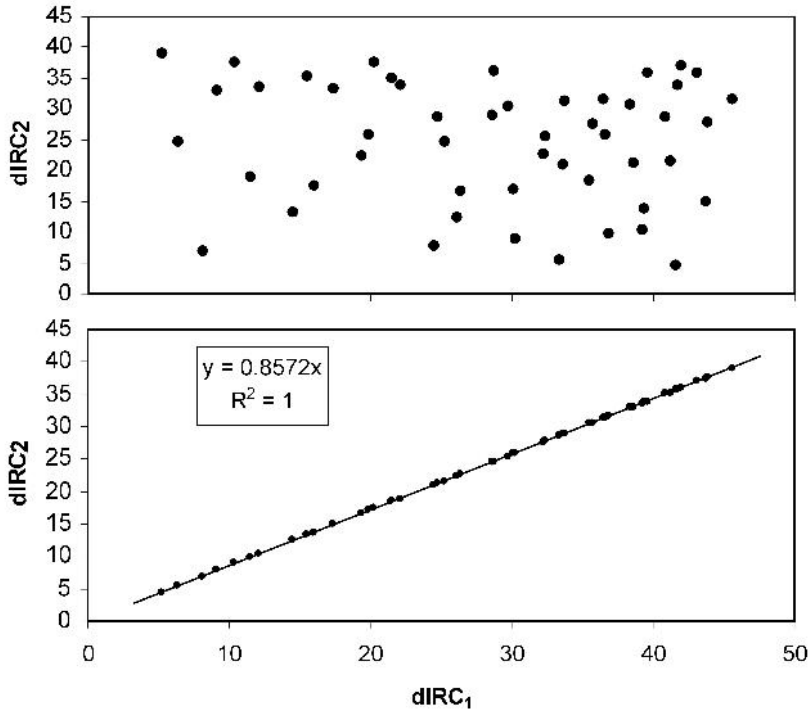


Figura 4. Reflectancias de los suelos similares e IAFs diferentes en ambas escenas. Superior: comparación, píxel por píxel, de los dIRC entre la escena 1 y 2; inferior: valores de dIRC ordenados para la escena 1 y 2.

$$R_{2,t} = C_R + R_1 \quad (21)$$

$$IRC_{2,t} = C_{IRC} + IRC_1 \quad (22)$$

Las constantes C_R y C_{IRC} se obtienen por regresión lineal entre los valores de las reflectancias de la imagen 2 transformada y la imagen 1. La transformación definida por las ecuaciones (19) y (20), sujeta a la relación (14), implica que $dIRC_{2,t}$ = dIRC, y $dR_{2,t}$ = dR, por lo que b_R y b_{IRC} de las ecuaciones (21) y (22) es la unidad.

La figura 3 muestra el resultado de la regresión propuesta para los datos simulados usando a_R = 1.0 (a_{IRC} = -1.3514). Con las constantes C_R y C_{IRC} estimadas, los valores de la imagen 2 transformada son corregidos, usando las ecuaciones (21) y (22):

$$R_1 = R_{2,t} - C_R \quad (23)$$

$$IRC_1 = IRC_{2,t} - C_{IRC} \quad (24)$$

Las constantes a_R y a_{IRC} están dadas por:

$$a_R = C_R a_R + a_{R,t} \quad (25)$$

$$a_{IRC} = C_{IRC} a_{IRC} + a_{IRC,t} \quad (26)$$

que son obtenidas de sustituir las ecuaciones (21), (22) y (11), (12) en las ecuaciones (19) y (20). La relación entre C_R y C_{IRC} puede ser obtenida al sustituir las ecuaciones (25) y (13) en la ecuación (14):

$$C_{IRC} = b_{s1} C_R \quad (27)$$

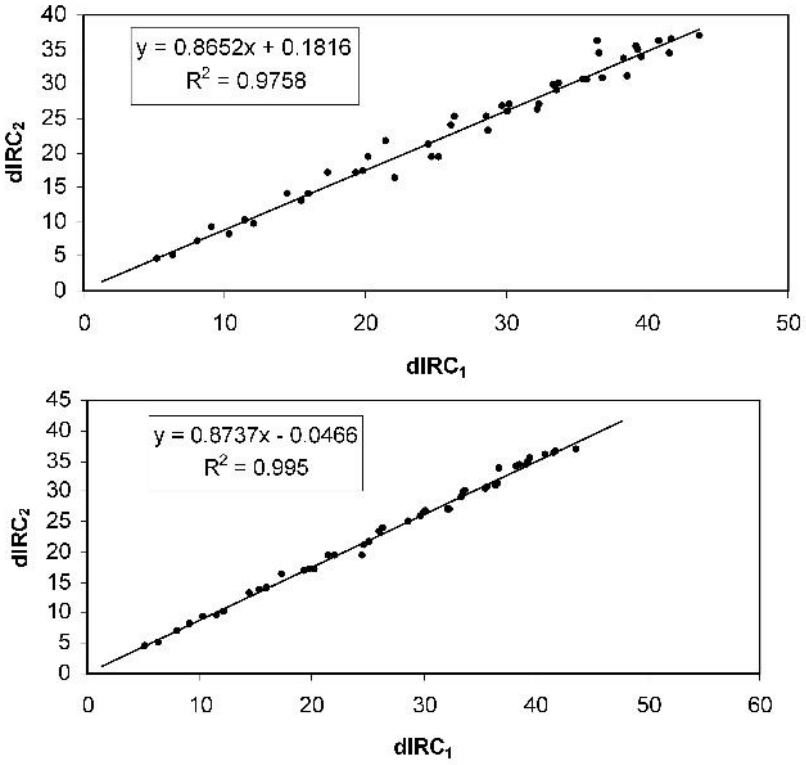


Figura 5. Reflectancias de los suelos diferentes e IAFs similares en ambas escenas. Superior: comparación entre $dIRC_1$ y $dIRC_2$ para reflectancias diferentes del suelo; inferior: comparación entre $dIRC_1$ y $dIRC_2$ ordenados en forma independiente.

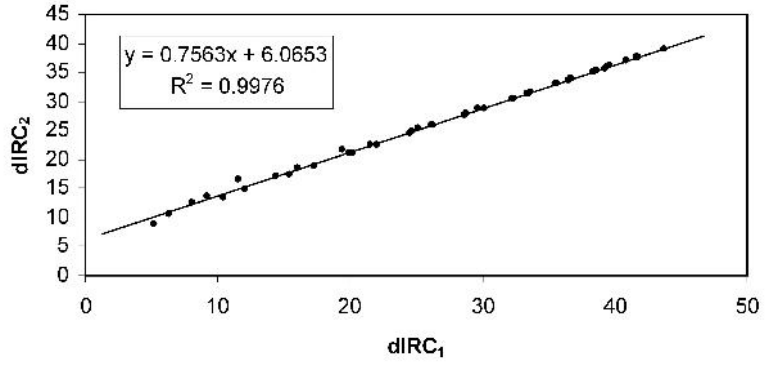


Figura 6. Reflectancias de los suelos similares e IAFs diferentes en ambas escenas: relación entre $dIRC_1$ y $dIRC_2$ para valores diferentes del IAF

b) Reflectancias del suelo similares e IAFs diferentes en ambas escenas

Este caso fue simulado cambiando al azar los valores del IAF en la imagen 2, de tal manera que en relación a la imagen 1 los IAF pudieran ser mayores, menores o iguales. Se utilizó la misma base de valores de reflectancias en las dos escenas.

La figura 4 presenta la relación entre $dIRC_1$ y $dIRC_2$ píxel por píxel. Algo similar se presenta para dR_1 y dR_2. Considerando que existe una relación isomórfica (multiplicación por una constante) entre $dIRC_1$ y $dIRC_2$ y que para valores iguales de dIRC tenemos valores diferentes de IRC (véase figura 1), podemos ordenar en forma independiente de menor a mayor (o al revés) los valores de $dIRC_1$ y $dIRC_2$ y compararlos uno a uno en la jerarquía de ordenación. La figura 4 muestra el resultado de la comparación, donde la constante multiplicativa es b_{IRC}, ecuación (17).

Usando el patrón de ordenación en dIRC, sus valores asociados de R e IRC quedan también ordenados, por lo que podemos utilizar el procedimiento del caso (a) para estimar a_R y a_{IRC} al hacer la transformación dada por las ecuaciones (19) y (20).

c) Reflectancias del suelo diferentes e IAF similares en ambas escenas

Los casos anteriores representan situaciones donde los suelos no cambian en sus propiedades ópticas. Si ocurre una precipitación o se aplica un riego a un cultivo, las reflectancias de los suelos cambian. Para simular este caso, los valores de R en la imagen 1, antes de agregar el efecto atmosférico, fueron modificados arbitrariamente. Los valores de IRC fueron calculados de los parámetros de las líneas iso-IAF de la imagen 1. La figura 5 muestra la relación entre $dIRC_1$ y $dIRC_2$, donde se observa algo de dispersión en la línea ajustada por regresión, con un valor diferente a cero en el parámetro de intersección con el eje $dIRC_2$. La dispersión es producto de agregar efectos de cambios en la reflectancia de los suelos. Para reducir la dispersión, podemos ordenar los valores de $dIRC_1$ y $dIRC_2$ por separado y compararlos en la jerarquía de ordenación. La figura 5 muestra el resultado del proceso de ordenación, donde se observa que la dispersión se ha reducido y que la intersección tiene un valor cercano a cero. La pendiente estimada por la regresión lineal tiene un error de 2% en relación a la real. Para reducir aún más la dispersión mostrada en la figura 5, podemos eliminar los valores de la mezcla suelo-vegetación con IAF pequeños, usando un índice de vegetación, ya que estos valores presentan un mayor efecto en las reflectancias de las mezclas al cambiar la reflectancia del suelo de fondo. Para valores de IAF grandes, el efecto del cambio en la reflectancia del suelo es la mayoría de las veces despreciable.

El caso de reflectancia del suelo e IAF diferentes en ambas imágenes es similar al caso b).

d) Reflectancia de los suelos similares e IAF diferentes en ambas imágenes

Todos los casos anteriormente presentados representan tiempos muy cortos entre las escenas, por lo que los valores de IAF varían muy poco. En el caso de tiempos más largos, los cultivos crecen y los IAF son mayores, en una base píxel por píxel.

La figura 6 muestra el caso en que en la imagen 2 (píxel por píxel) los valores de IAF fueron incrementados en 0.5 unidades en relación a la imagen 1. Se observa que la intersección de la línea ajustada con el eje $dIRC_2$ es mayor que cero, representando la situación en que los IAF entre ambas imágenes son diferentes. En esta situación es necesaria información adicional para ordenar los valores de dIRC. Un índice de vegetación cumple esta condición, siempre y cuando minimice el efecto del suelo.

Corrección atmosférica usando la línea de vegetación densa

La figura 1 muestra que la línea iso-IAF para vegetación densa es una línea recta vertical. El promedio de un conjunto de líneas verticales es una línea vertical, por lo que podemos usar esta propiedad para analizar la vegetación densa de una zona agrícola si usamos los mismos datos (píxeles) de vegetación densa de la escena 1 en la escena 2.

Así, representando a la línea recta R de la escena 1 con la ecuación:

$$R_1 = R_{c1} \tag{28}$$

donde R_c representa el valor promedio de saturación de la banda del rojo.

Aplicando el efecto atmosférico, ecuación (11), en la ecuación (28), tenemos que:

$$R_{c2} = a_R + b_R R_{c1} \tag{29}$$

Para poder calcular el valor de b_R, podemos usar la misma técnica que para la línea del suelo. Si en la figura 4 en lugar de la línea del suelo usamos la línea de la vegetación densa ($R = R_c$), entonces tenemos que:

$$dR = R - R_c \tag{30}$$

que nos da la relación entre a_R y b_R:

$$a_R = R_{c2} - R_{c1} b_R \tag{31}$$

Así, con un procedimiento similar al de la línea del suelo, podemos establecer que:

$$\frac{dR_2}{dR_1} = b_R \tag{32}$$

siendo posible estimar a_R por la ecuación (31) y hacer la corrección atmosférica de la banda del R.

En relación a los casos mostrados para la corrección por la línea del suelo, las metodologías propuestas son también aplicables a la corrección por la línea de vegetación densa. En especial, el caso conflictivo de cambios en las reflectancias de los suelos es de poco impacto en la línea de vegetación densa, ya que estos efectos están muy reducidos para esta línea (véase la figura 1).

Corrección atmosférica usando la línea del suelo y de la vegetación densa

Conocidos los parámetros a_R y b_R usando correcciones de la línea de la vegetación densa, el parámetro b_{IRC} se puede estimar de la ecuación (13) y el parámetro a_{IRC} de la ecuación (14). Así, con el uso combinado de los esquemas de corrección de las líneas del suelo y de la vegetación densa es posible hacer una corrección completa de los efectos atmosféricos. En esta corrección combinada, la estimación de dIRC o dR usando la línea del suelo o dR usando la línea de la vegetación densa es crítica. Un procedimiento alternativo del uso conjunto de la línea del suelo y la vegetación densa, evitando el problema del cambio de las reflectancias del suelo, es realizar una transformación del espacio R-IRC a uno de dIRC-IRC. Las líneas iso-IAF (incluida la del suelo y la vegetación densa)

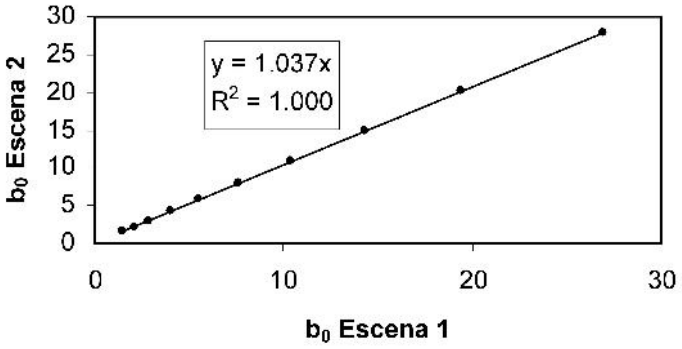


Figura 7. Líneas iso-IAF: relación entre las b_0 para la escena 1 y 2.

del espacio R-IRC están definidas por:

$$IRC = a_0 + b_0 R \quad (33)$$

y en el espacio dIRC-IRC son transformadas a una línea de parámetros:

$$IRC = a_1 + b_1 dIRC \quad (34)$$

La relación entre los parámetros de ambas líneas está dada por:

$$a_1 = a_0(1 - b_1) + a_s b_1 \quad (35)$$

$$b_1 = \frac{b_0}{b_0 - b_s} \quad (36)$$

Para el caso de la vegetación densa (línea vertical), tenemos que b_0 tiende a infinito, por lo que b_1=1, definiendo una línea a 45° en el espacio transformado dIRC-IRC. Para el caso de la imagen 2 con efecto atmosférico, la línea de la vegetación densa está dada por:

$$IRC_2 = c_2 + d_2 dIRC_2 \quad (37)$$

Si sustituimos las ecuaciones (9) y (10) en la ecuación (37) y la comparamos con la línea de la imagen 1 dada por:

$$IRC_1 = c_1 + dIRC_1 \quad (38)$$

tenemos que d_2= 1 (misma pendiente) y

$$a_{IRC} = c_2 - c_1 b_{IRC} \quad (39)$$

Las ecuaciones (13), (14), (31) y (39) pueden ser usadas para condicionar la búsqueda en matrices de atmósfera simuladas, reduciendo el espacio de soluciones.

Corrección atmosférica usando las líneas iso-IAF

En la figura 2, las líneas iso-IAF están definidas por los parámetros a_0 y b_0 [ecuación (33)]. Para el espacio transformado dIRC-IRC, los parámetros a_1 y b_1 de la ecuación (34) definen las líneas iso-IAF. Paz et al. (2005b) muestran un procedimiento para estimar los parámetros de las curvas iso-IAF, por lo que podemos analizar el impacto de los efectos atmosféricos en los parámetros de las curvas iso-IAF, después de su estimación.

La figura 7 muestra la relación entre los parámetros b_0 de las escenas 1 y 2. En la figura se observa una relación lineal con origen igual a cero, cuya pendiente es igual a $b_{IRC}/b_R = b_{s2}/b_{s1}$. En la relación entre el parámetro a_0 de las escenas 1 y 2 se observa un patrón no lineal. Así, con los parámetros de las líneas del suelo podemos corregir el

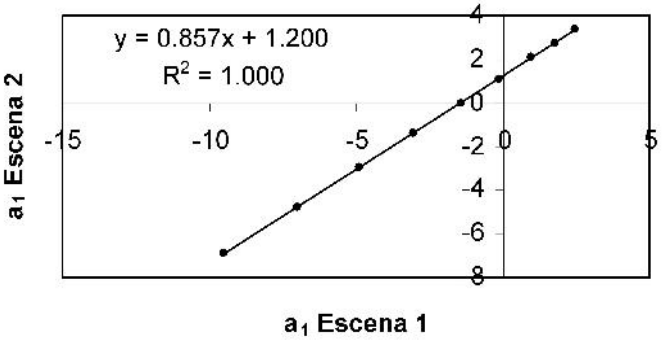


Figura 8. Líneas iso-IAF: relación entre las a_1 para la escena 1 y 2.

efecto atmosférico en las pendientes de las curvas iso-IAF.

$$b_{0,2} = \left(\frac{b_{s2}}{b_{s1}} \right) b_{0,1} \quad (40)$$

donde el subíndice 1 se refiere a la escena 1 y el subíndice 2 a la escena 2.

Si usamos el espacio transformado dIRC-IRC, entonces podemos estimar en forma directa los parámetros del efecto atmosférico. Para la transformación dada por las ecuaciones (35) y (36), tenemos que las pendientes de las curvas iso-IAF en las escenas 1 y 2 son iguales, tal como se ha discutido para el caso de la línea de la vegetación densa. Así, la transformación de espacios deja invariantes las pendientes de las curvas iso-IAF para efectos atmosféricos.

La figura 8 muestra la relación entre los parámetros a_1 de las escenas 1 y 2, la cual presenta un patrón lineal.

La ecuación (39) para la línea del suelo de la vegetación densa muestra que la relación entre el parámetro a_1 de la escena 1 y 2 está dado por:

$$a_{1,2} = a_{IRC} + b_{IRC} a_{1,1} \quad (41)$$

Así, con los parámetros a_{IRC} y b_{IRC} estimados de las relaciones entre las líneas iso-IAF, podemos utilizar las ecuaciones (9) y (10) para calcular b_{IRC} y a_R.

Discusión

Los diferentes métodos de corrección atmosférica propuestos en este trabajo fueron validados usando simulaciones de transferencia radiativa, bajo casos generales de la mezcla suelo-vegetación. Es importante señalar que las relaciones mostradas en los diferentes esquemas de corrección atmosférica son resultado de las matemáticas involucradas y no requieren de su validación, puesto que son consecuencia de la estructura matemática de la mezcla suelo-vegetación (Huete et al., 1985; Price, 1992 con datos de Huete y Jackson, 1987; Bausch, 1993; Gilabert et al., 2002; Meza-Diaz y Blackburn, 2003) y del modelo de efecto atmosférico (Kaufman y Sendra, 1988 y Kaufman. 2002).

Los esquemas de corrección atmosférica discutidos difieren de los existentes, ya que no requieren información absoluta de objetos invariantes o de un esquema de inversión del proceso de transferencia radiativa. Por el contrario, solo se basan en patrones espectrales invariantes, curvas iso-IAF, relativos de la mezcla suelo-vegetación, sin necesidad de conocer las proporciones de las mezclas o de los valores particulares de la reflectancia de un suelo o vegetación densa; además de que solo usan la información contenida en el espacio espectral del R-IRC, sin necesidad de realizar ninguna hipótesis. En términos generales, los esquemas propuestos se fundamentan en la hipótesis mínima posible en relación a los patrones espectrales de los objetos terrestres: simetría o invarianza. Esta propiedad es usada en forma intensiva para resolver el problema de corrección atmosférica, en términos relativos, usando la información contenida en las imágenes de satélite.

Una comparación directa con otros esquemas de corrección radiativa, bajo las mismas condiciones, implica el caso analizado de variación de las propiedades ópticas de los suelos (cambio de humedad, por ejemplo) o de las líneas iso-IAF (crecimiento del cultivo), los cuales fueron mostrados en las secciones respectivas. Los resultados obtenidos muestran un excelente desempeño de los algoritmos introducidos.

Es importante enfatizar que los esquemas propuestos se basan en la información espectral de objetos terrestres, suelo y vegetación, por lo que es necesario contar con un clasificador de objetos que los identifique. Palacios et al. (2005) han desarrollado un clasificador muy robusto para este fin.

En el caso de los sensores AVHRR, VEGETATION y MODIS, los píxeles son de grandes dimensiones, por lo que el encontrar píxeles de suelo desnudo es una tarea difícil. Un procedimien-

to alternativo para el uso de la línea del suelo es la selección de los píxeles en la base del "sombrero de tres picos", utilizándolos para ajustar una línea iso-IAF (con un IAF pequeño). La metodología propuesta por Fox et al. (2004) para detectar líneas del suelo puede ser usada para este caso. Seleccionados los píxeles de la curva iso-IAF en la escena 1, estos mismos píxeles son analizados en la escena 2. Para tiempo cortos (1 a 3 días), los cambios en el IAF son despreciables, por lo que la técnica puede ser usada en sustitución de la línea del suelo.

Los diferentes métodos propuestos en este trabajo utilizan la información de los objetos terrestres en una sola escena y sus patrones invariantes, por lo que resultan en esquemas de corrección atmosférica muy robustos y libres de hipótesis relativas a la atmósfera y aerosoles. La extensión de la metodología presentada puede extenderse fácilmente a las bandas del verde y azul del espectro electromagnético del visible, siguiendo los métodos presentados.

Agradecimientos

Este trabajo fue realizado con el apoyo del CONACYT, convenio CONACYT-2002-C01-41792, del proyecto "Agricultura Asistida por Sensores Remotos".

Referencias

Baret, F. y Guyot, G., 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. Remote Sensing of Environment, 35:161-174.

Baret, F.; Jacquemoud, S. y Hanocq, J.F., 1983. The soil line concept in remote sensing. Remote Sensing Reviews, 7: 65-82.

Bausch, W.C., 1993. Soil background effects on reflectance based crop coefficients for corn. Remote Sensing of Environment , 46: 213-222.

Chandrasekhar, S., 1960. Radiative transfer. Dover, New York

Chavez, P. Jr., 1996. Image based atmospheric corrections - revisited and improved. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 62: 1025-1036

de Haan, J.F.; Hovenier, J.W.; Kokke, J.M.M. y van Stokkon, H.T.C., 1993. Removal of atmospheric influences on satellite-borne imagery: a radiative transfer approach. Remote Sensing of Environment, 37: 1-21.

Fox, G. A. y Sabbagh, G.J., 2002. Estimation of soil organic matter from red and near-infrared remotely sensed data using a soil line euclidean distance technique. Soil Science Society of America Journal, 66: 1922-1929.

Fox, G.A., Sabbagh, G.J. y Searly, S.W., 2003. Radiometric normalization of multi-temporal images based on image soil lines, Transactions of the ASAE, 46: 851-859.

Fox, G.A., Sabbagh, G.J., Searly, S.W. y Yang, C., 2004. An automated soil line identification routine for remotely sensed images. Soil Science Society of America Journal, 68: 1326-1331.

Gausman, H.W., Allen, W.A., Wiegand, C.L., Escobar, D.E., Rodriguez, R.R. y Richardson, A.J., 1973. The leaf mesophills of twenty crops, their light spectra, optical and geometrical parameters. USDA Technical Bulletin, 59 pp.

Gilabert, M.A., González-Piqueras, J., García-Haro, F.J. y Melia, J., 2002. A generalized soil-adjusted vegetation index. Remote Sensing of Environment, 82: 303-310.

Huete, A.R. y Jackson, R.D., 1987. Suitability of spectral indices for evaluating vegetation characteristics on rangelands. Remote Sensing of Environment, 23: 213-232.

Huete, A.R., Jackson, R.D., y Post, D.F., 1985. Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. Remote Sensing of Environment, 17: 37-53.

Kaufman, Y.J., 2002. Relationship between surface reflectance in the visible and mid-IR used in MODIS aerosol algorithm - theory. Geophysical Research Letters, 29: 2116-2119.

Kaufman, Y.J. y Sendra, C., 1988. Automatic atmospheric correction. International Journal of Remote Sensing, 9: 1357-1381.

Kaufman, Y.J., Wald, A., Lorraine, L.A., Gao, B.C., Li, R.R. y Flynn, L., 1997. Remote sensing of aerosol over the continents with the aid of a 2.2 μm channel. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 35: 1286-1298.

Kauth, R.J. y Thomas, G.S., 1976. The tasseled cap - a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat, Proceedings of the Simposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data. Purdue University, West Lafayette, Indiana, Estados Unidos. pp. 4B41-4B51.

Liang G.S., Fallah-Adl, H., Kalluri, S., JaJa, J.; Kaufman, Y. y Townshend, J., 1997. Development of an operational atmospheric correction algorithm for TM Imagery. Journal of Geophysical Research, 102:17174-17186.

Liang G.S., Fang, H. y Chen, M., 2001. Atmospheric correction of Landsat ETM+ land surface imagery – Part I: methods, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39: 2490-2498.

Meza-Díaz, B. y Blackburn, G.A., 2003. Remote sensing of mangrove biophysical properties: evidence from a laboratory simulation of the possible effects of background variation on spectral indices. International Journal of Remote Sensing, 24: 53-75.

Moran, S., Jackson, R.D., Slater, P.N. y Teillet, P.N., 1992. Evaluating of simplified procedures for retrieval of land surface reflectance factors from satellite sensor output. Remote Sensing of Environment, 41: 169-182.

Palacios, L.A., Paz, F., Oropeza, J.L., Figueroa, B., Martínez, M., Ortiz, C.A. y García, E., 2005, Clasificador genérico de objetos en imágenes ETM+. Agrociencia (en prensa).

Paz, F., Palacios, E., Mejía, E., Martínez, M. y Palacios, L.A., 2005a, Análisis de los espacios espectrales de la

reflectividad del follaje de los cultivos, Agrociencia, 39:293-301.

Paz, F., Palacios, E., Mejía, E., Martínez, M. y Palacios, L.A., 2005b. Determinación del estado de crecimiento de cultivos sanos usando la transformada de Hough de las reflectividades del follaje. Agrociencia (en prensa).

Price, J.C., 1992. Estimating vegetation amount from visible and near infrared reflectances. Remote Sensing of Environment, 41: 29-34.

Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A.R., Kerr, Y.H. y Sorooshian, S., 1994. A modified soil adjusted vegetation index. Remote Sensing of Environment, 48: 119-126.

Richardson, A.J. y Wiegand, C.L., 1977. Distinguishing vegetation from soil background information. Photogrammetric Engineering, 43: 1541-1552.

Richardson, A.J. y Wiegand, C.L.,1991. Comparison of two models for simulating the soil vegetation composite reflectance of a developing cotton canopy. International Journal of Remote Sensing, 11: 447-459.

Richter, R., 1996a. A spatially adaptive fast atmospheric correction algorithm. International Journal of Remote Sensing, 17: 1201-1214.

Richter, R., 1996b. Atmospheric correction of satellite data with haze removal including a haze/clear transition region. Computers and Geosciences, 22: 675-681.

Richter, R., 1996c. Atmospheric correction of DAIS hyperspectral image data. Computers and Geosciences, 22: 785-793.

Tanre, D., Deschamps, P.Y., Devaux, C. y Herman, M., 1988. Estimation of Saharan aerosol optical thickness from blurring effects in thematic mapper data. Journal of Geophysical Research, 93: 15955-15964.

Tanre, D. y Legrand, M., 1991. On the satellite retrieval of Saharan dust optical thickness over land: two different approaches. Journal of Geophysical Research, 96: 5221-5227.

Teillet, P.N. y Fedosejevs, G., 1995. On the dark target approach to atmospheric correction of remotely sensed data. Canadian Journal of Remote Sensing, 21: 374-387.

Thome, K.J., 2001. Absolute radiometric calibration of Landsat 7 ETM+ using the reflectance-based method. Remote Sensing of Environment, 78: 27-38.

Verhoef, W., 1984. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: the SAIL model. Remote Sensing of Environment, 16: 125-141.

Vermote, E. F., Tanre, D., Deuze, J.L., Herman, M. y Morcrete, J.J., 1997. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: an overview. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 35: 675-686.

Wen, G., Tsay, S., Cahalan, R. y Oreopolus, L., 1999. Path radiance technique for retrieving aerosol optical thickness over land. Journal of Geophysical Research, 104: 31321-31332.

Yoshioka, H., Miura, T.; Huete, A.R. y Ganapol, B.D., 2000. Analysis of vegetation isolines in red-nir reflectance space. Remote Sensing of Environment, 74: 313-326.