

Correcciones atmosféricas relativas de imágenes de satélite: patrones invariantes y modelos atmosféricos

Relative atmospheric corrections of satellite images: invariant patterns and atmospheric models

Fernando Paz Pellat^{1‡}

¹ Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5. Montecillo, Texcoco, Edo. de México, México.

[‡] Autor responsable (ferpazpel@gmail.com)

RESUMEN

Para utilizar en forma confiable información obtenida con tecnología satelital, es necesario eliminar o disminuir los efectos perturbadores que se asocian con la información espectral que captan los sensores a bordo de las plataformas espaciales. En el presente trabajo se analiza la inversión de los modelos de radiación de la atmósfera, que consiste en determinar las constantes aditivas y multiplicativas por banda espectral, para realizar las correcciones atmosféricas necesarias. La metodología propone el uso de los patrones invariantes de las líneas del suelo y la vegetación densa, para la inversión de los modelos de radiación. Los resultados mostraron que, sin conocimiento del modelo atmosférico ni del tipo de aerosol, con el uso de datos de la línea del suelo fueron relativamente pobres (correlación baja) para la obtención de las constantes aditivas y multiplicativas de las inversiones atmosféricas, con problemas de soluciones múltiples en el proceso de inversión. Bajo condiciones similares, ocurrió lo mismo para las constantes aditivas con la línea de la vegetación densa, pero para las constantes multiplicativas, los resultados fueron favorables ($R^2 > 0.9$). A diferencia de lo anterior, con conocimiento del modelo atmosférico y del aerosol, las estimaciones de las constantes aditivas y multiplicativas resultaron altamente satisfactorias ($R^2 > 0.99$) en ambos casos. Para las inversiones de la línea del suelo sólo se usó una restricción de las dos disponibles. En conclusión, el uso de los patrones invariantes de las líneas del suelo permite establecer dos relaciones básicas para invertir las simulaciones de modelos de radiación de la atmósfera, previa compactación funcional, y se puede recurrir a mediciones en campo para que el proceso

de corrección atmosférica propuesto en el presente trabajo pueda considerarse en términos absolutos y no relativos.

Palabras clave: sensores remotos, patrones espectrales, líneas del suelo, línea de la vegetación densa, restricciones simples.

SUMMARY

To use information obtained with satellite technology reliably, it is necessary to eliminate or reduce the disruptive effects associated with the spectral information captured by sensors on space platforms. In this paper we analyze the inversion of radiative models of the atmosphere, which consists in determining the additive and multiplicative constants in each spectral band to make the necessary atmospheric corrections. The methodology proposes the use of invariant patterns of soil lines and dense vegetation for the inversion of radiative models. The results showed that, without knowledge of the atmospheric model or the type of aerosol, soil line data were relatively insufficient (low correlation) to obtain the additive and multiplicative constants of the atmospheric inversions, with problems of multiple solutions in the inversion process. Under similar conditions, the same was found for additive constants with the dense vegetation line, but for the multiplicative constants the results were favorable ($R^2 > 0.9$). In contrast, with the knowledge of the atmospheric model and the aerosol model, estimates of additive and multiplicative constants were highly satisfactory ($R^2 > 0.99$) in both cases. For soil line inversions, only one constraint of the two available was used. In conclusion, the use of invariant soil-line

Cita recomendada:

Paz, F. 2018. Correcciones atmosféricas relativas de imágenes de satélite: patrones invariantes y modelos atmosféricos. *Terra Latinoamericana* 36: 1-12. DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v36i1.228>

Recibido: enero de 2017. Aceptado: noviembre de 2017.
Publicado en *Terra Latinoamericana* 36: 1-12.

patterns allows us to establish two basic relationships to invert the radiative simulations of the atmosphere, prior to functional compaction, and field measurements can be made so that the proposed atmospheric correction process in this work can be considered in absolute and not relative terms.

Index words: *remote sensing, spectral patterns, soil lines, dense vegetation lines, simple restrictions.*

INTRODUCCIÓN

Para utilizar en forma confiable la tecnología satelital, resulta indispensable eliminar o disminuir los efectos perturbadores que se asocian con la información espectral que captan los sensores a bordo de las plataformas espaciales. Es necesario eliminar los efectos atmosféricos, los inherentes a la geometría sol-sensor y aquellos que resultan de la mezcla suelo-vegetación, por ser los de mayor impacto en la calidad de los datos o información contenida en las imágenes satelitales.

Los sensores satelitales pasivos captan la información producto de la trayectoria de los fotones que emite el sol. La trayectoria de la emisión y recepción de fotones define los elementos de perturbación atmosférica. La radiancia (radiación por banda espectral) que emite el sol, atraviesa la atmósfera terrestre y experimenta una distorsión por la absorción y reflexión de los fotones al chocar con las partículas y gases atmosféricos. Los fotones que atraviesan la atmósfera, a su vez chocan con los objetos terrestres (dispersión simple y múltiple) y viajan de regreso hacia la atmósfera, atravesándola de nuevo adicionando otras distorsiones, hasta que los sensores satelitales la captan. En esencia, la radiancia que capta el sensor se compone de dos elementos básicos: una constante aditiva que no contiene información sobre los objetos terrestres (radiancia de trayectoria) y una constante multiplicativa que es función de la transmisividad atmosférica. Por lo tanto, el reto de la corrección atmosférica consiste en determinar las constantes de la perturbación para recuperar la información relacionada con los objetos terrestres.

Los esquemas de corrección atmosférica que se utilizan comúnmente son: el de objetos invariantes (Moran *et al.*, 1992; Chávez, 1996; Fox *et al.*, 2003), el del objeto oscuro (Kaufman y Sendra, 1988; Teillet

y Fedosejevs, 1995; Kaufman *et al.*, 1997; Liang *et al.*, 1997; Wen *et al.*, 1999; Kaufman, 2002), el del ajuste de histogramas (Richter, 1996a y b) y el de reducción del contraste (Tanré *et al.*, 1988; Tanré y Legraud, 1991). Con excepción del método del objeto oscuro, que usa patrones de invariancia relativos, el resto se basa en hipótesis de invariancia absoluta de los objetos terrestres, por lo que su confiabilidad se limita a la validez de dicha hipótesis.

Aunado a lo anterior, para poder utilizarse, todos los métodos requieren de una identificación adecuada de los objetos terrestres, lo cual no siempre es posible. En especial, es importante identificar el suelo desnudo, la vegetación densa y los cuerpos de agua. De acuerdo con Palacios *et al.* (2006), la identificación de los objetos terrestres es posible a través de los índices y patrones de las firmas espectrales, que permiten caracterizarlos en forma adecuada.

Con base en lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue analizar la inversión de los modelos de radiación de la atmósfera, que consiste en determinar las constantes aditivas y multiplicativas por banda espectral, para realizar las correcciones atmosféricas necesarias, mediante los patrones invariantes de las líneas del suelo y la vegetación densa con las bandas espectrales del rojo (R) e infrarrojo cercano (IRC).

MATERIALES Y MÉTODOS

Simulaciones de Radiación Atmosféricas

Para analizar y validar los esquemas de corrección atmosférica se realizaron simulaciones de radiación de efectos atmosféricos sobre los patrones de la reflectancia de mezclas suelo-vegetación, reflejando experimentos controlados. Las simulaciones tuvieron las mismas características que los patrones reales de las imágenes de satélite, pero con datos controlados para poder validar los esquemas propuestos (de Haan *et al.*, 1993; Richter, 1996a, b y c; Liang *et al.*, 1997 y 2001; Thome, 2001).

Simulación del Efecto Atmosférico

El efecto atmosférico se modeló a través de un sistema de capas en paralelo, con una aproximación de medio turbio semi-infinito unidimensional (Chandrasekhar, 1960):

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

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

Las simulaciones del proceso de transferencia de radiación de la atmósfera se realizaron mediante el uso del modelo 6S (Vermote *et al.*, 1997), que se define como:

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

donde:

- τ_g = Transmisión total de gases
- ρ_{R+A} = Reflectancia de trayectoria (Rayleigh + Aerosoles)

El modelo 6S simula la absorción por los gases y la dispersión por aerosoles y moléculas (de Rayleigh), que son procesos atmosféricos de la radiancia solar que refleja el sistema suelo-vegetación, cuando la capta el sensor en una plataforma espacial. Si la absorción de los gases se desacopla de la dispersión, como cuando los agentes absorbentes se localizan por encima de las capas de absorción, la Ecuación (2) modela la transferencia de radiación para un píxel homogéneo Lambertiano 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 simplificarse, al quitar los argumentos angulares, quedando la Ecuación (3):

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

donde λ representa una banda espectral (R o IRC). La constante a es la radiancia de trayectoria y b es una

constante multiplicativa que considera la segunda parte del término de la derecha de la Ecuación (2).

Para analizar el esquema de corrección atmosférica se generaron, inicialmente, 82 944 simulaciones de radiación con el modelo 6S, variando los modelos atmosféricos y los tipos de aerosoles (Cuadro 1).

Las bandas espectrales que se usaron fueron las del sensor ETM+ (satélite LANDSAT 7), con 6 bandas, por lo que el ángulo cenital de visión fue de 0° (nadir). Los ángulos cenitales solares fueron 0°, 10°, 20°, 30°, 40°, 50°, 60° y 70°. No se contempló el efecto del acimut relativo sol-sensor, ya que las simulaciones no mostraron un efecto significativo de esta variable. La altitud varió de 0 a 5 km, en intervalos de 0.5 km. Las visibilidades atmosféricas fueron de 5, 7, 10, 25, 50, 100, 150 y 200 km. Para las simulaciones primero se dejó fijo el ángulo cenital solar, después se modificó la altitud y, para cada altitud, se cambió la visibilidad atmosférica. El proceso se realizó para cada aerosol y atmósfera particular.

Para una atmósfera dada (ángulo cenital solar y altitud fija), con el aerosol fijo, se analizó cada visibilidad atmosférica y se simuló la relación entre las bandas del R e IRC. La Ecuación (2) se utilizó para analizar el efecto de los cambios de las reflectancias de la mezcla suelo-vegetación, con variación de la banda del R de 5 a 25% (intervalos de 2.5%) y la banda del IRC de 5 a 50% (intervalos de 5%). La relación entre las reflectancias terrestres y aquellas con efecto atmosférico (para la visibilidad de interés) se examinó por regresión lineal, con la relación (3). El análisis mostró que el error asociado al uso de la Ecuación (3) fue menor al 4% (banda del IRC) en relación al uso de la Ecuación (2).

Cuadro 1. Atmósferas y aerosoles del modelo 6S.

Código 6S	Atmósfera	Código 6S	Aerosol
1	Tropical	1	Continental
2	Verano latitud media	2	Marítimo
3	Invierno latitud media	3	Urbano
6	E.U.A. Estándar 62	5	Desértico
		6	Quema de biomasa
		7	Estratosférico

Si se considera a las reflectancias terrestres (sin atmósfera) como parte de una escena satelital 1 y a las reflectancias con atmósfera como la escena satelital 2, para las bandas espectrales del R y del IRC, se puede establecer la relación (3):

$$R_2 = a_R + b_R R_1 \quad (4)$$

$$IRC_2 = a_{IRC} + b_{IRC} IRC_1 \quad (5)$$

donde los parámetros a y b se definen en función del modelo atmosférico y de aerosol que se use, para una visibilidad atmosférica, ángulo cenital solar y altitud dada. En general, las relaciones (4) y (5) son válidas si se considera la escena 1 con un efecto atmosférico diferente al de la escena 2, por lo que las relaciones pueden considerarse relativas a la atmósfera de la escena 1 de referencia o estándar.

Cabe señalar que sólo se incluyen y discuten los resultados de las simulaciones para las bandas del R e IRC, con una altitud máxima de 4 km. El subconjunto de simulaciones retenidas fue de 12 288, ya que el aerosol marítimo y el estratosférico no se analizaron en este trabajo, por enfocarse solo a la parte terrestre.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Simulación de la Reflectancia del Sistema Suelo-Vegetación

La Figura 1 muestra los patrones espectrales, en el espacio del R-IRC, para diferentes mezclas del sistema suelo-vegetación (Paz *et al.*, 2005), que se caracterizaron por el índice de área foliar (IAF). Los datos de la Figura 1 se obtuvieron con el modelo SAIL (Verhoef, 1984) de transferencia radiativa 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 fue de 30° y el de visión a nadir. Se usaron las reflectancias de cinco tipos diferentes de suelos para las mezclas.

Se observa en la Figura 1, que los suelos caen sobre una “línea de suelo” (Baret *et al.*, 1993) que se define como:

$$IRC = a_s + b_s R \quad (6)$$

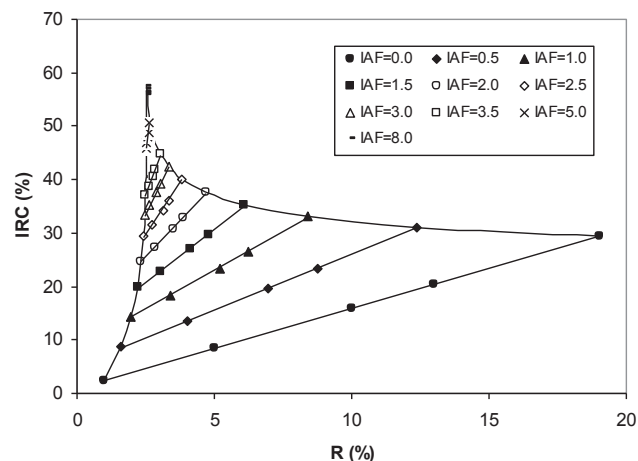


Figura 1. Patrones espectrales de la mezcla suelo-vegetación. R = rojo; IRC = infrarrojo cercano; IAF = índice de área foliar.

donde el subíndice s es por suelo. En lo general, si una región (imagen satelital) tiene suelos con propiedades ópticas diferentes y que no se ajustan a una sola línea del suelo, es posible segmentar una imagen de satélite y definir dos o más líneas del suelo. Evidentemente el uso de líneas del suelo se fundamenta en la existencia de suelo desnudo en una imagen satelital y que puedan ser fácilmente identificados (Fox *et al.*, 2003 y 2004; Palacios *et al.*, 2006). En el caso de no existir suelo desnudo, como se discute más adelante, es posible utilizar la vegetación densa (cultivos o vegetación natural) (Palacios *et al.*, 2006) para utilizar la metodología propuesta en este trabajo.

En la misma Figura 1 se observa, que los patrones espectrales de la mezcla suelo-vegetación, con igual IAF, son lineales (líneas iso-IAF), lo que coincide con las verificaciones experimentales de otros autores (Huete *et al.*, 1985; Price, 1992 con datos de Huete y Jackson, 1987; Bausch, 1993; Gilabert *et al.*, 2002; Meza Díaz y Blackburn, 2003) y, a través de modelos de transferencia radiativa (Richardson y Wiegand, 1991; Baret y Guyot, 1991; Qi *et al.*, 1994; Yoshioka *et al.*, 2000).

Para un IAF dado, la curva iso-IAF, se puede aproximar por:

$$IRC = a_0 + b_0 R \quad (7)$$

donde a_0 y b_0 son parámetros que dependen del IAF, la cobertura de la vegetación, las propiedades ópticas de las hojas, el suelo de fondo y de la arquitectura de las plantas.

Para un mismo suelo como fondo de un cultivo, la curva iso-Suelo en la Figura 1 muestra un patrón no-lineal (curvas envolventes que se asocian al suelo más claro y al más oscuro). A la envolvente de la Figura 1 se le llama “sombrero de tres picos” o “Tasseled Cap” (Kauth y Thomas, 1976).

Dado que los patrones de la Figura 1 son lineales, conservan esta propiedad cuando se transforman linealmente, Ecuación (3), como resultado de los efectos atmosféricos (Figura 2). Por lo tanto, la invariancia en los patrones de las reflectancias para el suelo y las mezclas suelo-vegetación, que incluye la vegetación densa (Figura 3), es la que se usa en este trabajo.

Las simulaciones que se muestran en las Figuras 2 y 3, caso con atmósfera, corresponden a un modelo atmosférico de verano, latitud media, aerosol continental, con una visibilidad de 10 km, ángulo cenital solar de 30°, altitud a nivel del mar (0 km), con valores de $a_s = 1.0$ y $b_s = 1.5$.

Los patrones de las Figuras 2 y 3 son similares para otras configuraciones, lo que denota que los efectos atmosféricos tienden a modificar la cantidad de vegetación terrestre, por lo que reducen en forma artificial el índice de área foliar (cantidad de vegetación).

Compactación Funcional de las Simulaciones Atmosféricas

En un enfoque clásico de inversión de la transferencia de radiación atmosférica, los valores de reflectancia que se observan a nivel exo-atmosférico (satélites) son comparados con simulaciones de radiación atmosféricas

en matrices de búsqueda, por lo que pueden extraerse las simulaciones que cumplen con alguna condición de mérito impuesta (p. ej. error cuadrático mínimo), de tal manera que el modelo atmosférico (y tipo de aerosol) a invertir (quitar el efecto atmosférico) es función de las observaciones. Más allá de que este problema tiene una solución de “muchos a uno”, tal como se discute más adelante, la búsqueda es muy lenta para realizarse en tiempo real. Una alternativa, por lo tanto, es compactar las simulaciones de radiación mediante el uso de las simetrías que conlleva la función de transferencia de radiación.

Un primer paso para compactar en forma funcional las simulaciones, es establecer relaciones entre los parámetros de las Ecuaciones (4) y (5), en forma independiente de las visibilidades atmosféricas. Así, al considerar un ángulo cenital solar, una altitud, un modelo atmosférico y un aerosol como fijos, además de las visibilidades atmosféricas (8 datos) como puntos comunes, se pueden establecer las siguientes relaciones:

$$b_{IRC} = A_1 + B_1 b_R \quad (8)$$

$$b_R = A_2 + B_2 a_R \quad (9)$$

$$b_{IRC} = A_3 + B_3 a_{IRC} \quad (10)$$

$$a_{IRC} = A_4 + B_4 a_R \quad (11)$$

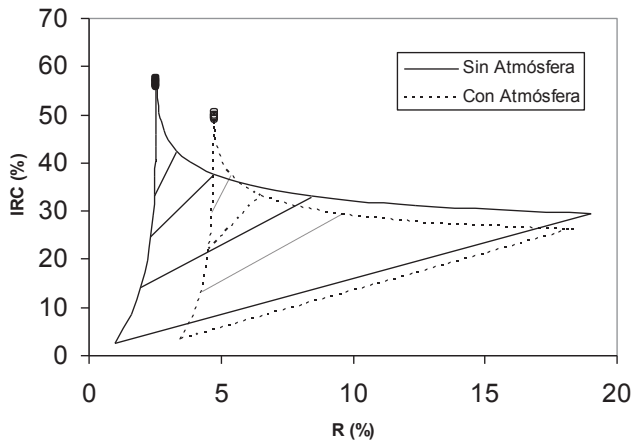


Figura 2. Patrones espectrales de la mezcla suelo-vegetación, con y sin atmósfera. R = rojo; IRC = infrarrojo cercano.

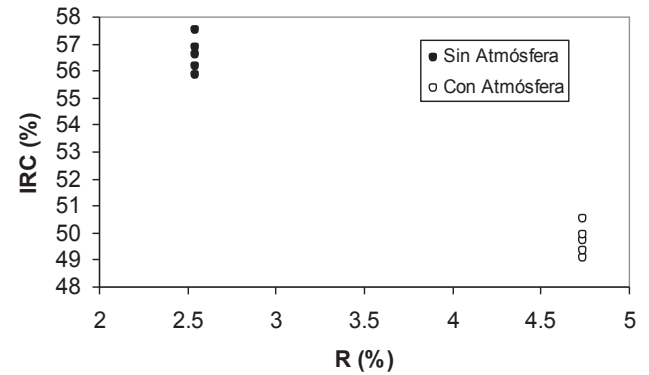


Figura 3. Línea de la vegetación densa (IAF = 8), con y sin atmósfera. R = rojo; IRC = infrarrojo cercano.

Las Figuras 4, 5, 6 y 7, muestran los ajustes que se realizaron para un ángulo cenital solar (θ_s) = 0, Altitud (Alt) = 0, Atmósfera (Atm) = 1 y Aerosol (Aero) = 1. Destaca el hecho de que el ajuste resulta óptimo ($R^2 > 0.99$) y similar en todos los casos.

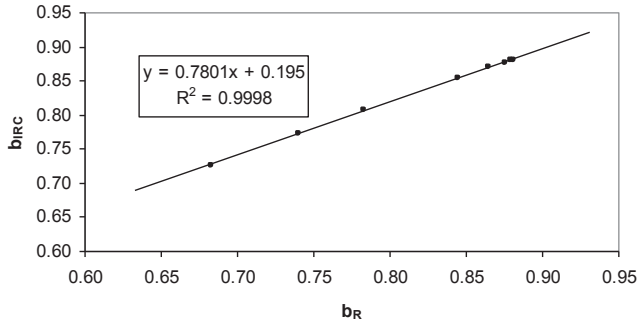


Figura 4. Ajuste experimental para determinar A_1 y B_1 . (Definidos en las ecuaciones 8 a 11).

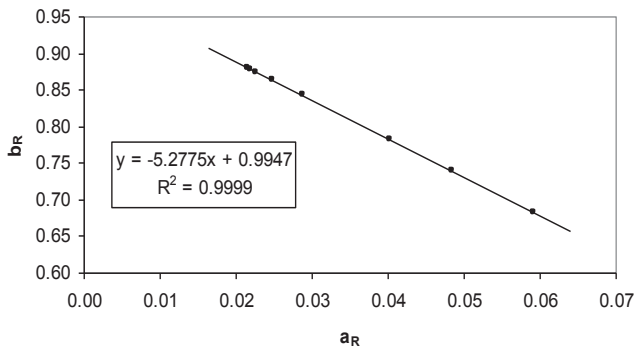


Figura 5. Ajuste experimental para determinar A_2 y B_2 . (Definidos en las ecuaciones 8 a 11).

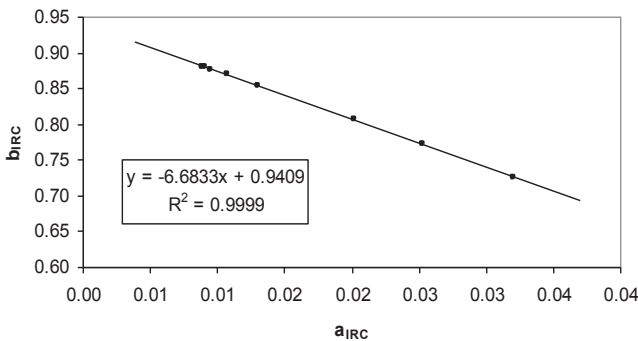


Figura 6. Ajuste experimental para determinar A_3 y B_3 . (Definidos en las ecuaciones 8 a 11).

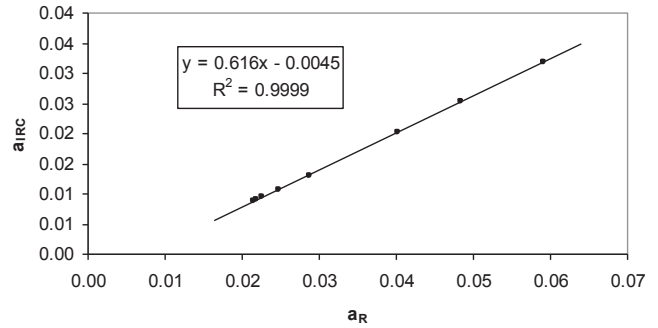


Figura 7. Ajuste experimental para determinar A_4 y B_4 . (Definidos en las ecuaciones 8 a 11).

Los parámetros A_i y B_i , $i=1, 2, 3, 4$ que se determinaron para las condiciones atmosféricas dadas, con el modelo atmosférico y el aerosol fijos, se pueden compactar en:

$$A_i \text{ o } B_i = k_{1,i} + k_{2,i}\theta_s + k_{3,i}Alt + k_{4,i}\theta_s^2 + k_{5,i}Alt^2 + k_{6,i}\theta_s^3 + k_{7,i}Alt^3 \quad (12)$$

De tal manera que para las condiciones descritas, es posible estimar los parámetros de las relaciones (8) a (11) y únicamente se almacena una matriz de 8×7 (8 parámetros y 7 valores del polinomio) por combinación del modelo atmosférico y el aerosol.

En las Figuras 8 y 9 se puede observar que hay un excelente ajuste del polinomio que se usó para ajustar los parámetros con $Atm = 6$ y $Aero = 6$.

Para el resto de los parámetros que se modelaron se obtuvieron ajustes similares ($R^2 > 0.99$); con excepción del parámetro B_2 . Para la $Atm = 6$ y $Aero = 6$ (parámetro B_2), la Figura 10 muestra que el modelo polinómico no se comporta adecuadamente en términos de estimación. Esto sucede para todos los casos del aerosol 6 (quema de biomasa).

Inversión del Modelo de Radiación Atmosférico Compacto

Con la finalidad de utilizar los patrones invariantes definidos por Paz *et al.* (2006), que parcialmente desarrolló en forma independiente Atzberger (1995), la compactación funcional de las simulaciones de radiación se resolvió para los parámetros de las relaciones (8) a (11) y no en función de las visibilidades atmosféricas, como usualmente se hace.

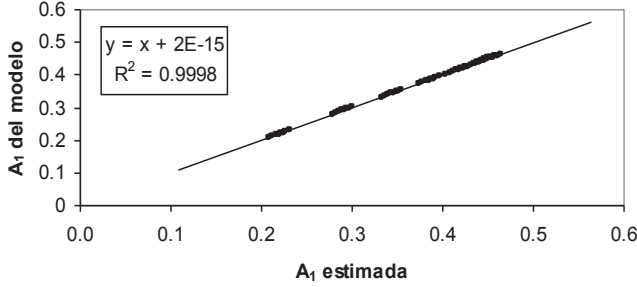


Figura 8. Ajuste del polinomio que se usó para estimar el parámetro A_1 . (Ecuación 12).

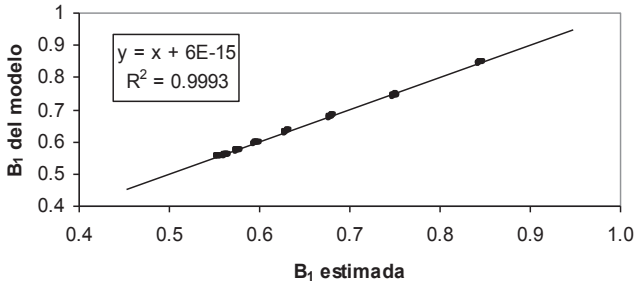


Figura 9. Ajuste del polinomio que se usó para estimar el parámetro B_1 . (Ecuación 12).

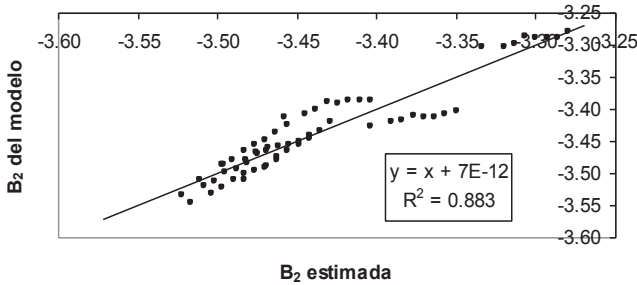


Figura 10. Ajuste del polinomio usado para estimar el parámetro B_2 . (Ecuación 12).

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

Patrones Invariantes de las Líneas del Suelo

Bajo el supuesto de que las líneas del suelo en las dos escenas están dadas por:

$$IRC_1 = a_{s1} + b_{s1}R_1 \tag{13}$$

$$IRC_2 = a_{s2} + b_{s2}R_2 \tag{14}$$

(donde el subíndice 1 se refiere a la escena 1 y el subíndice 2 a la escena 2), si se sustituyen las Ecuaciones (4) y (5) en la Ecuación (14) y el resultado se compara en relación con la Ecuación (13), las Ecuaciones (15) y (16) conforman los requerimientos básicos que deben cumplirse si se hace un proceso de búsqueda en matrices de efectos atmosféricos simulados, con sólo el uso de las líneas del suelo (Paz *et al.*, 2006).

$$\frac{b_{s2}}{b_{s1}} = \frac{b_{IRC}}{b_R} \tag{15}$$

$$a_{IRC} = (a_{s2} - a_{s1} b_{IRC}) + b_{s2} a_R \tag{16}$$

Patrones Invariantes de las Líneas de la Vegetación Densa

La Figura 3 muestra que la curva iso-IAF para vegetación densa corresponde a una línea recta vertical. Dado que el promedio de un conjunto de líneas verticales es una línea vertical, se puede usar esta propiedad para analizar la vegetación densa de una zona agrícola, si se consideran los mismos datos (píxeles) de vegetación densa de la escena 1, en la escena 2. Si se representa la línea recta R de la escena 1, la Ecuación queda como:

$$R_1 = R_{c1} \tag{17}$$

donde R_{c1} representa el valor promedio de saturación de la banda del rojo.

De acuerdo con Paz *et al.* (2006), al incluir el efecto atmosférico, Ecuación (4), en la Ecuación (17), se tiene:

$$a_R = R_{c2} - b_R R_{c1} \tag{18}$$

Esta ecuación define el requerimiento básico que debe cumplirse si se realiza la búsqueda en matrices de efectos atmosféricos simulados, mediante uso de las líneas de vegetación densa.

Inversión Genérica de Modelos de Radiación de la Atmósfera

De las relaciones (8 a 11) que se establecen para distintos modelos atmosféricos y aerosoles, la inversión del modelo de transferencia de radiación de la atmósfera, sin especificar ninguna información, sigue el algoritmo que se describe a continuación:

Líneas del Suelo

- Se estiman los parámetros de las líneas del suelo a partir de una imagen de referencia (con o sin atmósfera), así como en aquella que se desea estandarizar a la de referencia (mismos efectos atmosféricos).
- Se definen el ángulo cenital solar y la altitud, información que está disponible en las imágenes satelitales y en los modelos de elevación del terreno.
- Se estima $b_x = b_{IRC}/b_R$ con la relación (15). En consecuencia, la intersección de esta relación con la relación (8), que corresponde a la solución que se busca, estará dada por:

$$b_R = \frac{A_1}{b_x - B_1} \quad (19)$$

- Se usa el valor de b_R , que se calcula a partir de (19), para estimar b_{IRC} con la relación (15).
- Se puede estimar a_{IRC} si se despeja de la relación (10).
- Se puede estimar a_R de la relación (9), al despejarla, siempre que se establezca un parámetro B_2 estadísticamente confiable. Cuando la relación (9) sea pobre o no esté definida, se puede usar la estimación de a_{IRC} para calcular a_R , con la relación (11), despejándola.
- Se estiman las reflectancias sin atmósfera o para la atmósfera de referencia, con conocimiento de los parámetros de las relaciones (4) y (5).

Líneas de la Vegetación Densa

De las relaciones (8) a (11) que se establecieron para distintos modelos atmosféricos y aerosoles, la inversión del modelo de transferencia de radiación de la atmósfera, sin especificar información alguna, sigue el algoritmo:

- Se estiman los parámetros de las líneas de la vegetación densa, tanto en una imagen de referencia

(con o sin atmósfera), como en aquella que se desea estandarizar a la primera (con los mismos efectos atmosféricos).

- Se define el ángulo cenital solar y la altitud que se van a utilizar. Esta información está disponible en las imágenes satelitales y en los modelos de elevación del terreno.

- Se estima b_R (para el caso de no aerosoles) con la relación (18). La intersección de esta nueva relación, con la (9), corresponderá a la solución que se busca y estará dada por (con $R_{c1} = 2.54\%$, en nuestro caso):

$$a_R = \frac{R_{c2} - A_2 R_{c1}}{1 + B_2 R_{c1}} \quad (20)$$

- Se utiliza el valor de a_R , que previamente se estimó con (20), para calcular b_R , al despejar la relación (18).
- Se estima a_{IRC} con la relación (11).
- Se estima b_{IRC} con la relación (8).
- Se estiman las reflectancias, sin atmósfera o para la atmósfera de referencia, con previo conocimiento de los parámetros de las relaciones (4) y (5).

Inversiones Mediante el Uso de las Líneas del Suelo

De acuerdo con los resultados, las inversiones mediante líneas de suelo resultan relativamente pobres al estimar a_R (Figura 11) y b_R (Figura 12), cuando se usa la base original de simulaciones atmosféricas (12 288). Lo anterior puede atribuirse, principalmente, a que existen soluciones múltiples al sistema de relaciones condicionantes de búsqueda, relaciones (15) y (16), lo que implica que existen combinaciones de modelos atmosféricos y aerosoles que generan prácticamente los mismos resultados.

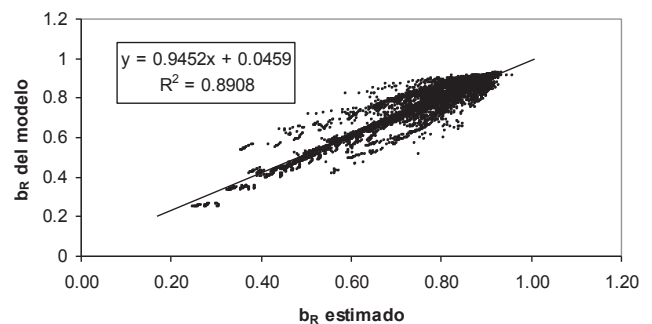


Figura 11. Estimaciones genéricas de b_R , líneas del suelo. (Ecuaciones 19 y 20).

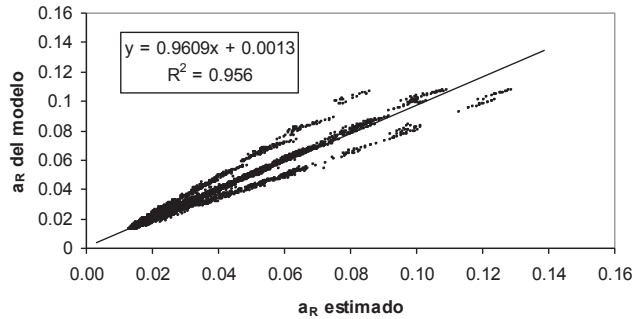


Figura 12. Estimaciones genéricas de a_R , líneas del suelo. (Ecuaciones 19 y 20).

Otra razón para explicar el pobre ajuste que se encontró, es que a_R y b_R se despejaron de otras relaciones, lo que produce un sesgo de estimación. Dicho sesgo puede evitarse al analizar la base de simulaciones de radiación y usar relaciones directas de los parámetros. Finalmente, otro error de estimación es el que se relaciona con el modelo polinómico, mismo que también puede minimizarse. Es importante señalar, que la estimación de (b_{IRC}/b_R) , relación (15), conlleva un mínimo de error: el que se asocia a la estimación de la pendiente de las líneas del suelo.

Inversiones Mediante el Uso de las Líneas de la Vegetación Densa

Para el caso de los patrones de las líneas de la vegetación densa, se usaron 5376 simulaciones para invertir en forma genérica el modelo radiativo atmosférico, sin considerar el aerosol 6, quema de biomasa.

Los resultados, Figura 13, muestran una relación casi perfecta, lo cual se debió a que b_R se estimó en forma directa y sólo conlleva el error que se asocia al cálculo de A_2 y B_2 .

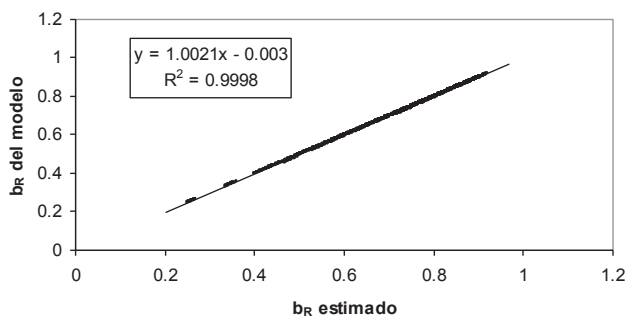


Figura 13. Estimaciones genéricas de b_R , líneas de la vegetación densa. (Ecuaciones 18 y 20).

Por otra parte, las estimaciones de b_{IRC} , mostraron ajustes buenos, producto de la óptima estimación de b_R (Figura 14), pero en el caso de las estimaciones de a_R y b_{IRC} (no se muestran los resultados), las estimaciones fueron pobres, lo cual puede atribuirse al inconveniente de decidir qué modelo atmosférico y qué aerosol usar.

Inversión Particular de Modelos de Radiación de la Atmósfera

Cuando se cuenta con información sobre el modelo atmosférico y aerosol a invertir, la solución es similar al caso de la inversión genérica, pero se utilizan solo las relaciones que corresponden al modelo atmosférico y aerosol que se definan.

Inversiones Mediante el Uso de las Líneas del Suelo

Las inversiones particulares de todos los modelos atmosféricos y aerosoles muestran que, para el caso de b_R (Figura 15) y a_R (Figura 16), las estimaciones fueron muy buenas ($R^2 > 0.98$) y los errores de estimación pueden atribuirse a las causas que se discutieron para las inversiones genéricas, en las que ahora las soluciones son únicas.

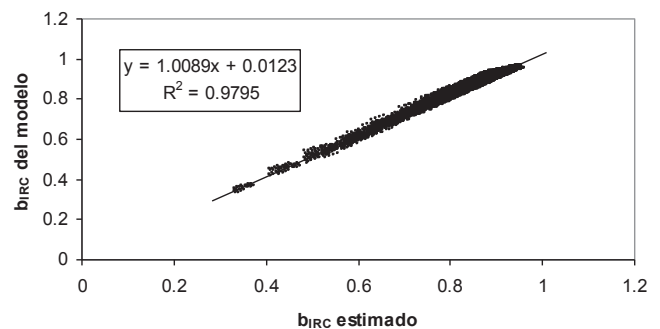


Figura 14. Estimaciones genéricas de b_{IRC} , líneas de la vegetación densa. (Ecuaciones 18 y 20).

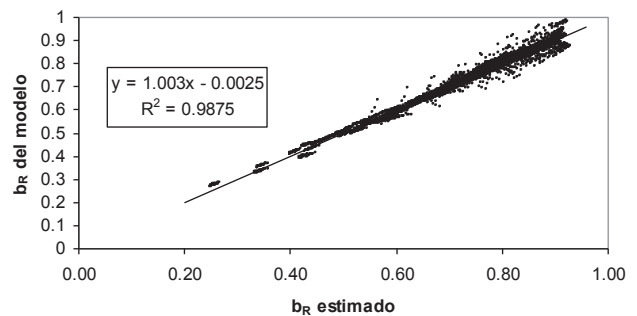


Figura 15. Estimaciones particulares de b_R , líneas del suelo. (Ecuaciones 19 y 20).

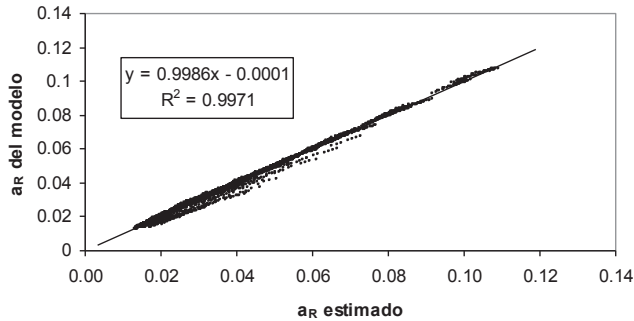


Figura 16. Estimaciones particulares de a_R , líneas del suelo. (Ecuaciones 19 y 20).

El problema del conocimiento del modelo atmosférico y del aerosol, puede aproximarse con información de perfiles atmosféricos por regiones del país, ya que se define el modelo más probable para esa región. En el caso de México, existe una base de perfiles atmosféricos que se puede utilizar para tal fin (CONAGUA, 1999). Adicionalmente, se pueden desarrollar esquemas iterativos de búsqueda mediante información satelital y la revisión de su congruencia.

Existen distintos métodos para realizar una validación cruzada de los modelos atmosféricos definidos *a priori*, que consideran el uso de diferentes condiciones de los patrones de crecimiento generales de la vegetación, para realizar estimaciones. Su pertinencia se discute en Paz *et al.* (2006).

Inversiones Mediante el Uso de las Líneas de la Vegetación Densa

Dado que, cuando se usan las líneas de la vegetación densa, las inversiones de b_R y b_{IRC} tienen muy poco error en las inversiones particulares, se muestran únicamente las estimaciones a_R y a_{IRC} (Figuras 17 y 18,

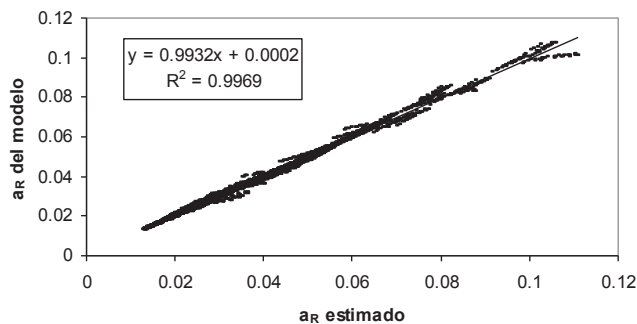


Figura 17. Estimaciones particulares de a_R , líneas de la vegetación densa. (Ecuaciones 18 y 20).

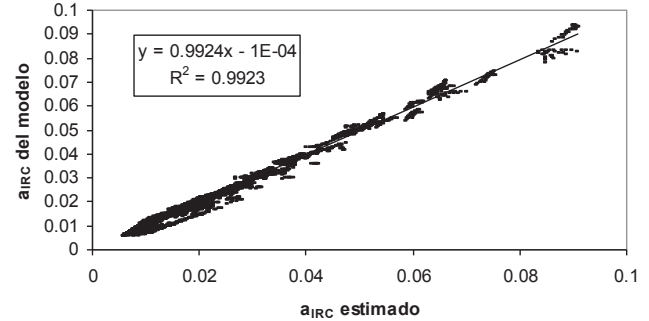


Figura 18. Estimaciones particulares de a_{IRC} , líneas de la vegetación densa. (Ecuaciones 19 y 20).

respectivamente), para las que, en general, la inversión del modelo atmosférico es aceptable ($R^2 > 0.99$).

CONCLUSIONES

- El uso de simulaciones de modelos de radiación atmosférica y del sistema suelo-vegetación en este trabajo se fundamenta en considerar modelos atmosféricos y tipos de aerosol múltiples, más allá de analizar casos especiales relacionados con una o varias imágenes satelitales. En esta perspectiva, la propuesta es operativa y genérica y sigue metodologías similares usadas en las publicaciones relacionadas, considerando que los modelos de radiación utilizados han sido validados con mediciones y mostraron ser adecuados para representar la realidad de los procesos analizados.
- El uso de los patrones invariantes de las líneas del suelo permite establecer dos relaciones básicas para invertir las simulaciones de radiación de la atmósfera, previa compactación funcional.
- La definición del modelo atmosférico y del aerosol reduce fuertemente la incertidumbre asociada a las estimaciones, ya que disminuye el error que se asocia a las relaciones del algoritmo de inversión.
- Cuando se conoce el modelo atmosférico y aerosol, se genera un error debido a la estimación de las relaciones funcionales que se usan para compactar las simulaciones de radiación que sirven de base.
- Finalmente, para que el proceso de corrección atmosférica propuesto se considere en términos absolutos y no relativos, se sugiere realizar mediciones en campo con un espectroradiómetro, sobre los suelos desnudos de un área que presente esta condición en una imagen satelital, de tal modo que los parámetros que se estiman de la línea del suelo, sin atmósfera, pueden servir como base.

LITERATURA CITADA

- Atzberger, C. 1995. The spectral correlation concept: an effective new image-based atmospheric correction methodology over land surfaces. pp. 125-132. *In*: E. Parlow (ed.). *Progress in Environmental Remote Sensing Research and Applications: Proceedings of the 15th EARSeL symposium*, Basel, Switzerland. CRC Press. ISBN-13: 978-9054105985.
- Baret, F. and G. Guyot. 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sens. Environ.* 35: 161-173.
- Baret, F., S. Jacquemoud, and J. F. Hanocq. 1993. The soil line concept in remote sensing. *Remote Sens. Rev.* 7: 65-82.
- Bausch, W. C. 1993. Soil background effects on reflectance based crop coefficients for corn. *Remote Sens. Environ.* 46: 213-222.
- Chandrasekhar, S. 1960. *Radiative transfer*. Dover Publications, INC. New York, NY, USA.
- Chávez, P. Jr. 1996. Image-based atmospheric corrections - revisited and improved. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 62: 1025-1036
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 1999. *Disco compacto sondeos atmosféricos, perfiles verticales de parámetros meteorológicos, base histórica nacional (1948-1998)*. Gerencia del Servicio Meteorológico Nacional. Quintas, I. (ed). Instituto Mexicano del Agua. México, D. F.
- de Haan, J. F., J. W. Hovenier, J. M. M. Kokke, and H. T. C. van Stokkon. 1993. Removal of atmospheric influences on satellite-borne imagery: A radiative transfer approach. *Remote Sens. Environ.* 37: 1-21.
- Fox, G. A., G. J. Sabbagh, and S. W. Searly. 2003. Radiometric normalization of multi-temporal images based on image soil lines. *Trans. ASAE* 46: 851-859.
- Fox, G. A., G. J. Sabbagh, S. W. Searcy, and C. Yang. 2004. An automated soil line identification routine for remotely sensed images. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 1326-1331.
- 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. USDA. Weslaco, TX, USA.
- Gilabert, M. A., J. González-Piqueras, F. J. García-Haro, and J. Meliá. 2002. A generalized soil-adjusted vegetation index. *Remote Sens. Environ.* 82: 303-310.
- Huete, A. R., R. D. Jackson, and D. F. Post. 1985. Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. *Remote Sens. Environ.* 17: 37-53.
- Huete, A. R. and R. D. Jackson. 1987. Suitability of spectral indices for evaluating vegetation characteristics on rangelands. *Remote Sens. Environ.* 23: 213-232.
- Kaufman, Y. J., N. Gobron, B. Pinty, J. L. Widlowski, and M. M. Verstraete. 2002. Relationship between surface reflectance in the visible and mid-IR used in MODIS aerosol algorithm - theory. *Geophys. Res. Lett.* 29: 2116-2119.
- Kaufman, Y. J., A. Wald, L. A. Remer, B. C. Gao, R. R. Li, and L. Flynn. 1997. Remote sensing of aerosol over the continents with the aid of a 2.2 μm channel. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 35: 1286-1298.
- Kaufman, Y. J. and C. Sendra. 1988. Automatic atmospheric correction to visible and near-IR satellite imagery. *Int. J. Remote Sens.* 9: 1357-1381.
- Kauth, R. J. and G. S. Thomas. 1976. The tasseled cap--A graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. pp. 4B41-4B51. *In*: *Proceedings of the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data*. IEEE Catalog no. 76CH1103-1 MPRSD. Purdue University. West Lafayette, IN, USA.
- Liang, G. S., H. Fallah-Adl, S. Kalluri, J. JaJa, Y. Kaufman, and J. Townshend. 1997. Development of an operational atmospheric correction algorithm for TM imagery. *J. Geophys. Res.* 102: 17173-17186.
- Liang, G. S., H. Fang, and M. Chen. 2001. Atmospheric correction of Landsat ETM+ land surface imagery - Part I: Methods. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 39: 2490-2498.
- Meza Díaz, B. and G. A. Blackburn. 2003. Remote sensing of mangrove biophysical properties: Evidence from a laboratory simulation of the possible effects of background variation on spectral indices. *Int. J. Remote Sens.* 24: 53-75.
- Moran, S., R. D. Jackson, P. N. Slater, and P. N. Teillet. 1992. Evaluating of simplified procedures for retrieval of land surface reflectance factors from satellite sensor output. *Remote Sens. Environ.* 41: 169-182.
- Palacios S., L. A., F. Paz P., J. L. Oropeza M., B. Figueroa S., M. Martínez M., C. A. Ortiz S. y A. Exebio G. 2006. Clasificador genérico de objetos en imágenes ETM+ imágenes. *Agrociencia* 40: 613-626.
- Paz, F., E. Palacios, E. Mejía, M. Martínez y L. A. Palacios. 2005. Análisis de los espacios espectrales de la reflectividad del follaje de los cultivos. *Agrociencia* 39: 293-301.
- Paz, F., E. Palacios, L. A. Palacios, L. Tijerina y E. Mejía. 2006. Correcciones atmosféricas usando patrones invariantes en el espacio del rojo e infrarrojo cercano. *Rev. Latinoam. Recur. Nat.* 2: 3-16.
- Price, J. C. 1992. Estimating vegetation amount from visible and near infrared reflectances. *Remote Sens. Environ.* 41:29-34.
- Qi, J., A. Chehbouni, A. R. Huete, Y. H. Kerr, and S. Sorooshian. 1994. A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sens. Environ.* 48: 119-126.
- Richardson, A. J. and C. L. Wiegand. 1991. Comparison of two models for simulating the soil vegetation composite reflectance of a developing cotton canopy. *Int. J. Remote Sens.* 11: 447-459.
- Richter, R. 1996a. A spatially adaptive fast atmospheric correction algorithm. *Int. J. Remote Sens.* 17: 1201-1214.
- Richter, R. 1996b. Atmospheric correction of satellite data with haze removal including a haze/clear transition region. *Comput. Geosci.* 22: 675-681.
- Richter, R. 1996c. Atmospheric correction of DAIS hyperspectral image data. *Comput. Geosci.* 22: 785-793.
- Tanré, D., P. Y. Deschamps, C. Devaux, and M. Herman. 1988. Estimation of Saharan aerosol optical thickness from blurring effects in thematic mapper data. *J. Geophys. Res.* 93: 15955 15964.
- Tanré, D. and M. Legraud. 1991. On the satellite retrieval of Saharan dust optical thickness over land: Two different approaches. *J. Geophys. Res.* 96: 5221-5227.

- Teillet, P. M. and G. Fedosejevs. 1995. On the dark target approach to atmospheric correction of remotely sensed data. *Can. J. Remote Sens.* 21: 374-387.
- Thome, K. J. 2001. Absolute radiometric calibration of Landsat 7 ETM+ using the reflectance-based method. *Remote Sens. Environ.* 78: 27-38.
- Verhoef, W. 1984. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: The SAIL model. *Remote Sens. Environ.* 16: 125-141.
- Vermote, E. F., D. Tanré, J. L. Deuze, M. Herman, and J. J. Morcrette. 1997. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: An overview. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 35: 675-686.
- Wen, G., S. Tsay, R. F. Cahalan, and L. Oreopoulos. 1999. Path radiance technique for retrieving aerosol optical thickness over land. *J. Geophys. Res.* 104: 31321-31332.
- Yoshioka, H., T. Miura, A. R. Huete, and B. D. Ganapol. 2000. Analysis of vegetation isolines in red-nir reflectance space. *Remote Sens. Environ.* 74: 313-326.