

Corrector atmosférico en imágenes Landsat

Atmospheric corrector in Landsat images

Luis Alberto Palacios Sánchez¹, Fernando Paz Pellat^{1‡}, José Luis Oropeza Mota¹,
Benjamín Figueroa Sandoval¹, Mario Martínez Menez¹,
Carlos A. Ortiz Solorio¹ y Adolfo Exebio García¹

¹ Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. 56230 Montecillo, Estado de México, México.

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

RESUMEN

Los efectos atmosféricos en las imágenes satelitales distorsionan la información disponible y originan errores en la estimación de las variables biofísicas provenientes de los datos espectrales. En este trabajo se desarrolló un algoritmo de corrección atmosférica que se basó en la correlación existente entre la reflectancia de la banda 7 (infrarrojo medio, 2.2 μm) y la banda 1 (Azul, 0.485 μm) de la vegetación, para los sensores TM y ETM+. La ordenada al origen de la regresión entre la banda 7 y la banda 1 de imágenes Landsat es un estimador de la reflectancia de trayectoria en la banda 1. Con esta reflectancia de trayectoria y un modelo de atmósfera y aerosol definido, es posible estimar el espesor óptico de los aerosoles centrado en 0.55 μm . El algoritmo se apoyó en el acoplamiento de varios modelos de simulación y bibliotecas de datos espectrales para la representación del sistema óptico suelo-vegetación-atmósfera. La vegetación en una imagen se identifica mediante un clasificador genérico de objetos en cuatro variantes: oscura densa, cobertura alta, media y baja. El algoritmo se probó en dos fases, la primera se basó en un análisis empírico sobre los resultados de la simulación del sistema óptico suelo-vegetación-atmósfera, en el que se tenían condiciones controladas. En la segunda fase se validó el algoritmo con 7 imágenes ETM+ cuyas escenas contenían un sitio de la red robótica de aerosoles (AERONET), la cual mide con gran precisión el espesor óptico de los aerosoles en diferentes intervalos de longitud de onda. El análisis de los resultados mostró que el corrector

estima el espesor óptico de la escena con un ajuste: $R^2 = 0.97$, error típico de 0.059 (20.3%) y que representa bien la variabilidad espacial de carga de aerosoles en imágenes Landsat.

Palabras clave: *radiancia de trayectoria, aerosoles, simulaciones de transferencia de radiación, espesor óptico.*

SUMMARY

Atmospheric effects in satellite imagery distort the available information and generate errors in the estimation of biophysical variables from spectral data. An atmospheric correction algorithm was developed based on the correlation between the reflectance of band 7 (medium infrared, 2.2 μm) and band 1 (Blue, 0.485 μm) of vegetation, for TM and ETM+ sensors. The intercept of the regression between band 7 and band 1 of Landsat imagery is an estimator of path reflectance in band 1. With this path reflectance and a defined atmosphere and aerosol model, it is possible to estimate the optical thickness of aerosols centered at 0.55 μm . The algorithm was based on coupling of several simulation models and spectral data libraries to represent the soil-vegetation-atmosphere optical system. Vegetation in an image is identified by a generic object classifier in four vegetation variants: dark dense, high, medium and low coverage. The algorithm was evaluated in two phases, the first was based on empirical analysis of the results of the simulation of the soil-vegetation-atmosphere optical system, in which

Cita recomendada:

Palacios Sánchez, L. A., F. Paz Pellat, J. L. Oropeza Mota, B. Figueroa Sandoval, M. Martínez Menez, C. A. Ortiz Solorio y A. Exebio García. 2018. Corrector atmosférico en imágenes Landsat. *Terra Latinoamericana* 36: 309-321.

DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v36i4.232>

Recibido: febrero de 2018. Aceptado: julio de 2018.

Publicado en *Terra Latinoamericana* 36: 309-321.

controlled conditions were maintained. In the second phase, the algorithm was validated with 7 ETM + images whose scenes contained a site of the aerosol robotic network (AERONET), which accurately measures the optical thickness of aerosols in different wavelengths. The analysis of results showed that the corrector estimates the optical thickness of the scene with good adjustment: $R^2 = 0.97$, Root Mean Squared Error of 0.059 (20.3%) and represents well the spatial variability of aerosol load in Landsat imagery.

Index words: *path radiance, aerosols, radiative simulations, optical thickness.*

INTRODUCCIÓN

Las imágenes que provienen de sensores ubicados en satélites captan muestras del espectro electromagnético que emite el Sol; esta radiación electromagnética recorre el espacio hacia la Tierra, en la cual se refleja o emite en otras longitudes de onda. Sin embargo, la atmósfera de la Tierra no es completamente transparente, ya que los gases existentes en ella, como el vapor de agua, O_2 , O_3 , CH_4 , CO_2 , N_2O , principalmente, absorben y dispersan la radiación en diferentes longitudes de onda. Adicionalmente, los aerosoles suspendidos en la atmósfera, absorben y dispersan la luz en longitudes de onda que dependen del tamaño de las partículas en suspensión (Vermote *et al.*, 1997).

La distribución de los gases atmosféricos es más o menos uniforme en una imagen del tamaño que captan los sensores TM5 y ETM+, aunque puede variar el contenido de vapor de agua y ozono en relación con el tiempo. Los aerosoles pueden tener una variación espacial y temporal significativa en las imágenes Landsat, lo que depende de los fenómenos que los producen, los cuales pueden ser antropogénicos o naturales. Esta variación de la turbidez atmosférica ocasiona que las firmas espectrales de objetos terrestres o índices de vegetación de una imagen presenten cambios importantes (Kaufman y Tanré, 1996), los cuales son fuente de errores no atribuibles a los sensores.

El efecto atmosférico es el cambio en la intensidad de radiación en una longitud de onda particular por efecto de la absorción y dispersión que ocasionan las moléculas y aerosoles presentes en la atmósfera.

La absorción es el proceso mediante el cual la energía radiante incidente se transforma en otro tipo de energía, o en energía de otra frecuencia, por las moléculas gaseosas y partículas suspendidas en el aire. La dispersión es el proceso mediante el cual la energía incidente reaparece en otras direcciones como radiación dispersa, por la interacción con moléculas y partículas de la atmósfera (Chandrasekhar, 1960).

Solo parte de la radiación que incide interactúa con la atmósfera, en donde disminuye por efecto de la absorción y se dispersa en todas direcciones. La señal de esta radiación dispersa que capta el sensor es la radiancia de trayectoria y sólo lleva información de los componentes atmosféricos (Vermote *et al.*, 1997). También algunos fotones que interactúan con la superficie terrestre en la cercanía de la zona de interés cambian de trayectoria por los componentes atmosféricos y se detectan por el sensor del satélite. Esta es la radiancia ambiental y lleva información de objetos de la superficie terrestre cercanos a la zona de interés (Kaufman y Tanré, 1996; Vermote *et al.*, 1997). Finalmente, la superficie de interés refleja los fotones que atraviesan la atmósfera y los capta el sensor, lo cual se denomina radiancia directa. Esta radiación es la que interesa al analista, por llevar información de los objetos terrestres (Kaufman *et al.*, 1997).

La atenuación de la energía radiante de los fotones provenientes del Sol se especifica por la transmisividad, que consta de cuatro componentes (Chandrasekhar, 1960; Vermote *et al.*, 1997): 1) por la trayectoria del Sol a la superficie terrestre (uso del subíndice s); 2) por trayectoria de la superficie terrestre al sensor (uso de subíndice v), transmisividad de los gases (T_{g_s} y T_{g_v}) y de los aerosoles (T_a y T_v); 3) la radiancia de trayectoria (r_a); y 4) por la interacción múltiple de los fotones con la atmósfera y la superficie terrestre, la cual es función del albedo esférico (S). La dirección de visión se describe con el ángulo cenital de visión q_v y el ángulo acimutal f_v , y los ángulos solares como el cenital q_s y acimutal f_s .

Así, la relación que existe entre la reflectancia que recibe el sensor (ρ^*) con la reflectancia de la superficie (ρ_o), se define por la Ecuación (1) (Vermote *et al.*, 1997):

$$\rho^*(\theta_s, \theta_v, \phi_s, -\phi_v) = Tg(\theta_s, \theta_v, \phi_s, -\phi_v) \left[\rho_o(\theta_s, \theta_v, \phi_s, -\phi_v) + T(\theta_s)T(\theta_v) \frac{\rho_o}{1 - \rho_o S} \right] \quad (1)$$

Al despejar la Ecuación (1) se obtiene la reflectancia en la superficie terrestre del objeto de interés (ρ_0). A esta operación se le denomina *corrección atmosférica*.

En la Figura 1 se muestra el resultado de simular diferentes condiciones de turbidez atmosférica con el modelo 6S (*Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum*) (Vermote *et al.*, 1997), a una firma espectral del maíz (*Zea mays*) simulado con el Modelo MCRM2 (*Multispectral Canopy Reflectance Model version 2*; Kuusk, 1994 y 2001). La etiqueta Superficie corresponde a la firma espectral como si las reflectancias se midieran en la superficie terrestre, mientras que las otras series corresponden a mediciones en el satélite Landsat 7. τ_{550} corresponde al espesor óptico en la longitud de onda de $0.55 \mu\text{m}$ (550 nm), el cual es un indicador de la turbidez atmosférica que se utiliza en la física atmosférica (Vermote *et al.*, 1997). En la firma espectral del maíz, se puede apreciar que la turbidez atmosférica aumenta la reflectancia de las bandas visibles y la disminuye para las bandas infrarrojas; también se observa que el efecto atmosférico en la porción infrarroja del espectro disminuye conforme aumenta la longitud de onda.

Si se realiza un análisis multitemporal de imágenes satelitales, es necesario homogeneizar las condiciones atmosféricas a una imagen de referencia, o eliminar el efecto atmosférico de las imágenes (Paz *et al.*, 2006). Las imágenes TM se utilizan extensivamente para el análisis de las condiciones de cultivos agrícolas, inventarios forestales, levantamientos geológicos, estimación de recursos hidráulicos, valoración de zonas costeras y muchas otras aplicaciones. Conforme el análisis de

esta información se vuelve más cuantitativo, el obtener reflectancias de objetos sobre la superficie terrestre cobra mayor importancia. Por ejemplo, los modelos de transferencia de radiación que se invierten para la estimación de parámetros biofísicos de la vegetación necesitan, forzosamente, estimar la reflectancia en la superficie terrestre (Kaufman y Tanré, 1996; Liang *et al.*, 2001). Desgraciadamente, un porcentaje importante de estas imágenes presentan contaminación por aerosoles, vapor de agua, nubes y sombras. Si se pudieran eliminar estos factores de las imágenes de los satélites Landsat, éstas serían potencialmente de mayor utilidad para el analista (Liang *et al.*, 2001).

Actualmente existen varios modelos que permiten aplicar una corrección atmosférica a imágenes Landsat TM/ETM+, como son: el programa ATmospheric REMoval (ATREM, Gao and Goetz, 1990, ya no tiene soporte y no está disponible para nuevos usuarios), Atmospheric CORrection Now (ACORN, Berk *et al.*, 1999), el Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes (FLAASH, Adler-Golden *et al.*, 1999), ATCOR (Richter, 1996; Richter y Schläpfe, 2016) basados en el modelo de transferencia de radiación MODTRAN (MODerate resolution atmospheric TRANsmission, (Berk *et al.*, 1999, 2014). Últimamente se han desarrollado programas como MAJA, (MACCS-ATCOR Joint Algorithm) donde MACCS fue el software de corrección atmosférica y detección de nubes, desarrollado por CNES y CESBIO, y ATCOR es el software de corrección atmosférica desarrollado por DLR (Hagolle *et al.*, 2017). Sin embargo, estos programas, con excepción de MAJA que no tiene costo con fines de investigación y sólo corre en el sistema operativo Linux, no están disponibles al público o se encuentran como módulos extra en programas de procesamiento de imágenes con un costo elevado.

El objetivo de este trabajo fue desarrollar un método de corrección, especialmente explícito y con base en patrones espectrales de objetos oscuros, de los efectos atmosféricos en las imágenes Landsat.

La corrección atmosférica de los satélites Landsat requiere dos hipótesis: 1) existencia de una correlación entre las bandas visibles y la banda infrarroja media con ordenada al origen cero para la vegetación; 2) que el efecto de la reflectancia de trayectoria no afecta significativamente la reflectancia de la banda infrarroja media (Figura 1). Las hipótesis se basan en evidencia empírica de diversos autores (Kaufman y Sendra, 1988;

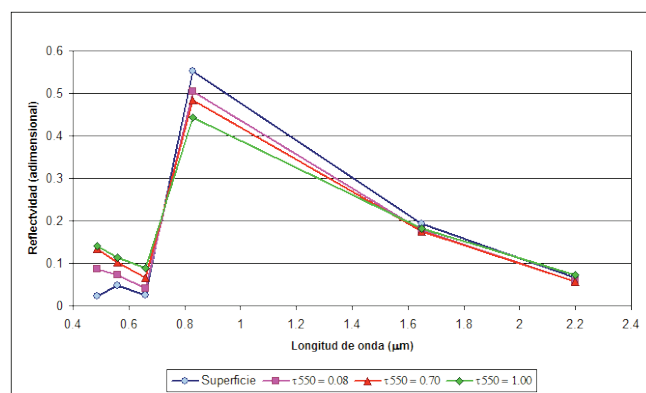


Figura 1. Efecto atmosférico en la firma espectral del maíz (*Zea mays*). A mayor valor del espesor óptico τ_{550} , mayor es la turbidez de la atmósfera.

Kaufman *et al.*, 1997; Liang *et al.*, 2001), que muestran una correlación entre las reflectancias de las bandas que se indican para objetos oscuros, principalmente vegetación densa oscura. Sin embargo, Wen *et al.* (1999) plantearon que agrupar píxeles con reflectancia similar permite obtener mejores resultados.

Si es posible discriminar la vegetación en diferentes grados de cobertura del suelo de otros objetos sobre la superficie terrestre, de una manera rápida y precisa, es posible obtener mejores correlaciones para la estimación de la reflectancia de trayectoria.

MATERIALES Y MÉTODOS

Con base en las dos suposiciones anteriores, se puede reescribir la Ecuación (1), primero para las bandas visibles como (Wen *et al.*, 1999):

$$\rho_{vis}^* = \rho_{vis}^{atm} + T_{vis}^{atm} \frac{\rho_{vis}^o}{1 - \rho_{vis}^o S} \quad (2)$$

donde: ρ_{vis}^* es la reflectancia aparente en el satélite para una banda en la porción visible del espectro electromagnético, ρ_{vis}^{atm} es la reflectancia de trayectoria con efecto de la transmisividad de gases para una banda visible, T_{vis}^{atm} es el resultado de multiplicar la transmisividad de gases, de aerosoles en la trayectoria de iluminación y de aerosoles en la trayectoria de visión para la misma banda visible. Para el caso de la banda centrada en 2.2 μm , al no existir un efecto apreciable de la reflectancia de trayectoria (Figura 1), ésta se puede eliminar de la Ecuación (2) por lo que quedaría como:

$$\rho_{2.2}^* = T_{2.2}^{atm} \frac{\rho_{2.2}^o}{1 - \rho_{2.2}^o S} \quad (3)$$

Si se considera que el producto $\rho^o S$ es pequeño (interacciones de primer orden), tal como ocurre con las bandas visibles, la Ecuación (2) se podría simplificar a:

$$\rho_{vis}^* = \rho_{vis}^{atm} + T_{vis}^{atm} \rho_{vis}^o \quad (4)$$

Si se usa la hipótesis de una relación entre la banda visible y la banda infrarroja media, se puede plantear como (Wen *et al.*, 1999; Kaufman *et al.*, 2002):

$$\rho_{vis}^o = \gamma \rho_{2.2}^o \quad (5)$$

donde: γ es una constante empírica.

Al sustituir la Ecuación (5) en la (3), la reflectancia aparente en el satélite queda como (Wen *et al.*, 1999):

$$\rho_{vis}^* = \rho_{vis}^{atm} + \frac{T_{vis}^{atm}}{T_{2.2}^{atm}} \gamma \rho_{2.2}^o \quad (6)$$

Por lo que si la banda visible se relaciona linealmente en la superficie con la banda infrarroja media, implica que también se relacionan linealmente en el satélite, y la ordenada al origen de esta relación corresponde a la reflectancia de trayectoria de la banda visible.

En las aplicaciones operacionales del esquema de corrección atmosférica descrito, la variable γ de la relación (5) se supone constante ($\gamma = 0.25$ para la banda 1 o del Azul y $\gamma = 0.5$ para la 3 o del Rojo) (Kaufman *et al.*, 1997). Esta suposición es muy restrictiva e implica un tipo de vegetación genérica con propiedades ópticas similares. El algoritmo propuesto en este trabajo hace dinámica la obtención de γ , sin requerir la hipótesis de vegetación genérica.

Para el desarrollo y validación del corrector atmosférico, se utilizaron dos enfoques: generación de efectos atmosféricos en simulaciones de transferencia de radiación de la mezcla suelo-vegetación y análisis de imágenes Landsat en sitios con información de espesores ópticos.

Para las simulaciones de transferencia de radiación de la mezcla suelo-vegetación se utilizó el Modelo MCRM2 (Kuusk, 1994 y 2001). Este modelo a su vez incluye dos modelos para simular las características ópticas de las hojas y el suelo: (1) Modelo PROSPECT (Jacquemoud *et al.*, 1996), para la simulación de la reflectancia y transmitancia de las hojas en función de su estructura, contenido de clorofila, pigmentos cafés, así como materia seca y agua; y (2) funciones base de Price (1990) para la simulación de reflectancia de suelos. Para la base de datos de espectros de reflectancia y transmitancia de las hojas se usaron los datos del experimento LOPEX93 (*Leaf Optical Properties EXperiment 1993*) (Hosgood *et al.*, 1993). Para la base de espectros de reflectancia del suelo se usó la biblioteca de ASTER (JPL, 1999). Finalmente, para generar efectos atmosféricos se utilizó el Modelo 6S de Vermote *et al.* (1997). La Figura 2 muestra la integración del modelo MOSAD, Modelo de simulación de albedos en doseles, desarrollado por los autores.

Con el programa MOSAD se hicieron una serie de combinaciones de 5 efectos atmosféricos en 6 tipos de suelo, 9 especies vegetales y para 18 estados

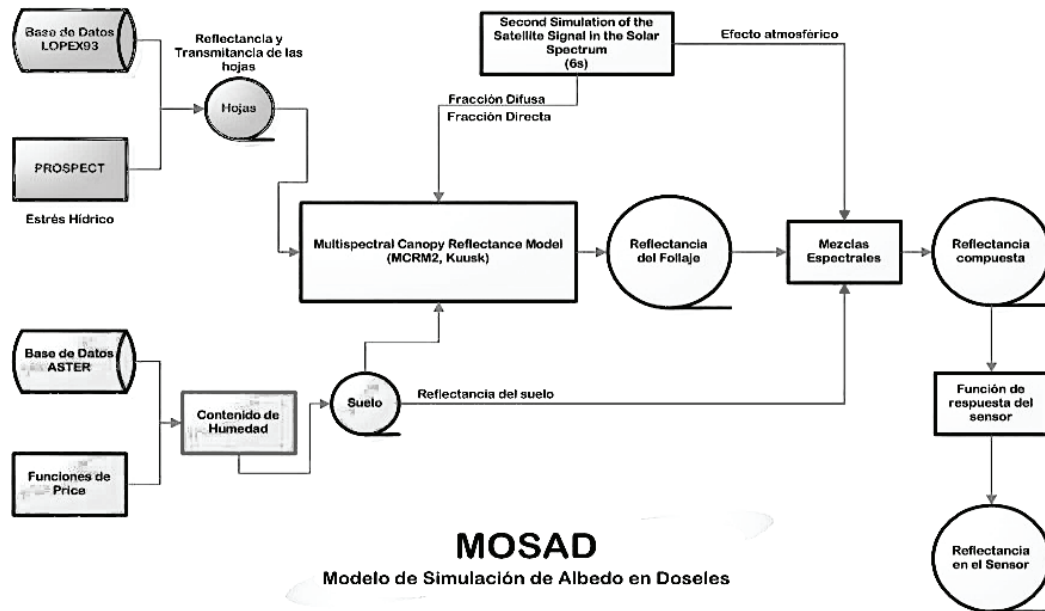


Figura 2. Integración de modelos de simulación y bases de firmas espectrales, MOSAD.

de desarrollo del cultivo, lo que se representó por valores ascendentes del índice de área foliar (IAF). Las 9 especies vegetales se seleccionaron para variar la arquitectura del dosel, esto es, la distribución angular de la inclinación de las hojas: planófilas, esféricas y erectófilas (Wang *et al.*, 2007). Además, se simularon 5 efectos atmosféricos con un IAF de cero para contar con la reflectancia de los suelos desnudos; el total de combinaciones fue de 4890. Posteriormente, se aplicaron las funciones de respuesta de las bandas ETM+ y TM5 a los espectros resultantes, con lo que se contó con simulaciones en las 6 bandas reflectivas de estos sensores. Con la simulación del sistema suelo-vegetación-atmósfera para diferentes tipos de especies vegetales, suelos y efectos atmosféricos se obtienen combinaciones de reflectancia de diferentes coberturas vegetación-suelo y en condiciones variantes de efectos atmosféricos. En el caso de las imágenes de satélite se aplicó un algoritmo de clasificación genérica de objetos (Palacios *et al.*, 2006), que identifica la vegetación en diferentes niveles de cobertura, suelo, nubes, bruma, agua, hielo, objetos artificiales, sombra y otros objetos.

Para aplicar el algoritmo de corrección de efecto atmosférico se realizó un análisis de regresión de las reflectancias de la vegetación entre la banda 7 y las bandas 1 y 3 de los sensores TM5 y ETM+, para las simulaciones de transferencia de radiación de la vegetación.

En el caso de las imágenes satelitales, se generaron tablas de búsqueda con parámetros atmosféricos, para la obtención del espesor óptico a $0.55 \mu\text{m}$, a partir de la reflectancia de trayectoria de las bandas 1 y 3. Las tablas se construyeron para los sensores Landsat TM y ETM+ mediante el modelo 6S, con variación de las condiciones de iluminación (ángulo cenital solar), altitud de la superficie sobre el nivel medio del mar y espesor óptico atmosférico. Las tablas incluyen las combinaciones de tres modelos de distribución de gases: tropical, verano latitud media e invierno latitud media, así como para seis tipos de aerosol: continental, marítimo, urbano, desértico, quema de biomasa y estratosférico. En el presente trabajo se generaron tablas de búsqueda para 8 ángulos cenitales solares, 6 altitudes, 9 espesores ópticos, 3 modelos atmosféricos y 6 modelos de aerosol, lo que generó 2592 valores para la reflectancia de trayectoria por banda. Posteriormente se codificó un algoritmo de corrección atmosférica con base en regresiones entre la banda 7 y las bandas 1 y 3 de los sensores TM / ETM+. Con el fin de representar la variabilidad espacial de los aerosoles en una imagen de las dimensiones de las del satélite Landsat, ésta se dividió en una malla cuyos nodos son el centro de una ventana donde se aplica el algoritmo de corrección. El tamaño que se sugiere es de cuadrados de 1000 píxeles de lado lo que representa un cuadrado de 30 km de lado por la resolución de las imágenes Landsat.

Con la reflectancia de trayectoria que se estimó en las bandas 1 y 3, se obtuvo un estimado del espesor óptico de los aerosoles en la malla definida por el usuario, donde se considera una distribución homogénea de los aerosoles. En cada celda de la malla se simuló los parámetros atmosféricos, mediante el modelo 6S, para posteriormente obtener reflectancias en superficies para todas las bandas reflectivas de las imágenes TM / ETM+. Una vez que se estimaron los espesores ópticos de los aerosoles en cada nodo de la malla, se comprobó que no existieran valores faltantes; cuando se detectó su existencia, los valores se interpolaron mediante una función Lipschitz (Beliakov, 2006), que es un interpolador multivariado que minimiza el error en la aproximación de la función, sin importar la distribución de los valores faltantes, motivo por el que se seleccionó este algoritmo. Con la malla llena con valores del espesor óptico en cada nodo, se densificó mediante una interpolación bilineal, para estimar los espesores ópticos en las cuatro esquinas de una ventana; con este procedimiento se pasó de contar con un valor al centro de la ventana a uno en cada esquina. Esto se realizó con el fin de acelerar el proceso de interpolación bilineal de los parámetros atmosféricos en los píxeles de una ventana. Finalmente, se realizó la validación del algoritmo de corrección atmosférica con simulaciones de transferencia de radiación y con siete imágenes ETM+ con información de medidas *in situ* de las condiciones atmosféricas y se realizó un análisis de correlación entre el espesor óptico estimado por el modelo y los valores medidos por la red AERONET.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se formuló un código donde se integraron los modelos de simulación MCRM2 al que se le incorporó la biblioteca de encadenado dinámica del modelo 6S, para que la simulación fuera del sistema suelo-vegetación-atmósfera. Los flujos de radiación directos y difusos que se estimaron por el modelo 6S alimentan al modelo MCRM2 para el cálculo de la reflectancia del dosel bajo una condición específica de turbidez atmosférica. Aun cuando se mide la reflectancia en superficie, las condiciones de turbidez de la atmósfera generan proporciones específicas de las fracciones directa y difusa de la radiación incidente, por lo que la firma espectral de un dosel en particular, varía en función de estas proporciones.

Los diferentes tipos de vegetación generan patrones lineales entre la banda visible e infrarrojo medio para diferentes valores del índice de área foliar, en la Figura 3 se muestra la reflectancia simulada de las bandas 7 y 1 y en la Figura 4 para las bandas 7 y 3. Las pendientes de rectas ajustadas a estos patrones, varían en función de la distribución angular de las hojas; sin embargo, la ordenada al origen para las bandas 7 y 1 en el conjunto completo, es muy cercana a cero. La ordenada al origen de la correlación entre la banda 7 y la 3 es diferente de cero ya que presenta un sesgo negativo y se descarta como estimador de la reflectancia de trayectoria de la banda 3, por lo que en lo sucesivo se utilizará sólo la relación entre las bandas 7 y 1.

Con la reflectancia de trayectoria que se estimó en la banda azul, al especificar el modelo atmosférico, el modelo de aerosol, el ángulo cenital solar y la altitud sobre el nivel medio del mar, es posible invertir el modelo 6S, para estimar el espesor óptico a $0.55 \mu\text{m}$. Una vez que se calcula el espesor óptico, se determinan automáticamente los parámetros necesarios para efectuar la corrección atmosférica. En la Figura 5 se puede apreciar el excelente ajuste entre las reflectancias de trayectoria que se simuló y estimó mediante regresión entre las bandas 7 y 1 del sensor ETM+. Los valores que se analizaron tienen condiciones atmosféricas que van desde muy claras, con espesor óptico de 0.07, hasta condiciones muy turbias con espesor óptico de 1.0. También se simuló tres modelos atmosféricos y tres aerosoles, bajo diferentes condiciones de iluminación. El coeficiente de determinación ajustado de la regresión fue de 0.998 con un error típico (RMSE) de 0.001 (1.25%).

Las regresiones se realizan sobre píxeles con vegetación, y en una imagen Landsat, ésta se identifica mediante un clasificador genérico de objetos (Palacios *et al.*, 2006); este clasificador no necesita de muestras en campo para la identificación, ya que se basa en la forma de la firma espectral de los objetos. Esta característica lo hace rápido y eficiente.

El algoritmo se validó con 7 imágenes Landsat (Cuadro 1), que cuentan con sitios de la red robótica de aerosoles (AERONET), los cuales estiman las condiciones atmosféricas con gran precisión; estos sitios incluyeron tres modelos atmosféricos de distribución de gases y tres modelos de aerosol. Los resultados mostraron que el corrector está a la altura de los mejores algoritmos de su clase en la estimación

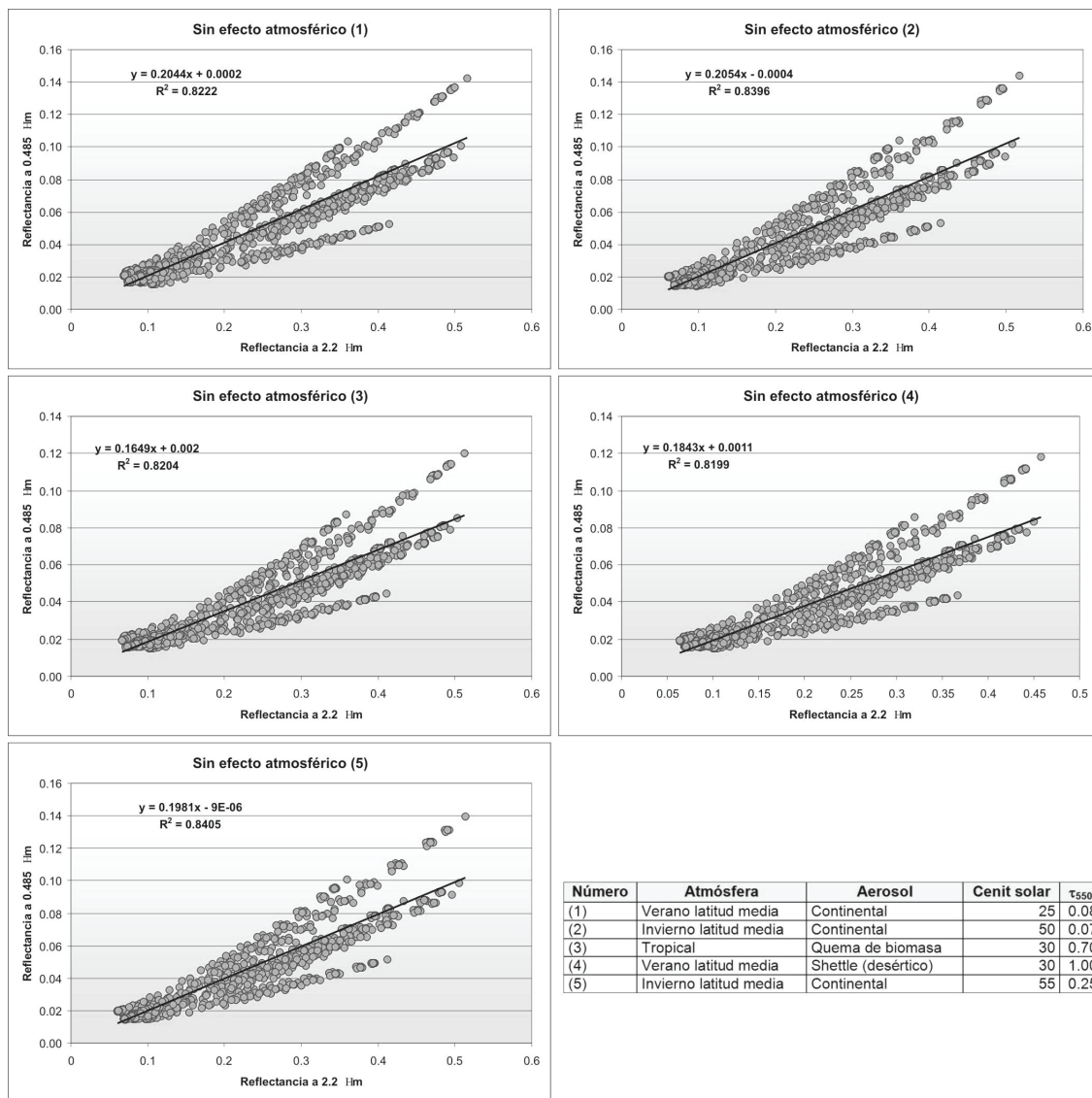


Figura 3. Reflectancias de trayectoria simuladas y estimadas por regresión para las bandas 7 y 1.

del espesor óptico de los aerosoles, con un error típico del espesor óptico a 0.55 μm de 0.059 contra valores de 0.05 a 0.07 reportados (Vermote and Vermeulen, 1999; Remer *et al.*, 2006; Guanter *et al.*, 2008).

Un problema que se asocia con la corrección atmosférica de imágenes Landsat es el desconocimiento del modelo atmosférico y del tipo de aerosol (Paz *et al.*, 2008). En caso de que no se especifique el modelo de aerosol, se utiliza un algoritmo para su estimación, el cual se generó siguiendo los criterios definidos en Vermote *et al.* (2002), en donde especifica el tipo de aerosol en función del exponente de Ångstrom y del

espesor óptico a 0.55 μm . Debido a que no se cuenta con el exponente de Ångstrom, el algoritmo se basa en el coeficiente de variación de los aerosoles, tal como se muestra en la Figura 6.

El modelo de atmósfera se le proporciona al algoritmo, o lo estima a partir de la latitud media de la ventana. Si el valor absoluto de la latitud es inferior a 23.45° se considera tropical. Si es superior o igual a 23.45°, se considera latitud media; con la fecha de la imagen se determina si es invierno o verano (boreal o austral) y de esta manera se especifica el modelo: verano latitud media o invierno latitud media.

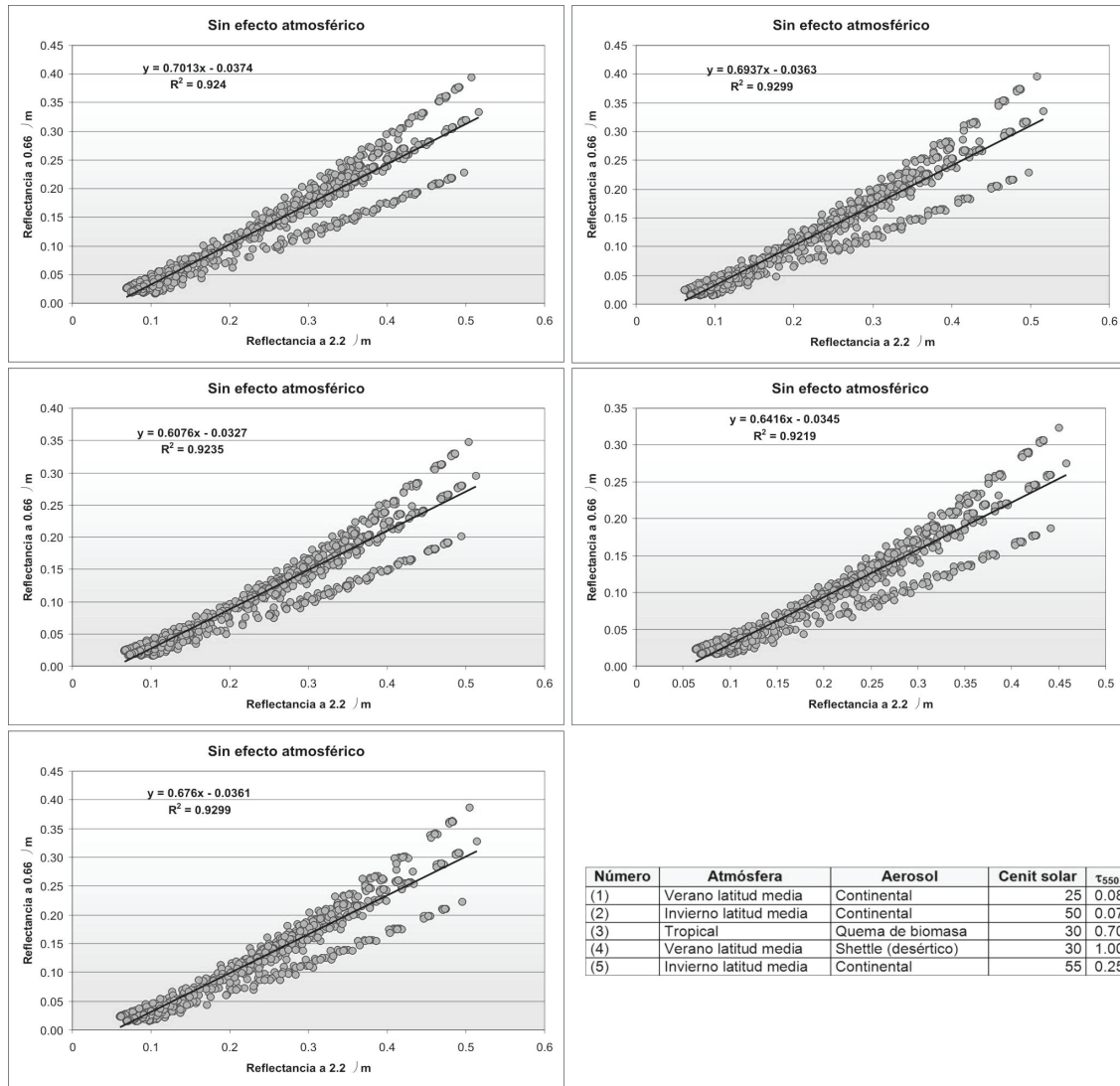


Figura 4. Reflectancias de trayectoria simuladas y estimadas por regresión para las bandas 7 y 3.

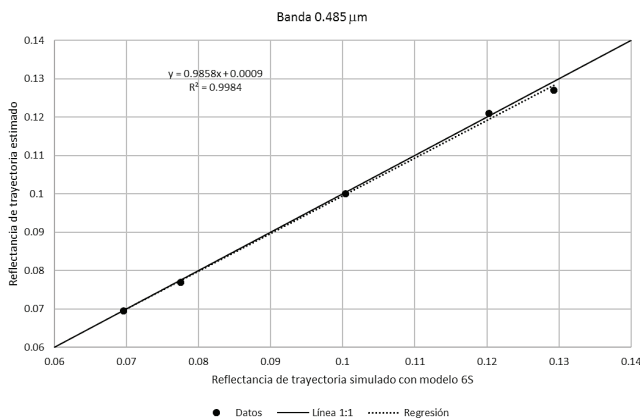


Figura 5. Reflectancias de trayectoria simuladas y estimadas por regresión para las bandas 7 y 1.

En la Figura 7 se presenta el algoritmo de corrección atmosférica, tal como se codificó en el programa desarrollado por los autores.

En la Figura 8 se muestra una comparación entre el espesor óptico de los aerosoles que se midieron por AERONET y los que se estimaron por el algoritmo propuesto en el presente trabajo. Las líneas punteadas corresponden a los intervalos de confianza que establecen Remer *et al.* (2006) para la estimación del espesor óptico sobre la tierra, los cuales se muestran en la Ecuación (7). Los intervalos se definieron para el sensor Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS); sin embargo, dada la similitud de las bandas (aunque no la resolución espacial) con las equivalentes

Cuadro 1. Escenas Landsat ETM+ utilizadas en la validación.

Sitio AERONET	Escena (WRS2)	Fecha	Hora (TMG)	Longitud	Latitud
Cart_Site	028/035	09/07/2000	16:58:54	-97.486	36.607
Córdoba - CETT	229/082	01/01/2001	13:58:43	-64.464	-31.524
Cuiabá - Miranda	226/071	08/08/2001	13:34:24	-56.021	-15.729
Ilorin	191/054	06/02/2000	9:55:04	4.34	8.32
Konza_EDC	027/035	21/07/2001	16:50:29	-96.61	39.102
Maricopa	037/037	19/04/2000	17:56:03	-111.972	33.069
Toulouse	198/030	31/08/1999	10:28:58	1.374	43.575

de Landsat, es posible aplicar este intervalo de confianza en el presente trabajo. Este intervalo acota la incertidumbre asociada a la estimación de la reflectancia en superficie y al modelo de aerosol, se espera que el error sea del orden de $\Delta\tau = \pm 0.05 \pm 0.1$ para pequeños espesores ópticos y aumente a 20-30% para altos espesores ópticos (Remer, 2006):

$$\Delta\tau = \pm 0.05 \pm 0.15\tau \tag{7}$$

donde: $\Delta\tau$ es la diferencia del espesor óptico estimado en relación con el medido por AERONET y τ es el espesor óptico de los aerosoles a $0.55 \mu\text{m}$.

La bondad de ajuste de la regresión entre los valores del espesor óptico medido en AERONET y estimado

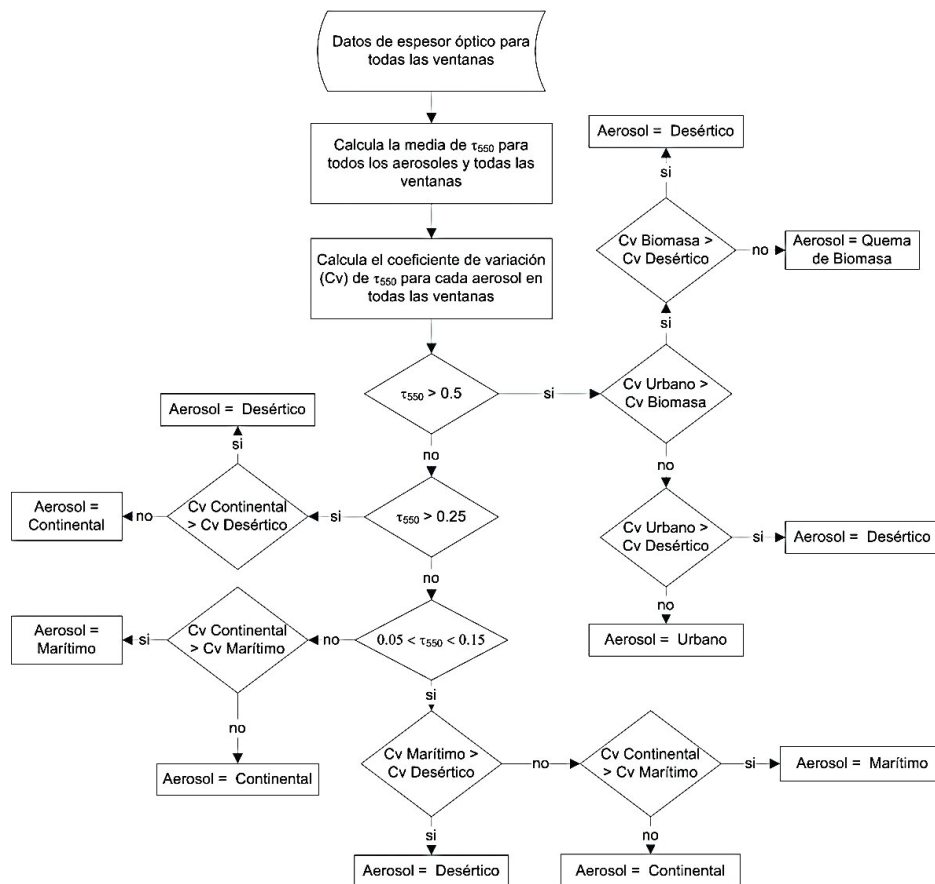


Figura 6. Algoritmo para la selección del modelo de aerosol.

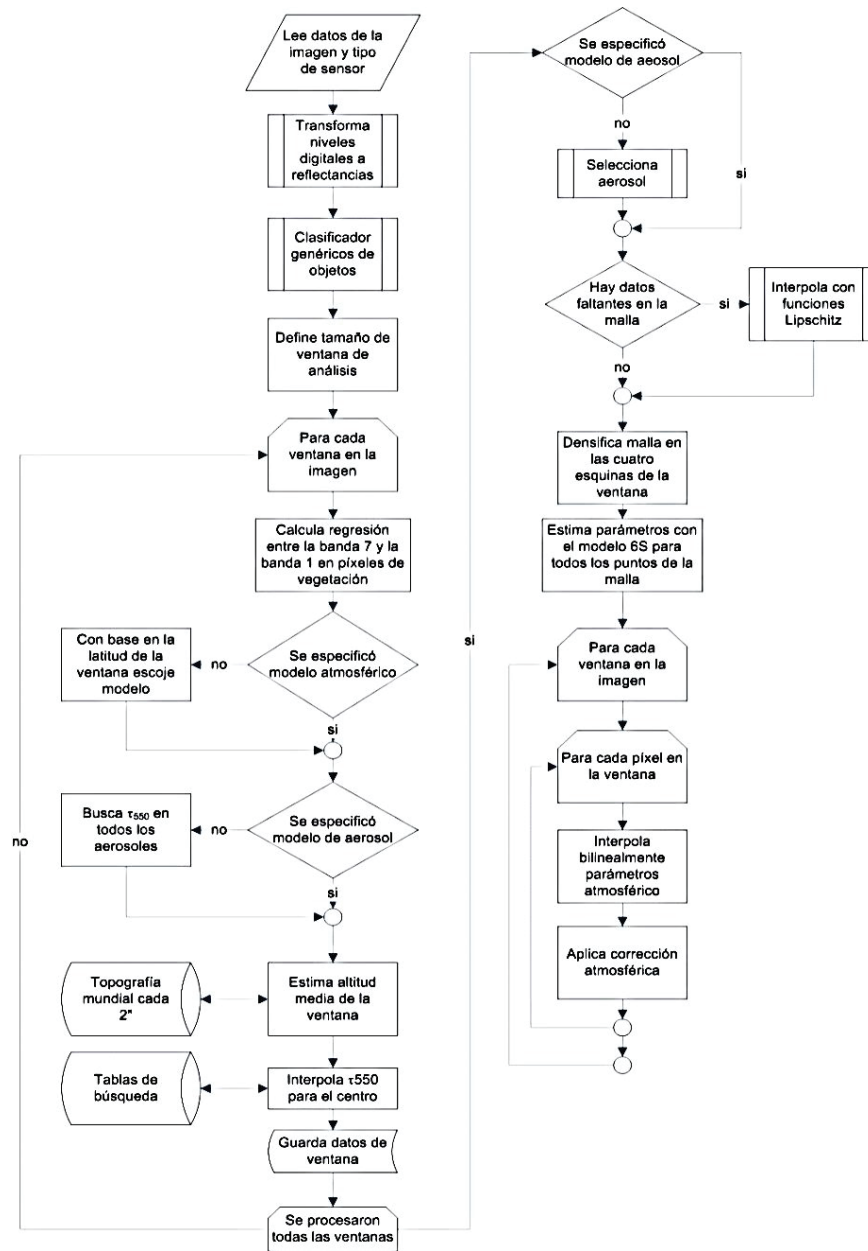


Figura 7. Algoritmo de corrección atmosférica.

por el algoritmo de corrección, es bueno, el coeficiente de determinación ajustado fue de 0.973 y el error típico de 0.059 (20.3%) (Figura 8).

En la Figura 9a se muestra una composición en color verdadero de las bandas Rojo-Verde-Azul (RGB) de la escena Landsat ETM+ 226/071 de fecha 08/08/2001 de Cuiabá-Miranda, sin corrección atmosférica y la 9b muestra el resultado de aplicar el algoritmo de corrección atmosférica propuesto, a la escena. Como se puede apreciar en las figuras, la corrección atmosférica

reduce la reflectancia de trayectoria de las bandas visibles (reflejo de la atmósfera) por lo que el contraste y el color de la imagen es mejor, asimismo corrige (aumenta) la transmisividad de las bandas infrarrojas (no visible en la Figura 9, ver Figura 1).

En la Figura 10 se muestra la distribución del espesor óptico atmosférico de los aerosoles en una composición RGB de la imagen ETM+ ya con procesamiento, que corresponde a la misma escena; también se muestra la ubicación del sitio AERONET con el espesor óptico

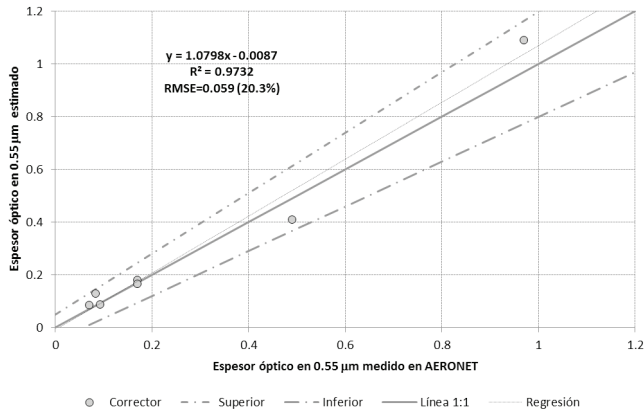


Figura 8. Comparación entre el espesor óptico en 0.55 μm medido por AERONET y el estimado por el algoritmo de corrección atmosférica, con los límites del intervalo de confianza.

interpolado a partir de los datos que se obtuvieron en el sitio para los diferentes intervalos de longitud de onda. Se generaron isolíneas de espesor óptico con el fin de destacar la variabilidad existente del aerosol en la imagen donde se observa que representa bien la variabilidad espacial de carga de aerosoles.

Las diferencias más importantes del algoritmo que se desarrolló, en relación con algoritmos operacionales relativamente similares (Kaufman y Tanré, 1996; Kaufman *et al.*, 1997 y 2002; Liang *et al.*, 2001) son:

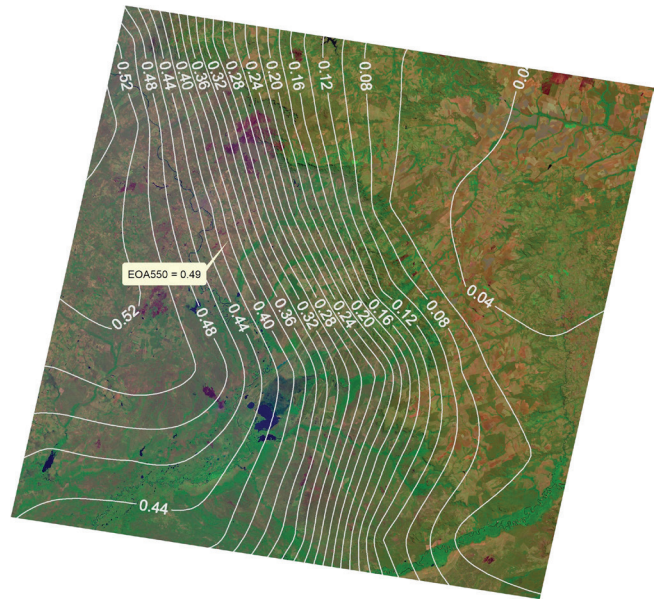


Figura 10. Distribución de aerosoles en imagen corregida por el algoritmo.

1.- No se supone una relación fija entre las bandas del visible y del infrarrojo medio, sino que se estima a partir de las reflectancias por áreas de una imagen satelital Landsat, lo que evita hipótesis de homogeneidad espacial y patrones espectrales fijos.

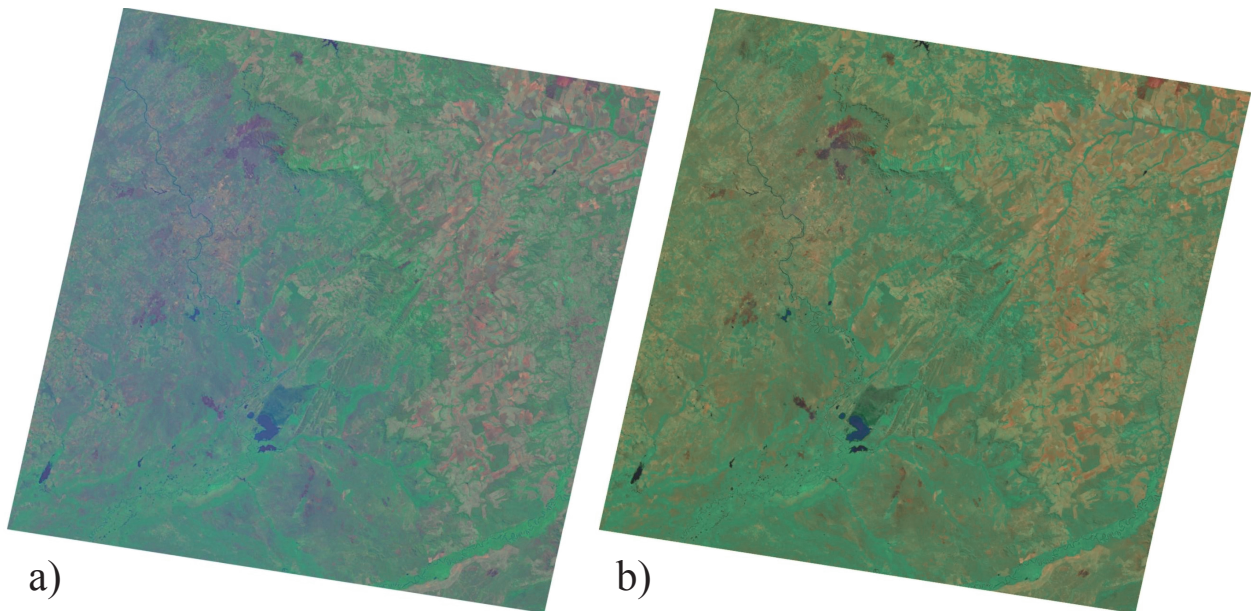


Figura 9. (a) Escena del sitio Cuiabá-Miranda sin corrección atmosférica y (b) misma imagen corregida por el algoritmo.

2.- En caso de desconocimiento del modelo atmosférico y del aerosol (condición típica), éstos se estiman mediante el uso de datos de la misma imagen satelital. Este proceso permite hacer operativo el algoritmo bajo condiciones de falta de información atmosférica.

3.- La estimación de los factores de corrección atmosférica (inversión radiativa atmosférica) se genera en una malla suavizada que evita cambios abruptos, producto de estimaciones discretas, lo que permite correcciones congruentes con las variaciones espaciales que se esperan.

Las diferencias descritas, que se incluyen en el algoritmo operacional, permiten una alta flexibilidad en las aplicaciones, ya que se utilizan hipótesis genéricas que se parametrizan en forma espacialmente explícita.

CONCLUSIONES

- La ordenada al origen de la regresión entre la banda 7 y la banda 1 de imágenes Landsat, que es un estimador de la reflectancia de trayectoria en la banda 1, permite estimar el espesor óptico de los aerosoles centrado en 0.55 μm , siempre que se especifique el modelo de atmósfera y de aerosol.

- Se descarta la idea de que la ordenada al origen de la regresión entre la banda 7 y la banda 3 (centrada en 0.66 μm) de los sensores TM5 / ETM+, sea un estimador confiable de la reflectancia de trayectoria de la banda 3.

- Se logró la identificación de la vegetación en una imagen Landsat, mediante un clasificador genérico de objetos, en cuatro variantes: vegetación oscura de alta cobertura, vegetación de alta, media y baja cobertura.

- La validación del algoritmo con imágenes Landsat demostró que el corrector está a la altura de los mejores algoritmos de su clase en la estimación del espesor óptico de los aerosoles, con un error típico del espesor óptico a 0.55 μm de 0.059 contra valores de 0.05 a 0.07 reportados (Vermeulen and Vermote, 1999; Remer *et al.*, 2006; Guanter *et al.*, 2008).

LITERATURA CITADA

Adler-Golden, S. M., M. W. Matthew, L. S. Bernstein, R. Y. Levine, A. Berk, S. C. Richtsmeier, P. K. Acharya, G. P. Anderson, G. Felde, J. Gardner, M. Hoke, L. S. Jeong, B. Pukall, J. Mello, A. Ratkowski, and H. -H. Burke. 1999. Atmospheric correction for short-wave spectral imagery based on MODTRAN4. *Imaging Spectrometry V. Proc. SPIE 3753*: 61-69. doi: 10.1117/12.366315.

Beliakov, G. 2006. Interpolation of Lipschitz functions. *J. Comput. Appl. Math.* 196: 20-44 doi: 10.1016/j.cam.2005.08.011.

Berk, A., G. P. Anderson, L. S. Bernstein, P. K. Acharya, H. Dothe, M. W. Matthew, S. M. Adler-Golden, J. H. Chetwynd, Jr., S. C. Richtsmeier, B. Pukall, C. L. Allred, L. S. Jeong, and M. L. Hoke. 1999. MODTRAN4 radiative transfer modeling for atmospheric correction. *Optical Spectroscopic Techniques and Instrumentation for Atmospheric and Space Research III. Proc. SPIE 3756*: 348-353. doi: 10.1117/12.366388.

Berk, A., P. Conforti, R. Kennett, T. Perkins, F. Hawes, and J. van den Bosch. 2014. MODTRAN6: A major upgrade of the MODTRAN radiative transfer code. *Proc. SPIE 90880H*. doi: 1117/12.2050433.

Chandrasekhar, S. 1960. *Radiative transfer*. Dover Publications. New York, NY, USA.

Gao, Bo-Cai and A. F. H. Goetz. 1990. Column atmospheric water vapor and vegetation liquid water retrievals from airborne imaging spectrometer data. *J. Geophys. Res.* 95: 3549-3564. doi: 10.1029/JD095iD04p03549.

Guanter, L., L. Gómez-Chova, and J. Moreno. 2008. Coupled retrieval of aerosol optical thickness, columnar water vapor and surface reflectance maps from ENVISAT/MERIS data over land. *Remote Sens. Environ.* 112: 2898-2913.

Hagolle, O., M. Huc, and C. Descardins, S. Auer, and R. Richter. 2017. MAJA ATBD Algorithm theoretical basis document. doi: 10.5281/zenodo.1209633.

Hosgood, B., S. Jacquemoud, G. Andreoli, V. Verdebout, A. Pedrini, and G. Schmuck. 1993. Leaf optical properties experiment 93 (LOPEX93). Joint Research Centre / IPSC / SERAC Unit TP 723. 21020 Ispra, Italy.

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.

JPL (Jet Propulsion Laboratory). 1999. ASTER spectral library, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology. Pasadena, CA, USA. <http://speclib.jpl.nasa.gov/> (Consulta: septiembre 19, 2008).

Kaufman, Y. J. and C. Sendra. 1988. Algorithm for automatic atmospheric corrections to visible and near-IR satellite imagery. *Int. J. Remote Sens.* 9: 1357-1381. doi: 10.1080/01431168808954942.

Kaufman, Y. J. and D. Tanré. 1996. Strategy for direct and indirect methods for correcting the aerosol effect on remote sensing: from AVHRR to EOS-MODIS. *Remote Sens. Environ.* 55: 65-79.

Kaufman, Y. J., A. E. Wald, L. A. Remer, Bo-Cai Gao, R. Li, and L. Flynn. 1997. The MODIS 2.1 mm channel - correlation with visible reflectance for use in remote sensing of aerosol. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 35: 1286-1298.

Kaufman, Y. J., N. Gobron, B. Pinty, J. L. Widlowski, and M. M. Vestraete. 2002. Relationship between surface reflectance in the visible and mid-IR used in MODIS aerosol algorithm - theory. *Geophys. Res. Lett.* 29: 31.1-31.4

Kuusk, A. 1994. A multispectral canopy reflectance model. *Remote Sens. Environ.* 50: 75-82.

Kuusk, A. 2001. A two-layer canopy reflectance model. *J. Quant. Spect. Radiat. Trans.* 71: 1-9.

- Liang, S., H. Fang, and M. Cheng. 2001. Atmospheric correction of Landsat ETM+ land surface imagery - Part I: Methods. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 39: 2490-2498.
- 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+. *Agrociencia* 40: 613-626.
- Price, J. C. 1990. On the information content of soil reflectance spectra. *Remote Sens. Environ.* 33: 113-121.
- 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. Latin. Rec. Nat.* 2: 51-64.
- Paz, F., M. Bolaños, E. Palacios, L. A. Palacios, M. Martínez y A. Huete. 2008. Optimización del índice espectral de la vegetación NDVIcp. *Agrociencia* 42: 925-937.
- Remer, L. A., D. Tanré, and Y. J. Kaufman. 2006. Algorithm for remote sensing of tropospheric aerosol from MODIS: Collection 5. Product ID: MOD04/MYD04.
- Richter, R. 1996. A spatially adaptive fast atmospheric correction algorithm, *Int. J. Remote Sens.* 17: 1201-1214.
- Richter, R. and D. Schlöpfer. 2016. Atmospheric/topographic correction for satellite imagery: ATCOR-2/3 User Guide, DLR IB 565-01/16. Wil, Switzerland.
- 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.
- Vermote, E. F. and A. Vermeulen. 1999. Atmospheric correction algorithm: Spectral reflectance (MOD09). Version 4.0. NASA contract NAS5-96062. (https://eosps.nasa.gov/sites/default/files/atbd/atbd_mod08.pdf). (Consulta: octubre 20, 2008).
- Vermote, E. F., S. Vibert, H. Kilcoyne, D. Hoyt, and T. Zhao. 2002. Suspended matter. Visible/Infrared Imager/Radiometer Suite algorithm theoretical basis document. SBRS Document # Y2390, Raytheon Systems Company, Information Technology and Scientific Services, Maryland, USA.
- Wang, W. M., Z. L. Li, and H. B. Su. 2007. Comparison of leaf angle distribution functions: Effects on extinction coefficient and fraction of sunlit foliage. *Agric. For. Meteorol.* 143: 106-122.
- Wen, G., S. C. Tsay, R. F. Cahalan, and L. Oreopoulos. 1999. Path radiance technique for retrieving aerosol optical thickness over land. *J. Geophys. Res.* 104: 31321-31332.