

ALGORITMO DE CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA DE MEDIDAS DE REFLECTIVIDAD MULTIANGULARES EN EL ESPECTRO SOLAR

L.Guanter y J.F.Moreno

luis.guanter@uv.es

*Dpto. de Termodinámica, Facultat de Física, Universitat de València
C/ Doctor Moliner, 50 - 46100 Burjassot (Valencia)*

RESUMEN: El acoplamiento en el transporte radiativo de la superficie y la atmósfera causa que para la eliminación del efecto de la segunda sobre las medidas de reflectividad de la primera se haya de resolver un problema en el que atmósfera y superficie están interconectadas, de modo que no es posible obtener información de una sin conocer la otra. Los modelos de corrección atmosférica más utilizados parten de la hipótesis de que la superficie se comporta como un reflector lambertiano, de modo que se puede desacoplar el sistema. Sin embargo, esta aproximación limita considerablemente la potencia de la corrección. En este trabajo se presenta un algoritmo de corrección atmosférica que considera los efectos angulares de la superficie. Se ha simulado espectros angulares de reflectividad en el techo de la atmósfera para nueve superficies naturales diferentes, que ha permitido validar el método y comprobar la mejora que proporciona respecto a la corrección basada en la consideración de superficies lambertianas.

ABSTRACT: The coupling between surface and atmosphere radiative transfer effects poses an interdependence problem for surface reflectance retrieval and atmospheric correction. The atmospheric correction models most commonly used lie on the hypothesis of a lambertian surface reflectance, so that the system can be decoupled. Nevertheless, this assumption limits the correction results. In this work an atmospheric correction method that considers directional effects in the surface reflectance is presented. We have simulated the top-of-the-atmosphere reflectances using nine different natural surfaces. That has allowed us to validate the model and check the improvements in the correction versus the algorithms based on Lambertian surface.

Palabras clave: Corrección Atmosférica, Modelo RPV, Inversión, Superf. Lambertiana, Reflectividad Direccional

INTRODUCCIÓN

En la mayor parte del espectro electromagnético que tiene interés para la Teledetección la atmósfera se manifiesta como un factor perturbador cuando el objetivo es la observación de la superficie.

Para computar el efecto de la atmósfera en la radiación reflejada por la superficie es necesario resolver la ecuación de transferencia radiativa, que considera la reflectividad de la superficie como condición de contorno, desconocida hasta que la influencia de la atmósfera es eliminada. Así, se tiene un problema en el que atmósfera y superficie se encuentran acopladas, de modo que no se puede llegar a determinar una hasta que no se conoce la otra. La resolución se simplifica considerablemente si se consideran propiedades lambertianas para la superficie, pero a costa de limitar considerablemente la precisión de los resultados.

Los continuos avances en el diseño de los sensores requieren una actualización constante de los algoritmos de procesado de datos existentes, que saquen el máximo partido a las posibilidades multiangulares e hiperspectrales que se ofrecen. Particularmente, en el campo de la corrección

atmosférica comienza a ser necesaria la aparición de modelos que sí incorporen las propiedades direccionales de la reflectividad de la superficie.

En este trabajo se presenta un algoritmo de corrección atmosférica que da cuenta de estas propiedades direccionales de las superficies. Los resultados alcanzados en las simulaciones realizadas permiten afirmar que el método mejora sustancialmente los obtenidos suponiendo la superficie lambertiana.

DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO

El modelo planteado se basa en el algoritmo diseñado para MODIS (Vermote *et alii* 1997), que expresa la reflectividad en el techo de la atmósfera mediante la ecuación

$$\begin{aligned} \rho_{\text{TOA}}(\mu_s, \mu_v, \phi) = & \rho_0(\mu_s, \mu_v, \phi) + \\ & + e^{-\tau/\mu_s} e^{-\tau/\mu_v} \rho_s(\mu_s, \mu_v, \phi) + \\ & + e^{-\tau/\mu_s} t_d(\mu_s) \bar{p} + e^{-\tau/\mu_v} t_d(\mu_v) \bar{p}' + \\ & + t_d(\mu_s) t_d(\mu_v) \bar{p} + \\ & + \frac{\left(e^{-\tau/\mu_s} + t_d(\mu_s) \right) \left(e^{-\tau/\mu_v} + t_d(\mu_v) \right) S(\bar{p})^2}{1 - S\bar{p}} \end{aligned}$$

donde por ρ_0 se representa la reflectividad intrínseca de la atmósfera (radiancia de camino o *path reflectance*); ρ_s es la reflectividad de la superficie para radiación directa; S es la reflectividad de la atmósfera para luz difusa que incide desde la superficie; μ_s es el coseno del ángulo cenital solar (que denotaremos por SZA); μ_v es el coseno del ángulo cenital de observación (VZA); ϕ es el azimut relativo entre las direcciones solar y de observación; $e^{-\tau/\mu_s}, t_d(\mu_s)$ son las transmisividades atmosféricas para la luz directa y difusa que desciende hacia la superficie, y $e^{-\tau/\mu_v}, t_d(\mu_v)$ las correspondientes a la luz que asciende hacia el sensor; $\bar{p}, \bar{p}', \bar{p}$ son, respectivamente, las reflectividades hemisférica-direccional, direccional-hemisférica y hemisférica-hemisférica, de la superficie, también llamados términos de acoplamiento.

Estos últimos se calculan a partir de integrales angulares de la reflectividad direccional ρ_s , lo que hace que la ecuación no se pueda invertir para recuperar ρ_s en función de la reflectividad observada ρ_{TOA} y los parámetros atmosféricos de transmisividad y reflectividad. Por ello, es necesario tener una estimación previa de ρ_s para poder determinar estos tres términos y realizar así la inversión. En nuestro modelo esta información la proporciona una corrección inicial bajo la consideración de superficie lambertiana; con la ρ_s obtenida de esta primera corrección podemos calcular $\bar{p}, \bar{p}', \bar{p}$ en buena aproximación, para invertir después la ecuación y encontrar una nueva ρ_s . Ésta es utilizada para un nuevo cálculo de $\bar{p}, \bar{p}', \bar{p}$, en un procedimiento que se repite hasta que se alcanza una convergencia en los valores de ρ_s (figura 1).

El código de transferencia radiativa utilizado para el cálculo de los parámetros atmosféricos es el 6S (Vermote *et alii* 1997), que utiliza la ecuación expuesta para simular los valores de reflectividad en el techo de la atmósfera en su modo *forward*, lo que lo hace el más directo para nuestra aplicación, al proporcionar todos los términos que aparecen en la ecuación de corrección como salidas en cada ejecución.

La especificación de la superficie para este código se realiza a través de los parámetros libres

del modelo de reflectividad que se quiere utilizar. Esto causa que en cada una de las iteraciones que se realizan para la corrección se deba ajustar los datos corregidos a uno de dichos modelos, para dar los parámetros ajustados como *input* de la siguiente iteración. Para hacer el ajuste se emplea el método de Levenberg-Marquardt, a partir de la subrutina *mrqmin* y las relativas a ésta de *Numerical Recipes* (Press *et alii* 1986).

El modelo de reflectividad elegido para ajustar los datos corregidos en cada paso es el RPV (Rahman *et alii* 1993) utilizado en el procesado de los datos del sensor MISR, por su versatilidad en la representación de diferentes tipos de superficies dependiendo sólo de tres parámetros:

$$\rho_s(\theta_v, \theta_s, \phi) = \rho_0 \left[\frac{\cos\theta_v \cos\theta_s}{\cos\theta_v + \cos\theta_s} \right]^{k-1} P_{HG}(\cos g; \Theta) \cdot \left[1 + \frac{1 - \rho_0}{1 + G(\theta_v, \theta_s, \phi)} \right]$$

Los parámetros en esta ecuación son ρ_0 , que caracteriza la reflectividad de la superficie, Θ , que es el factor de asimetría de Heyney-Greenstein que cuantifica la fracción de radiación dispersada hacia delante y retrodispersada mediante la función de Heyney-Greenstein, F_{HG} , y k , que indica el nivel de anisotropía de la superficie; g es el ángulo entre las direcciones de iluminación y observación, y G una función de las mismas.

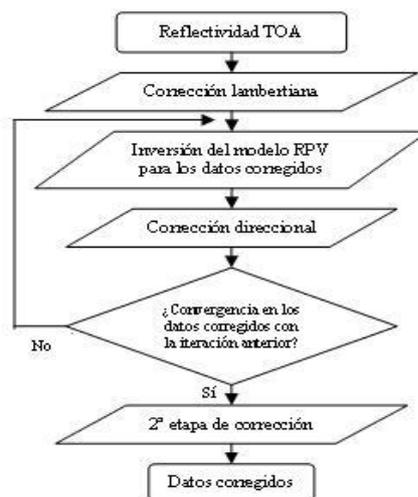


Figura 1.- Diagrama de flujo del algoritmo

Finalmente, el procedimiento acaba en una segunda etapa en la que se realiza un tratamiento del espectro angular obtenido que mejora sensiblemente el proceso global. Esta segunda etapa será descrita en el siguiente apartado.

PROCEDIMIENTO Y RESULTADOS

Para la validación del método se ha partido de reflectividades en el techo de la atmósfera simuladas con el código de transferencia radiativa MODTRAN-4, para 17 ángulos de observación (VZA entre -40° y $+40^\circ$, en el plano principal, ángulos negativos para la retrodispersión), con el Sol en -17° .

Estos datos se generan en las bandas del rojo ($0.67 \mu\text{m}$) y el infrarrojo próximo ($0.85 \mu\text{m}$) para una atmósfera continental de verano con visibilidad de 23 km. Se simula para nueve superficies naturales: estepa, arbustos, maíz, campo arado, pastos, bosque de pinar, vegetación dispersa erectófila, suelo arcilloso y prado (Engelsen1997).

Los resultados del esquema de corrección se representan para la superficie de campo arado (figura 2). Se puede apreciar cómo la corrección direccional propuesta mejora los resultados que se obtienen con la lambertiana, tanto en lo que respecta a la forma como al albedo global, y que la convergencia en los resultados de las iteraciones aparece en la número 12, si bien a la primera iteración en la que se asume las propiedades direccionales de la superficie las mejoras obtenidas ya son evidentes. En la banda del infrarrojo próximo los resultados alcanzados son muy similares.

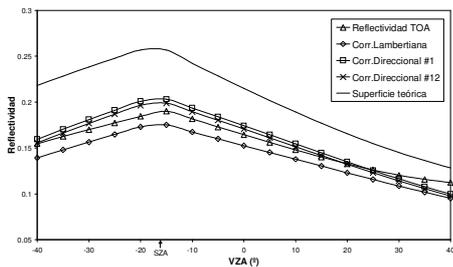


Figura 2.- Corrección atmosférica ($\lambda=0.67\mu\text{m}$) para un espectro angular de campo arado tras el procedimiento iterativo

Sin embargo, la curva obtenida de la corrección aún mantiene un defecto del orden del 20% respecto a la utilizada para la simulación, por lo que se hace necesaria la búsqueda de algún método que mejore el patrón de reflectividad ya corregido. Para ello se representa (figura 3) la fracción entre la reflectividad

teórica y la obtenida del proceso iterativo para las superficies de estudio, que se puede entender como un índice de la calidad de la corrección. Se observa en la misma que la desviación entre la curva teórica y la corregida para las distintas superficies es parecida cuantitativamente (un factor del orden de 1.3), si bien la separación cualitativa sí es característica de la superficie.

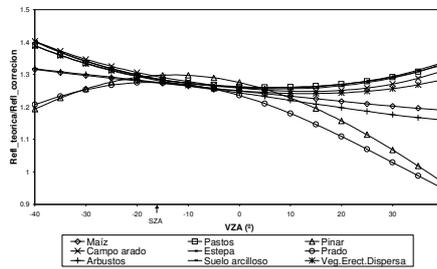
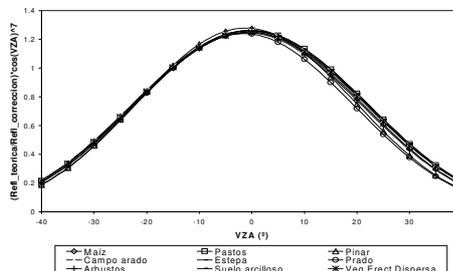


Figura 3.- Cociente entre la reflectividad teórica y corregida ($0.67 \mu\text{m}$) para las superficies de estudio

De la forma de las curvas anteriores se puede deducir que existe una dependencia de la precisión de la corrección con el VZA y el tipo de superficie, de modo que el siguiente paso en el tratamiento de los datos es la eliminación de estas dependencias. Para la dependencia existente con el tipo de superficie se multiplica las nueve curvas anteriores por un factor geométrico, $\cos^7 \theta_v$, determinado empíricamente (figura 4). Este factor hace que la desviación del patrón de reflectividad corregido respecto al teórico sea la misma para todas las superficies de estudio, con una dependencia angular similar en todas ellas. Esto posibilita que las operaciones que se realicen para eliminar la dependencia angular sean aplicables a cualquier superficie con una signatura espectral típica de las



cubiertas vegetales aquí analizadas.

Figura 4.- Producto de las curvas mostradas en la figura 3 con la potencia 7 del coseno del ángulo cenital de observación (VZA)

El procedimiento seguido para la normalización de los efectos relativos al VZA es el ajuste del valor medio de las curvas de la figura 4 a una campana de Gauss. Los parámetros resultantes del ajuste son válidos para todas las superficies descritas, siendo dependientes de la banda de observación. Invertiendo las operaciones realizadas se llega a encontrar una nueva reflectividad para la superficie, que se escribe

$$\rho_s' = \frac{\rho_s a e^{-b\theta_v^2}}{\cos^7 \theta_v}$$

con ρ_s la reflectividad corregida mediante el proceso iterativo y ρ_s' la encontrada tras la eliminación de las dependencias con el ángulo y la superficie y que, idealmente, debería ser igual a la reflectividad teórica (figura 5). En la figura 5 se aprecia la mejora sustancial obtenida tras esta segunda etapa de corrección.

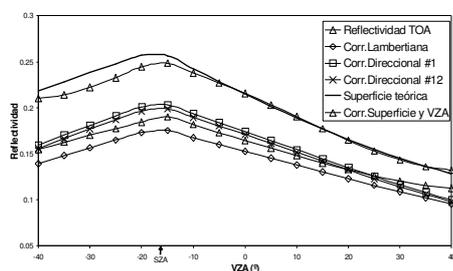


Figura 5.- Corrección atmosférica tras el tratamiento de los efectos angulares y de superficie

La justificación de la necesidad de aplicación de estos términos correctores hay que buscarla en las aproximaciones a las que recurre el 6S, como la aproximación de atmósfera plano-paralela o la sustitución de la reflectividad hemisférica-hemisférica por la integral angular de la direccional-hemisférica.

CONCLUSIONES

El procedimiento descrito aplicado a nueve superficies y dos longitudes de onda permite estimar la validez del método en todo el espectro solar para superficies naturales con una signatura angular de reflectividad ajustable al modelo de Rahman (curvas con un máximo suave en la dirección del *hot spot*).

El método demuestra ser más preciso frente al que se basa en una superficie lambertiana. Sin embargo, todavía debe ser objeto de investigación. Por una parte, la inclusión de los términos empíricos

descrita en la segunda etapa debe ser justificada físicamente, mediante la obtención de expresiones analíticas que realicen un papel similar al del término potencia séptima del coseno. Por otra, el algoritmo trata la atmósfera como una incógnita del problema, de modo que un objetivo futuro sea la inclusión de las variables atmosféricas como parámetros libres, que deben ser ajustados tal y como se hace con los de la superficie. La información hiperspectral que pueden proporcionar los sensores modernos permitiría que el sistema propuesto se pueda invertir con la robustez numérica necesaria.

BIBLIOGRAFÍA

Engelsen, O. 1997. An investigation of the coupled surface-atmosphere radiative transfer problem of remote sensing in the visible and near-infrared spectral bands and its inversion. *Tesis doctoral, University of Tromsø*

Hu, B., Lucht W., and Strahler A.H 1999. The interrelationship of atmospheric correction of reflectances and surface BRDF retrieval: a sensitive study. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, nº 37:724-738

Vermote F.V., Tanré, D., Deuzé, J.L., Herman, M. and Morcrette, J. 1997. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: An Overview. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, nº 35:675-686

Rahman, H., Pinty, B. and Verstraete, M.M. 1993. Coupled surface-atmosphere reflectance (CSAR) model. 2. Semiempirical surface model usable with NOAA AVHRR data. *Journal of Geophysical Research*, nº 98:20791-20801

Press, W.H., Flannery, B.P., Teukolsky, S.A. and Vetterling, W.T. 1986. *Numerical Recipes*. Cambridge University Press