

Estimación de la reflectividad superficial mediante datos del sensor aéreo AHS y comparación con el producto MODIS en la campaña CEFLES2

J. A. Sobrino* y B. Franch

*Global Change Unit (UCG). Imaging Processing Laboratory (IPL). Parque Científico.
Universitat de Valencia. P.O. Box 22085. 46071 Valencia. Spain*

Resumen

En este artículo se evalúa el producto MODIS de reflectividad superficial a través de su comparación con datos aéreos. En este sentido se ha desarrollado una metodología para obtener la reflectividad superficial y se ha aplicado a datos adquiridos mediante el sensor aerotransportado Airborne Hyperspectral Scanner (AHS). Se ha comparado la reflectividad superficial obtenida con la estimada por MODIS considerando la equivalencia entre las bandas 8 (centrada en 658 nm) y 15 (centrada en 862 nm) de AHS y las bandas 1 y 2 de MODIS respectivamente. El estudio se ha desarrollado en el contexto de la campaña CEFLES2 (CarboEurope, FLEX and Sentinel-2), la cual se desarrolló en Les Landes (Francia) durante tres periodos, abril, junio y septiembre de 2007. Con esta metodología se obtiene la reflectividad superficial de las imágenes AHS con un Root Mean Square Error (RMSE) al comparar con datos in situ de 0,02 en el visible y 0,05 en el infrarrojo cercano. La evaluación del producto MODIS de reflectividad superficial (MOD09GQ) se ha desarrollado comparándolo con la estimación mediante AHS. Los resultados muestran un RMSE de 0,03 en el visible y 0,08 en el infrarrojo cercano.

Palabras clave: MODIS, reflectividad superficial, espesor óptico de aerosoles, CEFLES2, corrección atmosférica, AHS.

Abstract

Evaluation of the MODIS surface reflectance product in the framework of the CEFLES2 campaign

In this paper the MODIS surface reflectance product is evaluated through its comparison with airborne data. In this way it has been developed a methodology to obtain the surface reflectance in the Visible and Near Infrared (VNIR) spectral range and it has been tested over airborne data by processing high-resolution images acquired with the Airborne Hyperspectral Scanner (AHS) sensor. AHS and MODIS surface reflectance images have been compared considering the equivalence between AHS bands Band 8 (centred on 658nm) and Band 15 (centred on 862 nm) and MODIS Band 1 and Band 2 respectively. The study has been performed in the framework of the CEFLES2 (CarboEurope, FLEX and Sentinel-2) campaign, which was developed in Les Landes region (France) during three different periods, April, June and September, on 2007. With this methodology the surface reflectance can be obtained with a Root Mean Square Error (RMSE) of 0.02 in the red spectral region and around 0.05 in the near infrared spectral region in comparison with ground measurements. Regarding the evaluation of the MODIS Collection C5 surface reflectance product (MOD09GQ), it has been performed by comparing with the AHS estimations. The results report a RMSE of 0.03 in the red spectral region and 0.08 in the near infrared spectral region.

Key words: MODIS, surface reflectance, aerosol optical thickness, CEFLES2, atmospheric correction, AHS.

* Autor para la correspondencia: jose.sobrino@uv.es

Recibido: 25-01-11; Aceptado: 10-05-11.

Introducción

El sensor MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) a bordo de los satélites Terra y Aqua permite una observación prácticamente global de la Tierra en una base diaria con una fina resolución espectral y espacial. La disponibilidad de productos MODIS ha supuesto un gran avance ya que estos son utilizados por la comunidad científica con diversas finalidades como por ejemplo la evaluación de la deforestación (Ferreira *et al.*, 2007), la estimación de la evapotranspiración (Mu *et al.*, 2007), estudios sobre la cobertura de nieve (Pu *et al.*, 2007), etc.

Recientemente, se ha desarrollado el producto MODIS de reflectividad superficial Collection 5 (C5) de manera que se han mejorado los algoritmos de corrección atmosférica, incluyendo máscara de nubes y aerosoles en comparación con los algoritmos de los productos Collection 4 (C4). Muchos estudios se han desarrollado validando el producto MODIS de aerosoles C4 (Chu *et al.*, 2002; Remer *et al.*, 2005; Levy *et al.*, 2005) y C5 (Papadimas *et al.*, 2008) considerando medidas in situ principalmente de AERONET. El producto MODIS de reflectividad superficial C5 también ha sido validado recientemente (VerMOTE *et al.*, 2008). En este contexto el principal objetivo del presente trabajo es la evaluación de los productos MODIS de reflectividad superficial y espesor óptico de aerosols C5 aprovechando la campaña de medidas CEFLES2.

Con esta finalidad el artículo se estructura en una primera introducción a la teoría y algoritmos utilizados. A continuación se desarrolla una sección de metodología en que se describe la campaña CEFLES2, los datos procesados y el método seguido en la corrección atmosférica. Finalmente se presentan los resultados obtenidos así como la discusión y las conclusiones.

Teoría y algoritmos

En la corrección atmosférica en el Visible e Infrarrojo Cercano (Visible and Near Infrared, VNIR) se deben tener en cuenta las diversas contribuciones de la atmósfera y la superficie a la irradiancia solar. En la Figura 1 se pueden ob-

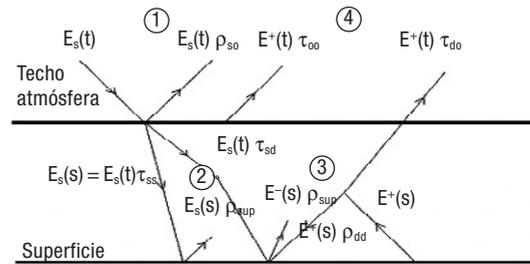


Figura 1. Diferentes contribuciones de la atmósfera y la superficie a la irradiancia solar.

servar las contribuciones a la señal en el techo de la atmósfera que se han tenido en cuenta en el rango espectral del visible y próximo infrarrojo (Visible and Near Infrared, VNIR). Como se puede observar se consideran cuatro términos: (1) fotones reflejados por la atmósfera antes de llegar a la superficie, (2) fotones transmitidos directamente a la superficie y son reflejados directamente al sensor, (3) fotones dispersados por la atmósfera antes de llegar a la superficie y son reflejados directamente al sensor y (4) fotones que sufren al menos dos interacciones con la atmósfera y una con la superficie.

Teniendo en cuenta estas contribuciones y considerando la superficie uniforme y Lambertiana (Nicodemus *et al.*, 1977), las ecuaciones de transferencia radiativa se pueden escribir como (Verhoef and Bach, 2003):

$$E_s(s) = \tau_{ss} E_s(t) \quad [1]$$

$$E^-(s) = \tau_{sd} E_s(t) + \rho_{dd} E^+(s) \quad [2]$$

$$E_o(t) = \rho_{so} E_s(t) + \tau_{do} E^+(s) + \tau_{oo} E_o(s) \quad [3]$$

$$E^+(s) = \rho_{sup} [E_s(s) + E^-(s)] \quad [4]$$

donde (s) y (t) indican la irradiancia (E) a nivel de la superficie y en el techo de la atmósfera (Top Of Atmosphere), TOA respectivamente, E_s es la irradiancia solar, E^- es la irradiancia descendente, E^+ es la ascendente y E_o es la irradiancia medida por el sensor. Además, ρ_{so} es la reflectividad bidireccional de la capa atmosférica, τ_{ss} es la transmisividad directa descendente, τ_{sd} es la transmisividad difusa en la dirección del sol, τ_{do} es la transmisividad difusa en la dirección de observación, ρ_{dd} es el albedo esférico de la atmósfera, τ_{oo} es la transmisividad directa ascendente y ρ_{surf} es la reflectividad superficial.

La ecuación [1] describe la atenuación de la radiación a lo largo de toda la capa atmosférica a través de la transmisividad directa τ_{ss} , la

ecuación [2] refleja la generación de un flujo difuso descendente compuesto por un flujo solar directo difusamente transmitido y un flujo difuso ascendente de la superficie que es reflejado en dirección descendente por la atmósfera. Aquí, el término ρ_{dd} es el albedo esférico atmosférico. La ecuación [3] describe como la radiancia en el techo de la atmósfera es generada a partir de la radiancia directa dispersada atmosféricamente vía el término ρ_{so} (el cual se puede considerar como reflectividad bidireccional de la capa atmosférica), el flujo ascendente difuso que es dispersado en la dirección de observación vía el término de transmisividad τ_{do} , y la radiancia directamente transmitida desde el blanco observado vía la transmisividad directa τ_{oo} . Finalmente, la ecuación [4] describe la reflexión de la radiancia por una superficie Lambertiana.

Considerando la aproximación de que la irradiancia medida por el sensor a nivel de superficie es igual a la irradiancia ascendente en la superficie [$E_o(s) = E^+(s)$] ya que se considera una superficie Lambertiana y escribiendo la ecuación en términos de reflectividad, se puede obtener la expresión (Verhoef and Bach, 2003):

$$\rho_{surf} = \frac{\rho_{TOA} - \rho_{so}}{(\tau_{do} + \tau_{oo})(\tau_{ss} + \tau_{sd}) + \rho_{dd}(\rho_{TOA} - \rho_{so})} \quad [5]$$

donde los inputs de esta ecuación son la imagen medida por el sensor (ρ_{TOA}) y los parámetros atmosféricos ρ_{so} , τ_{ss} , τ_{sd} , τ_{do} , ρ_{dd} y τ_{oo} .

El objetivo de este artículo es obtener la reflectividad superficial de la forma más precisa posible para poderla comparar con los datos MODIS. En este sentido se ha seguido la metodología basada en el código de transferencia radiativa MODTRAN4.3 (Berk *et al.*, 2003) que se detalla en la siguiente sección.

Metodología

Campaña de medidas CEFLES2

CEFLES2 (CarboEurope, FLEX and Sentinel-2) fue una campaña con múltiples objetivos y que sacó provecho de la correlación entre medidas in situ y medidas con sensores aerotransportados, realizadas en coordinación con CERES (CarboEurope Regional Experi-

ment Strategy). La campaña apoyó el desarrollo de la misión FLEX la cual fue candidata en el marco Earth Explorer en el momento de realización de la campaña al proporcionar medidas aéreas de fluorescencia y medidas intensivas in situ de procesos a nivel de hoja, y la misión Sentinel-2 la cual es una misión multiespectral basada en la observación a nivel global a alta resolución. Las medidas aéreas e in situ tuvieron lugar en la región francesa de Les Landes en abril, junio y septiembre de 2007 con la finalidad de registrar diferentes etapas de crecimiento de la vegetación. Las medidas aéreas realizadas consistieron en imágenes de flujo de carbono, de fluorescencia e hiperespectrales cubriendo las regiones espectrales del visible, próximo infrarrojo, infrarrojo de onda corta y térmico.

El área de estudio donde se desarrolló CEFLES2 comprendía un rectángulo desde Burdeos a Toulouse en el sureste de Francia. Nuestro estudio se centra en un área agrícola cerca de Marmande que fue el principal objetivo de FLEX durante las tres campañas y además fue zona donde se realizaron más medidas para CERES y Sentinel-2. La zona consistió en grandes campos de diferentes cultivos, principalmente trigo de invierno y maíz en un terreno llano al pie del valle Garonne.

Datos aéreos: AHS

Los datos utilizados en este trabajo fueron adquiridos por el sensor Airborne Hyperspectral Scanner (AHS) (Sobrino *et al.*, 2008), el cual es un radiómetro aerotransportado de 80 bandas desarrollado y creado por SensyTech Inc. y actualmente es administrado por el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA). El AHS tiene 63 bandas en el VNIR y SWIR, 7 bandas en el rango entre 3 y 5 micrómetros y 10 bandas en la región entre 8 y 13 micrómetros. Nuestro estudio se centrará en las primeras 20 bandas cuya cobertura espectral cubre desde unos 400 nm a 1.000 nm.

Los datos utilizados en este trabajo se adquirieron en una línea recta de vuelo a dos diferentes alturas de 2.865 m (vuelos altos) y 1.097 m (vuelos bajos) y durante tres fechas diferentes, 24 de abril, 30 de junio y 15 de sep-

tiembre de 2007. Las imágenes resultantes tienen una resolución espacial de 6m en vuelos altos y 2 m en vuelos bajos.

Medidas in situ de reflectividad

En el test de la corrección atmosférica de las imágenes AHS se han considerado dos espectrorradiómetros ASD FieldSpec Pro. El principal objetivo de estas medidas en la campaña CEFLES2 fue la obtención de suficientes espectros representativos de distintos tipos de superficie de la zona de medidas. Para realizar las medidas se siguió el siguiente procedimiento: se seleccionaron cuatro áreas de medida para cada campo considerado, en cada una de estas áreas se midieron 3 puntos intercalando medidas del blanco de referencia tanto al inicio como al final.

Los datos de uno de los ASD fueron procesados por la Humboldt-Universität en Berlín y los datos del otro ASD fueron tratados por el grupo Forschungszentrum Jülich en Alemania.

La Tabla 1 resume todas las medidas in situ que se han tenido en cuenta en el estudio sobre la precisión de la estimación de la reflectividad superficial a partir de datos adquiridos por los sensores aerotransportados.

Estimación de aerosoles y reflectividad superficial

Con el objetivo de obtener imágenes de reflectividad superficial se ha aplicado la corrección atmosférica a las imágenes AHS considerando la ecuación [5]. Los parámetros atmosféricos de los que depende esta ecuación han sido obtenidos utilizando el código de transferencia radiativa MODTRAN4.3. Como nuestro estudio se basa en datos adquiridos por sensores aerotransportados, en el cálculo de cada parámetro atmosférico debemos decidir en-

Tabla 1. Datos in situ utilizados en el test de la corrección atmosférica

Mes	Especies			
Abr	Suelo desnudo		Trigo	
Jun	Suelo desnudo		Maíz	Girasol
Sep	Suelo desnudo	Maíz	Judías	Girasol

tre considerar toda la atmósfera o sólo la atmósfera entre la superficie y la altura del sensor. En consecuencia, sólo hemos considerado toda la atmósfera en el cálculo de τ_{ss} (transmisividad directa descendente) y τ_{sd} (transmisividad difusa en la dirección solar) y la atmósfera entre la superficie y el sensor en los demás casos. En la campaña CEFLES2 los radiosondeos atmosféricos fueron considerados de la base de datos RAOB considerando la zona Bordeaux/Merignac (<http://raob.fsl.noaa.gov>).

Para obtener el espesor óptico de aerosoles (AOT) y evaluar el producto MODIS de aerosoles estos se han estimado a partir de las imágenes adquiridas mediante teledetección aplicando un método propuesto en Guanter *et al.* (2008). Este se basa en la comparación en la región espectral desde 412 nm a 681 nm entre el espectro de una especie de superficie oscura (dark spectrum) y la radiancia total dispersada resultante de considerar diferentes valores de AOT. La superficie oscura considerada es el espectro resultante de la búsqueda del valor mínimo de radiancia en cada banda espectral de la imagen. El valor final de AOT será aquel que implique la mayor proximidad entre el espectro de la superficie oscura y la radiancia total dispersada, no permitiendo que la radiancia dispersada sea mayor que el espectro de la superficie oscura en ninguna de las bandas del visible.

Una vez obtenida la reflectividad superficial se ha comparado con los datos in situ realizados en la campaña de manera simultánea al paso del sensor. Esto se desarrollará en la siguiente sección.

Resultados

Para evaluar el producto MODIS de reflectividad superficial C5 este se ha comparado con la estimación de reflectividad superficial con imágenes AHS siguiendo la metodología escrita. Primero, se han estimado los valores de AOT con las imágenes AHS de la campaña CEFLES2.

En la Figura 2 se he representado un ejemplo de una imagen adquirida el 24 de abril en que se ha representado la radiancia total dispersada simulada para diferentes valores de AOT considerando el modelo rural de aerosoles y el «dark spectrum» obtenido de la imagen.

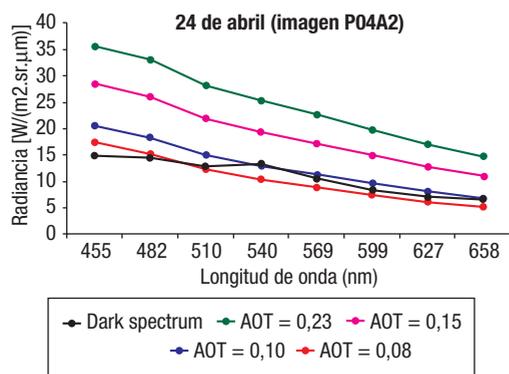


Figura 2. Comparación entre el «dark spectrum» de una imagen AHS del 24 de abril y la radiancia total dispersada simulada para diferentes valores de AOT.

A partir de esta gráfica se puede asumir que el valor de AOT estimado en el momento en que la imagen fue captada es 0,08. Aunque la radiación total dispersada considerando este valor es mayor que el «dark spectrum» en algunas bandas del dominio espectral del visible, consideramos este valor como el AOT real. Para comprobar el efecto de considerar este valor en la estimación de reflectividad superficial, se ha invertido la corrección atmosférica para estimar la radiancia a nivel del sensor que debería haber medido el mismo. Comparando la simulación con el valor real, el RMSE a través de la imagen es de $0,002 \text{ (W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1})$ para todas las bandas, implicando un error relativo entre el 0,008% y 0,003% en radiancias.

En la Tabla 2 se resume los valores de AOT estimados a partir del análisis de todas las imágenes AHS de la campaña CEFLES2. En esta tabla, el error se refiere a la variación temporal de este valor.

Comparando el AOT estimado a partir de las imágenes y el producto de MODIS de AOT, se

Tabla 2. Comparación de los AOT estimados por MODIS y obtenidos de las imágenes AHS

Fecha	AOT (MODIS)	AOT (imagen)
24 abril	0,23	$0,08 \pm 0,00$
30 junio	0,43	$0,09 \pm 0,01$
15 septiembre	0,13	$0,09 \pm 0,01$

puede observar que en todos los casos el producto MODIS sobreestima en promedio 0,15 el valor real de AOT. Esta diferencia es mucho más notable el 30 de junio, lo cual puede ser debido a la presencia de nubes altas y neblina en esta fecha. En consecuencia, debido a que MODIS tiene una resolución espacial menor que AHS, el pixel de MODIS podría incluir alguna nube. Además, la diferencia en altura entre MODIS y AHS, podría situar las nubes altas entre ambos sensores, incluyéndolas MODIS pero no AHS. La sobreestimación del producto MODIS de aerosoles también se ha detectado en anteriores estudios en que validan este producto con datos medidos in situ con un fotómetro solar, principalmente con datos de AERONET (Levy *et al.*, 2005; Papadimas *et al.*, 2008). Estos estudios concluyen que tanto los productos MODIS de aerosoles C4 como C5 sobreestiman los valores de bajo AOT y subestiman los valores altos de AOT, aunque los datos de C5 se ajusten significativamente mejor a los datos de AERONET que los C4 (Papadimas *et al.*, 2008).

Para proceder en la evaluación del producto de reflectividad superficial de MODIS, a continuación se ha realizado el test de la corrección atmosférica con datos in situ para proceder finalmente a la comparación de ambas imágenes.

La Figura 3 muestra la comparación del espectro de dos campos, un trigo de invierno y

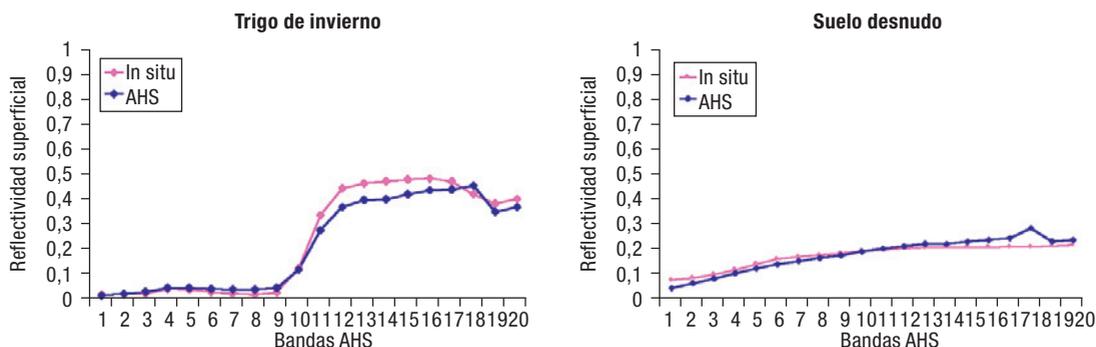


Figura 3. Espectro en el VNIR medido in situ y estimado a partir de una imagen AHS de dos superficies diferentes.

Tabla 3. Valores RMSE al comparar la reflectividad superficial estimada por AHS y los datos in situ

		Banda 9	Banda 12
24 abril	Suelo	0,01	0,03
	Vegetación	0,00	0,04
30 junio	Suelo	0,02	0,01
	Vegetación	0,01	0,09
15 septiembre	Suelo	0,03	0,06
	Vegetación	0,01	0,09
RMSE medio		0,02	0,05

un suelo desnudo, medidos a nivel in situ respecto al estimado a nivel aéreo.

En esta figura se observa una buena concordancia entre los datos in situ y los datos corregidos atmosféricamente. Para realizar el test de la corrección atmosférica pero teniendo en cuenta todas las imágenes AHS y periodos de medidas, hemos centrado el análisis en las bandas utilizadas en la obtención del NDVI, la banda 9 (centrada en 687 nm) y la banda 12 (centrada en 773 nm). En la Tabla 3 se resume el valor de RMSE obtenido al comparar los datos in situ con los datos estimados mediante AHS diferenciando las distintas bandas, fechas y cultivos.

En esta tabla se puede observar que los mayores errores se obtienen para la banda 12 y para vegetación. Este mayor error va ligado al hecho de que en esta región espectral la reflectividad de la vegetación tiene valores mayores. Se observa también que abril es el mes con menores errores. Esto puede ser debido a que en esta fecha se consideran medidas sobre suelos desnudos muy similares y la misma clase de vegetación (trigo) que en estas fechas era muy homogénea. Sin embargo, en junio y septiembre las medidas in situ se centraron sobre diferentes tipos de vegetación (como maíz, girasoles y judías) y suelos desnudos algo distintos (por ejemplo en septiembre se midió en un área quemada). Finalmente, el RMSE medio considerando todas las fechas y tipos de cultivos es 0,02 en la banda 9 y 0,05 en la banda 12.

Una vez obtenida la reflectividad superficial con el sensor aéreo AHS se ha realizado una comparación entre estos valores y el producto de reflectividad superficial de MODIS

(Vermote *et al.*, 1999). Este consta de dos bandas espectrales, la primera cubre la región desde 620 nm a 670 nm y la segunda cubre la región desde 841 nm a 876 nm. En la comparación se los diferentes sensores hemos considerado la equivalencia entre la primera banda de MODIS con la banda 8 de AHS (centrada en 658 nm) y la segunda banda de MODIS con la banda 15 de AHS (centrada en 862 nm).

Por otra parte, la resolución espacial de AHS es de 6 m (ya que en la comparación con MODIS sólo se han tenido en cuenta los vuelos altos de AHS) y la resolución espacial de MODIS es 250 m, por lo que para poder comparar los productos de los distintos sensores se ha degradado la resolución de AHS a 250 m.

En la Figura 4 se puede observar un ejemplo de la diferencia entre las imágenes de reflectividad de AHS y el producto de MODIS para el día 15 de septiembre.

En la Tabla 4 se muestra el valor del RMSE así como el Bias obtenidos al comparar el producto de reflectividad superficial de MODIS con la estimación de la misma de las imágenes AHS e Hyper.

A partir de esta tabla se puede afirmar que la diferencia entre el producto de MODIS y la estimación de la reflectividad superficial por AHS es menor en la banda 1 que en la banda 2. Esto puede ser debido a que la señal en esta última banda es mayor. También se puede remarcar que la principal contribución al RMSE es el Bias y en todos los casos este tiene un valor positivo. Esto indica que el producto de reflectividad superficial de MODIS es en la mayoría de los casos mayor que la estimación con imágenes AHS y principalmente debido a un valor constante. Cabe destacar que el producto MODIS de reflectividad superficial se estima con el código de transferencia radiativa 6S (Vermote *et al.*,

Tabla 4. Valores del RMSE y Bias al comparar la reflectividad superficial estimada a partir de AHS con el producto de reflectividad superficial de MODIS

	Banda 1		Banda 2	
	RMSE	Bias	RMSE	Bias
Abr	0,03	0,02	0,06	0,04
Jun	0,03	0,02	0,08	0,06
Sep	0,03	0,02	0,08	0,08

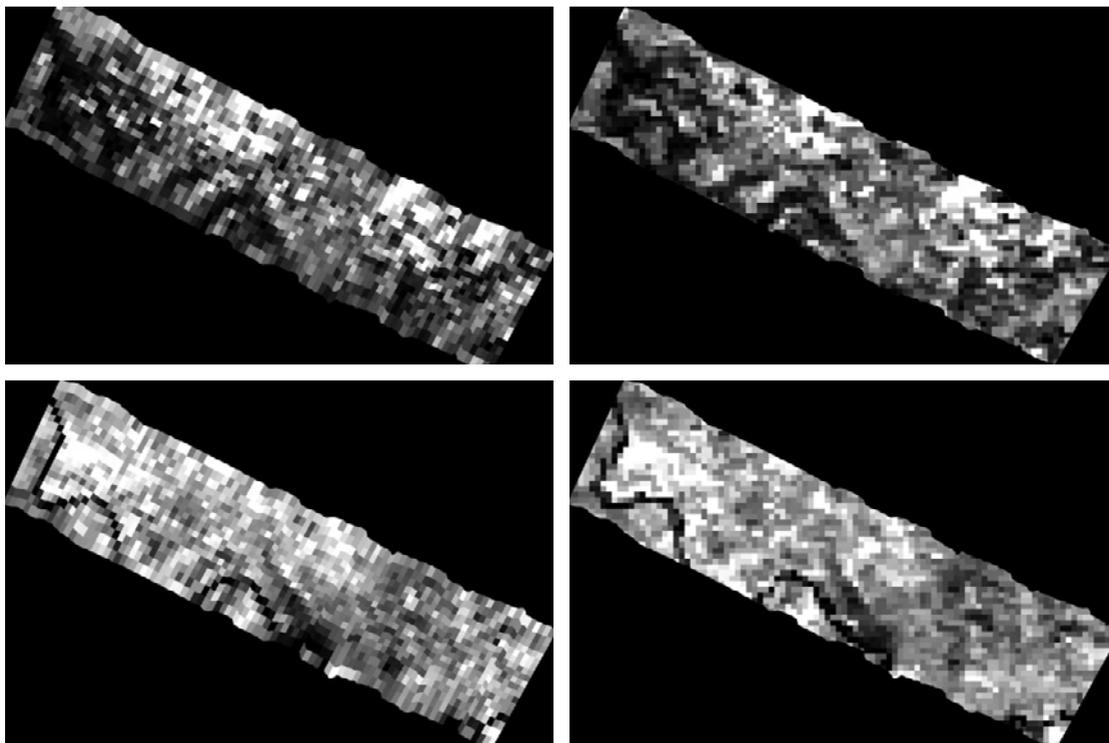


Figura 4. Comparación entre la reflectividad superficial estimada de las imágenes AHS y el producto de reflectividad superficial de MODIS el 15 de septiembre.

2006), en cambio, las imágenes AHS han sido corregidas con el código MODTRAN. En consecuencia, el hecho de haber tenido valores similares, muestra que ambos códigos de transferencia radiativa, en la estimación de reflectividad superficial, proporcionan resultados totalmente comparables.

A partir de estos resultados podemos concluir que en el contexto de la campaña CEFLES2 el producto de reflectividad superficial de MODIS en la banda 1 y 2 es fiable ya que proporciona valores muy similares a la reflectividad superficial estimada a partir de sensores aerotransportados.

Conclusiones

El objetivo de este estudio consistía en evaluar el producto MODIS de reflectividad superficial en el contexto de la campaña CEFLES2. En el estudio, también se ha analizado el producto MODIS de aerosoles y se ha comprobado que en todas las fechas este producto sobreestima el valor de AOT, siendo el caso de junio el de mayor diferencia respecto al valor real.

Esta sobreestimación también ha sido constatada en otros estudios como hemos visto en la sección de resultados. La metodología presentada para la estimación de la reflectividad superficial en el VNIR presenta al ser aplicada a imágenes AHS un RMSE de 0,02 en el visible y 0,05 en el infrarrojo cercano. Al comparar estas imágenes de mayor resolución espacial con el producto MODIS de reflectividad superficial se ha obtenido un RMSE de 0,03 en el visible y 0,08 en el infrarrojo cercano lo que prueba la precisión de este producto MODIS.

Este estudio se ha centrado en una zona agrícola. En un trabajo futuro este estudio se aplicará a una zona urbana al procesar imágenes adquiridas en la campaña DESIREX 2008 (Dual-use European Security IR Experiment) la cual se desarrolló en Julio de 2008 en la ciudad de Madrid.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo en este trabajo por una parte del Ministerio de Ciencia y Tecnología (TERMASAT, proyecto ESP2005-

07724-C05-04; EODIX, proyecto AYA2008-0595-C04-01) y por otra parte de la Unión Europea (CEFLES2, proyecto 20801/07/I-LG; CEOP-AEGIS, proyecto FP7-ENV-2007-1 proposal No. 212921; WATCH, proyecto 036946).

Referencias

- BERK, A., ANDERSON, G. P., ACHARYA, P. K., HOKE, M. L., CHETWYND, J. H., BERNSTEIN, L. S., SHETTLE, E. P., MATTHEW, M. W. & ADLER-GOLDEN, S. M. 2003. MODTRAN4 Version 3 Revision 1 Users's Manual. *Tech. rep., Air Force Research Laboratory, Hanscom Air Force Base, MA, USA.*
- CHU, D. A., KAUFMAN, Y. J., ICHOKU, C., REMER, L. A., TANRE, D. & HOLBEN, B. N. 2002. Validation of MODIS aerosol optical depth retrieval over land. *Geophys. Res. Lett.*, 29: 8007. doi: 10.1029/2001GL013205
- FERREIRA, N. C., FERREIRA, L. G., HUETE, A. R. & FERREIRA, M. E. 2007. An operational deforestation mapping system using MODIS data and spatial context analysis. *International Journal of Remote Sensing*, 28(1-2): 47-62.
- GUANTER, L., GÓMEZ-CHOVA, L. & MORENO, J. 2008. Coupled retrieval of aerosol optical thickness, columnar water vapour and surface reflectance maps from ENVISAT/MERIS data over land. *Remote Sensing of Environment* 112: 2898-2913.
- LEVY, R. C., REMER, L. A., MARTINS, J. V. & KAUFMAN, Y. J. 2005. Evaluation of the MODIS aerosol retrievals over Ocean and Land during CLAMS. *Journal of the atmospheric sciences* 62: 974-992
- MU, Q., HEINSCH, F. A., ZHAO, M. & RUNNING, S.W. 2007. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. *Remote Sensing of the Environment*, 111(4): 519-536.
- NICODEMUS, F. E., RICHMOND, J. C., HSIA, J. J., GINSBERG, I. W. & LIMPERIS, T. 1977. Geometrical considerations and nomenclature for reflectance. *Tech. rep., National Bureau of Standards, US Department of Commerce, Washington, DC, USA.*
- PAPADIMAS C. D., MIHALOPOULOS, N., KANAKIDOU, M., KATSOLIS, B. D. & VARDAS, I. 2008. Assessment of the MODIS Collections C005 and C004 aerosol optical depth products over the Mediterranean basin. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 8: 16891-16916
- PU, Z. X., XU, L. & SALOMONSON, V. V. 2007. MODIS/Terra observed seasonal variations of snow cover over the Tibetan Plateau. *Geophysical Research Letters*, 34(6), Art. No. L06.
- REMER, L. A., KAUFMAN, Y. J., TANRE, D., MATTOO, S., CHU, D. A., MARTINS, J. V., LI, R.-R., ICHOKU, C., LEVY, R. C., KLEIDMAN, R. G., ECK, T. F., VERMOTE, E. & HOLBEN, B. N. 2005. The MODIS Aerosol Algorithm, Products and Validation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, Special Section, 62: 947-973.
- SOBRINO, J. A., JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C., SORIA, G., GÓMEZ, M., BARELLA-ORTIZ, A., ROMAGUERA, M., ZARAGOZA, M., JULIEN, Y., CUENCA, J., ATITAR, M., HIDALGO, V., FRANCH, B., MATTAR, C. *et al.* 2008. Thermal Remote Sensing in the Framework of the SEN2FLEX Project: Field Measurements, Airborne Data and Applications. *International Journal of Remote Sensing*, 29: 4961-4991.
- VERHOEF, W. & BACH, H. 2003. Simulation of hyperspectral and directional radiance images using coupled biophysical and atmospheric radiative transfer models, *Remote Sensing of Environment*, 87: 23-41
- VERMOTE, E. F., TANRE, D., DEUZE, J. L., HERMAN, M., MORCRETTE, J. J., KOTCHENOVA, S. Y. & MIURA, T. 2006. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (6S), 6S User Guide Version 3 (November, 2006), <http://www.6s.ltdri.org>
- VERMOTE, E. F. & VERMEULEN, A. 1999. Atmospheric correction algorithm: spectral reflectances (MOD09). *Algorithm technical Background Document (MODIS).*
- VERMOTE, E. F. & KOTCHENOVA, S. 2008. Atmospheric correction for the monitoring of land surfaces, *J. Geophys. Res.*, 113, D23S90, doi: 10.1029/2007JD009662.