

Evaluación del Índice de Aerosoles AI-TOMS a partir de parámetros de aerosoles derivados de MODIS

O. E. García⁽¹⁾, A. M. Díaz⁽¹⁾, C. Guirado⁽¹⁾, J. Barrancos⁽²⁾, J. P. Díaz⁽¹⁾, F. J. Expósito⁽¹⁾, y J. C. Guerra⁽¹⁾

⁽¹⁾Dep. Física Fundamental y Exp., Electrónica y Sistemas. Universidad de La Laguna. Tenerife. Avda. Francisco Sánchez s/n, 38200 La Laguna, Tenerife, Canarias. ogarcia@ull.es

⁽²⁾División de Investigación Medioambiental. Instituto Tecnológico y de Energías Renovables, S.A., Polígono Industrial de Granadilla, 38611 Granadilla, Tenerife, Canarias.

Resumen

El índice de aerosoles (AI) del TOMS es una herramienta muy útil para evaluar los aerosoles absorbentes en la región espectral ultravioleta (UV). En este trabajo se presenta una metodología alternativa para evaluar este parámetro a partir de datos suministrados por el sensor MODIS. Para ello, se han seleccionado nueve píxeles TOMS en la zona de Canarias para el año 2002, que cubren la región 27-31°N, 15-19°W; todos ellos frecuentemente afectados por intrusiones de polvo mineral africano. En cuanto a MODIS se ha utilizado el producto elaborado de aerosoles nivel 2 sobre el océano, MOD04_L2, en sus siete bandas espectrales (0.47-2.13 μm) proporcionado por el satélite Terra. Para reducir el número de parámetros de aerosoles MODIS útiles se ha aplicado un análisis factorial por componentes principales, obteniéndose cuatro factores que reducen el número de variables de 59 a 40. Sobre estos 40 parámetros se han aplicado técnicas de análisis lineal multivariante para encontrar la combinación de variables independientes MODIS que mejor evalúe el AI. Así se ha obtenido un ajuste lineal que depende del espesor óptico de aerosoles a 0.47 μm , del flujo transmitido a 0.55 μm y del reflejado a 2.13 μm . El coeficiente de correlación de dicho ajuste es $R=0.94$, y explica el 88% de la variación en el AI.

1. Introducción

Los aerosoles atmosféricos constituyen un problema a escala global dada su gran variabilidad espacial y temporal, por lo que una herramienta fundamental para su caracterización son las técnicas de teledetección espacial. Entre las plataformas que actualmente suministran datos sobre estas partículas cabe destacar los sensores TOMS y MODIS. En este sentido el índice de aerosoles, AI, del sensor TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) es una herramienta muy útil dado que proporciona una imagen global de los aerosoles atmosféricos absorbentes en la región ultravioleta del espectro

solar tales como polvo mineral, quema de biomásas, etc. (Torres et al., 1998). Este sensor ha estado en diferentes plataformas espaciales y cuenta con una serie temporal casi continua de 23 años, una de las más largas que existen actualmente en cuanto a teledetección espacial de aerosoles atmosféricos. El cálculo de este parámetro se basa en el contraste de las irradiancias medidas a dos longitudes de onda: 0.33 y 0.36 μm , en el caso del Earth Probe (éstas varían según la plataforma).

Por otra parte, el sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectrometer) vuela a bordo de dos satélites Terra y Aqua, desde 1999 y 2002 respectivamente. Cuenta con 36 bandas espectrales que van desde el visible hasta el infrarrojo térmico, aunque son los primeros siete canales (0.47, 0.55, 0.66, 0.87, 1.24, 1.64 y 2.13 μm) los usados para derivar propiedades de los aerosoles atmosféricos. La adquisición de datos se realiza con tres resoluciones espaciales dependiendo del canal de medida: 0.25, 0.50 y 1 km (Kaufman y Tanré, 1998). El mayor número de canales y la mejora de los métodos de inversión permiten al MODIS realizar una completa caracterización de los aerosoles atmosféricos, si bien no en la zona región UV. De ahí la necesidad de complementar la información de sendos sensores. Para ello en este trabajo se propone una estrategia alternativa para estimar el AI-TOMS a partir de datos suministrados por el sensor MODIS, lo que nos permitiría poder detectar aerosoles atmosféricos absorbentes en el UV mediante este sensor.

2. Análisis Lineal Multivariante

2.1. Análisis Factorial

El análisis factorial es una técnica muy utilizada en la reducción de los datos que intenta identificar factores no correlacionados, que expliquen la configuración de las asociaciones dentro de un conjunto de variables observadas. Aplicando esta técnica y en particular el criterio de Kaiser (i.e.

autovalores mayores que uno) a los 59 parámetros de aerosoles de las siete bandas espectrales (0.47-2.13 μm) en el producto MODIS-Terra nivel 2 sobre el océano (MOD04_L2) junto con el AI-TOMS (v. 8), se han extraído cuatro factores para el 2002.

El principal inconveniente a la hora de relacionar las magnitudes derivadas de ambos sensores es que presentan distinta resolución espacial. Mientras que TOMS proporciona los datos para un píxel de 1.25° en longitud por 1° en latitud, MODIS ofrece un promedio en un píxel de 10 km, aunque su resolución espacial sea mucho mayor. Por ello ha sido necesario calcular el promedio MODIS para cada uno de los píxeles TOMS, los cuales cubren la región 27-31°N, 15-19°W en la zona de Canarias. Además se ha seleccionado los datos proporcionados por el satélite Terra, dado que su pase sobre dicha región es el más próximo al promedio ofrecido por TOMS (± 1 hora).

La varianza total explicada para el conjunto original de datos, la cual es obtenida con estos cuatro factores, es muy alta, del 95%. Además, la comunalidad o extracción final, i.e. proporción de variabilidad de cada una de las variables explicada por el conjunto de los cuatro factores es mayor del 95% para todas las variables MODIS excepto para la fracción nubosa (FN), menor del 20%. En la figura 1 se muestra como la extracción final para el índice de aerosoles disminuye claramente a medida que la fracción nubosa aumenta, siendo superior al 85% para FN menores del 20%. Este filtro aunque reduce el número de datos disponibles de 1512 a 248 (16%), garantiza que la varianza presentada por el AI quedará altamente explicada por el conjunto de variables MODIS asociadas al factor del AI y será factible obtener un modelo fiable de regresión lineal multivariante con éstas. Así, en particular, con el conjunto de 248 datos para el 2002, la comunalidad final para el índice de aerosoles es del 86%.

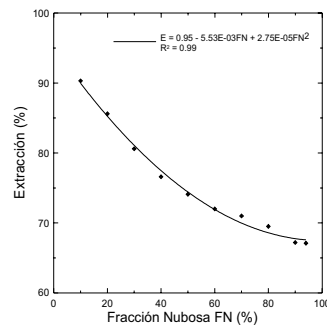


Figura 1: Extracción final para el AI-TOMS en función de la fracción nubosa MODIS.

La asociación de cada variable MODIS y del AI con su factor mejora si se aplica una rotación de los factores originales. El objetivo de ésta es obtener una solución más interpretable, tratando de minimizar el número de variables con saturaciones altas sobre un mismo factor. La tabla 1 muestra la matriz de componentes para una rotación Varimax del primer factor, donde se incluye el AI y las variables MODIS que presentan un coeficiente de correlación significativo (superior a 0.40). Estas variables serán las seleccionadas para realizar la posterior regresión lineal multivariante. En el factor 2 se asocian claramente ($R \approx 0.90$) los parámetros de aerosoles relacionados con su tamaño (radio efectivo y parámetro de Ångström) y con la función de fase de dispersión (factor de asimetría y fracción de retrodispersión). Los factores 3 y 4 explican tan sólo un 7% de la varianza total del conjunto de datos, y presentan saturaciones residuales de todos las variables.

Tabla 1: Matriz de componentes rotados para el primer factor, donde se incluye el AI.

Variable	R	Variable	R
EOA1 ^a	0.97	AI ^d	0.90
EOA2	0.97	RefM1 ^e	0.47
EOA3	0.97	RefM2	0.75
EOA4	0.98	RefM3	0.87
EOA5	0.98	RefM4	0.93
EOA6	0.99	RefM5	0.95
EOA7	0.99	RefM6	0.95
EOAL1 ^b	0.98	RefM7	0.96
EOAL2	0.98	RefF3 ^f	0.48
EOAL3	0.98	RefF4	0.60
EOAL4	0.98	RefF5	0.70
EOAL5	0.98	RefF6	0.74
EOAL6	0.99	RefF7	0.77
EOAL7	0.99	TrF1 ^g	-0.73
EOAS1 ^c	0.95	TrF2	-0.84
EOAS2	0.94	TrF3	-0.89
EOAS3	0.94	TrF4	-0.93
EOAS4	0.94	TrF5	-0.94
EOAS5	0.93	TrF6	-0.92
EOAS6	0.93	TrF7	-0.88
EOAS7	0.93		

^a Espesor Óptico de Aerosoles. ^b EOA para el modo grueso de la distribución de partículas. ^c EOA para el modo fino. ^d Índice de aerosoles. ^e Reflectancia Media. ^f Flujo Reflejado. ^g Flujo Transmitido. El número corresponde al canal MODIS.

2.2. Regresión Lineal Multivariante

Con las 40 variables MODIS extraídas del análisis factorial (tabla 1) se ha realizado un ajuste lineal multivariante siguiendo el método *paso a*

para. Para ello se ha seleccionado un conjunto de datos aleatoriamente para el 2002 que incluye el 55% (136) de los originales (248). Sólo tres variables superan los criterios de entrada impuestos en el método, i.e. nivel de significación de su estadístico de tolerancia F menor que el valor de entrada 0.50. Dichas variables son el espesor óptico de aerosoles a 0.47 μm , el flujo transmitido y reflejado a 0.55 μm y 2.13 μm . Con éstas se ha obtenido un ajuste lineal con un alto coeficiente de correlación, $R=0.94$, explicando el 88%, R^2 , de la varianza en el AI (tabla 2). El error típico asociado al valor predicho del AI es de ± 0.45 , del orden del error experimental ± 0.50 y próximo al límite de detección del sensor TOMS (Herman et al., 1997).

Tabla 2: Coeficientes y error típico del modelo lineal multivariante. Su peso en el ajuste viene dado por el parámetro t , cociente entre el valor del coeficiente y su error típico.

	Coefficiente	Error típ.	t
EOA1	5.53	0.32	17.32
TrF2	92.97	12.24	7.60
Constante	-89.04	11.81	-7.54
RefF7	73.95	12.82	5.77

3. Análisis Residual

Para analizar los residuos del modelo de regresión obtenido se ha aplicado el ajuste multivariante dado en la tabla 2 sobre el subconjunto de datos originales no seleccionados aleatoriamente (112) en el 2002, evaluando así el AI (figura 2).

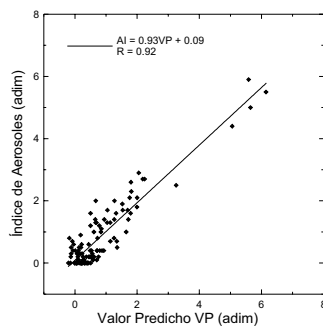


Figura 2: AI-TOMS frente al valor predicho por el subconjunto aleatorio seleccionado para el 2002.

En la figura 3 se muestra la dependencia de los residuos (diferencia entre el AI y el valor predicho por el modelo de regresión) con el índice de aerosoles. Los intervalos para el AI corresponden al percentil 20 del subconjunto de datos considerados. Para cada rango se observa como la mediana se localiza muy próxima a cero y siempre dentro del

error típico del valor predicho y del error experimental (± 0.45 y ± 0.50 respectivamente). A su vez la mayor dispersión de los datos se concentra en los rangos de los valores más altos (situaciones con una alta carga de aerosoles), donde la estimación predicha por el modelo subestima el valor real, disminuyendo la distancia intercuartil para situaciones limpias de aerosoles absorbentes en el UV ($AI \approx 0$).

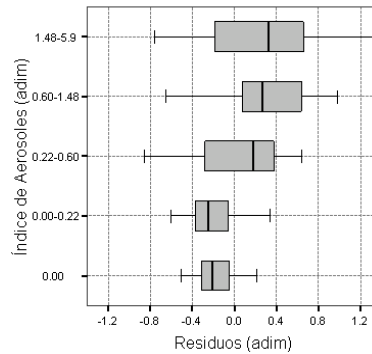


Figura 3: AI-TOMS frente a los residuos estimados del modelo de regresión. La línea negra marca la mediana por intervalo y los límites superior e inferior de cada caja corresponden a los percentiles 25 y 75 respectivamente, los cuales definen la distancia intercuartil. Las líneas de error cubren 1.5 veces la longitud de la caja.

En el espesor óptico de aerosoles en el canal 2 MODIS (figura 4) se observa la misma tendencia que en el AI, siendo el parámetro que mayor peso presenta en el ajuste lineal ($t=17.32$) y mayor correlación parcial posee con el AI ($R=0.88$).

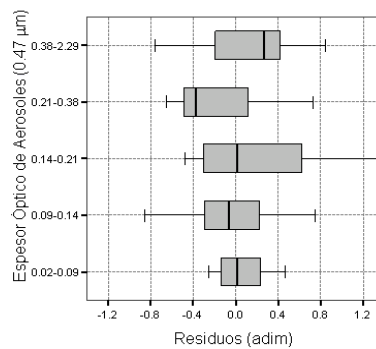


Figura 4: Espesor Óptico de Aerosoles a 0.47 μm frente a los residuos estimados. En cada rango se concentra el 20% de los datos.

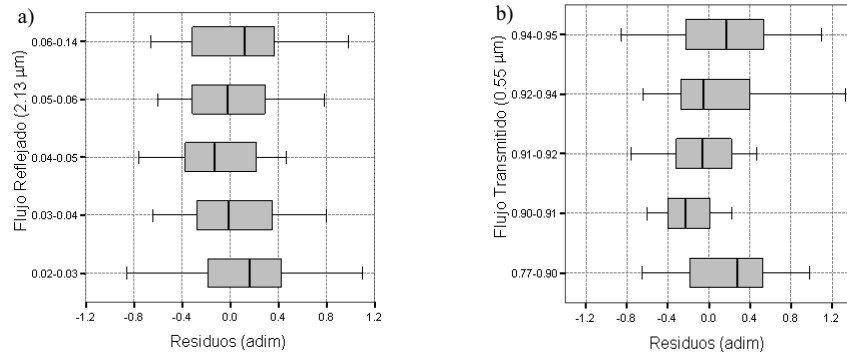


Figura 5: a) *Flujo Reflejado a 2.13 μm* b) *Flujo Transmitido a 0.55 μm* frente a los residuos estimados. Cada intervalo agrupa el percentil 20 de los datos.

Al igual que con el AI, la mediana de los residuos está localizada muy cercana a cero para los tres parámetros que definen el mejor ajuste lineal multivariante (figuras 4 y 5), y siempre dentro de los límites del error típico del valor predicho por el modelo de regresión. Por otra parte, los residuos presentan mayor independencia para el flujo reflejado (RefF7) y para el transmitido (TrF2) que para el EOA1, de acuerdo a su menor peso en el ajuste (tabla 2) y a su menor correlación parcial con el AI (0.65 para el RefF7 y -0.70 para el TrF2). En particular para el RefF7 la distancia intercuartil es prácticamente constante en todos los intervalos y las medianas muy próximas entre sí.

4. Conclusiones

Para estimar la presencia de aerosoles absorbentes en el UV a partir de datos MODIS evaluando para ello el índice de aerosoles-TOMS, se ha propuesto una metodología basada en técnicas de análisis multivariante (análisis factorial y regresión lineal). De este análisis se ha reducido el número de variables MODIS originales hasta 40, obteniéndose que el AI se asocia con parámetros tales como el espesor óptico de aerosoles, reflectancias, flujos reflejados y transmitidos. Además, se ha obtenido un ajuste lineal suficientemente fuerte ($R=0.94$) con tan sólo tres variables: espesor óptico de aerosoles a $0.47 \mu\text{m}$, el flujo transmitido a $0.55 \mu\text{m}$ y reflejado a $2.13 \mu\text{m}$. Para validar esta metodología se ha seleccionado arbitrariamente un subconjunto de datos, y se han evaluado los residuos estimados del modelo de regresión así obtenido sobre el resto de datos originales. Analizando estos residuos en función de los tres parámetros seleccionados para el ajuste y

del AI, se observa que en todos los casos la mediana de los residuos se encuentra muy próxima a cero y siempre dentro del error típico de la estimación del AI ± 0.45 , del orden de su error experimental. Por lo que se puede concluir que el ajuste obtenido es lo suficientemente robusto para evaluar el índice de aerosoles, tanto en condiciones de una alta carga de aerosoles como en situaciones limpias de éstos.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por las becas FP2001-0963 y FP2000-5379 asociadas a los proyectos REN2001-0609-C02/CLI y REN2000-0903-C08-06/CLI respectivamente; y los proyectos CGL2004-05984-C07-05 y EU INTERREG III B CLIMAAT MAC/2.3/A3. Finalmente, agradecemos al grupo TOMS y al MODIS (NASA/GSFC) por suministrarlos los datos.

6. Referencias

- [1] Torres, O., P.K. Bhartia, J.R. Herman, Z. Ahmad y J. Gleason. "Derivation of aerosol properties from satellite measurements of backscattered ultraviolet radiation: Theoretical basis", *J. Geophys. Res.*, 103, 14, 17099-17110, 1989.
- [2] Kaufman, Y.J., y D. Tanré. "Algorithm for remote sensing of tropospheric aerosol from MODIS", 1998. [<http://modis.gsfc.nasa.gov/>].
- [3] Herman, J.R., P.K. Bhartia, O. Torres, C. Hsu, C. Seftor y E. Celarier. "Global distribution of UV-absorbing aerosols from Nimbus 7/TOMS data", *J. Geophys. Res.*, 102, 14, 16911-16922, 1997.