

Algoritmo para corregir el efecto de los aerosoles minerales en la estimación de la temperatura superficial del mar desde satélites

Manuel Arbelo*, Guillermo P. Podestá** y Pedro A. Hernández-Leal*
marbelo@ull.es

* *Dpto. de Física F.E.E.S. Universidad de La Laguna. 38200 La Laguna. Tenerife. Canarias España*
** *Rosenstiel Scholl of Marine and Atmospheric Science. University of Miami. Miami, Florida 33149. USA*

RESUMEN

Proponemos un método que relaciona los errores en las estimaciones de la temperatura superficial del mar del sensor AVHRR con las concentraciones de aerosoles atmosféricos absorbentes calculadas con el Earth Probe Total Ozone Mapping Spectrometer. El algoritmo desarrollado elimina el sesgo que tiende a subestimar sistemáticamente los campos de temperatura superficial del mar generados en el Proyecto NASA/BIAA AVRR Oceans Pathfinder, en la región del Océano Atlántico Norte influenciada por las invasiones de polvo mineral del desierto del Sahara, y reduce hasta 0,55°C el error total.

PALABRAS CLAVE: AVHRR, TOMS, aerosoles minerales, Sahara, temperatura superficial del mar.

ABSTRACT

We propose a methodology to link SST errors in AVHRR estimates with concentrations of absorbing atmospheric aerosols as estimated by the Earth Probe Total Ozone Mapping Spectrometer. The proposed equation seems to be valid for North Atlantic Ocean region affected frequently by Saharan dust plumes. Applying new algorithm would nearly eliminate the systematic error on SST fields from NASA/NOAA AVHRR Oceans Pathfinder Project and the total error would be diminished 0,55°C.

INTRODUCCIÓN

La estimación de la temperatura superficial del mar (TSM) desde satélites viene siendo realizada de forma rutinaria desde hace más de dos décadas. La técnica normalmente aplicada, utiliza dos canales infrarrojo-térmicos situados dentro de una misma ventana atmosférica (10.5 - 12.5 μm) para corregir la absorción que sufre la radiación emitida por la superficie y que es debida principalmente al vapor de agua (Barton 1995). Sin embargo, en algunas regiones de nuestro Planeta, próximas a fuentes naturales de aerosoles minerales, como por ejemplo, el Océano Atlántico, influenciado frecuentemente por las tormentas del desierto del Sahara, los algoritmos para la determinación de la TSM pueden provocar correcciones atmosféricas erróneas.

El objetivo que nos planteamos con este estudio es desarrollar un algoritmo que corrija los posibles efectos que el polvo mineral sahariano produce en

la TSM obtenida con el sensor NOAA/AVHRR (Nacional Oceanic and Atmospheric Administration/Advanced Very High Resolution Radiometer). El método relaciona los errores asociados a la TSM con las concentraciones de aerosoles atmosféricos absorbentes deducidos del Índice de Aerosoles (AI) calculado con los datos del Earth Probe Total Ozone Mapping Spectrometer (EP-TOMS) (Torres *et alii*. 1998).

DATOS

Hemos usado la base de datos Pathfinder Matchups Data Base (PFMDB) desarrollada bajo el Proyecto NASA/NOAA AVHRR Oceans Pathfinder. Este conjunto de datos contiene medidas realizadas por boyas fijas y/o a la deriva simultáneas en el tiempo (~ 30 min) y en el espacio (~ 10 km) con observaciones del sensor AVHRR a bordo de los

satélites NOAA-14 durante los años 1997 y 1998. Con objeto de eliminar todos los posibles emparejamientos afectados por contaminación de nubes o errores de calibración, hemos aplicado los tests descritos por Kilpatrick *et alii.* (2001). Asimismo, obligamos a nuestro conjunto de datos a cumplir otros dos requerimientos, que fueron: a) diferencias absolutas entre TSM *in situ* y la estimación del algoritmo PFSST (Pathfinder Sea Surface Temperature) menores que 3°C y b) ángulos cenitales del satélite $\leq 45^\circ$.

La región seleccionada para llevar a cabo este estudio está situada en el Océano Atlántico y esta limitada por 10-40°N y 0-70°W. Esta es la zona mas importante y continuamente influenciada por el polvo mineral del desierto del Sahara (Husar *et alii.* 1999). El número total de datos que reúnen las restricciones anteriores es de 45.873.

Temperatura superficial del mar

El algoritmo utilizado para estimar la TSM fue el desarrollado en el contexto del Proyecto Pathfinder (PFSST). PFSST es una función de las temperaturas de brillo de los canales 4 y 5 del AVHRR, y está basado en la formulación clásica del NLSST (Non-Linear Sea Surface Temperature) (Walton *et alii.* 1998). Los coeficientes de este algoritmo se obtienen para cada mes mediante regresión de las medidas de la TSM tomadas *in situ* con las coincidentes desde satélite (Kilpatrick *et alii.* 2001).

Índice de aerosoles TOMS

El índice de aerosoles del TOMS (IA-TOMS) es una medida del cambio de contraste espectral que se produce en el ultravioleta próximo (331 and 360 nm), como consecuencia de los efectos radiativos de los aerosoles en una atmósfera con dispersión Rayleigh (Torres *et alii.* 1998). Los aerosoles absorbentes, aquellos procedentes de erupciones volcánicas o polvo mineral del desierto, están relacionados con valores positivos del IA-TOMS, mientras que los valores negativos se asocian a aerosoles no absorbentes como sulfatos y partículas de sal marina (Torres *et alii.* 1998).

Los datos del IA-TOMS se adquirieron a través de NASA/GSFC TOMS Ozone Processing Team (<http://jwocky.gsfc.gov/ftpdata.html>). Los valores diarios, con una resolución espacial de 1.25° de lon-

gitud por 1° de latitud, se emparejaron a los datos correspondientes de la PFMDB para la región elegida del Océano Atlántico Norte. El número final de datos de la TSM *in situ* coincidentes en el tiempo y espacio con las medidas de los satélites NOAA/AVHRR y EP/TOMS fue de 1610, 657 para el año 1997 y 953 para 1998.

METODOLOGIA Y RESULTADOS

La relación entre los errores sistemáticos encontrados en la estimación de la TSM con el AVHRR y la presencia de aerosoles de polvo identificada por el IA-TOMS ha quedado suficientemente probada por Diaz *et alii.* 2001. Ellos encontraron que los errores del PFSST, definidos como la diferencia entre la TSM *in situ* menos la TSM del satélite, aumentaban cuando crecían los valores del IA-TOMS. En la Figura 1 se observa con claridad este comportamiento y en la Tabla 1 se muestran las estadísticas correspondientes. Para valores de IA < 0,5, no existe influencia alguna y los resultados son comparables a las estadísticas globales de los errores del PFSST presentadas por Kilpatrick *et alii.* (2001). Sin embargo, resulta obvia la tendencia positiva de los errores para IA > 0,5, con una diferencia en las medias de 2°C y una variación en los mínimos desde -2,96°C a 1,40°C para los intervalos de IA-TOMS calculados. Es importante destacar la desaparición total de residuos negativos para un índice de aerosoles superior a 1,0.

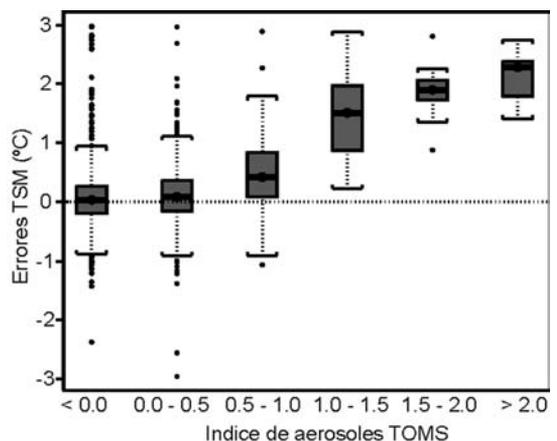


Figura 1. Errores del PFSST en función del IA-TOMS. El punto central muestra la mediana. Los límites superior e inferior de las cajas indican los percentiles 25 y 75. Los corchetes abarcan 1,5 veces el ancho de las cajas. Los valores fuera de este intervalo aparecen como puntos aislados.

IA TOMS	Nº datos	Min. (°C)	Max. (°C)	Med (°C)	DE* (°C)
< 0	766	-2,38	2,98	0,05	0,52
0,0 - 0,5	673	-2,96	2,97	0,11	0,49
0,5 - 1,0	115	-1,06	2,89	0,46	0,59
1,0 - 1,5	38	0,22	2,89	1,51	0,68
1,5 - 2,0	9	0,88	2,81	1,87	0,54
≥ 2	9	1,40	2,75	2,11	0,45

Tabla 1. Estadísticas de los errores del algoritmo PFSST para seis intervalos del índice de aerosoles TOMS (IA-TOMS). (*Desviación estándar).

Algoritmo de corrección de aerosoles

Para determinar de manera efectiva la influencia de los aerosoles del Sahara en las estimaciones del algoritmo PFSST, se decidió utilizar sólo aquellos datos con IA-TOMS > 0,5. Este conjunto final se dividió aleatoriamente en dos subconjuntos diferentes para obtener y comprobar el algoritmo empírico de corrección de aerosoles. El primero de ellos, denominado conjunto de entrenamiento, contiene 126 datos que fueron usados para estimar el término de corrección que se incorporó al algoritmo PFSST. El otro, llamado conjunto de validación, contiene 125 datos utilizados para comprobar el comportamiento del algoritmo.

El término de corrección obtenido calcula la diferencia en temperatura (DSST) entre la TSM *in situ* y PFSST como una función del IA-TOMS (Arbelo *et alli.* 2003):

$$\Delta\text{SST} = 1.258 \text{ IA} - 0.353 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (1)$$

El algoritmo de corrección de aerosoles (PFSST_{IA}) se obtendría entonces, añadiendo ΔSST a la ecuación del algoritmo PFSST:

$$\text{PFSST}_{\text{IA}} = \text{PFSST} + \Delta\text{SST} \quad (2)$$

Conjunto de datos	Algoritmo	Media (°C)	Desviación estándar °C
Entrenamiento	PFSST _{IA}	0,000	0,549
	PFSST	0,705	0,782
Validación	PFSST _{IA}	-0,084	0,553
	PFSST	0,616	0,772

Tabla 2. Error medio y desviación estándar de los algoritmos PFSST y PFSST_{IA} para IA-TOMS > 0.5.

En la Tabla 2 observamos el comportamiento del algoritmo PFSST original y el corregido de aeroso-

les en condiciones atmosféricas de polvo del Sahara. El error medio para el algoritmo no corregido produce una inaceptable subestimación sistemática de la TSM superior a 0,6°C, con una desviación estándar mayor que 0,75°C. Las Figuras 3 y 4 muestran con claridad el comportamiento sesgado del algoritmo PFSST tanto para el conjunto de entrenamiento como para el de validación.

El algoritmo de corrección de aerosoles basado en los datos de IA-TOMS mejora considerablemente las estimaciones de la TSM desde satélite. PFSST_{IA} presenta un error medio próximo a 0,0°C en ambos conjuntos de datos, con una desviación estándar aproximadamente 0,2°C inferior al algoritmo original. Las tendencias sesgadas desaparecen como se muestra en los paneles inferiores de las Figuras 3 y 4.

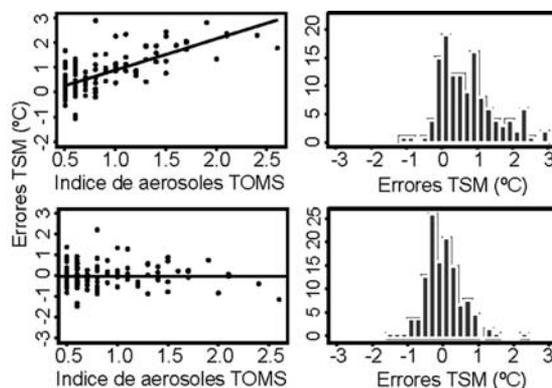


Figura 3. Errores en función del IA-TOMS e histogramas de los mismos para el conjunto de entrenamiento. PFSST (panel superior) y PFSST_{IA} (panel inferior).

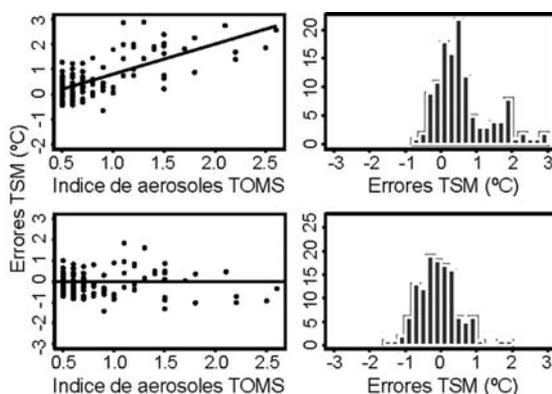


Figura 4. Errores en función del IA-TOMS e histogramas de los mismos para el conjunto de validación. PFSST (panel superior) y PFSST_{IA} (panel inferior).

DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

La presencia de aerosoles de polvo, que puede ser detectada por el instrumento Earth Probe TOMS, produce una corrección atmosférica errónea en los algoritmos que utilizan el sensor AVHRR para la determinación de la TSM y basados en la técnica "split-window". La causa es una anormal diferencia entre los canales 4 y 5 del AVHRR ($T_4 - T_5$), inferior a la esperada para una condiciones atmosféricas determinadas (Díaz *et alii*. 2001). Para evitar este error se ha incorporado un término de corrección dependiente del IA-TOMS al algoritmo PFSST. La ecuación propuesta ($PFSST_{IA}$), siempre que $AI > 0.5$, parece ser válida para la región del Atlántico Norte frecuentemente afectada por invasiones de polvo sahariano. La aplicación de $PFSST_{IA}$ casi eliminaría el error sistemático en los campos de TSM generados en el Proyecto Pathfinder y reduciría la dispersión de los errores en aproximadamente $0,2^\circ\text{C}$ con respecto al algoritmo operativo actualmente. Es importante resaltar que todos los datos de satélite usados en este trabajo superaron los tests de eliminación de nubes propuestos en el Proyecto (Kilpatrick *et alii*. 2001), sin embargo, muchos de ellos permanecen contaminados por "nubes" de polvo del desierto que nos han permitido demostrar el sesgo en los campos de TSM del PFSST.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la financiación de NASA NA37RJ0200, NAS5-31362 y NAS5-31361.

BIBLIOGRAFÍA

- ARBELO, M., PODESTÁ, G. P., HERNÁNDEZ-LEAL, P. A. y DÍAZ, J. P., 2003. Use of TOMS data to correct the Saharan dust effects on SST retrievals from satellite, *Adv. Space Res.*, (in press).
- BARTON, I. J., 1995. Satellite-derived sea surface temperatures: Current status, *J. Geophys. Res.*, 100, 8777-8790.
- DÍAZ, J. P., ARBELO, M., EXPÓSITO F. J., PODESTÁ, G. P., PROSPERO, J. M. y EVANS, R., 2001. Relationship between errors in AVHRR-derived sea surface temperature and the TOMS aerosol index, *Geophys. Res. Letters*, 28, 1989-1992.
- HUSAR, R. B., PROSPERO, J. M. y STOWE, L. L., 1997. Characterization of tropospheric aerosols over the oceans with the NOAA advanced very high resolution radiometer optical thickness operational product, *J. Geophys. Res.*, 102 (D14), 16889-16909.
- KILPATRICK, K., PODESTÁ G. y EVANS, R., 2001. Overview of the NOAA/NASA advanced very high resolution radiometer Pathfinder algorithm for sea surface temperature and associated matchup database, *J. Geophys. Res.*, 106 (C5), 9179-9197.
- TORRES, O., BARTIA, P. K., HERMAN, J. R., AHMAD, Z. y GLEASON, J., 1998. Derivation of aerosol properties from satellite measurements of backscattered ultraviolet radiation: Theoretical basis, *J. Geophys. Res.*, 103, 17099-17110.
- WALTON, C. C., PICHEL, W. G., SAPPER, F. J. y MAY, D. A., 1998. The development and operational application of nonlinear algorithms for the measurement of sea surface temperatures with NOAA polar-orbiting environmental satellites, *J. Geophys. Res.*, 103, 27999-28012.