

INFLUENCIA DE LAS LONGITUDES DE ONDA EN LA DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE ANGSTROM A PARTIR DE MEDIDAS DE IRRADIANCIA ESPECTRAL

J. L. GÓMEZ AMO, J. A. MARTÍNEZ-LOZANO, M. P. UTRILLAS y R. PEDRÓS

jmartine@uv.es

Grupo de Radiación Solar, Facultat de Física. Universitat de València

RESUMEN: En teledetección el efecto de los aerosoles atmosféricos se caracteriza normalmente asumiendo un modelo en el que se incluye el valor de su espesor óptico en determinadas bandas espectrales, directamente o a través de los denominados coeficientes de turbiedad de Angstrom. Debido a los diferentes tipos de radiómetros existentes en el mercado, y las distintas bandas espectrales en las que opera cada uno de ellos, estos coeficientes se determinan con muy diverso grado de precisión. En este trabajo se analiza la influencia que tiene sobre el valor de los mismos el número de longitudes de onda consideradas en su determinación, así como su distribución espectral.

ABSTRACT: Usually, the effect of the atmospheric aerosols in remote sensing is taken into account using a model. Such model may include the value of the aerosol optical thickness corresponding to different wavelengths or some other aerosol parameters, such as the widely used Angstrom turbidity coefficients. As there are different types of radiometers available and as they operate in different spectral ranges, in this work we will evaluate the influence on those parameters of the number of wavelengths used and their spectral distribution.

Palabras clave: aerosoles, corrección atmosférica, coeficientes de Angstrom.

INTRODUCCIÓN

En los algoritmos de corrección atmosférica, uno de los efectos más complejos de modelizar es el de las propiedades ópticas de los aerosoles. Normalmente se recurre a modelos preestablecidos de los mismos (d'Almeida *et al.*, 1991), pero éstos, aunque presentan interés desde el punto de vista climático, difícilmente sirven para identificar los aerosoles presentes en un determinado lugar, que normalmente son consecuencia de la presencia simultánea de varios de estos tipos. Por ello, y también debido a la alta variabilidad espacial y temporal que presentan sus propiedades físicas y químicas, es conveniente recurrir a parámetros determinados a partir de medidas de irradiancia solar o de radiancia de cielo obtenidas desde suelo.

Por otra parte, para la nueva generación de satélites multiespectrales (King *et al.*, 1999; Diner *et al.*, 1999) es necesario desarrollar modelos que relacionen propiedades espectrales de aerosoles con propiedades fácilmente medibles desde satélites, en particular el espesor óptico espectral (Remer y Kaufman, 1998). Actualmente estas características de los aerosoles pueden obtenerse

con la precisión adecuada usando métodos pasivos de extinción. En este sentido, la red AERONET (Holben *et al.*, 1998), basada en medidas rutinarias de irradiancia solar y de radiancia de cielo en 8 bandas espectrales ha venido a cubrir el vacío producido después de que otras redes previas de medidas de turbiedad fueran ampliamente cuestionadas y finalmente clausuradas (WMO, 1994).

Todo ello ha reavivado el interés por establecer las posibilidades que plantea el uso del exponente a de Angstrom, correlacionado significativamente con algunas de las propiedades ópticas más importantes de los aerosoles como la distribución de tamaños, el albedo de dispersión simple y la fracción de radiación retrodispersada (Reid *et al.*, 1999).

El espesor óptico de aerosoles está relacionado con λ a través de la fórmula de Angstrom

$$k_{s\lambda} = \beta\lambda^{-\alpha} \quad (1)$$

donde β (coeficiente de turbiedad) proporciona la cantidad de aerosoles presentes en la atmósfera. Para obte-

ner los valores de los coeficientes de Angstrom es habitual parametrizar la expresión anterior en el rango visible (Martínez-Lozano *et al.*, 1998). Sin embargo el resultado de esta parametrización depende tanto del número de longitudes de onda elegidas como de su distribución espectral (Martínez-Lozano *et al.*, 2001a).

En este trabajo se analiza la influencia del número de longitudes de onda consideradas (así como su posición en el espectro) en la obtención de los coeficientes de Angstrom. El interés de este análisis se justifica por la gran variedad de tipos de espectrorradiómetros y fotómetros existentes en el mercado, cada uno de ellos con diferentes características en cuanto al rango y la precisión espectral, así como por los diversos criterios utilizados en numerosos trabajos publicados hasta la fecha sobre propiedades ópticas de aerosoles.

INSTRUMENTACIÓN

Las medidas espectrales de irradiancia solar directa se han realizado con un espectrorradiómetro Li-cor 1800, provisto de un limitador de radiancia (colimador) de un FOV (Field of View) de 5°. El rango espectral del Li-cor 1800 se extiende desde 300 nm hasta 1100 nm, con una anchura de banda de 6.15 nm, y un paso de banda de 1 nm. Las características de este instrumento se han descrito en trabajos previos (Riordan *et al.*, 1989). El Li-cor 1800 se calibra cada seis meses mediante una lámpara de referencia (Li-cor Optical Radiation Calibrator) por el Grupo de Radiación Solar en el Departamento de Termodinámica de la Universitat de Valencia. Los resultados muestran una desviación menor del 5% para longitudes de onda mayores de 400 nm. Para longitudes de onda más cortas la desviación crece gradualmente hasta alcanzar valores cercanos al 30% en el UVB. En las medidas de irradiancia directa en el visible las desviaciones están en torno a un 3% (Martínez-Lozano *et al.*, 2001b).

Para este trabajo se ha analizado una muestra de 39 espectros de irradiancia directa, distribuidos a lo largo de un periodo de medidas de seis años, comprendido entre 1994 y 2000. Todos los espectros empleados fueron obtenidos en condiciones de cielo despejado y con masas ópticas comprendidas en el rango 1.05 a 6.00.

METODOLOGÍA

El espesor óptico atmosférico total, $k_{T\lambda}$, se ha determinado a partir de medidas de irradiancia directa espectral empleando la ley de Bouger-Lambert-Beer. En este trabajo limitamos el estudio del espesor óptico de aerosoles a la región visible, 400-670 nm. Los únicos componentes atmosféricos que muestran una absorción no despreciable en esta banda son el ozono (banda de Chappuis) y el NO₂. En la mencionada región el espe-

sor óptico total de la atmósfera puede expresarse mediante

$$k_{T\lambda} = k_{R\lambda} + k_{a\lambda} + k_{O_3\lambda} + k_{NO_2\lambda} \quad (2)$$

en función de las contribuciones debidas a Rayleigh, aerosoles, ozono y NO₂ respectivamente. Una vez se ha determinado el espesor óptico atmosférico total, se obtienen los valores del espesor óptico de aerosoles eliminando las contribuciones debidas al resto de componentes atmosféricos. Una vez obtenido el valor espectral de $k_{a\lambda}$ hemos analizado su dependencia con la longitud de onda a partir de la expresión (1). Para ello hemos considerado dos aspectos, que se detallan seguidamente.

En primer lugar, y dado que el parámetro a proporciona información sobre la pendiente de la curva que forma el espesor óptico con la longitud de onda, el valor de α debe depender del número de longitudes de onda elegidas. En este caso, dado que la mayoría de radiómetros trabajan con un número de longitudes de onda entre 4 y 8, se han elegido tres números de longitudes de onda diferentes, concretamente 5, 9 y 28. Esta elección viene motivada por la intención de observar la variación que se produce en el parámetro α al emplear un valor dentro del intervalo antes mencionado, un valor próximo a uno de los límites de dicho intervalo y por último un valor bastante más alejado.

En segundo lugar, y debido a que la curva del espesor óptico de aerosoles frente a la longitud de onda suele tener una pendiente mucho más acusada en las longitudes de onda más cortas, trataremos de observar el comportamiento de α al acumular mayor número de longitudes de onda a una parte o a otra del espectro. Para ello, se ha dividido cada grupo correspondiente a un número de longitudes de onda n dado ($n=5, 9, 28$), en tres subconjuntos que denotaremos por n_i , donde $i=a,b,c$. El primero de ellos, denotado con la letra a, incluye el espesor óptico de aerosoles para longitudes de onda distribuidas equidistantemente a lo largo de la región considerada. El subconjunto denotado por la letra b se caracteriza por incorporar el espesor óptico de aerosoles acumulado en las longitudes de onda más pequeñas, es decir, en el primer tercio del intervalo, entre 400-500 nm. En el último de los subconjuntos, denotado por la letra c, el espesor óptico de aerosoles se ha acumulado en el tercer tercio del intervalo, es decir, entre 600-670 nm.

Inicialmente se han calculado los valores de los parámetros de Angstrom mediante el ajuste del espesor óptico de aerosoles para todas las longitudes de onda del intervalo espectral considerado, que se han tomado como valores de referencia. Posteriormente se han establecido las desviaciones entre dichos valores y los obte-

nidos para cada uno de los grupos mencionados anteriormente. Como indicadores de error se han utilizados los parámetros estadísticos MBD (Desviación Media), MAD (Desviación Media Absoluta) y RMSD (Desviación Cuadrática Media). Por último, y con objeto de establecer el número y distribución de longitudes de onda más adecuados, se han efectuado ajustes lineales entre los valores obtenidos para todo el espectro visible y para cada uno de los grupos empleados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla I se muestra los parámetros estadísticos calculados a partir de las diferencias existentes entre los valores de α obtenidos empleando todo el espectro visible y empleando los diferentes grupos anteriormente comentados. A partir de la lectura de los valores de la desviación cuadrática media se observa que, en general, cuanto mayor es el número de longitudes de onda empleadas mejor es el ajuste entre el valor de α obtenido utilizando todo el espectro y el obtenido utilizando cada uno de los grupos mencionados anteriormente.

Siguiendo la lectura de los errores estadísticos (Tabla I), parece observarse que la influencia sobre el valor de α es más determinante al modificar la distribución espectral de los valores del espesor óptico que al variar su número. En ese sentido, se observa una tendencia a que todos los grupos c subestimen el valor de α obtenido a partir del espectro visible, mientras que los grupos a y b los sobrestiman. Esto se debe a que en los grupos c, los espesores ópticos empleados están acumulados en las longitudes de onda largas del espectro visible, y esa zona se caracteriza por tener una pendiente poco pronunciada, por tanto no contribuye excesivamente a la pendiente de la curva. Aún así, los grupos a y c se acercan mejor al valor de α obtenido usando 9 valores del espesor óptico de aerosoles, mientras que los grupos b dan valores RMSD bastante mayores. En cambio, cuando se utilizan 5 valores de espesor óptico de aerosoles, el comportamiento es el inverso ya que es el grupo b el que mejor se ajusta.

Con objeto de obtener información adicional sobre cual sería la configuración ideal para representar el espesor óptico de aerosoles se ha realizado un ajuste lineal entre el valor proporcionado al utilizar todo el espectro visible y el obtenido mediante cada configuración. En este caso, tendremos varios indicadores del ajuste. En la Tabla II se muestran el coeficiente de correlación lineal R, la pendiente m y la ordenada en el origen de la recta de regresión.

Como era de suponer, los grupos citados anteriormente siguen siendo los que mejores ajustes proporcionan. Los coeficientes de correlación lineal son elevados para todas las configuraciones, destacando el obtenido para el grupo 28c. Sin embargo tanto las pendientes como las ordenadas en el origen no son todo lo buenas que cabría esperar, siendo especialmente bajas al emplear 9 valores del espesor óptico de aerosoles.

Con la intención de mejorar el ajuste, se ha obligado a la recta a pasar por el origen. En este caso, el coeficiente de correlación empeora en casi todos los casos pero sin dejar de ser alto. Sin embargo los valores de las pendientes mejoran ostensiblemente, de forma que todos los grupos b sobrestiman el valor obtenido empleando todo el espectro visible, mientras que los demás grupos lo subestiman.

En lo que concierne al parámetro β , comparte con α la tendencia general de mejorar el ajuste a medida que se aumenta el número de longitudes de onda utilizadas. Además, como en el caso de α , se observa una mayor influencia debido a la dependencia espectral que al número de valores empleados en el ajuste. Los grupos que se ajustan mejor a los valores obtenidos para todo el espectro visible son 5b, 9a, 28a, exactamente los mismos que en el caso de α .

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran que empleando 5 longitudes de onda distribuidas en el primer tercio de la región visible, y evitando las bandas de absorción de los componentes atmosféricos, sería suficiente para caracterizar el espesor óptico de aerosoles en la región visible mediante el parámetro α de Angstrom dentro de un margen de error del 14%. No obstante, siempre que sea posible será interesante la obtención de dicho parámetro con una mejor aproximación, ya que un pequeño error en su determinación puede causar errores bastante más grandes de las propiedades ópticas de los aerosoles que se puedan derivar de él. Por este motivo, la obtención de estos parámetros derivados mejorara ligeramente si se emplean los grupos 9a y 28a. Sin embargo parece indiscutible que lo más apropiado sería el empleo de espectrorradiómetros que operen en todas las longitudes de onda visibles con objeto de obtener los mejores valores posibles de α , incluso extendiendo el estudio a la región ultravioleta si es posible.

Grupo	MBD					MAD			
	Máximo	Mínimo	Media	Mediana	RMSD	Máximo	Mínimo	Media	Mediana
5a	23	-84	-5	3	25	84	1.5	18	13
5b	8	-30	-9	-10	14	30	0	12	10
5c	36	-70	8	10	22	70	0.9	18	17
9a	14	-50	-5	-1.3	14	50	0.5	10	9
9b	13	-72	-13	-8	25	72	1.4	18	9
9c	27	-44	5	8	14	44	0.9	11	9
28a	42	-30	-1.8	-1.3	12	42	0	8	6
28b	64	61	-10	-10	25	65	0	18	13
28c	35	-30	-7	9	12	35	0.7	10	9

Tabla I. Valores estadísticos para el parámetro α de Angstrom, calculados a partir de las diferencias existentes entre los valores obtenidos en todo el espectro visible en cada uno de los diferentes grupos.

Grupo	Ajuste regresión lineal				Ajuste pasando por el origen				
	r	m	Error m	n	Error n	r	m	Error m	
5a	0.947	0.74	0.04	0.33	0.07	0.906	0.94	0.02	
5b	0.976	0.95	0.04	0.16	0.06	0.970	1.050	0.017	
5c	0.942	0.73	0.05	0.21	0.07	0.925	0.85	0.02	
9a	0.985	0.79	0.02	0.02	0.04	0.974	0.987	0.015	
9b	0.967	0.79	0.04	0.38	0.06	0.917	1.01	0.02	
9c	0.971	0.77	0.03	0.21	0.05	0.956	0.890	0.017	
28a	0.980	0.91	0.03	0.12	0.05	0.980	0.979	0.014	
28b	0.925	0.84	0.06	0.28	0.09	0.904	1.01	0.03	
28c	0.988	0.85	0.02	0.10	0.04	0.985	0.904	0.011	

Tabla II. Coeficientes del ajuste de regresión lineal entre el valor del parámetro α calculado a partir de toda la región visible y empleando cada uno de los diferentes grupos (m pendiente, n ordenada en el origen, r coeficiente de correlación lineal).

BIBLIOGRAFÍA

- D'ALMEIDA, G. A., P. KOEPKE, E. P. SHETTLE, Atmospheric aerosols, global climatology and radiative characteristics. *A. Deepak Publishing*, 1991.
- DINER D. J., G. P. ASNER, R. DAVIES, Y. KNYAZIKHIN, J. P. MULLER, A. W. NOLIN, B. PINTY, C. S. SCHAAF and J. STROEVE, New directions in the Earth observing: scientific applications of multiangle remote sensing. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, 80, 2209-2228, 1999.
- HOLBEN B. N., T. F. ECK, I. SLUTSKER, D. TANRÉ, J. P. BUIS, A. SETZER, E. VERMOTE, J. A. REAGAN, Y. J. KAUFMAN, T. NAKAJIMA, F. LAVENU, I. JANKOWIAK, A. SMIRNOV, AERONET-A Federated instrument network and data archive for aerosol characterization, *Rem. Sensing Environ.*, 66, 1-16, 1998.
- KING M. D., Y. J. KAUFMAN, D. TANRÉ and T. NAKAJIMA, Remote sensing of tropospheric aerosols from space: past, present, and future. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, 80, 2229-2259, 1999.
- MARTÍNEZ-LOZANO, J. A., M. P. UTRILLAS, F. TENA, R. PEDRÓS, J. CAÑADA, J. V. BOSCA y J. LORENTE. Aerosol optical characteristics from a summer campaign in an urban coastal mediterranean area. *IEEE Trans. Geos. Rem. Sen.* 2001a (en prensa)
- MARTÍNEZ-LOZANO, J. A., M. P. UTRILLAS y R. PEDRÓS. Visible Measurements. Report of the first Iberian UV-VIS instrument intercomparison. L. Sanchez-Munierguren, B. De la Morena y E. Cueva. Ministerio de Medio Ambiente. 2001 (en prensa)
- REID, J. S., ECK, T. F., CHRISTOPHER S. A., HOBBS, P. V. and HOLBEN, B., 1999. Use of the Angstrom

exponent to estimate the variability of optical and physical properties of aging smoke particles in Brazil, *Journal of geophysical research*, 104, 27,473-27,489.”

REMER L. A. and Y. J. KAUFMAN, Dynamic aerosol model: Urban/industrial aerosol, *J. Geophys. Res.*, 103, 13859-13871, 1998.

WMO, Report on the measurements of atmospheric turbidity in BAPMoN, GAW Report No. 94, 1994.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la Generalitat Valenciana a través del proyecto GV97-RN-14-18.