

ANÁLISIS DE UN AÑO DE MEDICIONES CON FOTÓMETRO SOLAR EN EL NOROESTE DEL CONURBANO BONAERENSE

ONE-YEAR ANALYSIS OF MEASUREMENTS WITH SOLAR PHOTOMETER IN THE NORTHWEST OF GREAT BUENOS AIRES AREA

A. F. Scagliotti*¹ y G. A. Jorge¹

¹Laboratorio en Física Aplicada y Tecnología – Instituto de Ciencias – Universidad Nacional de General Sarmiento (CONICET), J. M. Gutierrez 1150 (B1613GSX), Los Polvorines, Prov. Buenos Aires, Argentina.

Recibido: 16/03/2020; Aceptado: 14/04/2020

Este trabajo presenta un primer estudio fotométrico de la carga aerosólica en la zona noroeste del conurbano bonaerense, específicamente en el campus de la Universidad Nacional de General Sarmiento (UNGS) en Los Polvorines. Para tal fin, se utilizaron un año de mediciones manuales con fotómetro solar y se corroboraron los cálculos de espesor óptico de aerosoles (AOD) a partir de la ley de Lambert-Beer. Los resultados del histograma de AOD a 465 nm y del coeficiente de Ångström en función del AOD son afines a las características de la zona de estudio, con una atmósfera limpia y aerosoles categorizados en los grupos “continental limpio” y “promedio”.

Palabras clave: aerosoles, fotómetro, atmósfera, AOD.

This paper presents a first photometric study of the aerosol charge in the northwest of Great Buenos Aires area, specifically on the campus of the National University of General Sarmiento (UNGS) in Los Polvorines. For this purpose, one year of manual measurements with a solar photometer has been used and the aerosol optical depth (AOD) calculations were corroborated with the Lambert-Beer law. The results of the AOD histogram at 465 nm and the Ångström coefficient vs AOD are related to the study area characteristics, with a clean atmosphere and aerosols categorized in the “clean continental” and “average” groups.

Keywords: aerosols, photometer, atmosphere, AOD.

<https://doi.org/10.31527/analesafa.2020.31.2.46>



ISSN 1850-1168 (online)

I. INTRODUCCIÓN

Los aerosoles atmosféricos son partículas pequeñas sólidas o líquidas que permanecen, dependiendo de su tamaño y de las condiciones de la atmósfera, desde unas horas hasta varias semanas suspendidas en el aire [1]. Los aerosoles son un aspecto importante a considerar para evaluar la calidad del aire ya que pueden influir en el clima [2] y en la salud de la población [3]. Sin embargo, es una variable poco estudiada hasta el momento, especialmente en el hemisferio sur [4].

Monitorear aerosoles resulta dificultoso, por ser inhomogéneos y variables al sufrir cambios en la atmósfera. Los monitoreos satelitales poseen un alcance y precisión limitados por su resolución y dependen de la reflexión de la superficie terrestre [5], y los monitoreos en superficie, como los de la red AERONET de NASA [6], que entregan información confiable y continua con cobertura global aunque limitada a los puntos de medición disponibles (10 en el territorio argentino hasta la fecha).

Distintos aerosoles dispersan y absorben diferentes longitudes de onda de la luz solar. Este fenómeno es aprovechado por los fotómetros solares que son capaces de registrar un valor proporcional a la intensidad de la luz, en determinadas componentes espectrales, que llega a la superficie luego de atravesar la atmósfera. Tras someter a los instrumentos a un protocolo de calibración, se pueden determinar

el espesor óptico de aerosoles (AOD, por sus siglas en inglés) y otros productos derivados que aportan información sobre el tipo y cantidad de aerosoles presentes en la columna atmosférica sobre el sitio donde se ubica el instrumento al momento de la medición.

El Laboratorio de Investigación en Física Aplicada y Tecnología (LIFAT) de la Universidad Nacional de General Sarmiento (UNGS), ubicada en el partido de Malvinas Argentinas de la provincia de Buenos Aires, adquirió un fotómetro solar CALITOO (identificación #1703-0304) del fabricante TENUM desarrollado en el marco del programa internacional GLOBE que tiene como fin estudiar el impacto de los aerosoles en el medio ambiente [7]. Este instrumento utiliza diodos emisores de luz que experimentan una tensión eléctrica en su juntura cuando reciben luz dentro de un rango similar a su espectro de emisión. De esta manera, el fotómetro utilizado registra un valor proporcional a la intensidad de luz en las longitudes de onda de 465 nm (canal azul), 540 nm (canal verde) y 619 nm (canal rojo), además de fecha, hora, temperatura, presión atmosférica, altitud, latitud, longitud y ángulo de elevación solar. Los valores de AOD que calcula el fotómetro a partir de las mediciones realizadas son equivalentes al nivel 1.0 según la denominación de AERONET, con un error inferior a 0,02 unidades de AOD [8].

Hasta la fecha, no existen registros de mediciones vinculadas a cantidad y tipos de aerosoles en la zona de influencia

* ascagliotti@campus.ungs.edu.ar

de la UNGS. Por ello, este trabajo representa un primer estudio de aerosoles en la región noroeste del conurbano bonaerense, al determinar sus principales propiedades ópticas con el fin de caracterizar la calidad del aire.

II. METODOLOGÍA

A partir de noviembre de 2018, se realizan mediciones periódicas manuales con el fotómetro solar CALITOO en el campus de la UNGS. Para ello, se procura que no haya presencia distinguible de nubes en torno a 30° del disco solar ni registro de bancos de niebla en ese momento, y que el ángulo de elevación solar sea mayor a 30° con el fin de que la masa relativa de aire sea inferior a 2 unidades. A su vez, se toman imágenes del cielo desde una cámara estacionaria cada vez que se realiza una medición con el fin de contar con un control adicional del estado del cielo en torno al disco solar.

Pequeños movimientos del fotómetro pueden provocar que la luz directa no incida completamente en el campo visual de 2,5° del instrumento, alterando las mediciones. Incluso, fluctuaciones propias de la atmósfera pueden tener el mismo efecto. Por ello, cada medición consta de 1 minuto de orientación del colimador al disco solar para que el fotómetro registre el máximo valor de intensidad de luz detectado en ese tiempo.

Para el presente estudio, se utilizaron datos recogidos desde noviembre de 2018 a noviembre de 2019 (232 mediciones) para calcular los valores de AOD en las tres componentes y cotejar con los valores calculados por el fotómetro. Dichos cálculos se realizan en base a la ley de Lambert-Beer aplicada a la atmósfera (ver ecuación (1)) [9], considerando que el espesor óptico atmosférico total depende únicamente de la dispersión de la luz causada por las moléculas conocidas como dispersión de Rayleigh, por las moléculas de ozono (O₃) y por los aerosoles.

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp[-m(\tau_a + \tau_{O_3} + \tau_r)], \quad (1)$$

siendo $I(\lambda)$ la intensidad de la luz solar recibida en superficie para la longitud de onda dada, $I_0(\lambda)$ la intensidad de la luz solar fuera de la atmósfera para la longitud de onda dada, m es el coeficiente de la masa de aire que la luz atraviesa hasta llegar a la superficie calculada como la inversa del seno del ángulo de elevación solar [10], τ_a es el coeficiente de transparencia de aerosoles también conocido como AOD, τ_{O_3} es el coeficiente de transparencia de ozono y τ_r (ver ecuación (2)) es el coeficiente de transparencia de difusión de Rayleigh, proporcional a la relación entre la presión atmosférica medida en el punto de observación p y la presión al nivel del mar p_0 [11].

$$\tau_r = a_r \frac{p}{p_0}, \quad (2)$$

donde a_r es la contribución al espesor óptico de la dispersión molecular de la luz de Rayleigh en la atmósfera y es informado con la calibración del fotómetro ($a_{r-azul} = 0,19490$; $a_{r-verde} = 0,10637$; $a_{r-rojo} = 0,06281$), al igual que el coeficiente τ_{O_3} ($\tau_{O_3-azul} = 0,0000$; $\tau_{O_3-verde} = 0,0128$; $\tau_{O_3-rojo} = 0,0154$).

El coeficiente de transparencia de aerosoles puede calcu-

larse a partir de un valor N directamente proporcional a la intensidad de la luz que registra el fotómetro como

$$\tau_a = \frac{\left\{ \ln \left[N_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \right] - \ln(N) \right\}}{m} - a_r \frac{p}{p_0} - \tau_{O_3}. \quad (3)$$

N_0 es el valor que registraría el fotómetro para una medida de la intensidad luminosa fuera de la atmósfera a una distancia al Sol r_0 igual a 1UA (unidad astronómica), y es un parámetro de calibración del instrumento [7, 12] ($N_{0-azul} = 3530$; $N_{0-verde} = 3443$; $N_{0-rojo} = 2559$). A su vez, el cálculo del AOD requiere de la distancia al Sol r en UA para el momento en que se tomó la medición.

El coeficiente de Ångstrom α [13]

$$\alpha = \frac{\ln \left(\frac{\tau_{a1}}{\tau_{a2}} \right)}{\ln \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)} \quad (4)$$

es un coeficiente sensible a la distribución de tamaños de los aerosoles y se calcula a partir de la pendiente del logaritmo del AOD, τ_{an} , medido en dos longitudes de onda, λ_1 y λ_2 , vs. el logaritmo de la longitud de onda [5, 14-16]. Resulta ser inversamente proporcional al radio cuadrático medio de las partículas [13, 17, 18], variando entre 4 (para partículas pequeñas) y 0 (para partículas grandes).

Mayor información puede aportar la relación entre el coeficiente de Ångstrom y el AOD. Una gráfica entre estas dos variables permite identificar los grupos principales de aerosoles presentes y sus características de acuerdo a la clasificación climática [4, 14, 19-21]. En este trabajo se utiliza la tabla de clasificación desarrollada por Otero (2006) [4].

III. RESULTADOS

Generalmente, se utiliza la banda de 440 nm para caracterizar el AOD dado que se encuentra en el rango visible y la suelen utilizar de referencia los trabajos realizados por los investigadores de NASA [19]. Por ello, en este trabajo se tomó el canal azul (centrado en 465 nm) como referencia.

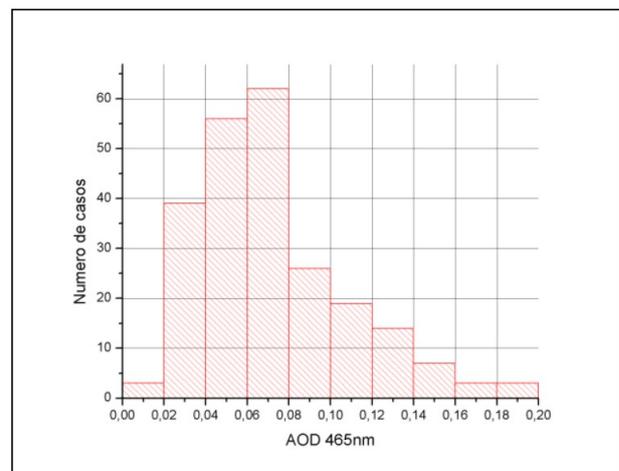


FIG. 1: Histograma de valores de AOD para el canal azul. La distribución se encuentra centrada entre 0,06 y 0,07 y presenta pocos casos de valores correspondientes a la presencia de aerosoles antropogénicos.

En la Fig. 1 se puede observar que la distribución de valores de AOD para el canal azul está sesgada en valores bajos típicos de una atmósfera limpia [4, 19, 22, 23]. Una menor cantidad de datos, fuera del percentil 80, se corresponden a valores propios de una zona rural con intrusión de aerosoles típicos de actividades industriales. Las características de la zona de medición se condicen con estas observaciones, dado que los centros urbanos más importantes se encuentran aproximadamente a 2,5 km del campus de la UNGS y existen varias industrias aisladas a distancias menores.

Estacionalmente, se encontró que los mayores valores de AOD se registraron durante verano y primavera y los menores durante otoño e invierno, como se muestra en la Fig. 2. Resultados similares se encontraron en otros estudios para datos de diversas estaciones pertenecientes a la red AERONET [22, 23]. Esto se debe a que durante los meses cálidos la radiación genera un crecimiento mayor de la capa de mezcla convectiva en la cual los contaminantes se acumulan limitados por la zona de entremezcla [24]. Por lo tanto, la cantidad efectiva de aerosoles integrada en una columna atmosférica crece con la altura de la capa límite. Por otro lado, durante los meses cálidos es posible que ocurra una mayor quema de biomasa luego de las cosechas, aunque se requiere de más información acerca de las actividades de la zona para aseverar un vínculo de este hecho con mayores valores de AOD.

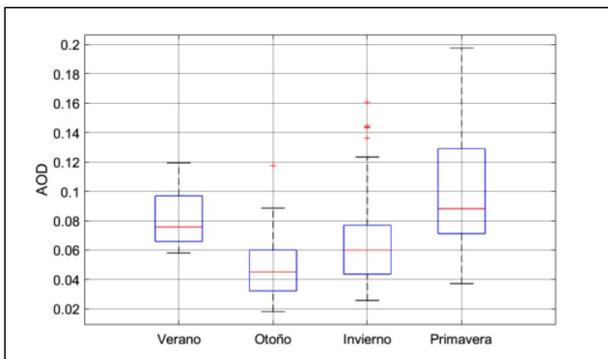


FIG. 2: Gráfico de cajas estacional con valores de AOD correspondientes al canal azul. Los valores máximos se dan en verano y primavera.

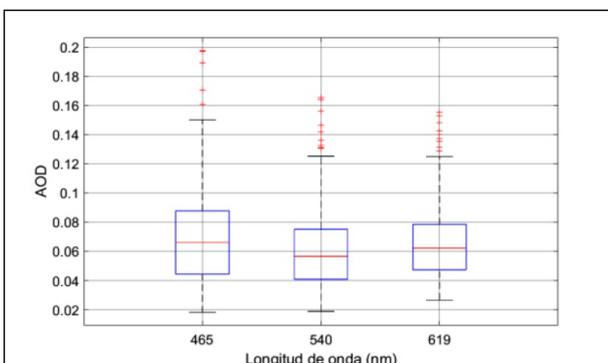


FIG. 3: Gráfico de cajas con valores de AOD registrados para cada longitud de onda. El valor medio disminuye con la longitud de onda, con excepción del canal rojo.

Dentro del espectro de luz analizado, se espera que el valor medio de AOD disminuya con la longitud de onda, dado

que los aerosoles típicos dispersan con mayor efectividad la luz en rangos cercanos al azul que al rojo [8]. Esto no se cumple para el caso de la longitud de 619 nm en la Fig. 3. Esto puede deberse a una falla de calibración para ese canal en el fotómetro utilizado. Por este motivo, el coeficiente de Ångstrom fue calculado a partir de los datos de AOD de los canales azul y verde.

La Fig. 4 muestra la distribución de coeficientes de Ångstrom calculados, se puede apreciar que los valores más frecuentes se encuentran entre 0,7 y 1,3 correspondientes a una atmósfera limpia sin intrusión de aerosoles propios de eventos contaminantes de origen natural o antrópico [4, 14, 19, 23].

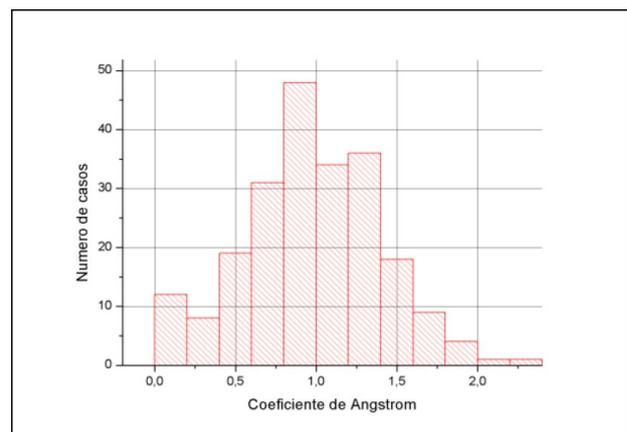


FIG. 4: Histograma de valores de coeficiente de Ångstrom calculados con valores de AOD de los canales azul y verde.

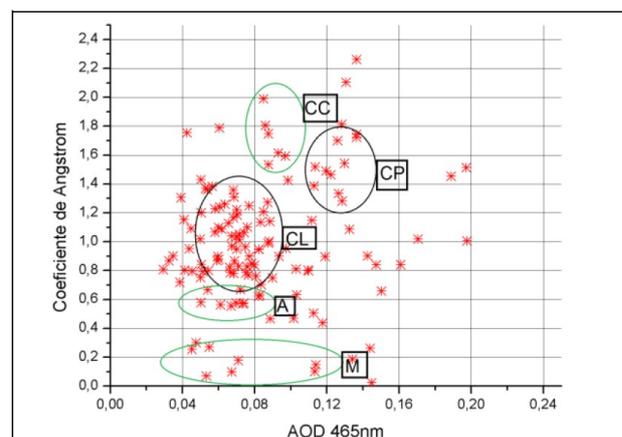


FIG. 5: Dispersión de datos de coeficiente de Ångstrom vs. AOD del canal azul. Los grupos se encuentran identificados CL (continental limpio), CP (continental promedio), CC (continental contaminado), A (antártico), M (marítimo). En círculos negros se marcan los grupos de mayor importancia, en verde las trazas.

En la gráfica de coeficientes de Ångstrom en función de AOD de la Fig. 5, se puede observar que la mayoría de los casos se encuentran en el grupo de aerosoles perteneciente a Continental Limpio, compuesto principalmente por partículas solubles en agua y minerales propias de zonas rurales. Esto se debe a que la UNGS se encuentra emplazada en una zona con amplios espacios verdes incluido el predio Campo de Mayo de unas 8000 hectáreas de superficie. El siguiente grupo en importancia corresponde al Continental Promedio,

con aerosoles de mezclas de hollín, polvo y compuestos solubles en agua. La intrusión de estos aerosoles en la zona se explica con el flujo vehicular y la suspensión de partículas de polvo propias de calles no asfaltadas. El resto de los grupos identificados son trazas de aerosoles correspondientes a categorías de Continental Contaminado, Antártico y Marítimo. Los casos en estas categorías se detectaron en diversos meses y separados en el tiempo, pueden ocurrir por diversas razones como el transporte de partículas con viento norte o el pasaje de un frente frío o pueden tratarse simplemente de valores atípicos. Se requiere de mayor información para caracterizar estos casos y determinar su naturaleza.

Por otro lado, debe tenerse en cuenta que los límites establecidos para los grupos de clasificación climática son difusos y varían para diferentes autores [4, 14, 19-21]. Es por ello que las observaciones en base a estos resultados deben realizarse considerando las características propias de cada zona de estudio.

IV. CONCLUSIONES

Se llevó a cabo un estudio de las propiedades ópticas de la carga aerosólica en la zona noroeste del conurbano bonaerense a partir de 1 año de mediciones con un fotómetro solar CALITOO. Los resultados de AOD del canal rojo son atípicos, por lo que los coeficientes de Ångström debieron ser calculados a partir de los canales azul y verde.

Tomando como referencia el canal azul para el análisis de AOD, se llegó a la conclusión de que los valores corresponden a una atmósfera limpia. También se encontró un ciclo estacional típico donde los mayores valores de AOD se presentan en verano y primavera.

El análisis de la distribución de los coeficientes de Ångström calculados apoyan las conclusiones de una atmósfera limpia sin intrusión de contaminantes, con aerosoles de pequeña talla. Los tipos de aerosoles encontrados corresponden, de acuerdo a la clasificación climática, principalmente al grupo Continental Limpio con una minoría en Continental Promedio.

Las observaciones producto de los resultados se corresponden con las características de la zona de estudio y representan una primera aproximación a la determinación de la calidad de aire en la región con un control y mediciones sistemáticas.

Posteriores trabajos se centrarán en recalibrar el canal rojo del fotómetro y en evaluar las posibles intrusiones de aerosoles propios de los grupos Antártico y Marítimo. Una mayor cantidad de mediciones permitirán realizar un análisis de variabilidad más preciso, así como mediciones en diferentes puntos de la zona ofrecerán la posibilidad de establecer una distribución espacial del AOD diferenciado en puntos de mayor densificación poblacional y flujo vehicular así como los polos industriales.

REFERENCIAS

- [1] L. A. Otero, P. R. Ristori, G. J. Fochesatto, E. J. Quel y B. Holben. Estadística de la evolución de los aerosoles medidos en las estaciones de la red AERONET en Argentina desde 1999. *Anales AFA* **15**, 323-328 (2003).
- [2] S. Kazadzis. *WMO/GAW Aerosol Measurement Procedures, Guidelines and Recommendations* Tech. Rep. (World Meteorological Organization, 2016).
- [3] L. A. Jimoda. Effects of particulate matter on human health, the ecosystem, climate and materials: a review. *Facta universitatis-series: Working and Living Environmental Protection* **9**, 27-4 (2012).
- [4] L. Otero, P. Ristori, F. Robledo, B. Holben y E. Quel. Espesor óptico de aerosoles durante el año 2002 para diez estaciones pertenecientes a la red AERONET – NASA. *Anales AFA* **17**, 349-352 (2005).
- [5] O. Dubovik, A. Smirnov, B. N. Holben, M. D. King, Y. J. Kaufman, T. F. Eck e I. Slutsker. Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from Aerosol Robotic Network (AERONET) Sun and sky radiance measurements. *J. Geophys. Res. Atmos.* **105**, 9791-9806 (2000).
- [6] B. Holben, T. F. Eck, I. Slutsker, D. Tanre, J. P. Buis, A. Setzer, E. Vermote, J. A. Reagan, Y. Kaufman, T. Nakajima, F. Lavenue, I. Jankowiak y A. Smirnov. AERONET- A federated instrument network and data achieve for aerosol characterization. *Remote Sens. Environ.* **66**, 1-16 (1998).
- [7] D. R. Brooks y F. M. Mims III. Development of an inexpensive handheld LED-based Sun photometer for the GLOBE program. *J. Geophys. Res. Atmos.* **106**, 4733-4740 (2001).
- [8] *Especificaciones del fotómetro solar* <http://www.calitoo.fr/>.
- [9] M. Iqbal. *An Introduction to Solar Radiation* 1.^a ed. ISBN: 9780323151818 (Academic Press, 1983).
- [10] S. Papandrea, C. Repetto, G. Junod, O. Vilar, J. C. Dworniczak y M. Raponi. Development of an inexpensive handheld LED-based Sun photometer for the GLOBE program. *Anales AFA* **26**, 65-69 (2015).
- [11] K. N. Liou. *An introduction to atmospheric radiation* 2.^a ed. ISBN: 9780124514515 (Academic Press, 2002).
- [12] F. Toledo, C. Garrido, M. Díaz, R. Rondanelli, S. Jorquera y P. Valdivieso. AOT Retrieval Procedure for Distributed Measurements With Low-Cost Sun Photometers. *J. Geophys. Res. Atmos.* **123**, 1113-1131 (2018).
- [13] A. Ångström. On the atmospheric transmission of sun radiation and on dust in the air. *Geogr. Ann.* **2**, 156-166 (1929).
- [14] T. F. Eck, B. N. Holben, J. S. Reid, O. Dubovik, A. Smirnov, N. T. O'neill y S. Kinne. Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban, and desert dust aerosols. *J. Geophys. Res. Atmos.* **104**, 31333-31349 (1999).
- [15] O. Dubovik y M. King. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements. *J. Geophys. Res. Atmos.* **105**, 20673-20696 (2000).
- [16] O. Dubovik, B. Holben, T. F. Eck, A. Smirnov, Y. J. Kaufman, M. D. King e I. Slutsker. Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations. *J. Atmos. Sci.* **59**, 590-608 (2002).
- [17] K. S. Shifrin. Simple relationships for the Ångström parameter of disperse systems. *Appl. Opt.* **34**, 480-4485 (1995).

- [18] P. Ristori, J. Fochesatto, P. H. Flamant, E. Wolfram, E. J. Quel, R. Piacentini y B. N. Holben. *Characterization of the atmospheric aerosols in the Buenos Aires area using sun photometer measurements* en *Proc. SPIE 4419, 4th Ibero-american Meeting on Optics and 7th Latin American Meeting on Optics, Lasers, and Their Applications 4419* (Tandil, Argentina, 2001), 506-509.
- [19] B. N. Holben, D. Tanre, A. Smirnov, T. F. Eck, I. Slutsker, N. Abuhassan e Y. J. Kaufman. An emerging ground-based aerosol climatology: Aerosol optical depth from AERONET. *J. Geophys. Res. Atmos.* **106**, 12067-12097 (2001).
- [20] G. A. D'Almeida, P. Koepke y E. P. Shettle. *Atmospheric aerosols: Global climatology and radiative characteristics*. (A. Deepak Publishing, Hampton, Virginia, 1991).
- [21] A. R. Esteve. *Estudio de los aerosoles atmosféricos en valencia mediante medidas del nefelómetro de integración* Tesis doct. (Departament de Física de la Terra I Termodinámica Universitat de València, 2011).
- [22] M. Hess, P. Koepke e I. Schult. Optical properties of aerosols and clouds: The software package OPAC. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **79**, 831-844 (1998).
- [23] L. A. Otero, P. R. Ristori, J. Pallotta, E. Pawelko, R. D'Elia y E. J. Quel. Análisis de 12 años de medición de un fotómetro solar de la red AERONET instalado en Falda del Carmen, Provincia de Córdoba. *Anales AFA* **24**, 56-59 (2013).
- [24] R. B. Stull. *An introduction to boundary layer meteorology* (Springer Science & Business Media, 2012).