

RED AERONET EN TERRITORIO ARGENTINO: ANÁLISIS ESTADÍSTICOS DE LOS DATOS Y CARACTERIZACIÓN DE LOS AEROSOLES

L. A. Otero^{a,b*}, P. R. Ristori^{a,c}, M. F. García Ferreyra^{d,e}, M. E. Herrera^{a,c}, J. L. Bali^f, A. F. Pereyra^a, E. Martorrella^a, S. Brusca^a, R. L. D'Elia^a, V. E. Fierro^b, G. Franchi^b, O. Vilar^a, J. O. Salvador^{a,c,g}, M. M. Raponi^{a,c}, E. J. Quel^{b,c}

- a. CEILAP- UNIDEF (MINDEF-CONICET) – CITEDEF. Juan Bautista de La Salle 4397 (B1063ALO), Villa Martelli, Provincia de Buenos Aires, Argentina
- b. Universidad de la Defensa Nacional, Escuela Superior Técnica Grl Div Manuel N. Savio - Facultad del Ejército. Av. Cabildo 15 (C1426AAA), C.A.B.A., Argentina.
- c. Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Buenos Aires. Medrano 951 (C1179AAQ), C.A.B.A., Argentina.
- d. Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) Centro Espacial Teófilo Tabanera. Ruta C45. km 8. (5187), Falda del Cañete, Córdoba, Argentina.
- e. Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Córdoba Maestro M. López esq. Cruz Roja s/n, Ciudad Universitaria, (5000), Córdoba, Argentina.
- f. Departamento de Modelado y Manejo de Crisis - DMMC, CITEDEF-CONICET. Juan Bautista de La Salle 4397 (B1063ALO), Villa Martelli, Provincia de Buenos Aires, Argentina.
- g. Universidad Nacional de la Patagonia Austral, Unidad Académica Río Gallegos y CIT Santa Cruz, Río Gallegos, Argentina.

e-mail del primer autor: lidial116@gmail.com lotero@citedef.gov.ar

Sede del proyecto: EST – Escuela Superior Técnica

Título del proyecto: **Estudio estadístico de las propiedades ópticas y microfísicas de los aerosoles en el territorio argentino con técnicas de sensado pasivo de la atmósfera**

Resumen: El 20 de abril de 2017 se instaló un nuevo fotómetro solar de la red AERONET – NASA en Pilar, provincia de Córdoba, en dependencias del Servicio Meteorológico Nacional, con el fin de medir la carga aerosólica de la región y sobre todo detectar los eventos de quema de biomasa que afectan el centro y norte del territorio, y que posteriormente – debido al transporte del viento – arriban a la provincia de Buenos Aires y La Pampa. Con la instalación de este nuevo instrumento, la red de fotómetros solares pasa a tener 7 equipos en el país, los cuales realizan sistemáticamente mediciones. Cabe destacar que el primer equipo se instaló en el CEILAP-UNIDEF (MINDEF-CONICET) - CITEDEF, el 17 de octubre de 1999 en Buenos Aires. En este trabajo se presentan los resultados obtenidos de un análisis estadístico efectuado sobre las mediciones de las 7 estaciones activas: CEILAP-BA, CEILAP-RG, CEILAP-Comodoro, CEILAP-Bariloche, CEILAP-Neuquén, Trelew y Pilar-Córdoba, con el propósito de determinar valores medios mensuales, tendencias de espesores ópticos de aerosoles, coeficiente de Ångström y clasificación del tipo de aerosol típico en suspensión en cada estación.

Palabras clave: AERONET, fotómetro solar, aerosoles, estadística.

I. INTRODUCCIÓN

En octubre de 1999 la red AERONET (AErosol RObotic NETwork) (Holben et al., 1998) administrada por NASA, instaló el primer fotómetro solar en el predio de CITEDEF, Villa Martelli, provincia de Buenos Aires (estación denominada CEILAP-BA) y desde entonces sus datos son analizados diariamente para determinar el contenido de aerosoles en suspensión en la

atmósfera en la zona. Con los años, se fueron sumando estaciones con el objetivo de poder caracterizar los aerosoles en otros puntos del país. El programa AERONET tiene como objetivo determinar características ópticas de los aerosoles y validar datos satelitales. La red está formada por más de 800 fotómetros solares instalados en estaciones estratégicamente distribuidas en todo el mundo (<https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>). En abril de 2017 se instaló el séptimo equipo en Pilar, provincia de Córdoba, en dependencias del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). La importancia de que todos estos instrumentos estén integrados a la red radica en el hecho que: a) todos los equipos son fotómetros solares de la misma marca (CIMEL Electronique, modelo CE-318) (<http://support.cimel.fr/photo/sunph.htm>), b) se calibran en la NASA siguiendo el mismo protocolo, y c) sus datos son procesados de la misma forma, también en la NASA, en tres niveles de calidad de datos. Estos son: a) Nivel 1.0, es el nivel del dato de espesor óptico sin control de extracción de nubes, b) Nivel 1.5 son los datos luego de la extracción automática de nubes y c) Nivel 2.0 son los datos sin nubes luego de ser re-calibrados e inspeccionados manualmente. Esta estandarización es importante para poder comparar los datos entre estaciones, es decir, que se puede hacer comparación temporal y espacial de los mismos.

En este trabajo se presenta un análisis estadístico de los datos disponibles de las 7 estaciones actualmente activas, desde que fueron instaladas hasta septiembre de 2017.

II. DESCRIPCION DE LAS ESTACIONES Y DATOS

Descripción del fotómetro solar

Los fotómetros solares son radiómetros de campo de visión angosto diseñados para medir la irradiancia solar. Estos instrumentos tienen bandas espectrales bien definidas, con un ancho banda a media altura del orden de los 10 nm. Los instrumentos modernos son controlados electrónicamente, tienen la capacidad de almacenar los datos e incorporan un sistema de tracking automático para un seguimiento preciso del posicionamiento solar. El equipo realiza tres tipos de medición: a) directa, b) almucantar y c) planos principales (Holben et al., 1998). En la medición directa apunta el colimador al Sol y realiza la medición, girando una rueda de filtros, típicamente, en las siguientes longitudes de onda: 1640, 1020, 940, 870, 675, 500, 440, 380 y 340 nm. De esta medición directa se obtiene el espesor óptico de aerosoles (AOD) y con la línea de 940 nm, el contenido de agua precipitable (Dubovik et al., 2000). En la medición de almucantar, el colimador apunta al Sol y luego describe un cono con ángulo cenital constante. Las mediciones de Plano Principal barren el cielo en el ángulo acimutal solar, variando el ángulo cenital hasta alcanzar un ángulo de aproximadamente 150° con el Sol. Las longitudes de onda utilizadas para estas mediciones son: 1020, 870, 675 y 440 nm. Con estas observaciones complementarias se pueden obtener, por métodos de inversión (Dubovik et al., 2000), la siguiente información de los aerosoles en suspensión: distribución en talla, concentración volumétrica, índice de refracción complejo y función de fase, entre otros. A lo largo de un día el fotómetro solar realiza varios ciclos de medición según efemérides preprogramadas (Holben et al., 1998).

Ubicación geográfica

Las 7 estaciones que se usaron para hacer este trabajo se encuentran en el territorio argentino por debajo del paralelo 31° S. En la Tabla 1 se presenta la ubicación geográfica de cada una de ellas.

TABLA 1: UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES

Nombre de la estación	Provincia	Lat (Sur)	Long (Oeste)	m s. n. m [m]
CEILAP-BA	Buenos Aires	34°34'01''	58°30'00''	10
Trelew	Chubut	43°15'00''	65°18'32''	15
CEILAP-RG	Santa Cruz	51°36'00''	69°19'11''	15
CEILAP-Bariloche	Río Negro	41°08'49''	71°09'46''	840
CEILAP-Comodoro	Chubut	45°47'31''	67°27'46''	49
CEILAP-Neuquén	Neuquén	38°57'07''	68°08'13''	271
Pilar-Córdoba	Córdoba	31°40'01''	63°52'58''	333

Datos utilizados

Para realizar este estudio se utilizaron las mediciones de AOD entre 870 y 440 nm registradas en cada estación desde su instalación. La cantidad de datos disponibles depende mucho de cuando se puso en marcha el equipo, de cómo se realizó su mantenimiento y de la cantidad de días con cielo despejado o parcialmente despejado con el Sol sin cobertura nubosa, se tuvieron. En la Tabla 2 se presenta la fecha de instalación de cada instrumento, la cantidad de días registrados con medición y la cantidad de datos que se procesaron para llevar adelante este trabajo.

TABLA 2: CANTIDAD DE DÍAS Y DATOS PROCESADOS POR ESTACIÓN

Estación	Fecha de instalación	Cantidad de días medidos	Cantidad de datos procesados
CEILAP-BA	18/10/1999	3926	110844
Trelew	11/11/2005	3234	85467
CEILAP-RG	12/11/2005	2200	32377
CEILAP-Bariloche	01/02/2012	717	19877
CEILAP-Comodoro	24/09/2013	1055	25723
CEILAP-Neuquén	12/11/2013	837	26709
Pilar-Córdoba	20/04/2017	104	2997

La mayor cantidad de datos usados son de Nivel 2.0. Llevar los datos a Nivel 2.0 requiere muchos meses de calibración. Para poder extender el estudio hasta septiembre 2017, fue necesario completar la serie temporal de mediciones con datos Nivel 1.5. En la Tabla 3 se presenta por estación el intervalo de las fechas en las cuales los datos se encuentran en Nivel 2.0 y 1.5. Además, se calcula el porcentaje de datos en Nivel 2.0 sobre el total de los datos utilizados.

TABLA 3: INTERVALO DE FECHAS DE DATOS EN NIVEL 2.0 Y NIVEL 1.5.

Estación	Nivel 2.0	Nivel 1.5	% de datos Nivel 2.0
CEILAP-BA	10/1999 a 01/2016	02/2016 a 09/2017	92,7
Trelew	11/2005 a 05/2016	06/2016 a 09/2017	91,4
CEILAP-RG	11/2005 a 07/2016	08/2016 a 09/2017	91,6
CEILAP-Bariloche	02/2012 a 04/2017	*	100
CEILAP-Comodoro	09/2013 a 08/2016	09/2016 a 09/2017	77,3
CEILAP-Neuquén	11/2013 a 01/2016	02/2016 a 09/2017	79,6
Pilar-Córdoba	--	04/2017 a 09/2017	0

*No hay datos a partir de abril 2017 ver tabla 4.

Cálculo del Coeficiente de Ångström

La Ley de Ångström (Ångström, 1929) propone una función potencia para representar la variación espectral del espesor óptico de aerosoles,

$$\text{AOD}(\lambda) = \beta(\lambda_0) \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^{-\text{Å}} \quad (1)$$

donde $\text{AOD}(\lambda)$ es el espesor óptico de aerosoles en diferentes longitudes de onda, $\beta(\lambda_0)$ es el parámetro de turbidez, proporcional al valor medio de la concentración de aerosoles (Iqbal, 1983) (Middleton y Knowles, 1952). El coeficiente o exponente de Ångström (Å), normalmente entre 0 y 4, está relacionado con la distribución cuadrática media de los radios de aerosoles correspondientes a los rangos micrométricos y sub-micrométricos. Se calculó el coeficiente de Ångström aplicando logaritmo a (1) y encontrando los valores de β_{λ_0} y de Å que minimicen el error cuadrático medio para los AOD medidos en (2)

$$\log(\text{AOD}_{\lambda_i}) = \log(\beta_{\lambda_0}) - \text{Å} \cdot \log \left[\frac{\lambda_i}{\lambda_0} \right] \quad (2)$$

Para este trabajo se calculó el coeficiente de Ångström usando las longitudes de onda de 870, 675, 500 y 440 nm.

III. RESULTADOS

Valores medios de AOD mensuales

Con los datos disponibles de AOD en 440 nm se calcularon los valores medios diarios por estación y con esos, la media mensual. Se puede observar que en todos los casos se presenta una variación anual sinusoidal con valores máximos en primavera y verano y valores mínimos en invierno (Otero, et al., 2003), (Otero, et al., 2002). En la Tabla 4 se presentan los meses en que las estaciones no reportaron datos.

También se puede ver que en CEILAP-Comodoro la media mensual de AOD no supera el valor de 0,1 y en las demás estaciones lo supera sólo unos pocos meses (Otero, et al., 2015), salvo la estación de Buenos Aires. La desviación estándar máxima mensual no supera el 9 % en ningún caso.

TABLA 4: MESES SIN DATOS POR ESTACIÓN

Estación	Meses
CEILAP-BA	2003: mayo, julio y diciembre; 2005: enero; 2009: septiembre, noviembre; 2011: febrero, marzo; 2016: octubre
Trelew	2010: mayo a julio
CEILAP-RG	2011: julio; 2014: enero; 2016: enero
CEILAP-Bariloche	2012: julio, septiembre a diciembre; 2013: enero a julio; 2014: febrero, julio, octubre a diciembre; 2015: febrero; 2017 mayo a septiembre
CEILAP-Comodoro	--
CEILAP-Neuquén	2016: septiembre a diciembre; 2017: enero a marzo
Pilar-Córdoba	--

Clasificación del tipo de aerosoles

El coeficiente de Ångström junto con el AOD en 440 nm permite hacer una clasificación de los aerosoles presentes en cada estación (Otero et al., 2006). Como se está trabajando con valores medios mensuales de AOD, también se calcula el valor medio mensual del coeficiente de Ångström (desviación estándar máxima no supera el 10 %). Realizar este estudio con valores

medios, proporciona información del tipo de aerosoles más frecuente, minimizándose el efecto de los eventos puntuales. En la Tabla 5 se presenta por estación el tipo de aerosol dominante o típico que la caracteriza.

TABLA 5: CARACTERIZACIÓN DE LOS AEROSOLES MÁS FRECUENTES POR ESTACIÓN

Estación	Tipo de aerosoles más frecuentes
CEILAP-BA	Continental Limpio, Continental Promedio, Continental Contaminado y Urbano/Industrial
Trelew	Continental Limpio, Antártico y Marítimo
CEILAP-RG	Continental Limpio, Antártico, Marítimo y Desértico
CEILAP-Bariloche	Continental Limpio, Continental Promedio
CEILAP-Comodoro	Continental Limpio, Antártico y Marítimo
CEILAP-Neuquén	Continental Limpio, Continental Promedio y Desértico
Pilar-Córdoba	Continental Limpio

IV. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se utilizan todos los datos disponibles por estación. Se calculan los valores medios mensuales del espesor óptico de aerosoles en 440 nm y el coeficiente de Ångström usando las longitudes de onda de 870, 675, 500 y 440 nm. Del análisis de los resultados se observa que todas las estaciones presentan valores máximos de AOD(440 nm) en la primavera y verano y valores mínimos en invierno (Otero et al., 2003), (Otero et al., 2002). Las estaciones patagónicas presentan valores bajos de AOD(440 nm) indicando que la región está afectada por una atmósfera libre de contaminación urbana/industrial (Otero et al., 2015), (Otero et al., 2006). La región de la Patagonia queda caracterizada por aerosoles del tipo continental limpio, continental promedio y desértico con trazas de aerosoles del tipo antártico y marítimo para las estaciones costeras (Otero et al., 2015), (Otero et al., 2006). Los valores de AOD(440 nm) se encuentran en un 89 % por debajo de 0,05. La estación central de Pilar-Córdoba tiene características de aerosoles del tipo continental limpio aunque los datos disponibles son muy escasos para confirmar esta aseveración. Esta estación, por su posición geográfica, va a ser influenciada durante los meses de septiembre a noviembre por la quema de biomasa que se produce en el norte del país y de los países limítrofes después de la actividad agrícola (Otero et al., 2004), por lo tanto el resultado obtenido para esta estación se va a modificar cuando se tengan más mediciones. La estación de Buenos Aires, es la que más datos tiene, ya que fue la primera en ser instalada. Esta estación, si bien está en el límite de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, diariamente se ve poco influenciada por la contaminación directa de la ciudad debido a la circulación preferencial de los vientos. Pero claramente, presenta valores muy superiores de AOD(440 nm) comparando con los demás sitios. Debido a la gran cantidad de datos procesados, la estación CEILAP-BA se puede decir que está dominada por aerosoles del tipo continental y urbanos/industriales (Otero et al., 2006), (Ristori et al., 2003).

Los resultados de este trabajo fueron enviados y aceptados para su publicación en la revista Anales AFA (Asociación de Física Argentina) ISSN 1850-1168.

V. REFERENCIAS

Holben B. N., T. F. Eck, I. Slutsker, D. Tanre, J. P. Buis, A. Setzer, E. Vermote, J. A. Reagan, Y. Kaufman, T. Nakajima, F. Lavenu, I. Jankowiak, and A. Smirnov. (1998). AERONET- A

federated instrument network and data achieve for aerosol characterization. *Rem. Sens. Environ.*, 66, 1-16.

Dubovik O. and M. King. (2000). A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements. *J. Geophys. Res.*, 105 (D16), 20673-20696.

Ångström, A. (1929). On the atmospheric transmission of sun radiation and on dust in the air. *Geografis Annal.*, 2, 156-166.

Iqbal. M. (1983). *An Introduction to Solar Radiation*. Academic Press.

Middleton W. E. Knowles. (1952). *Vision through the Atmosphere*. University of Toronto Press.

Otero, L., P. Ristori, J. Fochesatto, E. Quel, B. Holben. (2003). Detección De Procesos de Intrusión de Masas de Aire Utilizando un Análisis Estadístico de Series Temporales De Fotómetros Solares. *Anales AFA*, 14, 289 – 293.

Otero, L., P. Ristori, J. Fochesatto, P. H. Flamant, E. Wolfram, E. Quel, R. Piacentini, B. Holben, C. McClain. (2002). Aerosoles atmosféricos medidos en diferentes lugares de la Argentina con la red AERONET / NASA. *Anales AFA* 13, 280-284.

Otero, L., P. Ristori, S. Papandrea, J. Pallotta, R. D'Elia, E. Quel. (2015). Mediciones en la patagonia argentina de espesores ópticos de aerosoles con fotómetros solares de la red AERONET. *Anales AFA* 26, 4, 186-189.

Otero, L., P. Ristori, B. Holben, E. Quel. (2006). Aerosol Optical Properties by Means of a Sunphotometer and Lidar System in Buenos Aires Argentina. *Opt. Pura Apl.* 39 (4) 355-364.

Otero L. A., P. R. Ristori, B. Holben, E. J. Quel. (2004). Detection of Biomass Burning Aerosols In Córdoba, Argentina, Using The Aeronet / Nasa Data Base. *Opt. Pur. y Apl.*, 37, (3), 3359- 3363.

Ristori, P., L. Otero, J. Fochesatto, P. H. Flamant, E. Wolfram, E. Quel, R. Piacentini, B. Holben, C. McClain. (2003). Aerosol optical properties measured in Argentina: wavelength dependence and variability based on sun photometer measurements. *Optics and Lasers in Engineering*. 40, 1-2 91 – 104.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a: la red AERONET, JICA, CONICET, ANPCyT, UNDEF, al programa UNDEFI, proyecto SAVER.Net y Ministerio de Defensa. También a todo el personal técnico del SMN que mantiene en funcionamiento los fotómetros solares en las distintas estaciones.