

Medición de cenizas del volcán Puyehue ó Cordon Caulle con un sistema lidar en Buenos Aires, Argentina, durante junio 2011

Volcano Puyehue - Cordon Caulle Ash Measurement with a Lidar System in Buenos Aires, Argentina, during June 2011

Lidia Ana Otero^{1,2}, Pablo Roberto Ristori¹, Juan Vicente Pallotta¹, Ezequiel Eduardo Pawelko¹, Patricio Agustín Ballesteros¹, Pablo Facundo Orte¹, Gabriela Nicora¹, Marcelo Martín Raponi¹, Raúl DeElia¹, Elian Wolfram¹, Jacobo Salvador¹, Daniela Bulnes¹, Evangelina Martorella¹, Andrea Pereyra¹, Francisco González¹, Osvaldo Vilar¹, Juan Carlos Dworniczak^{1,2}, Eduardo Jaime Quel^{1,2}

1. CEILAP, UNIDEF (MINDEF - CONICET), UMI-IFAECI-CNRS 3351, - Juan Bautista de La Salle 4397 - B1603ALO Villa Martelli, Argentina.
2. Escuela Superior Técnica, Facultad de Ingeniería del Ejército ó Av. Cabildo 15 ó CABA. Argentina.
e-mail: lotero@citedef.gob.ar lidia1116@gmail.com

El volcán chileno Puyehue ó Cordon Caulle entró en erupción el día 4 de junio de 2011. La actividad eléctrica atmosférica relacionada con este fenómeno fue detectada en el CEILAP (CITEDEF-CONICET; 34,5° S; 58,5° O) por la red de Alerta Temprana de Volcanes perteneciente a la red mundial WWLLN (World Wide Lightning Location Network) a las 18.41 UTC. Las cenizas eyectadas fueron transportadas por los vientos alcanzando la provincia de Buenos Aires. Éstas fueron detectadas en el laboratorio el día 7 de junio con un sistema lidar coaxial multilongitud de onda. En este trabajo se analizan 100 horas de mediciones continuas efectuadas con el sistema lidar e información adicional y complementaria para estudiar en forma intensiva el evento como imágenes satelitales (AQUA y TERRA), retrotrayectorias (modelo HYSPLIT/NOAA), espesores ópticos de aerosoles (red AERONET administrada por NASA) y atenuación en el flujo de radiación solar (UV y visible) en Buenos Aires y evolución y evaluación de la actividad eléctrica atmosférica en torno al volcán.

Palabras claves: aerosoles, AERONET, lidar, cenizas volcánicas.

The Chilean volcano Puyehue - Cordon Caulle erupted on June 4, 2011. Atmospheric electrical activity related to this process was detected in CEILAP (CITEDEF-CONICET, 34.5 ° S, 58.5 ° W) for the early warning network of volcanoes worldwide within the network WWLLN (World Wide Lightning Location Network) the 18.41 UTC. Ejected ashes were carried by winds reaching the province of Buenos Aires. These were detected in the laboratory on 7 June with a multi-wavelength coaxial lidar. This paper analyzed 100 hours of continuous measurements with the lidar system and additional and complementary information to study intensively the event as satellite images (AQUA and TERRA), back trajectories (HYSPLIT / NOAA), aerosol optical thicknesses (AERONET network managed by NASA) and attenuation in the flow of solar radiation (UV and visible) in Buenos Aires and development and evaluation of atmospheric electrical activity around the volcano.

Keywords: aerosol, AERONET, lidar, volcanic ash.

I. INTRODUCCIÓN

La Patagonia Argentina es afectada frecuentemente por las erupciones volcánicas que se producen en nuestro país y en los países limítrofes. Estos eventos perturban la calidad del aire en general, generan pérdidas económicas y en especial pueden causar efectos dañinos para la salud. En este trabajo se estudia un evento de erupción volcánica del volcán chileno Puyehue - Cordon Caulle. Los productos eyectados por esta erupción afectaron la Patagonia, centro y norte de nuestro país, siendo las cenizas detectadas en varios países del hemisferio sur. Los datos utilizados para el estudio de este evento son los pertenecientes a las mediciones de un sistema lidar, un fotómetro solar perteneciente a la red AERONET [1], retrotrayectorias y dispersión de cenizas volcánicas calculadas con el modelo HYSPLIT de NOAA [2, 3, 4, 5,

6], imágenes de los satélites AQUA y TERRA [7, 8], radiación solar UV y visible y datos de la red WWLLN [9].

II. DESCRIPCIÓN DEL EVENTO

El volcán Puyehue-Cordon Caulle ubicado en la cordillera de Los Andes, entre la Región de Los Ríos y Región de Los Lagos, Chile, al norte del paso internacional Cardenal Samoré, (40,590° S; 72,117° O; 2240 m), entró en erupción el 4 de junio de 2011. En la figura 1 se muestra una imagen satelital AQUA [7, 8] instantes posteriores de la primer erupción. Esta erupción emitió cenizas a una altura máxima 14.000 m, de acuerdo con el Centro de Avisos de Cenizas Volcánicas de Buenos Aires (Buenos Aires Volcanic Ash Advisory Center ó VAAC [11]). La nube de cenizas se mantuvo por encima de los 12.000 m

durante los días 5 y 6 de junio. Estos dos días de emisiones continuas creó una nube de cenizas que se extendió más de 1.900 km desde Chile, a lo largo de la Argentina (ver imágenes satelitales en las figuras 2 a 7), alcanzando a Uruguay, Paraguay y Brasil. También fueron detectadas cenizas en Nueva Zelanda, sur de África y Australia. A modo de ejemplo se presenta en la figura 8 una imagen satelital AQUA [7, 8] del 12 de junio mostrando una pluma de cenizas sobre Nueva Zelanda



Figura 1. Imagen satelital AQUA del 4 de junio de 2011 a las 18.50 UTC.



Figura 2. Imagen satelital AQUA del 5 de junio de 2011 a las 17.55 UTC.



Figura 3. Imagen satelital TERRA del 6 de junio de 2011 a las 14.25 UTC.

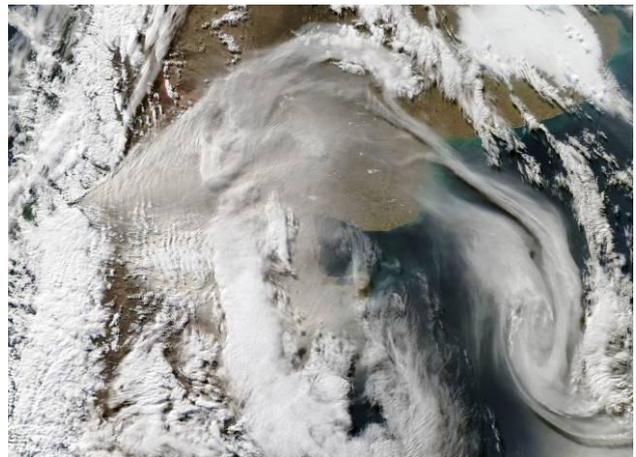


Figura 4. Imagen satelital AQUA del 8 de junio de 2011 a las 18.30 UTC.

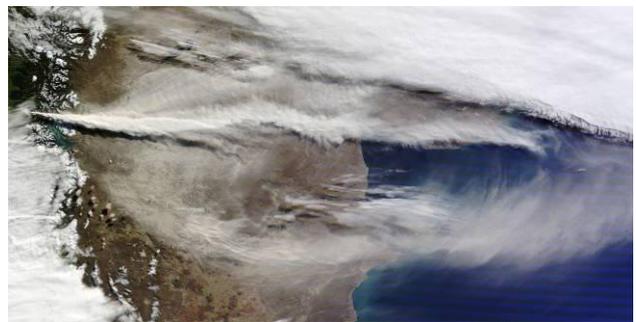


Figura 5. Imagen satelital TERRA del 11 de junio de 2011 a las 14.45 UTC.



Figura 6. Imagen satelital AQUA del 12 de junio de 2011 a las 18.50 UTC.



Figura 7. Imagen satelital TERRA del 13 de junio de 2011 a las 14.35 UTC.

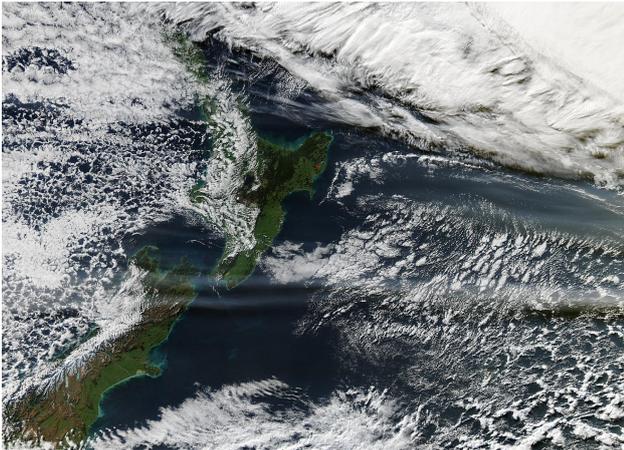


Figura 8. Imagen satelital AQUA sobre Nueva Zelanda del 12 de junio de 2011 a las 02.20 UTC.

Las figuras 9 y 10 muestran la evolución de la pluma de cenizas volcánicas calculada con el modelo HYSPLIT/VOLCANIC ASH de NOAA. Cada imagen es una composición de capas entre la superficie y los aproximadamente 16 km (FL550 ó fly level 550 millas) [6]. En ellas se puede observar que las cenizas avanzan sobre el centro del país alcanzando la provincia de Buenos Aires.

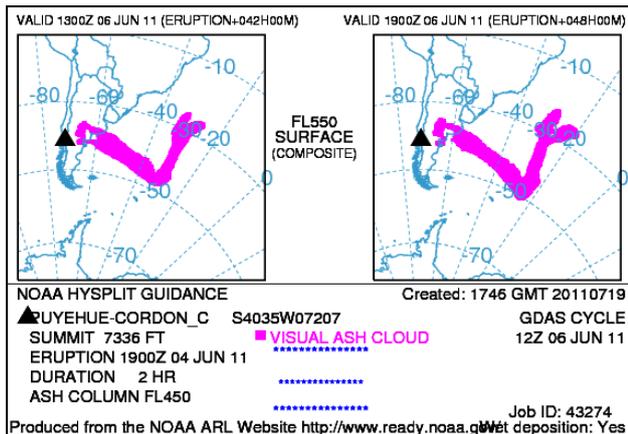


Figura 9. Evolución de las cenizas volcánicas calculadas con el modelo HYSPLIT/VOLCANIC ASH de NOAA para 48 horas después de la primera erupción.

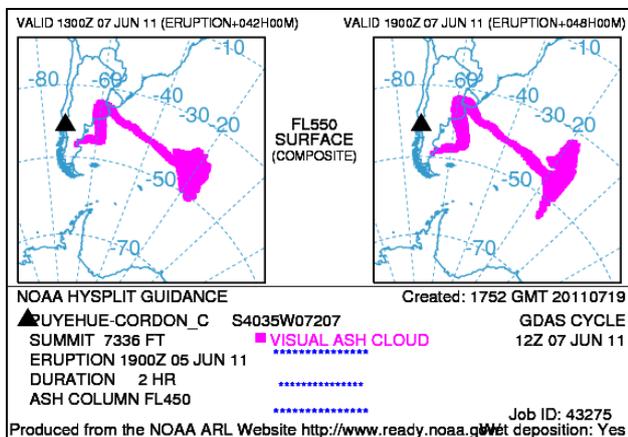


Figura 10. Evolución de las cenizas volcánicas calculadas con el modelo HYSPLIT/VOLCANIC ASH de NOAA para 48 horas después del segundo día de erupción.

III. DESCARGAS ELÉCTRICAS. ERUPCIÓN VOLCÁNICA: ALERTA TEMPRANA DE SU DETECCIÓN.

La red mundial de detección de descargas (World Wide Lightning Location Network; WWLLN [9, 10]) está formada por más de 50 estaciones distribuidas alrededor del mundo. En la Argentina se encuentran instaladas tres estaciones: en la Facultad de Matemática, Astronomía y Física de la Universidad Nacional de Córdoba; en la estación CEILAP-RG en Río Gallegos, Santa Cruz y en Departamento de Física, Universidad Nacional de la Patagonia, Trelew, Chubut. Esta configuración de estaciones, permite una perfecta cobertura del territorio nacional para la detección y estudio de descargas eléctricas atmosféricas.

Cada estación está dotada de una antena capaz de detectar ondas electromagnéticas en la banda de muy baja frecuencia ó VLF (3-30 kHz) debido a que la radiación electromagnética generada por las descargas eléctricas en este rango de frecuencia puede ser detectada a varios miles de kilómetros debido a su propagación en la guía de onda Tierra-Ionosfera (EIWG).

Global Volcanic Lightning Monitor es una red dependiente de la WWLLN que es capaz de emitir una alerta temprana de erupción volcánica detectando las descargas eléctricas que se producen en torno de un volcán instantes antes que este entre en erupción. Esta alerta es enviada vía e-mail en forma automática a los integrantes o suscriptos a la red WWLLN. Para el caso de la erupción del volcán Puyehue la alerta llegó vía e-mail [9, 10] 47 minutos antes de la alarma emitida por el VACC Buenos Aires. En la figura 11 se puede observar la cantidad de rayos detectados en la cercanía del volcán entre los días 4 y 14 de junio de 2011.

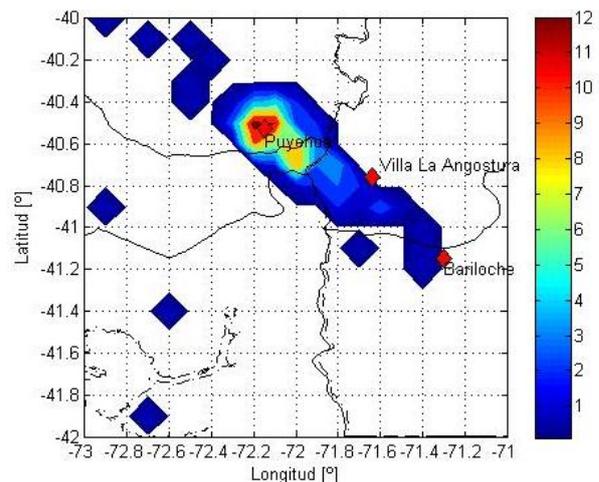


Figura 11. Cantidad de rayos detectados con la red WWLLN en cercanías del volcán Puyehue, (grilla 0,1° por 0,1°).

IV. RESULTADOS.

En el CEILAP-BA (Centro de Investigaciones en Láseres y Aplicaciones ó sede Villa Martelli, provincia de Buenos Aires, 35,5° S; 58,5° O) se encuentra instalado un sistema lidar coaxial multilongitud de onda [12] capaz de medir desde los 80 m a los 13 km la evolución de la capa límite,

capas de aerosoles (partículas en suspensión en la atmósfera), nubes y vapor de agua con una resolución espacial de 7,5 m y temporal de 10 s.

En la figura 12 se muestra la evolución temporal y espacial de la señal de retrodifusión de aerosoles en 1064 nm (en unidades logarítmicas arbitrarias) medido con el sistema lidar. En la imagen se pueden distinguir claramente la evolución de la capa límite atmosférica y su estructura e importantes capas de aerosoles hasta los 6 km, entre los 8 a 12 km se observa la presencia de nubes.

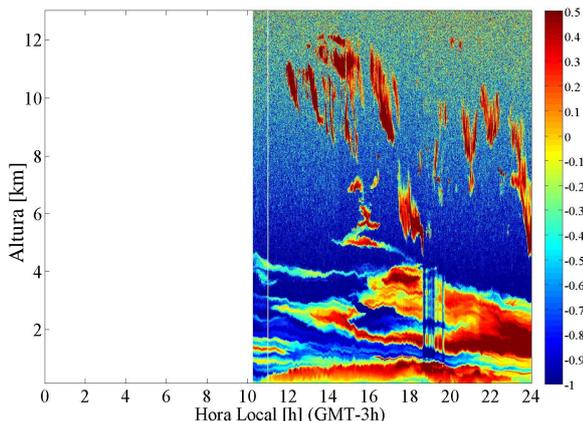


Figura 12. Evolución de la capa límite atmosférica y de las capas de aerosoles para el día 7 de junio de 2011, medido con el sistema lidar en 1064 nm.

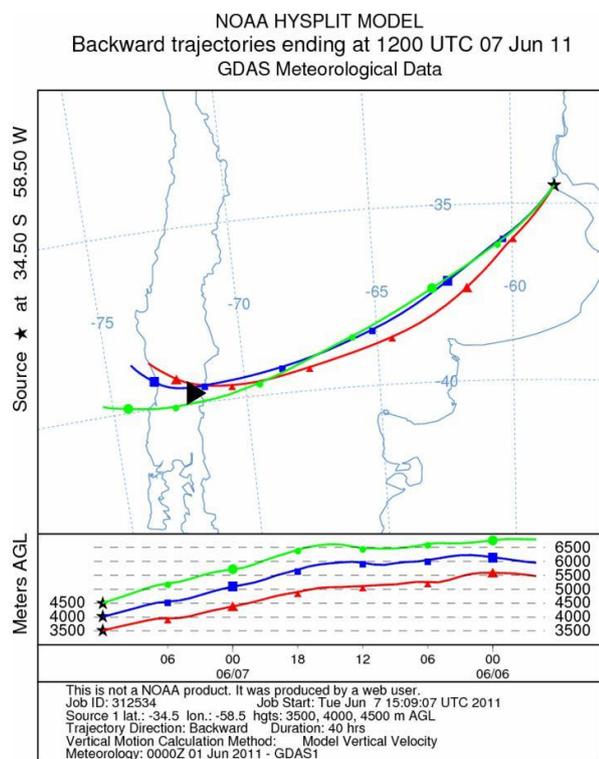


Figura 13. Retro trayectorias calculadas con el modelo HYSPLIT de NOAA para el día 7 de junio de 2011 a diferentes alturas para las 12 UTC.

Para poder verificar que los aerosoles presentes sobre la capa límite son aerosoles de transporte producto de las

erupciones volcánicas del Puyehue, se calcularon retrorayectorias con el modelo HYSPLIT [4], para tres alturas, 3,5 km, 4 km y 4,5 km. Este resultado se presenta en la figura 13, donde se puede ver que las masas de aire que arribaron a Buenos Aires se originaron en torno al volcán. Este resultado es una verificación más de análisis previo que se realizó por medio de las imágenes satelitales y de la evolución de las cenizas por el modelo HYSPLIT/VOLCANIC ASH de NOAA [5, 6] en donde se observaba que las mismas arribarían a Buenos Aires días después de su eyección a la atmósfera.

En las figuras 14 a 17 se muestran mediciones ininterrumpidas efectuadas entre los días 8 al 11 de junio y en la figura 18 la medición para el día 13 de junio. En todas las figuras se puede visualizar la evolución de la capa límite diurna y nocturna, el espesor geométrico y altura de las capas de aerosoles. Por encima de los 8 km se detecta la presencia de cirrus. Es de destacar que el día 11 de junio presentó una leve capa a media noche y entre las 15 y 16 horas, aproximadamente a los 1800 m, prácticamente para este día no se detectaron capas importantes de aerosoles pero si fue muy importante el desarrollo de un cirrus entre los 10 y los 12 km.

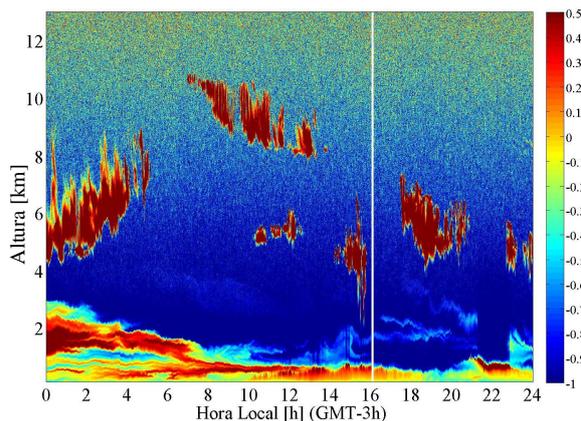


Figura 14. Evolución de la capa límite atmosférica y de las capas de aerosoles para el día 8 de junio de 2011, medido con el sistema lidar en 1064 nm.

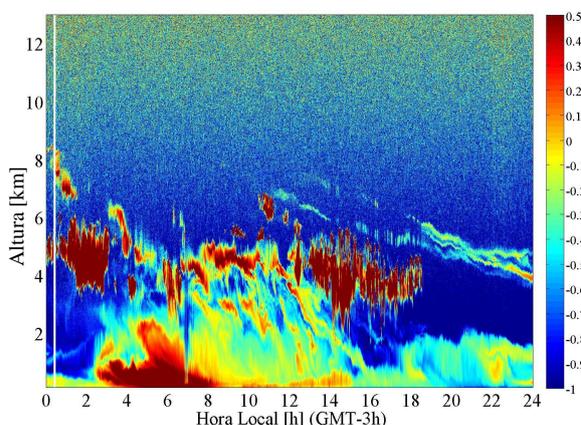


Figura 15. Evolución de la capa límite atmosférica y de las capas de aerosoles para el día 9 de junio de 2011, medido con el sistema lidar en 1064 nm.

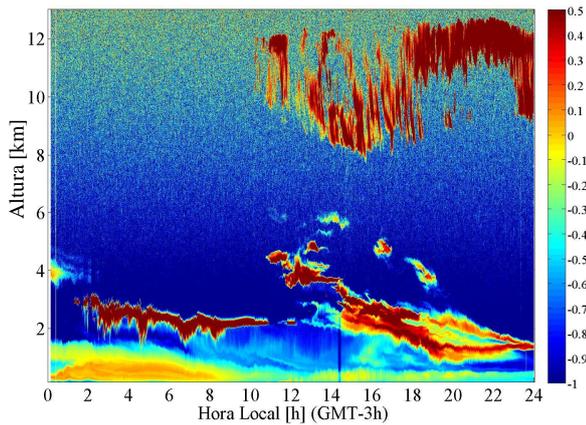


Figura 16. Evolución de la capa límite atmosférica y de las capas de aerosoles para el día 10 de junio de 2011, medido con el sistema lidar en 1064 nm.

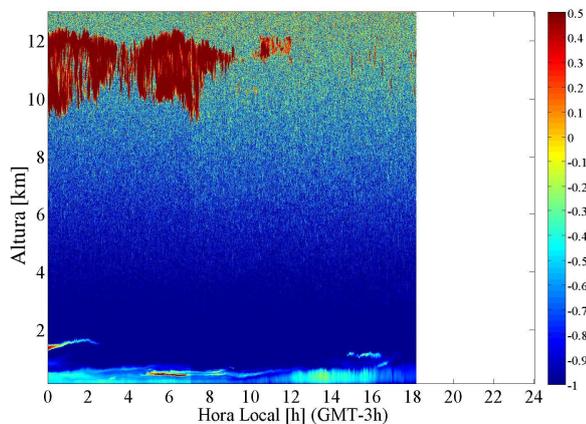


Figura 17. Evolución de la capa límite atmosférica y de las capas de aerosoles para el día 11 de junio de 2011, medido con el sistema lidar en 1064 nm.

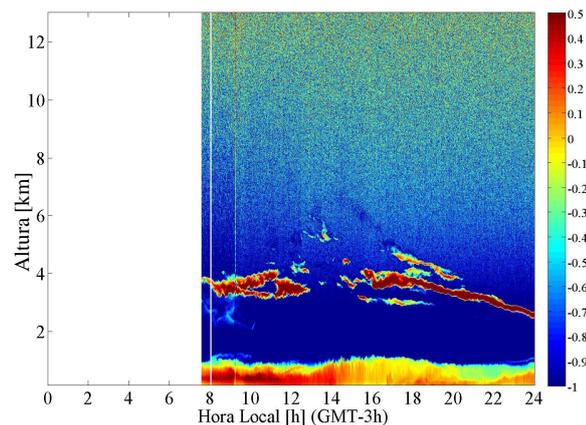


Figura 18. Evolución de la capa límite atmosférica y de las capas de aerosoles para el día 13 de junio de 2011, medido con el sistema lidar en 1064 nm.

En el CEILAP-BA también se encuentra instalado un fotómetro solar de la red mundial AERONET [1]. Este sistema permite medir en forma integrada la extinción de aerosoles. En la figura 19 se puede observar la evolución temporal del espesor óptico de aerosoles (AOD) en 440 nm del 7 al 13 de junio. Se puede ver claramente como los valores superan, más de 5 veces, la media esperada

para el mes de junio que es de 0,1, representada con línea continua en el gráfico y su desvío estándar en línea de punto (0,05). Es de notar que el día 11 de junio, en donde no se observaron capas significativas de aerosoles de transporte, los valores medidos están dentro de los valores esperados.

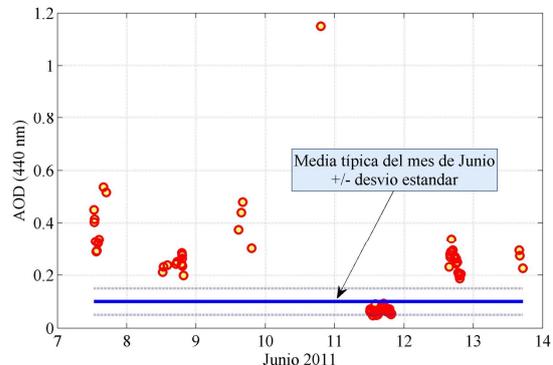


Figura 19. Evolución del espesor óptico de aerosoles medido con un fotómetro solar en la estación de CEILAP-BA.

Una forma de identificar diferentes tipos de aerosoles es graficar el coeficiente de Ångström [13], que está relacionado con el radio medio de las partículas, versus el espesor óptico de aerosoles en 440 nm [14]. En la figura 20 se muestra este tipo de gráfico mostrando que entre los días 7 y 13 de junio se pueden identificar tres tipos diferentes: continental limpio, desértico y volcánico [15]. Se puede observar que el día 11 de junio es el que presenta aerosoles de tipo continental limpio. También hay que remarcar que en el análisis de cenizas que se hizo del volcán Chaitén en mayo de 2008 [15], se encontraron aerosoles desérticos además de los aerosoles del tipo volcánico esperados como sucedió en este caso.

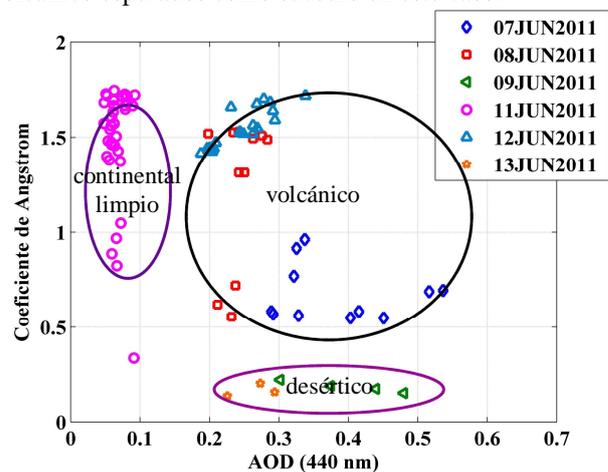


Figura 20. Coeficiente de Ångström versus el espesor óptico de aerosoles en 440 nm para la estación de CEILAP-BA.

La presencia de las capas de aerosoles provocó también una importante atenuación de la radiación solar en superficie tanto en la región visible como en la ultravioleta. La estación de sensado remoto pasivo operativa en el CEILAP-BA cuenta con una serie de radiómetros que permiten medir el flujo de radiación solar global que llega a la superficie de la Tierra en un plano horizontal. El flujo solar visible es registrado por medio de un piranómetro Kipp&Zonen mientras que el rango

ultravioleta es medido con radiómetros EKO en el UVA y UVB con una resolución temporal de un minuto [16].

Para evaluar la atenuación producida por las cenizas en el flujo de radiación solar se consideró la diferencia relativa entre dos días cercanos con y sin cenizas. De acuerdo a la evolución diaria del espesor óptico de aerosoles entre el día 7 y el día 14 de junio (ver figura 19), el día 11 de junio presentó espesores ópticos dentro de la media para Buenos Aires para esta época del año. Por esta razón, y debido a que la medición lidar nos permite identificarlo como un día sin gran formación de nubes, lo tomaremos como referencia para calcular la atenuación que produjeron las cenizas con respecto al día 13 de junio, que sí presentó capas de aerosoles con espesores ópticos elevados.

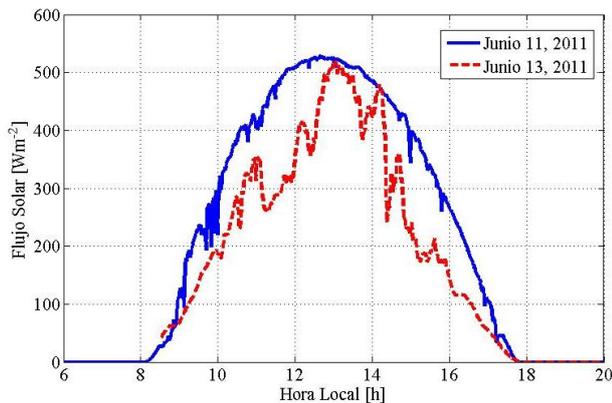


Figura 21. Atenuación de la radiación solar visible debido a la presencia de cenizas volcánicas para el día 13 de junio.

En la figura 21 podemos ver la evolución temporal del flujo de radiación solar visible medido por un piranómetro en el CEILAP-BA para los días 11 y 13. Durante la mañana del día 13, la mayor atenuación se produjo alrededor de las 11:25 hora local, con un 41 % de disminución, mientras que por la tarde se registró a las 15:25 hora local, una atenuación del 52 % ambas relaciones con respecto al día 11 de junio. El mismo tipo de análisis pero en la radiación UVB medida con un biómetro EKO se muestra en la figura 22. En este caso para la irradiancia eritémica la atenuación por la mañana fue del 38 % y de 30 % por la tarde.

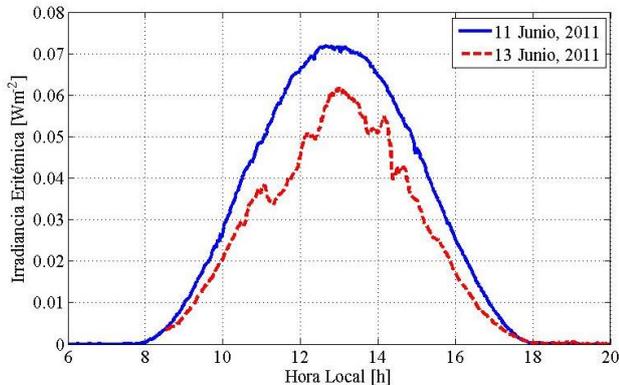


Figura 22. Evolución temporal de la irradiancia eritémica (UVB pesado con la respuesta de la piel) para el día 11 de junio (línea azul) y para el 13 de junio (línea roja).

V. CONCLUSIONES

En resumen, en este trabajo se analizó la evolución del espesor óptico de aerosoles de un evento de cenizas volcánicas sobre la ciudad de Buenos Aires.

Es posible destacar como estos eventos hacen que el espesor óptico de aerosoles aumente significativamente produciendo un cambio desfavorable en el balance radiativo, influyendo en el clima de la región. Esto ocasiona a su vez una reducción en la visibilidad y un incremento de las afecciones respiratorias.

VI. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a: la red AERONET, JICA, CONICET, ANPCyT y CONAE por el apoyo brindado para la realización del presente trabajo. También a NOAA Air Resources Laboratory (ARL) por permitirnos el uso del modelo de transporte HYSPLIT y HYSPLIT/VOLCANIC ASH utilizados en esta publicación y al Profesor Holzworth, Director de la red WWLLN.

VII. REFERENCIAS

- [1] - Holben B., T. F.Eck, I. Iutsker, D.Tanre, J. P. Buis, A. Setzer, E. Vermote, J. A. Reagan, Y. Kaufman, T. Nakajima, F. Lavenu, I. Jankowiak, and A. Smirnov. AERONET- A federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote Sens.* 12, 1147-1163, (1991).
- [2] - Draxler, R. R. and G. D. Rolph. HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model access via NOAA ARL READY. NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD. (2003).
- [3] - Rolph, G. D. Real-time Environmental Applications and Display sYstem (READY). NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD. (2003).
- [4] - http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT_traj.php
- [5] - <http://ready.arl.noaa.gov/READYVolcAsh.php>
- [6] - <http://www.arl.noaa.gov/VolcAsh.php>
- [7] - <http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/>
- [8] - <http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/>
- [9] - <http://webflash.ess.washington.edu/>
- [10] - <http://wwlln.net>
- [11] - <http://www.ssd.noaa.gov/VAAC/OTH/AG/messages.html>
- [12] - Otero, L., P. Ristori, E. Pawelko, J. Pallotta, E. Quel. Six-Year Evolution of Multiwavelength Lidar System at CEILAP. V Workshop on Lidar Measurements in Latin America. OPT. PURA APL Sociedad Española de Óptica (S.E.D.O.) vol.44, p13 ó 18, ISSN 0030-3917 (2011).
- [13] - Ångström, A., On the atmospheric transmission of sun radiation and on dust in the air. *Geografis Annal.*, 2,156-166, (1929).
- [14] - Otero L., P. Ristori, B. Holben, E. Quel. Espesor óptico de aerosoles durante el año 2002 para diez estaciones pertenecientes a la red AERONET ó NASA. (Aerosol Optical Thickness at ten AERONET ó NASA stations during 2002). *Opt. Pura Apl.* 39 (4) 355-364, (2006).
- [15] - Pawelko, E., J. Pallotta, L. Otero, E. Wolfram, R. De Elia, J. Salvador, M. Raponi, E. Martorella, O. Vilar, F. Gonzalez, J. Dworniczak y E. Quel. Medición de cenizas del Volcán Chaitén en Buenos Aires, (Measurement of Chaitén Volcano ashes in Buenos Aires) *Anales AFA (Asociación Física Argentina)* Vol. 20, 255-259, ISSN: 0327-358 X ISSN (Online) 1850 ó 1158, Asociación de Física Argentina, Editor Dr. Roberto Gratton, (2009).
- [16] - <http://www.division-lidar.com.ar>