

RESULTADOS PRELIMINARES DE LA MODELACIÓN DE AEROSOLES VOLCÁNICOS. CASO DE ESTUDIO: VOLCÁN PUYEHUE.

G. Mulena¹, D. Allende², E. Puliafito³.

Grupo de Estudios de la Atmósfera y el Ambiente (GEAA)
Facultad Regional Mendoza - Universidad Tecnológica Nacional
Rodríguez 273. C.P. 5500. Mendoza

Tel. 0261- 543000. e-mail: celeste.mulena@gmail.com, david.allende@frm.utn.edu.ar, epuliafito@frm.utn.edu.ar

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

RESUMEN: Con el objeto de describir los efectos provocados por la erupción del Complejo volcánico Puyehue el 4 de junio de 2011, y contribuir a los estudios de modelación de aerosoles volcánicos correspondientes al mismo, se presentan los resultados preliminares de SO₂, PM₁₀ y PM_{2.5} durante el periodo comprendido entre el 3 y 8 de junio de 2011. Para la modelación se empleó el sistema WRF/CALMET/CALPUFF.

Los resultados iniciales muestran que las especies volcánicas simuladas poseen un patrón de distribución espacial con desplazamiento hacia el Este, lo cual coincide con la pluma volcánica observada por MODIS. Además, los valores máximos de concentración y deposición promedios son cercanos a la ubicación del volcán. Para el caso de SO₂, en 24 hs, se observa que excede la máxima concentración diaria admitida por la OMS.

Se considera necesario elevar el número de simulaciones y comparar los resultados con otros estudios y herramientas.

Palabras clave: volcán Puyehue, modelo WRF, modelo CALMET, modelo CALPUFF, MODIS.

INTRODUCCIÓN

Las erupciones volcánicas pueden expulsar a la atmósfera grandes cantidades de bloques, lapilli y cenizas durante periodos relativamente largos de tiempo. Estos productos, conocidos como tefra, representan una seria amenaza para las comunidades cercanas. Sin embargo, otros productos derivados de este tipo de eventos como ser SO₂ (dióxido de azufre), PM₁₀ (material particulado con radio aerodinámico menor a 10 µm) y PM_{2.5} (material particulado con radio aerodinámico menor a 2,5 µm) necesitan ser estudiados por sus implicancias en la población. El objetivo de este trabajo es mostrar los resultados preliminares para las especies de SO₂, PM₁₀ y PM_{2.5} provocados por la erupción del volcán Puyehue en el periodo del 3 al 8 de junio de 2011. El estudio de éstas fue efectuado con el sistema WRF/CALMET/CALPUFF.

El volcán Puyehue ubicado unos 850 Km al Sur de Santiago de Chile (40° 35' 36, 21'' S, 72° 07' 05,51'' W, elevación 2199 m) entró en erupción el 4 de junio de 2011 a las 15:15, hora local, luego de un promedio de 230 sismos por hora, 12 de los cuales presentaron magnitudes mayores a 4,0 grados en la escala de Richter. El Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) - Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur (OVDAS), registró a las 14:45 la explosión que generó una columna de gases con altura de 10 Km y un ancho de 5 Km aproximadamente (SERNAGEOMIN-OVDAS, 2011) El viento, a una altura de 5 Km respecto a la base volcánica, fue en dirección Sur, mientras que a 10 Km de altura, se orientó en dirección Sureste y Este. El nivel de alerta volcánica se comunicó como erupción moderada.

La actividad de este volcán obligó al desalojo de más de 3.500 personas y al cierre de los pasos fronterizos. Durante la noche del 4 de junio se registró escurrimiento de lava y desprendimientos de roca volcánica, razón por la cual se intensificaron las medidas de seguridad. La nube de cenizas provocada por la erupción se extendió sobre varias ciudades argentinas, entre ellas San Carlos de Bariloche y Villa La Angostura.

UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL VOLCÁN PUYEHUE

El volcán Puyehue está ubicado en la Cordillera de Los Andes, en la Provincia del Ranco, Región de Los Ríos, Chile y alcanza los 2.199 msnm (Figura 1).

¹ Becaria Doctoral CONICET

² Becario Postdoctoral CONICET

³ Investigador Independiente CONICET

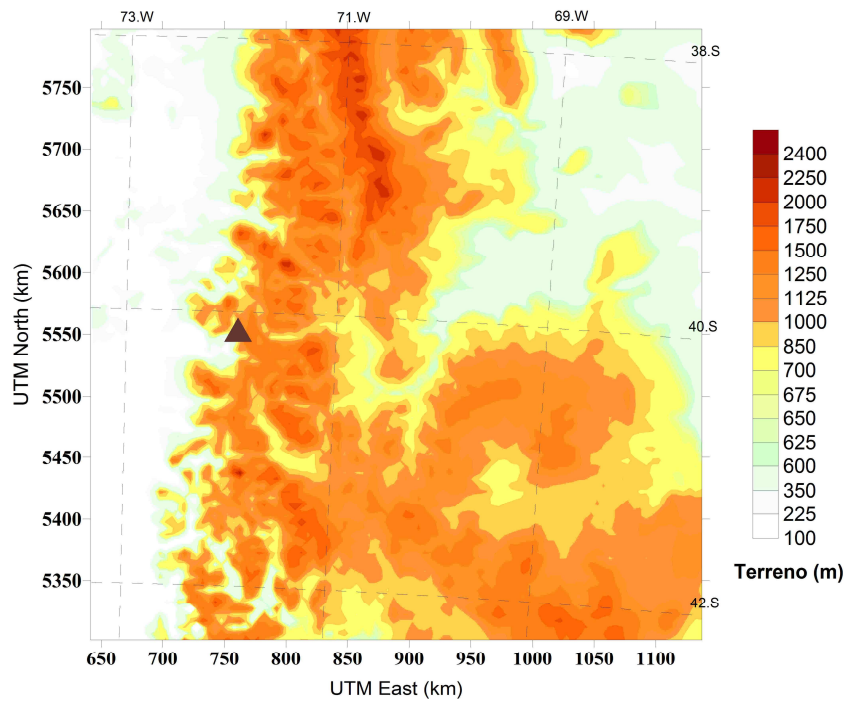


Figura 1: Ubicación del Volcán Puyehue. Coordenadas UTM 18 S: 743,85 Km E 5502,41 Km N, a 2.199 m de elevación.

MÉTODOS

En este estudio se utilizó el sistema WRF/CALMET/CALPUFF para el cálculo de dispersión de gases y partículas contaminantes. El sistema se corrió en base de tiempo horaria, utilizando en primer lugar, el modelo Weather Research and Forecasting (WRF; Michalakes et al., 2005) para generar campos de vientos de gran escala como aproximación inicial para luego emplear el modelo CALMET (Scire et al., 2000), que ajusta dichos campos meteorológicos generados, al terreno y uso/cobertura del suelo incluidos del dominio de modelado con alta resolución. Los campos meteorológicos de WRF/CALMET se usaron para conducir las simulaciones con el modelo de dispersión CALPUFF (Scire et al., 2000)

El modelo WRF fue configurado con tres dominios anidados: un dominio exterior de 100 x 100 celdas con una resolución espacial de 27 Km, un dominio intermedio de 133 x 133 celdas con resolución espacial de 9 Km y un dominio inferior de 181 x 181 celdas con resolución espacial de 3 Km. Los tres dominios poseen 27 niveles verticales de presión hasta 50 hPa y están centrados en 40° 35' 36, 21'' S, 72° 07' 05,51'' W correspondientes a las coordenadas del volcán Puyehue. WRF se configuró para adaptarse al dominio local introduciendo datos estáticos en una resolución mucho más adecuada que la incluida por defecto en el modelo. En tal sentido, los más recientes datos de uso de suelo en resolución de 250 m provenientes de GLOCOVER 2009 (Arino et al., 2009) fueron incluidos para mejorar la caracterización de todos los dominios. El modelo fue corrido con condiciones iniciales y de contorno del modelo circulación GFS (Global Forecast System) del National Center for Environmental Prediction (NCEP) con resolución de 1° x 1° en intervalos 6 horas. En la Tabla 1 se muestran algunas de las opciones empleadas en la microfísica. Mayores detalles de las parametrizaciones físicas de WRF pueden encontrarse en Michalakes et al., 2005.

Opciones	Esquema
Microfísica	Eta Ferrier scheme
Radiación de onda larga	RRTM schem (modelo Rapid Radiative Transfer Model)
Radiación de onda corta	Dudhia scheme
Nubes convectivas	Grell-Devenyi ensemble scheme

Tabla 1: Resumen de las principales opciones elegidas en el esquema de física de WRF.

CALMET fue configurado para el dominio intermedio (Figura 1) con resolución horizontal de 5 Km y 11 niveles verticales que corresponden a las alturas físicas de 20, 50, 100, 500, 1000, 2.000, 5.000, 7.500, 10.000, 12.000 y 15.000 metros. Los campos meteorológicos generados por WRF fueron interpolados horizontal y verticalmente para CALMET con el procesador offline CALWRF, e introducidos al modelo como campos iniciales. El análisis objetivo en CALMET se realizó usando un radio de influencia de 5 Km, dando como dominio de modelación una región de 500 Km x 500 Km. Finalmente, campos meteorológicos en tres y dos dimensiones fueron generados para todo el período de modelado con resolución horaria.

CALPUFF (Scire et al., 2000) es un avanzado modelo de dispersión por soplos de estado no estacionario adoptado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA) como modelo preferido para evaluar el transporte, dispersión, transformación y deposición de contaminantes gaseosos y partículas en escalas urbanas. CALPUFF es un modelo de soplos lagrangiano y está programado para simular cantidades discretas de material contaminante emitidas por una fuente en el flujo de aire, así, mientras la circulación cambia de hora a hora, el camino que cada soplo sigue, cambia con la nueva

dirección del viento. En este trabajo se modelaron con CALPUFF tres especies: SO_2 , PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$. La fuente de emisión, fue colocada a partir del 4 de junio de 2011, debido que en esta fecha comenzó la erupción, se consideró como puntual; y los parámetros de emisión, tales como altura efectiva y velocidad de elevación de la pluma se tomaron de datos del volcán El Reventador (CORPAIRE, 2002). El resumen de las diferentes configuraciones en CALPUFF para SO_2 , PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ se pueden observar en la Tabla 2.

Especies	Periodo de simulación	Nivel (altura) simulada	Resultados que se obtienen con la simulación
$\text{SO}_2 / \text{PM}_{10}$	5 días (3 al 8 de junio de 2011)	12.000 m	Valores promedios de concentración / deposición seca para el periodo y altitud considerada.
	5 días (3 al 8 de junio de 2011)	0 - 100 m	
	24 hs (4 al 5 de junio de 2011)	4.700 m	
	24 hs (5 al 6 de junio de 2011)	5.700 m	
	24 hs (6 al 7 de junio de 2011)	7.700 m	
$\text{PM}_{2.5}$	5 días (3 al 8 de junio de 2011)	12.000 m	Valores promedios de deposición seca para el periodo y altitud considerada.
	5 días (3 al 8 de junio de 2011)	12.000 m	
	5 días (3 al 8 de junio de 2011)	12.000 m	

Tabla 2: Resumen de las simulaciones efectuadas con CALPUFF. Los valores promedios de SO_2 se obtienen en ug/m^3 y los de PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ en $\text{ug}/\text{m}^2/\text{s}$.

RESULTADOS

Las imágenes captadas por el sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) en los satélites Aqua y Terra de la National Aeronautics and Space Administration (NASA) de los Estados Unidos (Randall, 2008), permiten identificar el patrón espacial de la pluma volcánica (Figura 2).

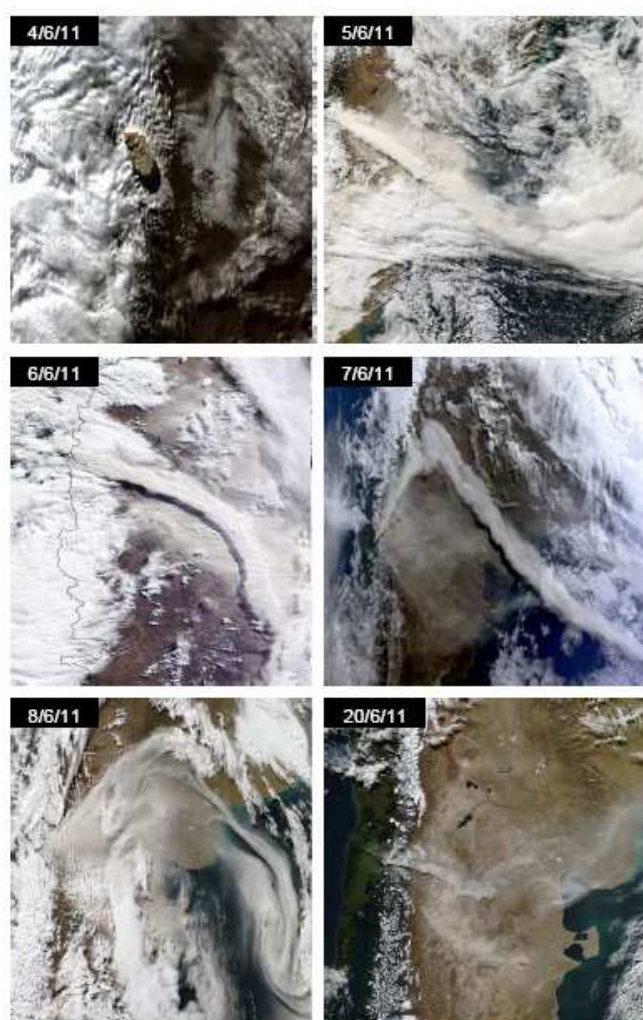


Figura 2: Imágenes satelitales captadas por el sensor MODIS: progresión de la pluma volcánica emitida tras la erupción del volcán Puyehue. En la parte superior, de izquierda a derecha, se muestran los días 4 y 5 de junio de 2011; con el mismo criterio, en el medio los días 6 y 7. Finalmente las dos imágenes inferiores corresponden a los días 8 y 20 de junio de 2011.

En la primera imagen de la izquierda de la Figura 3, correspondiente al 4 de junio de 2011, se observa la columna de cenizas emitida por el volcán, moviéndose en dirección Sureste como consecuencia de los vientos. La densidad de la pluma de

cenizas, así como su color característico, permiten identificarla con facilidad en la imagen, a pesar de la nubosidad que cubre gran parte de la zona.

En la imagen de la derecha del 6 de junio se puede ver la pluma dirigiéndose en dirección Noreste y posteriormente hacia el Sureste, alcanzando la costa atlántica. Asimismo, se observa una zona mucho más amplia, a menor altura, que muestra evidencia de partículas en suspensión en la atmósfera. Las nubes de agua se distinguen claramente en este tipo de imágenes por su color más blanco (dispersan de manera eficiente la radiación solar incidente) y por las inhomogeneidades asociadas con la dinámica propia de cada tipo de nube. La última imagen, correspondiente al 20 de junio, ya no presenta una pluma bien definida, observándose una vasta zona cubierta por partículas en suspensión.

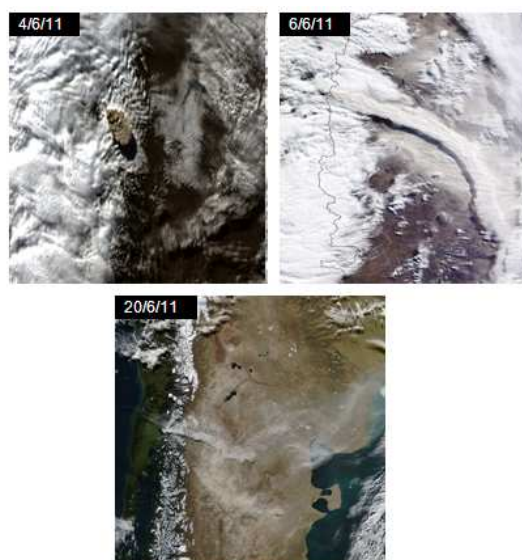


Figura 3: Imágenes satelitales de la pluma provocada por la erupción del volcán Puyehue obtenidas por el sensor MODIS los días 4, 6 y 20 de junio de 2011 (arriba hacia abajo y de izquierda a derecha).

Utilizando el sistema WRF/CALMET/CALPUFF, con las configuraciones expuestas en la sección MÉTODOS para el período de 5 días y nivel 12.000 m, se obtienen los gráficos de concentración promedio de SO_2 y deposiciones secas de PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ (Figura 4).

En la Figura 4 se puede apreciar que los valores máximos promedios de concentración de SO_2 se centran en las coordenadas UTM 19 G 321,83 Km E 5502,07 Km S. Por otro lado, las deposiciones secas de PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ se ubican a los 19 G 310,43 Km E 5502,42 Km S. Los valores máximos promedios de SO_2 son de aproximadamente $5,6 \text{ ug/m}^3$, y los de PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ son de $0,00135 \text{ ug/m}^2/\text{s}$ y $0,00096 \text{ ug/m}^2/\text{s}$ respectivamente. El desplazamiento de las especies analizadas a 12.000 m es en dirección Noreste y Este.

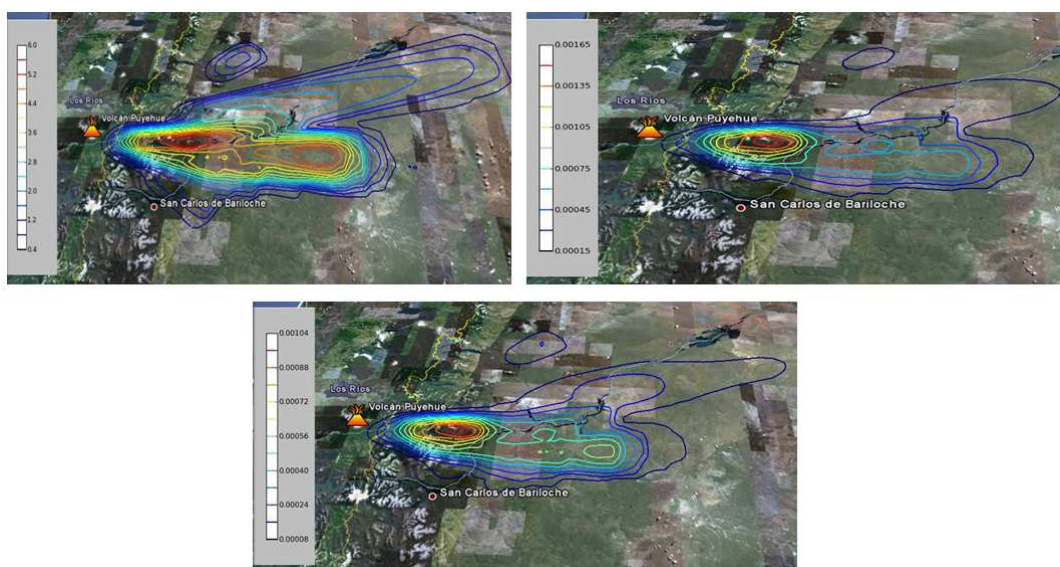


Figura 4: Promedio de concentración de SO_2 en ug/m^3 y las deposiciones secas de PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ en $\text{ug/m}^2/\text{s}$. El periodo simulado es del 3 y 8 de junio de 2011. Nivel considerado: 12.000 m.

Para el período de 5 días y los primeros 100 m de altitud, se obtienen los gráficos de concentración promedio de SO₂ y deposiciones secas de PM₁₀ y PM_{2.5} (Figura 5).

En la Figura 5 se puede apreciar que los valores máximos promedios de concentración de SO₂ así como las deposiciones secas de PM₁₀ y PM_{2.5} se ubican sobre el volcán. Los valores máximos promedios de SO₂ son de aproximadamente 3.600 ug/m³, y los de PM₁₀ y PM_{2.5} son de 2.10 ug/m²/s y 1.04 ug/m²/s respectivamente. El desplazamiento de las especies analizadas en los primeros 100 m de altura es en dirección Noreste y Sureste.

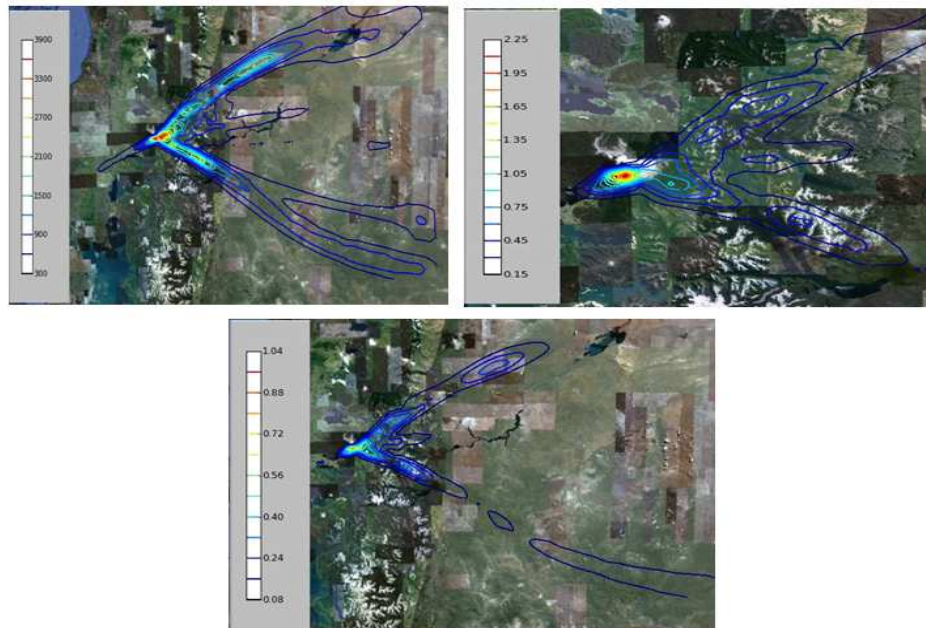


Figura 5: Promedio la concentración de SO₂ en ug/m³ y las deposiciones secas de PM₁₀ y PM_{2.5} en ug/m²/s. El periodo simulado es del 3 y 8 de junio de 2011. Alturas consideradas: primeros 100 m.

La Figura 6 muestra las simulaciones de 24 hs correspondientes a diferentes días y altitudes para la especie SO₂ (Tabla 2). En la imagen superior izquierda, correspondiente al día 1 (4 al 5 de junio) y altitud 4.700 m, podemos observar el desplazamiento de la concentración de SO₂ hacia el Noreste. La imagen superior derecha, correspondiente al día 2 (5 al 6 de junio) y altitud 5.700 m, se muestra un desplazamiento hacia el Sureste. La imagen inferior izquierda correspondiente al día 3 (6 al 7 de junio) y altitud 7.700 m, indica un desplazamiento hacia el Sureste. La imagen inferior derecha, correspondiente al día 4 (7 al 8 de junio) y altitud 12.000 m, apunta un desplazamiento hacia el Noreste.

Los valores máximos de concentración siguen estando cercanos al volcán en los 4.700 y 5.700 metros, no así para la altitud de 7.700 y 12.000 metros.

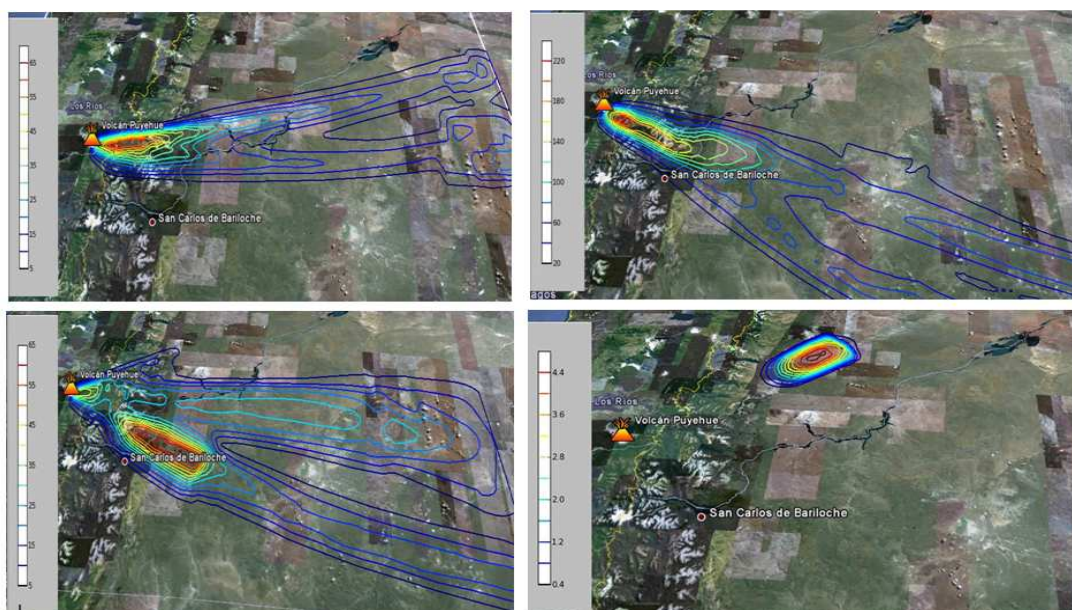


Figura 6: Evolución la concentración de SO₂ para cada uno de los días simulados (ver Tabla 2).

La Figura 7 muestra las simulaciones de 24 hs correspondientes a diferentes días y altitudes para la especie PM_{10} (Tabla 2). En la imagen superior izquierda, correspondiente al día 1 (4 al 5 de junio) y altitud 4.700 m, podemos observar el desplazamiento de la deposición de PM_{10} hacia el Este, con dos máximos cercanos. La imagen superior derecha, correspondiente al día 2 (5 al 6 de junio) y altitud 5.700 m, se muestra un desplazamiento hacia el Sureste. La imagen inferior izquierda correspondiente al día 3 (6 al 7 de junio) y altitud 7.700 m, indica un desplazamiento hacia el Sureste. La imagen inferior derecha, correspondiente al día 4 (7 al 8 de junio) y altitud 12.000 m, apunta un desplazamiento hacia el Noreste. Los valores máximos de concentración siguen estando cercanos al volcán en los 4.700 m y 5.700 m, no así para la altitud de 7.700 m y 12.000 m. Los valores máximos de concentración siguen estando cercanos al volcán a los 4.700, 5.700 y 7.700 metros, no así para la altitud 12.000 m.

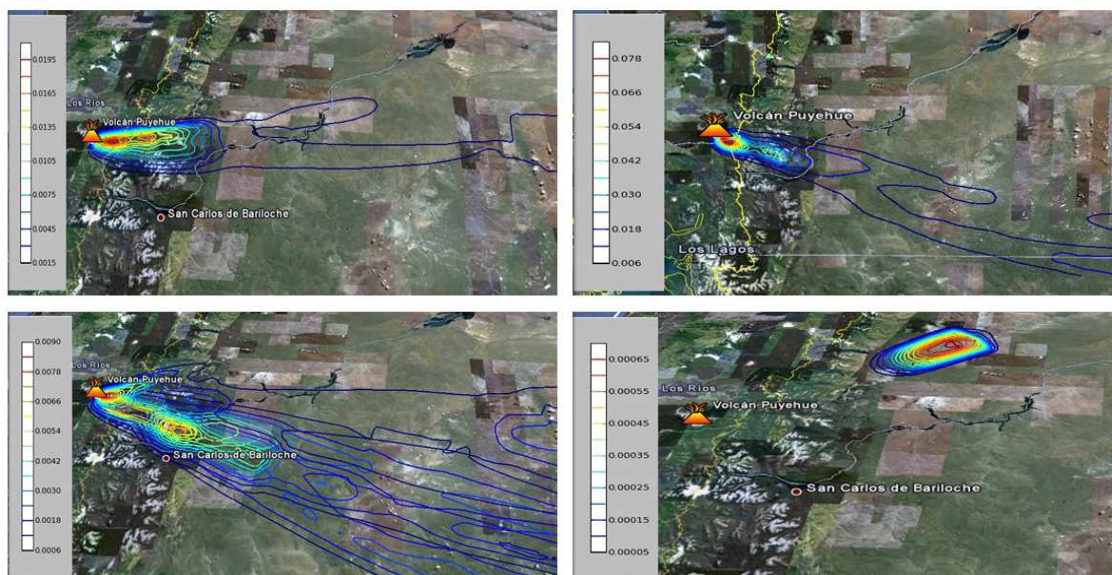


Figura 7: Evolución la deposición seca de PM_{10} para cada uno de los días simulados (ver Tabla 2).

CONCLUSIONES

Los días posteriores a la erupción del volcán Puyehue, los vientos tuvieron una componente Este, con lo cual la pluma volcánica fue transportada a miles de kilómetros del mismo, alcanzando el Atlántico. Esto se evidencia en los patrones de distribuciones espaciales de SO_2 , PM_{10} y $PM_{2.5}$ expuestos en las figuras anteriores.

En la Tabla 3 se pueden apreciar los valores máximos establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS), para las especies de SO_2 , PM_{10} y $PM_{2.5}$ (OMS, 2005).

	SO_2	PM_{10}	$PM_{2.5}$
	Máx. Prom. 24 hs en ug/m^3	Máx. Prom. 24 hs en ug/m^3	Máx. Prom. 24 hs en ug/m^3
OMS	20	50	25

Tabla 3: Resumen de las disposiciones de la OMS para SO_2 , PM_{10} y $PM_{2.5}$.

El análisis del estado de contaminación del aire efectuado para SO_2 muestra que los valores medios para los 5 días de simulación en los primeros 100 metros de altitud varían entre 300 y 3.600 ug/m^3 , lo que indica que los valores promedios diarios para esa especie deben haber sido superiores o iguales a estos valores. De este modo los límites aceptables estarían sobrepasados con respecto a lo que indica la norma poniendo de manifiesto la necesidad de estudiar los posibles efectos adversos para la salud.

El 23 de junio de 2011, la Subsecretaría de Medio Ambiente de la provincia de Neuquén con la colaboración de la Secretaría de Medio Ambiente de la provincia de Buenos Aires, coordinaron actividades para llevar a cabo el monitoreo de determinación de material particulado y calidad de aire, de manera de disponer de datos para establecer diagnósticos de situación en Villa La Angostura, San Martín de los Andes, localidades y parajes aledaños afectados por la erupción del volcán Puyehue. Se fijaron para la medición continua los siguientes parámetros en aire: PM_{10} (material particulado 10 micrones), $PM_{2.5}$ (material particulado 2.5 micrones), CO (monóxido de carbono), SO_2 (dióxido de azufre) y NO_x (óxidos de nitrógeno). Eventualmente se propuso extraer muestras para determinar concentraciones de sulfuro de hidrógeno (H_2S) y amoníaco (NH_3) en aire. También se efectuarían mediciones de oxígeno disuelto, temperatura, potencial de hidrógeno (pH) y conductividad eléctrica en agua. De dicho monitoreo no se tienen registros.

El producto de sensado remoto Microwave Limb Souder de SO_2 - Level 2 Mixing Ratio a bordo del satélite AURA (Livesey, et al., 2011), proporciona concentraciones de SO_2 volcánico en forma de columna total y unidades DU (Dobson Unit). La resolución espacial horizontal es de 170 Km y la vertical de 3 Km. Dicho producto no ha sido validado aún para SO_2 , por lo cual no es posible utilizarlo como herramienta de calibración.

En estudios posteriores se continuará modelando los aerosoles volcánicos derivados de la erupción del volcán Puyehue. Se aumentarán el número de simulaciones y se contrastarán los resultados con otros instrumentos y modelos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a Juan Carlos Baca de la Secretaría de Ambiente – Red de Monitoreo Atmosférico de Quito por los datos suministrados y el asesoramiento sobre el volcán El Reventador. También agradecen al Ing. Pablo Cremades por su colaboración en el presente estudio.

REFERENCIAS

- Arino, O., Ramos, J., Kalogirou, V., Defoumy, P., y Achard, F. (2010). GlobCover 2009. ESA Living Planet Symposium (p. 686). Bergen, Norway.
- CORPAIRE (2002). Simulación numérica de la dispersión y caída de ceniza en Quito debido a la erupción del volcán El Reventador durante el 3 de noviembre de 2002, Quito.
- Michalakes, J., Dudhia, J., Gill, D., Henderson, T., Klemp, J., Skamarock, W., y Wang, W. (2005). The Weather Research and Forecast Model: Software Architecture and Performance. Use of High Performance Computing in Meteorology - Proceedings of the Eleventh ECMWF Workshop, (June), 156-168. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- Livesey, N., Read, W., Froidevaux, L., Lambert, A., Manney, G., Pumphrey, H., Santee, M., Schwartz, M., Wang, S., Cofield, R., Cuddy, D., Fuller, R., Jarnot, R., Jiang, J., Knosp, B., Stek, P., Wagner, P y Wu, D. (2011). Version 3.3 Level 2 data quality and description document.
- Organización Mundial de la Salud (2005). Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre.
- Randall, V. (2008). Review: Satellite remote sensing of surface air quality. *Atmospheric Environment* 42, 7823–7843.
- Scire, J., Strimaitis, D., y Yamartino, R. (2000). A User ' s Guide for the CALPUFF Dispersion Model Control.
- Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) - Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur (2011). Reporte Especial de Actividad Volcánica N° 27 Región de Los Ríos Complejo Volcánico Puyehue – Cordón Caulle, Chile.

ABSTRACT

In order to describe the effects caused by the eruption of the Puyehue volcanic complex June 4, 2011, and contribute to the modeling studies of volcanic aerosols for the same, we present the preliminary results of SO₂, PM₁₀ and PM_{2.5} during the period between June 3 and 8, 2011. For simulation, the WRF/CALMET/CALPUFF system, was used. Initial results show that simulated volcanic species have a pattern of spatial displacement to the East, which coincides with the volcanic plume observed by MODIS. Moreover, their average maximum values are close to the location of the volcano. In the case of SO₂, in 24 hours, concentrations observed exceed the daily maximum allowed by the WHO.

It is necessary to increase the number of simulations and compare results with other studies and tools.

Keywords: Puyehue volcano, WRF, model CALMET, CALPUFF model, MODIS.