

NOTAS Y CORRESPONDENCIA

**ACTIVIDAD ELECTRICA ASOCIADA A LA ERUPCIÓN DEL COMPLEJO
VOLCÁNICO CORDÓN CAULLE DURANTE 2011**

María Gabriela Nicora¹, Rodrigo E. Bürgesser², Alejandro Rosales³, Eduardo J. Quel¹ y Eldo E. Ávila²

¹CEILAP, UNIDEF (MINDEF - CONICET), UMI-IFAECI-CNRS 3351, - Juan Bautista de La Salle 4397 - B1603ALO Villa Martelli, Argentina.

²FaMAF, Universidad Nacional de Córdoba, IFEG-CONICET, Córdoba, Argentina.

³Universidad Nacional de la Patagonia SJB, Facultad de Ingeniería, Departamento de Física, Rawson y Belgrano, 9100 Trelew, Chubut, Argentina

(Manuscrito recibido el 22 de agosto de 2012, en su versión final el 21 de marzo de 2013)

RESUMEN

Se realizó un estudio de la actividad eléctrica generada por la erupción del complejo volcánico Cordón Caulle en junio de 2011 utilizando datos de descargas eléctricas detectadas por la red World Wide Lightning Location Network. La actividad eléctrica observada se corresponde a descargas eléctricas generadas en la pluma volcánica con una buena correlación entre la cantidad de descargas y la altura de la misma. Aunque la actividad eléctrica detectada fue baja, los resultados están de acuerdo con los obtenidos por estudios previos y muestran que puede ser usada como un indicador de la actividad volcánica. Además muestra la factibilidad de utilizar la red para una detección temprana de erupciones volcánicas.

Palabras clave: Actividad eléctrica; Complejo volcánico Cordón Caulle, WWLLN.

**LIGHTNING ACTIVITY DURING THE 2011 ERUPTION OF THE CORDÓN
CAULLE VOLCANIC COMPLEX**

ABSTRACT

A study of the lightning activity generated by the eruption of the Cordón Caulle volcanic complex during June 2011 was performed using the World Wide Lightning Location Network data. The observed lightning activity corresponds to the volcanic plume electrical activity with a good correlation between the lightning count and the volcanic plume height. Although the detected lightning activity was low, the results agree with previous studies and show that lightning activity could be used as a proxy of the volcanic activity. This study also shows the feasibility on the use of the network for early volcanic eruptions detection.

Keywords: Lightning activity; Cordón Caulle volcanic complex, WWLLN.

1. INTRODUCCIÓN

El complejo volcánico Cordón Caulle está ubicado aproximadamente a los 40,5900° de latitud sur y 72,1170° de longitud oeste y está constituido por una serie de centros volcánicos de tipo fisural asociados a dos fracturas paralelas principales de orientación NO-SE que constituyen una estructura de rift. El complejo hizo erupción mediante la apertura de un nuevo aparato volcánico identificado por Collini y otros, (2012) como We Pillan, el 4 de junio del 2011. La erupción comenzó en junio de 2011, con un evento mayor entre el 4 y el 7 de junio y un evento de menor intensidad entre el 11 y el 14 de junio continuando con emisiones de lava y pequeñas columnas eruptivas hasta al menos mayo del 2012. La erupción fue catalogada de nivel 6, lo cual representa un Índice de Explosividad Volcánica (Volcanic Explosivity Index, VEI) de clase 3, y presentó una columna eruptiva con una altura entre los 7 y 12 km para el evento mayor. La erupción presentó magmas evolucionados con una erupción inicial pliniana o subpliniana con una fase explosiva, seguida por otras más efusivas con duración de varios meses (Collini y otros, 2012). Del análisis de las cenizas tomadas en diferentes localidades se sugiere la presencia de al menos dos diferentes materiales juveniles basáltico-andesítica (55-60% SiO₂) y riolítica (71-73% SiO₂), con composiciones intermedias que podría representar un tipo híbrido, posiblemente de un proceso de mezcla de magma incipientes (Collini y otros 2012).

Distintos estudios (Thomas y otros, 2007, 2010; Bennett y otros, 2010; Harrison y otros, 2010; Behnke y otros, 2012; entre otros) han mostrado que las erupciones volcánicas pueden generar descargas eléctricas. McNutt and Williams (2010) presentaron una base de datos sobre descargas eléctricas producidas por distintas erupciones volcánicas. La base de datos muestra que 212 erupciones, debidas a 80 volcanes, han sido documentadas como productoras de descargas eléctricas.

Thomas y otros, (2007, 2010) estudiaron la actividad eléctrica generada por la erupción del volcán Augustine durante 2006. Estos autores encontraron dos etapas en la actividad eléctrica. Una primera etapa que se corresponde con la erupción del volcán y que está caracterizada por una alta tasa de descargas de corta extensión, con pocas ramificaciones y con longitudes típicas de pocos cientos de metros (Por ejemplo: National Geographic, Sept. 2007, p. 14–15) y tiempos de 10ms (Thomas y otros, 2010); y una segunda etapa que se corresponde con el desarrollo de la columna eruptiva y pluma volcánica. Las descargas eléctricas en esta segunda etapa son similares a las descargas intranube (descargas dentro de la misma nube) observadas en las nubes de tormentas, con duración de entre 30–600 ms.

La generación de descargas eléctricas se debe a que las partículas generadas durante la erupción volcánica pueden resultar cargadas como resultado de su proceso de formación o por la interacción entre ellas. Si el proceso de cargado es mayor al proceso de disipación de carga (debido a la conductividad del aire y a la neutralización de cargas por colisiones entre partículas con carga opuesta), el campo eléctrico generado por las cargas eléctricas aumenta hasta alcanzar un valor suficiente para que ocurra la ruptura dieléctrica del aire y se produzca la descarga eléctrica.

Existen diferentes teorías sobre los procesos que generan la electrificación de las nubes volcánicas (volcanic clouds o eruption clouds). Dentro de los procesos asociados a la primera etapa en la actividad eléctrica, se pueden señalar:

Electrificación de cenizas debido a las interacciones con agua. Este proceso fue descrito a partir de las observaciones de la erupción tipo freática del volcán Surtsey en Islandia durante 1963. Estas observaciones mostraron una electrificación de la pluma ($10^5 - 10^6$ cargas elementales positiva cm^{-3}) durante los períodos cuando el vapor de agua y el material piroclástico entraban en contacto

(Anderson y otros, 1965). Pounder (1972) sugirió que la separación de carga se produce durante la pulverización del agua cuando esta se evapora. También se observó separación de carga cuando la lava fluía hacia el mar, lo cual podría producirse cuando la roca caliente volatiliza partículas de sal marina, las cuales transportan carga positiva (Björnsson y otros, 1967).

Electrificación de cenizas a través de mecanismos de fragmentación. Gilbert y otros (1991) midieron la carga en partículas de cenizas en la columna eruptiva del volcán Sakurajima en Japón y sugirieron dos mecanismos para la carga de las mismas, que no implicaban explícitamente la presencia de agua: (i) triboelectrical o cargado por fricción, que es debido al contacto entre materiales con características eléctricas diferentes; (ii) fractoemission o fractocharging, en el cual los electrones, los iones positivos y negativos, los átomos neutros y las radiaciones electromagnéticas son expulsados de las superficies agrietadas del material fresco dando como resultado una carga residual. Estos mecanismos se apoyan en diversos experimentos de laboratorio en el cual se midió la electrificación de partículas por medio de fricción (Hatakeyama y Uchikawa, 1952; Kikuchi y Endoh, 1982; James y otros, 2000). En el trabajo de James y otros (2008), sobre electrificación de plumas volcánicas ricas en silicato plantean que, a su entender, el mecanismo más importante es el de fractoemission, el cual confiere a la partícula una carga neta opuesta a la del gas y del aerosol circundante. Este último mecanismo se concibe dentro y en las cercanías del conducto eruptivo.

Dentro de los procesos asociados a la segunda etapa, que se corresponde con el desarrollo de la columna eruptiva y de la pluma volcánica, se pueden señalar:

Separación de carga dependiente del tamaño de las cenizas. Durante esta etapa el proceso fractoemission parece dominar. Sin

embargo, no existe un proceso físico conocido por el cual este proceso de electrificación dependa del tamaño de la partícula (Mather y otros, 2006). James y otros (2000) sugirieron que la dependencia de la electrificación con el tamaño de las partículas puede resultar como un proceso secundario de la captura de iones, que es a la vez función del tamaño de las partículas y de la velocidad de caída asociada. Miura y otros (2002) realizaron estudios durante la erupción del Volcán Sakurajima en Japón, entre el 28 y 29 de octubre de 1995, y propusieron un modelo “PNP” (Positivo – Negativo – Positivo) para la distribución de carga dentro de la nube volcánica, el cual depende del tamaño de las partículas. Este modelo propone que la parte superior de la nube está formada mayoritariamente por gas y pequeños aerosoles, los cuales llevan una carga positiva; la existencia de una capa intermedia de ceniza fina con carga neta negativa y la parte inferior formada por cenizas de mayor tamaño cargadas positivamente (Figura 1). La recopilación de los resultados actuales y anteriores a la erupción del volcán Sakurajima y de otros volcanes, indica que distribución de la carga negativa en la parte media de la nube es predominante en la mayoría de los casos observados.

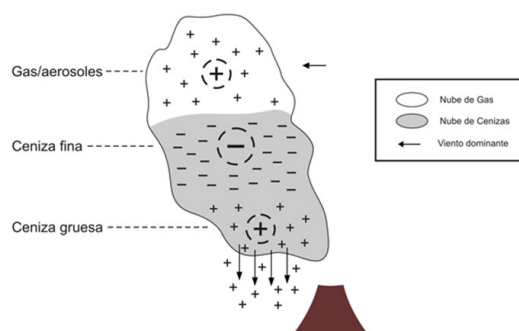


Figura 1: Modelo de separación de cargas basada de mediciones en el volcán Sakurajima. Adaptado de Miura y otros, 2002.

Mecanismo de electrificación análogo al de nubes de tormenta. McNutt y

Williams (2010) sugirieron que cuando la columna eruptiva alcanza una altura de 7 km, el mecanismo para la generación de descargas eléctricas es similar al mecanismo de electrificación de las nubes de tormentas.

La electrificación en nubes de tormentas usualmente es explicada mediante el mecanismo no inductivo (Reynolds et al., 1957; Takahashi, 1978; Saunders et al 1991, 2006; Avila and Caranti 1994; Pereyra et al. 2000), el cual se basa en la interacción de las partículas de hielos (cristales de hielo y granizos) y de agua que conforman a las mismas. Las nubes se forman a partir del ascenso de parcelas de aire húmedo. Este ascenso puede producirse por convección, debido al calentamiento de la superficie terrestre por la radiación solar; por forzado topográfico, debido a la presencia de montañas; o debido al encuentro de dos masas de aire a distintas temperaturas. En todos estos casos, durante el ascenso se activan los núcleos de condensación de agua y de hielo a partir de los cuales se forman las gotas de agua y los cristales de hielo. Los cristales de hielo crecen por deposición de vapor hasta alcanzar un tamaño suficiente, a partir del cual los cristales de hielo comienzan a crecer por colección de gotas de agua. Durante este proceso de crecimiento, las gotas de agua sobreenfriadas colisionan con los cristales de hielo y se congelan sobre los mismos, formando una acreción. Este mecanismo permite que las partículas de hielo alcancen tamaños del orden de milímetros y se formen los granizos.

El mecanismo no inductivo asume que durante la colisión entre cristales de hielo y granizos, en presencia de gotas de agua sobreenfriada, se produce una separación de carga eléctrica. Distintos estudios revelaron que el signo y la magnitud de la carga transferida al granizo depende de la condiciones microfísicas de la nube como son la temperatura y el contenido de agua líquida (Takahashi, 1978; Saunders y otros, 1991, 1999, 2001; Avila y otros, 1995, 1996; Pereyra y otros., 2000, 2008), de la distribución de tamaños de las gotas de nube (Avila y otros, 1998; Avila y Pereyra, 2000),

del tamaño de los cristales de hielo (Keith y Saunders, 1990) y de la velocidad de impacto (Bürgesser y otros, 2006). Se ha observado que se transfiere una carga significativa solo cuando coexisten granizos, cristales de hielo, gotas de agua sobreenfriadas y vapor de agua, por lo tanto la zona de cargado en la nube se extiende desde los 0 a los -40°C (temperatura de glaciación), que se corresponden a una altura de la atmósfera entre los 4 y los 10 km (Figura 2).

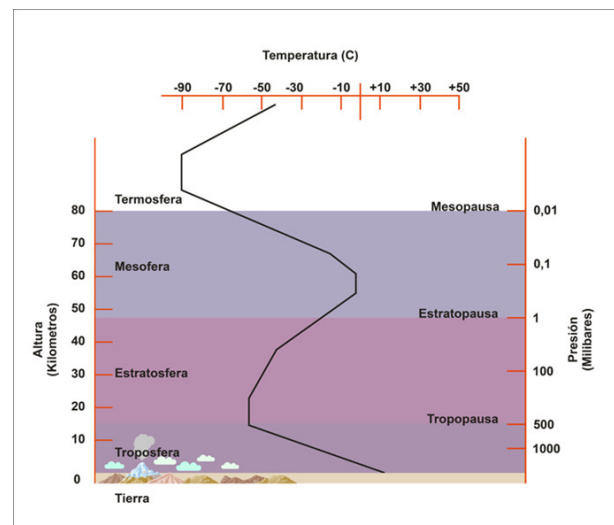


Figura 2: Perfil de temperatura y presión de la atmósfera terrestre.

Para el caso de las nubes volcánicas, las partículas de cenizas volcánicas sirven como núcleos de condensación de agua y de hielo. Duran y otros (2008), basados en experimentos de laboratorio, encontraron que la nucleación de partículas de hielo sobre cenizas volcánicas ocurre a temperaturas entre -10 y -20°C . Debido a la alta concentración de estos núcleos, en comparación con los núcleos encontrados naturalmente en la atmósfera, las gotas de nube y cristales de hielo son más pequeños que los presentes en las nubes de tormentas, y por lo tanto, el proceso de precipitación es suprimido (Williams y otros, 2005). Sin embargo, Sparks y otros (1997) mostraron que las cenizas volcánicas presentan una distribución bimodal con modas de $10\ \mu\text{m}$ y de $200\ \mu\text{m}$, siendo dominante la moda menor a medida

que aumenta la distancia al cráter del volcán. Por otra parte, las fuerzas electrostáticas y las diferentes velocidades de caída permiten que el proceso de agregado de las partículas sea muy eficiente, alcanzando los agregados tamaños de hasta $800 \mu m$ (James y otros, 2002). Por lo tanto, aunque el proceso de precipitación es suprimido, debido a la dispersión en el espectro de tamaños de las cenizas volcánicas, las partículas nucleadas o acrecidas sobre la misma presentan una distribución de tamaños que permiten diferentes velocidades de caída y por lo tanto, la colisión entre las mismas. Además, en nubes volcánicas las corrientes de aire ascendentes son sustancialmente mayores que las presentes en las nubes de tormentas, y por lo tanto, la acreción de los cristales de hielo y de las cenizas volcánicas debería ocurrir en un tiempo menor y con una mayor eficiencia que en las nubes de tormentas (Williams y otros 2005).

McNutt y Williams (2010) presentaron una correlación entre el índice de explosividad volcánica (VEI) con el porcentaje de volcanes que presentaron electrificación. Estos autores encontraron que alrededor de una 10% de las erupciones con valores de VEI entre 3 y 6 presentaron actividad eléctrica, y solo el 2% lo hicieron para valores de VEI entre 1 y 2. Esta correlación es coherente con el hecho de que las grandes erupciones, con valores altos de VEI, tienen asociadas nubes volcánicas con un desarrollo vertical similar a los sistemas de convección profunda.

Para el mecanismo de electrificación análogo al de nubes de tormenta, el papel del agua, en todas sus formas, parece tener un rol fundamental (Williams y otros, 2005). Por ello la composición del magma es un parámetro relevante ya que, según su composición, se puede determinar aproximadamente el contenido de agua disuelto (Mc Nutt y Williams, 2010), y a la vez conocer el estilo eruptivo (Estromboliana, Pliniano, etc.), el cual da una característica de la explosividad del evento.

Entonces, tanto el índice de explosividad

volcánica como la composición del magma son parámetros fundamentales para las teorías expuestas anteriormente ya que los mismos se relacionan con la altura de la columna eruptiva y con el contenido de agua de la misma.

El objetivo de este trabajo es estudiar la actividad eléctrica generada por la erupción del complejo volcánico Cordón Caulle (1507-15) durante el mes de Junio de 2011 usando datos de actividad eléctrica detectada por la red de detección mundial World Wide Lightning Location Network (WWLLN), y en base a los informes sobre dicha actividad volcánica, estudiar la relación de ésta con distintos parámetros relevantes de la erupción.

2. DATOS Y METODOLOGÍA

Los datos de descargas eléctricas utilizados provienen de la red WWLLN (<http://wwlln.net>). La WWLLN es una red de suelo que detecta a tiempo real la actividad eléctrica a escala global. Las estaciones de la red detectan la radiación de muy baja frecuencia (VLF, 3-30 kHz) emitida por las descargas eléctricas. Esta señal VLF se propaga por la guía de onda Tierra-Ionosfera con una atenuación baja, lo que permite que la red logre una cobertura global y a tiempo real de la actividad eléctrica con una menor cantidad de antenas, respecto de otros sistemas de detección (Dowden y otros, 2002, 2008; Lay y otros, 2004; Rodger y otros, 2005; Jacobson y otros, 2006). Distintos estudios han mostrado que la red es capaz de detectar las características principales de la distribución espacial de la actividad eléctrica y del ciclo estacional (Bürgesser y otros, 2012; Bovalo y otros, 2012); posee una precisión espacial de ~ 5 km (Abreu y otros, 2010), y tiene una baja eficiencia de detección con una tendencia a detectar las descargas de mayor intensidad (Lay y otros, 2004; Rodger y otros, 2005; 2006; 2009; Jacobson y otros, 2006; Abarca y otros, 2010; Abreu y otros, 2010)

Para realizar el estudio sobre la actividad eléctrica producida por la erupción del complejo

volcánico Cordón Caulle, se utilizó una ventana espacial ubicada entre 40°y 42°de latitud sur y entre 73°y 71°de longitud oeste con una resolución espacial de $0,1^\circ \times 0,1^\circ$. La actividad eléctrica se monitoreo durante los meses de mayo a julio. Se recopilaron los informes sobre la actividad volcánica y parámetros meteorológicos generados por distintos organismos (Servicio Geológico y Minero de Chile, Servicio Geológico Minero Argentino, Centro de avisos de Cenizas Volcánicas Buenos Aires VAAC Buenos Aires SMN-SHN, Proyecto CYTED-CENIZA).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la ventana espacial considerada, la red WWLLN detectó 115 eventos entre el 4 y el 7 de junio, mientras que para los días anteriores se detectó solo un evento. Para los días posteriores se detectaron 4 eventos entre el 11 y 14 de junio, y solo un evento durante el mes de julio.

Es bien conocido que la actividad eléctrica debido a descargas por tormentas eléctricas, disminuye cuando aumenta la latitud; en particular, la actividad eléctrica en la ubicación del complejo volcánico Cordón Caulle es usualmente muy baja, en especial durante los meses de invierno. Esto fue corroborado ya que la actividad eléctrica detectada fue muy baja o nula para los días anteriores y posteriores a la erupción volcánica. Esto indicaría que la actividad eléctrica detectada entre el 4 y el 7, y entre el 11 y el 14 de junio se corresponde con actividad eléctrica generada por la erupción del volcán.

El Reporte Especial de Actividad Volcánica No 28 - Región de Los Ríos - Complejo Volcánico Cordón Caulle con fecha del 4 de junio de 2011 indica que la erupción se inició a las 14:45 (hora local) del día 4 de junio. A su vez, el primer evento detectado por la red WWLLN ocurrió a las 14:41 (hora local) del mismo día (<http://www.sernageomin.cl/volcan.php?id=38>).

El hecho que la red WWLLN detectara el primer evento al momento de la erupción

indicaría que, a pesar de la tendencia a detectar eventos de alta intensidad, las descargas detectadas inicialmente se corresponden a descargas generadas en la fase explosiva. Sin embargo, durante esta etapa no es posible determinar que mecanismo (electrificación de la ceniza debido a la interacción con agua o por fragmentación) domina o si actúan de manera combinada.

La figura 3 muestra la actividad eléctrica detectada entre el 4 y 7 de junio, la cual presenta una distribución espacial con una dirección preferencial sudeste. Los informes para estos días indican que se observó una columna de gas de 10 km de altura y 5 km de ancho, vientos con dirección sur a 5 km de altura y con una dirección sudeste-este a 10 km de altura. Por lo tanto, la ubicación de las descargas detectadas es consistente con estos informes y con la pluma observada en distintas imágenes satelitales. En la figura 3, también se observa que se detectaron cuatro eventos ubicados al noroeste del volcán que no pueden ser relacionados con la pluma volcánica y que podrían deberse a errores en la ubicación dado por la red WWLLN.

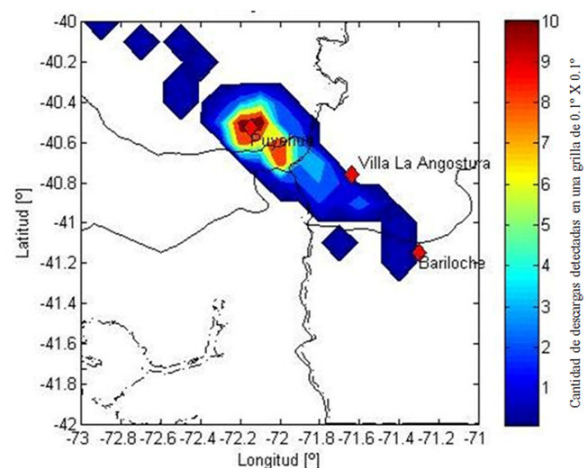


Figura 3: Actividad eléctrica detectada por la red WWLLN entre el 4 y 7 de junio de 2011 y la ubicación del complejo volcánico Cordón Caulle.

En la figura 4 se muestra el histograma de las descargas detectadas en función de la distancia

al volcán. Se puede observar que la mayoría de las descargas detectadas (>60 %) ocurrieron entre los 5 y 20 km del volcán. Esto indicaría que la mayoría de las descargas eléctricas detectadas se produjeron en la pluma volcánica ya que presentan una distribución espacial y temporal consistente con la misma.

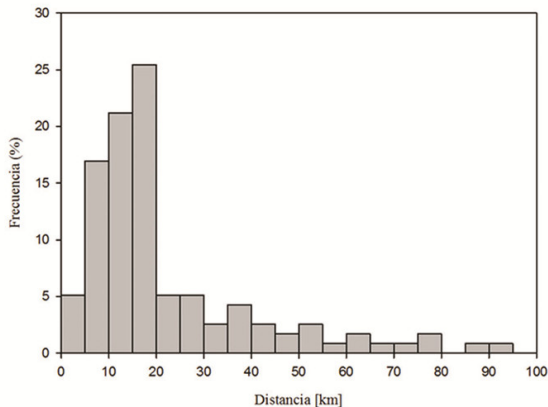


Figura 4: Histograma de la distancia entre la ubicación de las descargas eléctricas y la posición del cráter del complejo volcánico Cordón Caulle.

La figura 5 muestra la altura de la pluma reportada por el Observatorio Vulcanológico de los Andes del Sur (OVDAS) y la cantidad de descargas eléctrica detectada por la WWLLN en la ventana espacial considerada para los días entre el 1 y el 18 de junio. Se puede observar que existe una buena correlación, con un coeficiente de Pearson mayor a 0.8 ($p < 10^{-4}$), entre la altura y la cantidad de descargas detectadas por la red. Se observa que la red WWLLN detecta actividad eléctrica cuando la altura de la pluma es superior a 7 km, que se corresponde a una temperatura de la atmósfera de aproximadamente -20°C (Figura 2). Es plausible asumir que la temperatura de la pluma es mayor a la de su entorno y que a esta altura se produce la nucleación de partículas de hielo sobre las cenizas volcánicas (Duran y otros, 2008). Además, la composición química del magma, de tipo basáltico a riolíticos (48-77 %SiO₂), tiene un contenido de agua entre 0.1 al 6.5 por ciento de la masa, lo cual provee del agua para que el proceso de nucleación

y de acreción pueda realizarse. Esto sugiere que en la nube volcánica estaría operando el mecanismo de electrificación análogo al de nubes de tormentas. Sin embargo, no es posible descartar al mecanismo de fractoemission sino asumir que estos mecanismos pueden operar de manera simultánea.

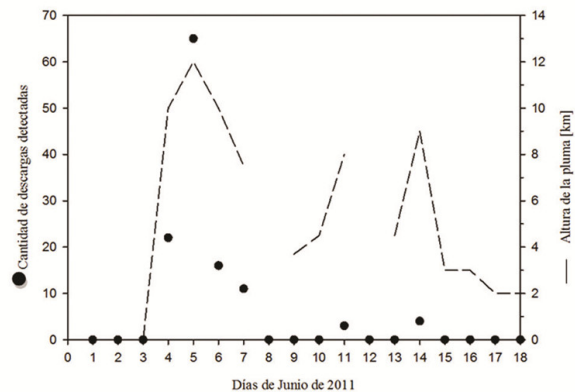


Figura 5: Cantidad de descargas eléctricas detectadas (círculos negros) y altura de la pluma (línea quebrada) por día entre el 1 y el 18 de junio.

La red WWLLN posee un proyecto de investigación experimental para la detección temprana de erupción de volcanes denominado Monitoreo Global de Actividad Eléctrica Volcánica (Global Volcanic Lightning Monitor, <http://wwlln.net/volcanoMonitor.html>), el cual se basa en la detección de la actividad eléctrica en la cercanía de la caldera del volcán. Este sistema emitió un alerta sobre le erupción del complejo volcánico Cordón Caulle a las 14:43 (hora local), con la detección del primer rayo a las 14:41 (hora local). Esta alerta fue enviada 30 minutos antes de la primera alerta sobre la erupción del volcán dada por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) - Observatorio Vulcanológico de los Andes del Sur (OVDAS).

4. CONCLUSIÓN

La actividad eléctrica observada es consistente espacial y temporalmente con la pluma

volcánica generada por la erupción del complejo volcánico Cordón Caulle. La ubicación de la mayoría de las descargas detectadas en dirección sureste del volcán está de acuerdo con la dirección del viento dominante y la pluma observada.

Aunque se observó un aumento en los eventos detectados por la WWLLN, esto no implica necesariamente un aumento en la actividad eléctrica sino una mayor cantidad de descargas de gran intensidad. Sin embargo, no existe otro sistema que pueda detectar actividad eléctrica en las latitudes donde se ubica el complejo volcánico Cordón Caulle.

Es importante señalar la coincidencia temporal entre la erupción volcánica con los primeros datos de electrificación de la pluma y de la columna eruptiva. Esto pareciera deberse al tipo explosivo de la erupción con una fase inicial pliniana, la cual eyectó una columna eruptiva entre los 10 y 12 km (Collini y otros, 2012). Este tipo de erupción de muy alta energía provocó una electrificación muy efectiva de la columna eruptiva por alguno o varios de los procesos de electrificación descritos.

Tanto la composición química del magma, como el tipo de erupción del volcán en estudio, son característicos de erupciones que pueden tener asociados actividad eléctrica (McNutt y otros, 2010). Esto fue observado en el estudio realizado, ya que la erupción estuvo asociada a descargas eléctricas generadas tanto en la etapa explosiva como en la pluma y en la columna eruptiva. Estas descargas fueron observadas desde diversos sitios y fueron, desde los primeros momentos, una de las principales características visuales de la erupción.

Por primera vez se detectó la actividad eléctrica generada por una erupción volcánica en Suramérica. Aunque la actividad eléctrica detectada fue baja y se corresponde principalmente a la electrificación de la pluma, los resultados encontrados están de acuerdo con los obtenidos en estudios previos

y muestran que la actividad eléctrica puede ser usada como indicador de actividad volcánica.

La alerta del Monitoreo Global de Actividad Eléctrica Volcánica de la red WWLLN fue anterior al reporte del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) de Chile, demostrando la relevancia del sistema como herramienta de alerta temprana, apoyando a los sistemas nacionales de alerta (en el caso de que existieran) y en los casos que no existan monitoreo continuo de sistemas eruptivos, esta técnica podría servir como alertas tempranas de erupciones en lugares remotos del Cono Sur

Agradecimientos: Los autores quieren agradecer a: (a) la World Wide Lightning Location Network (<http://wwlln.net>) con sus más de 50 Universidades e Instituciones, por proveer la localización de las descargas eléctricas usadas en este trabajo; (b) al Sr. Patricio Ballesteros por su dedicación en las figuras y (c) al Dr. J. G. Viramonte por sus valiosos aportes al trabajo.

REFERENCIAS

- Abarca, S. F., Corbosiero, K. L. and Galarneau Jr., T.J., 2010. An evaluation of the Worldwide Lightning Location Network (WWLLN) using the National Lightning Detection Network (NLDN) as ground truth. *J. Geophys. Res.* 115, D18206, doi:10.1029/2009JD013411.
- Abreu, D., Chandan, D., Holzworth, R. H. y Strong, K., 2010. A performance assessment of the World Wide Lightning Location Network (WWLLN) via comparison with the Canadian Lightning Detection Network (CLDN). *Atmos. Meas. Tech.*, 3, 1143–1153.
- Anderson R, Bjornsson S, Blanchard D, Gathman S, Hughes J, Jonasson S, Moore CB, Survilas HJ, Vonnegut B, 1965. Electricity in volcanic clouds. *Science* 148:1179–1189
- E.E. Avila and G.M. Caranti, 1994. A laboratory study of static charging by fracture in ice growing by riming.. *Journal of*

- Geophysical Research-Atmospheres, 99 (D5), 10611-10620.
- Avila, E. E., Aguirre Varela, G. G. and Caranti, G. M., 1995. Temperature dependence of static charging in ice growing by riming, *J. Atmos. Sci.*, 52, 4515-4522.
- Avila, E. E., Aguirre Varela, G. G. and Caranti, G. M. 1996. Charging in ice-ice collisions as a function of the ambient temperature and the larger particle average temperature, *J. Geophys. Res.*, 101, 29609-29614.
- Avila, E. E., Caranti, G. M., Castellano, N. E. and Saunders 1998. C. P. R.: Laboratory studies of the influence of cloud droplet size on charge transfer during crystal-graupel collisions, *J. Geophys. Res.*, 103, 8985– 8996.
- Avila, E. E., and Pereyra, R. G. 2000. Charge transfer during crystal graupel collisions for two different cloud droplet size distributions, *Geophys. Res. Lett.*, 27, 3837– 3840.
- Behnke, S.A., Thomas, R.J., McNutt, S.R., Schneider D.J., Krehbiel, P.R., William, R. y Edens, H.E., 2012 Observations of volcanic lightning during the 2009 eruption of Redoubt Volcano, *J. Volcanol. Geotherm. Res.* doi:10.1016/j.jvolgeores.2011.12.010.
- Bennett, A.J., Odams, P., Edwards, D. y Arason, P., 2010. Monitoring of lightning from the April–May 2010 Eyjafjallaj okull volcanic eruption using a very low frequency lightning location network, *Environ. Res. Lett.* 5, 044013 (8pp).
- Björnsson, S., Blanchard, D.C., y Spencer, A.T., 1967. Charge generation due to contact of saline waters with Molten Lava. *J Geophys Res* 72, 1311–1323.
- Bovalo, C., Barthe, C. y Bègue, N., 2012. A lightning climatology of the South-West Indian Ocean, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 2659–2670.
- Bürgesser, R. E., Pereyra, R. G. and Avila, E. E. , 2006. Charge separation in updraft of convective regions of thunderstorm, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L03808, doi:10.1029/2005GL023993.
- Bürgesser ,Rodrigo E. , Nicora Maria G., and Ávila Eldo E, 2012. Characterization of the lightning activity of “Relámpago del Catatumbo”.” *Journal Of Atmospheric And Solar-Terrestrial Physics* 77, 241-247.
- Collini, E. A., Osores, M. S., Folch A., Viramonte J.G., Villarosa G. y Salmuni G., 2012. Volcanic ash forecast during the June 2011 Cordón Caulle eruption. *Natural Hazards*. Vol 64. DOI 10.1007/s11069-012-0492-y (Springer)
- Dowden, R.L., Brundell, J.B. and Rodger, C.J., 2002. VLF lightning location by time of group arrival (TOGA) at multiple sites Source. *J. Atmos. Sol –Terr. Phys.*, 817–30.
- Dowden, R. L., Holzworth, R. H., Rodger, C. J., Lichtenberger, J., Thomson, N. R., Jacobson, A. R., Lay, E. H., Brundell, J. B., Lyons, T. J., O’Keefe, S., Kawasaki, Z., Price, C., Prior, V., Ortega, P., Weinman, J., Mikhailov, Y., Woodman, R., Qie, X., Burns, G., Collier, A. B., Pinto Jr, O., Diaz, R., Adamo, C., Williams, E. R., Kumar, S., Raga, G. B., Rosado, J. M., Ávila, E. E., Clilverd, M. A., Ulich, T., Gorham, P., Shanahan, T. J. G., Osipowicz, T., Cook, G., Zhao, Y., Oct. 2008. World-Wide Lightning Location Using VLF Propagation in the Earth-Ionosphere Waveguide. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 50 (5), 40–60.
- Duran, A.J., R.A. Shaw, W.I. Rose, Y. Mi y Ernst, G.G.J., 2008. Ice nucleation and overseeding of ice in volcanic clouds. *J. Geophys. Res.*, 113:D09206. Doi:10.1029/2007JD009064.
- Gilbert JS, Lane SJ, Sparks RSJ, Koyaguchi T., 1991. Charge measurements on particle fallout from a volcanic plume. *Nature* 349:598–600
- Harrison, R.G., Nicoll, K.A, Ulanowski, Z. y Mather, T.A., 2010. Self-charging of the Eyjafjallaj okull volcanic ash plume. *Enviromental Research Letters*, 5 024004 (4pp).
- Hatakeyama H, Uchikawa K, 1952. On the disturbance of the atmospheric potential gradient caused by the eruption smoke of the volcano Aso. *Pap Meteorol Geophys* 2:85–89
- Jacobson, A.R., Holzworth, R.H., Harlin, J., Dowden, R.L. Lay E.H., 2006. Performance assessment of the World Wide Lightning

- Location Network (WWLLN), using the Los Alamos Sferic Array (LASA) array as ground-truth. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 23, 1082–92.
- James MR, Lane SJ, Gilbert JS, 2000. Volcanic plume electrification: Experimental investigation of a fracture-charging mechanism. *J Geophys Res* 105:16641–16649
- James, M.R., Gilbert, J.S. y Lane, S.J., 2002. Experimental investigation of a volcanic particle aggregation in the absence of a liquid phase. *J Geophys Res* 107:2191, doi:10.1029/2001JB000950.
- James, M. M., Wilson, L. L., Lane, S. S., Gilbert, J. J., Mather, T. T., Harrison, R. R., & Martin, R. R., 2008. Electrical Charging of Volcanic Plumes. *Space Science Reviews*, 137(1-4), 399-418. doi:10.1007/s11214-008-9362-z
- Keith, W. D., and Saunders, C. P. R., 1990. Further laboratory studies of the charging of graupel during ice crystal interactions, *Atmos. Res.*, 25(5), 445–464.
- Kikuchi K, Endoh T, 1982. Atmospheric electrical properties of volcanic ash particles in the eruption of Mt. Usu volcano, 1977. *J Meteorol Soc Japan* 60:548–561
- Lay, E.H., Holzworth, R.H., Rodger, C.J., Thomas, J.N., Pinto, O. Jr. and Dowden, R.L., 2004. WWLL global lightning detection system: Regional validation study in Brazil. *Geophys. Res. Lett.*, 31, L03102, doi:10.1029/2003GL018882.
- Mather, T.A. y Harrison, R.G., 2006. Electrification of volcanic plumes. *Surv Geophys* 27:387–432, doi: 10.1007/s10712-006-9007-2
- McNutt, S.R. y Williams, E.R., 2010. Volcanic lightning: global observations and constraints on source mechanisms, *Bulletin of Volcanology*, Vol. 72 Issue 10, p1153-1167.
- Miura, T., Koyaguchi, T. y Tanaka, Y., 2002. Measurements of electric charge distribution in volcanic plumes at Sakurajima Volcano, Japan, *Bulletin of Volcanology*, Vol. 64 Issue 2, p75-93, *Natl Geogr* (2007) (photo) Sept issue, *National Geographic magazine*, 212, 14–15
- Pereyra, R. G., Avila, E. E., Castellano, N. E. and Saunders, C. P. R., 2000. A laboratory study of graupel charging. *J. Geophys. Res.*, 105, 20803–20812.
- Pereyra, R. G., Bürgesser, R. E. and Ávila, E. E., 2008. Charge separation in thunderstorm conditions, *J. Geophys. Res.*, 113, D17203, doi:10.1029/2007JD009720.
- Pounder, C., 1972. Electrification from salt water on heated metals. *J Phys D Appl Phys* 5, 753–755.
- Reynolds, S. E., Brook, M. y Gourley, M. F., 1957: Thunderstorm charge separation. *J. Meteor.*, 14, 426–436.
- Rodger, C. J., Brundell, J. B. and Dowden, R. L., 2005. Location accuracy of VLF World Wide Lightning Location (WWLL) network: Post-algorithm upgrade. *Ann. Geophys.*, 23, 277–290.
- Rodger, C. J., Werner, S., Brundell, J. B., Lay, E. H., Thomson, N. R. Holzworth, R. H., and Dowden, R. L., 2006. Detection efficiency of the VLF World-Wide Lightning Location Network (WWLLN): initial case study. *Ann. Geophys.*, 24, 3197–3214, doi:10.5194/angeo-24-3197-2006.
- Rodger, C. J., Brundell, J. B., Holzworth, R. H., and Lay, E. H., 2009. Growing detection efficiency of the World Wide Lightning Location Network. *Am. Inst. Phys. Conf. Proc.*, Coupling of thunderstorms and lightning discharges to near-Earth space: Proceedings of the Workshop, 23–27 June 2008, Corte, France, 1118, 15–20, doi:10.1063/1.3137706.
- Saunders, C. P. R., Keith, W. D. and Mitzeva, R. P., 1991. The effect of liquid water on thunderstorm charging, *J. Geophys. Res.*, 96, 11,007– 11,017, doi:10.1029/91JD00970.
- Saunders, C.P.R., Avila, E.E., Peck, S.L., Castellano, N.E. and Aguirre Varela, G.G. 1999. A laboratory study of the effects of rime ice accretion and heating on charge transfer during ice crystal/graupel collisions, *Atmos. Res.* 51, 99–117.
- Saunders, C. P. R., Peck, S. L., Aguirre Varela, G. G., Avila, E.E. and Castellano, N.E. , 2001. A laboratory study of the influence of

the water vapour and mixing on the charge transfer process during collisions between ice crystals and graupel, *Atmos. Res.*, 58, 187–203

Saunders, C. P. R., Bax-norman, H., Emersic, C., Avila, E. E. and Castellano, N. E., 2006. Laboratory studies of the effect of cloud conditions on graupel/crystal charge transfer in thunderstorm electrification. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 132: 2653–2673. doi: 10.1256/qj.05.218.

Servicio Nacional de Geología y Minería – SERNAGEOMIN Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur – OVDAS - Red Nacional de Vigilancia Volcánica – RNVV <http://www.sernageomin.cl/>

Sparks, R.S.J., Bursik, M.I., Carey, S.N., Gilbert, J.S., Glaze, L.S., Sigurdsson, H., y Woods, A.W., 1997. *Volcanic Plumes*. John Wiley & Sons, Chichester.

Takahashi, T., 1978. Riming electrification as a charge generation mechanism in thunderstorms. *J. Atmos. Sci.*, 35, 1536–1548.

Thomas, R.J., Krehbiel, P.R., Rison, W., Edens, H.E., Aulich, G.D., Winn, W.P., McNutt, S.R., Tytgat, G., Clark, E., 2007. Electrical activity during the 2006 Mount St. Augustine volcanic eruptions. *Science* 315, 1097.

Thomas, R.J., McNutt, S.R., Krehbiel, P.R., Rison, W., Aulich, G., Edens, H.E., Tytgat, G., Clark, E., 2010. Lightning and electrical activity during the 2006 eruption of Augustine Volcano. In: Powers, J., Coombs, M., Freymueller, J. (Eds.), *The 2006 Eruption of Augustine Volcano: Alaska*. U.S. Geological Survey Professional Paper 1769, pp. 579–608.

Virts, Katrina S., Joel A. Thornton, John M. Wallace, Michael L. Hutchins, Robert H. Holzworth, and Abram R. Jacobson, 2011. Daily, seasonal, and intraseasonal relationships between lightning and NO₂ over the Maritime Continent, *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1029/2011GL048578 (in press)

Williams, E.R. y McNutt, S.R., 2005. Total water contents in volcanic eruption clouds and implications for electrification and

lightning, *Recent Progress in Lightning Physics*. ISBN:81-308-0016-0