



RIESGO VOLCÁNICO

Alberto T. Caselli¹ y María Laura Vélez^{1,2}

1. Grupo de Estudio y Seguimiento de Volcanes Activos, Universidad de Buenos Aires, Ciudad Universitaria
acaselli@gl.fcen.uba.ar 2. lvelez@gl.fcen.uba.ar

RESUMEN

Las erupciones volcánicas representan, en la sociedad actual, un problema de preocupación creciente, debido especialmente a la progresiva densificación de áreas urbanas. Si bien, en Argentina son pocas las localidades ubicadas cerca de centros eruptivos activos, los productos emitidos por erupciones lejanas tanto en territorio argentino como chileno, pueden repercutir fuertemente sobre las economías regionales, sistemas vitales y la salud. En particular, en la provincia de Neuquén y a estas latitudes en Chile se localizan varios centros eruptivos activos con registros históricos que representan un alto riesgo para las poblaciones. En este capítulo se analizarán las principales características de estos centros eruptivos, así como sus últimas erupciones y se los repasarán los conceptos básicos asociados al riesgo y a su mitigación. Se realizará especial énfasis en los métodos de estudio y seguimiento ya que son la base para la detección de precursores que permitan una alerta temprana de erupción.

Palabras clave: Volcanes activos, riesgo, mitigación, cenizas volcánicas

ABSTRACT

Volcanic risk.- Volcanic eruptions represent, for today's society, a problem of growing concern, particularly due to the gradual densification of urban areas. While in Argentina only a few towns are located around active eruptive centers, the products issued by distant eruptions both in Argentine and Chilean territory, can impact heavily on regional economies, vital systems and health. In particular, at Neuquen province and at these latitudes in Chilean territory, there are several eruptive centers with records of historical activity that represent a high risk to population. This chapter will discuss the main features of these eruptive centers, as well as their recent eruptions and a review of the basic concepts associated with risk and its mitigation. There will be special emphasis on the study and monitoring methods as they are the basis for the detection of precursors to enable early warning of eruption.

Key words: Active volcanoes, volcanic hazards, risk mitigation, volcanic ash

INTRODUCCIÓN

Los fenómenos naturales pueden constituir potenciales peligros para las actividades humanas y su existencia, por los que han merecido numerosos estudios en diferentes partes del mundo, particularmente en las últimas décadas, debido al extraordinario crecimiento demográfico y en consecuencia el aumento exponencial en la exposición del hombre a estos fenómenos. Se entiende por riesgos naturales a todos aquellos procesos o fenómenos naturales generalmente de tipo catastróficos, que afectan a la humanidad ya sea mediante un impacto directo sobre las vidas, instalaciones y actividades productivas o mediante un impacto indirecto al modificar estados de equilibrio naturales (como por ejemplo la configuración del paisaje, el clima, la biota o los recursos naturales como los suelos y el agua).

Uno de los riesgos naturales que mayor peligro entraña está asociado a la actividad volcánica. En este sentido, la Cordillera de los Andes es una de las regiones del mundo en donde los volcanes y la actividad asociada tienen una mayor interacción con el hombre. Dentro de los Andes Argentino-Chilenos se han reconocido cerca de 500 volcanes activos que son potencialmente peligrosos para las poblaciones y sus economías regionales, de los cuales 60 presentan erupciones históricas. La Cordillera Neuquina se extiende en el borde occidental de la provincia de Neuquén entre los 36 y los 41° de latitud sur aproximada-

mente. Esta región de los Andes corresponde a la denominada Zona Volcánica Sur (ZVS, 33,4° - 45,9° LS) que se caracteriza por una subducción oblicua de tipo normal (30°) entre la placa de Nazca y la placa Sudamericana. En la ZVS, Watt *et al.* (2008) realizaron un estudio de recopilación y análisis estadístico de los registros obtenidos desde el año 1558, estos muestran 262 erupciones a partir de 25 centros efusivos, lo que implica una tasa media de erupción **1,32** erupciones por año en dicho sector.

Si bien la mayor parte de los centros eruptivos se encuentran en territorio chileno, los productos emitidos por erupciones explosivas generan en territorio Argentino una vulnerabilidad permanente a exposición de cenizas volcánicas debido a los vientos predominantes del sector oeste. En territorio Argentino, la mayoría de los volcanes activos se encuentran en zonas con baja densidad demográfica, alejados de grandes centros poblados. Sin embargo, en la provincia de Neuquén se encuentra uno de los volcanes activos argentinos más importantes: el volcán Copahue. Este centro volcánico presenta una historia eruptiva reciente (1992, 1995 y 2000), y sobre él se desarrollan dos localidades, una con población permanente (Caviahue) y otra con población transitoria durante los meses de verano (Copahue).

En Argentina, y en especial en la provincia de Neuquén, el riesgo volcánico comienza a ser considerado por las autoridades políticas y la comunidad, principalmente a partir de las erupciones de los años 2008 y 2009 de los

volcanes Llaima y Chaitén en la hermana República de Chile.

En este trabajo se analiza los fenómenos volcánicos ocurridos en la provincia de Neuquén durante el cuaternario, el riesgo volcánico asociado y las acciones que autoridades y científicos están realizando. Por otro lado, teniendo en cuenta que centros eruptivos localizados fuera del territorio provincial pueden repercutir a grandes distancias, mediante lluvia de cenizas, se hace mención de algunas acciones que se están llevando a cabo para su mitigación.

VOLCANISMO DE LA PROVINCIA DE NEUQUÉN

El volcanismo cuaternario en la provincia de Neuquén se desarrolló en dos ambientes tectónicos vinculados al proceso de subducción de la Placa de Nazca por debajo de la Placa Sudamericana. Uno de ellos está asociado al desarrollo del arco volcánico actual y el otro al retroarco, en la región extraandina del norte de Neuquén y sur de Mendoza. En la Fig. 1 se ubican los principales centros eruptivos Argentinos y Chilenos.

Volcanismo asociado al Retroarco

Hacia la región de antepaís entre los 35° S y 38° S, se desarrolla un extenso volcanismo básico alcalino de retroarco que caracteriza la región de la Payunia, y que se implanta sobre la región norte del Engolfamiento Neuquino. Este volcanismo está representado por grandes estratovolcanes mayormente basálticos y basandesíticos hasta traquíticos, calderas volcánicas, domos, volcanes basálticos monogénicos y extensos campos basálticos, que presentan en general edades menores a 5 Ma, aunque en algunos se ha reconocido actividad histórica (Groeber 1928). El mayor exponente en la provincia del Neuquén corresponde al **volcán Tromen**, con 4.114 m s.n.m. y cerca de 2000 m sobre el relieve circundante. Por sus laderas norte y nordeste descienden coladas de lava de edades cercanas a 17,5 Ka (Kay *et al.* 2006). En los alrededores existen una serie de volcanes satélites, como el Tilhue, Wayle, Polco, Piujenta y Boliviano, cuyas edades se estiman entre 1-0,8 Ma. Groeber (1926, 1928) hace mención sobre una erupción del volcán Tromen ocurrida en tiempos de los Mapuches, según relatos directos de los indígenas. Teniendo en cuenta que las lavas conservan con aspecto joven sus rasgos de fluidalidad, y los relatos transmitidos por mapuches al Dr. Groeber, sugieren que estos derrames podrían haber ocurrido en tiempos históricos. Por su parte, Folguera *et al.* (2008) mencionan el relato del misionero jesuita Bernardo Havestadt, quien señala haber visto el 7 de febrero de 1752 columnas de humo negro que convertían el día en noche, e indica que caminaba sobre una escoria negra que gastaba las pezuñas de los animales.

Actualmente, el volcán Tromen presenta en su cumbre una serie de cráteres, en uno de ellos se menciona la existencia de fumarolas con temperaturas cercanas a los 70° C (Folguera *et al.* 2008). Estas anomalías térmicas, sumado a la posible actividad reciente del volcán en tiempos históricos, convierten al Tromen en un volcán activo, merecedor de un estudio profundo. Sin embargo, debido a

la baja densidad población, no representa un riesgo volcánico significativo en cuanto la magnitud del impacto.

Volcanismo cuaternario asociado al Arco

El arco magmático comprende una larga cadena de estratovolcanes activos cenozoicos tardíos situados principalmente en el sector chileno de la Cordillera Principal (Ramos 1999). A la altura de la provincia de Neuquén se desarrolla un segmento de subducción normal que se corresponde con la Zona Volcánica Sur. En este segmento, el arco volcánico está caracterizado por presentar una mayor influencia cortical con rocas de composición andesítica a dacítica (López Escobar *et al.* 1995). Hacia el sur predominan los basaltos y andesitas basálticas con bajas relaciones de Sr^{87}/Sr^{86} (0,7037 a 0,7044) (Ramos 1999), correspondientes a centros efusivos fuertemente controlados por fallas de desplazamiento de rumbo asociadas a la zona de falla de Liquiñe-Ofqui (Hervé 1994). A estas latitudes se han identificado al menos 10 volcanes activos, en Chile los principales exponentes los constituyen los volcanes Lonquimay, Llaima y Villarica; mientras que en Argentina encontramos los volcanes Copahue y Lanín.

El **volcán Lanín** (3.776 m s.n.m.) es un estratovolcán que se eleva 2330 m sobre el terreno lindante. Actualmente no presenta evidencias de actividad, ni erupciones documentadas históricamente, salvo una información de Sapper (1917), sobre una erupción en 1906 sin datos confiables. Lara & Moreno (2004) y Lara (2004) han propuesto, sobre la base de criterios morfológicos y relaciones de campo, cuatro unidades evolutivas. La unidad más reciente (Lanín 4) se incluyen una serie de derrames lávicos basálticos fisurales y una lava-domo dacítica. Este último, Dacita Mamuil Malal) dio lugar a un flujo piroclástico tipo bloques y cenizas (*block and ash flow*) cuya datación ^{14}C , realizada en restos orgánicos, indicarían una posible edad de 2170 +/-70 años AP. Las coladas fisurales que se extienden en el flanco occidental (Basaltos Momolluco), fueron emitidas desde una cota aproximada de 3.000 m s.n.m., y tienen una edad mínima estimada en 1650 +/- 70 años AP, al igual que los derrames de lavas cordadas del flanco norte (Basaltos Quilleihue). Si bien no presenta registros históricos de actividad eruptiva documentada, la edad reciente de sus emisiones sugiere que sea considerado un volcán activo. La altura y pendiente del edificio volcánico, la presencia de un casquete glaciar en la cumbre y el abundante material morrénico, dan a lugar a peligros potenciales como el colapso parcial de las laderas del edificio, flujos laháricos y caída de cenizas (Lara & Moreno 2004). Existen además manifestaciones recientes en centros adventicios al volcán Lanín, como el volcán Achen Niyeu, localizado decenas de kilómetros al sur. Este centro corresponde a un cono de escoria, de 500 m de altura, del cual desciende un derrame lávico que ingresa al lago Epulafquen datado en 200 +/- 90 años AP (Inbar *et al.* 1995).

Actualmente los mayores peligros de este centro eruptivo están relacionados a posibles deslizamientos o flujos producto del derretimiento del casquete de hielo en su cumbre, que pueden verse intensificados por eventos sísmicos regionales.

El **volcán Copahue** (37° 45' S - 71° 10.2' W, 3.001 m s.n.m.), con una historia eruptiva reciente (1992, 1995, 2000) presenta un lago intracraterico ácido (pH entre 0 y 1) y vertientes ácidas

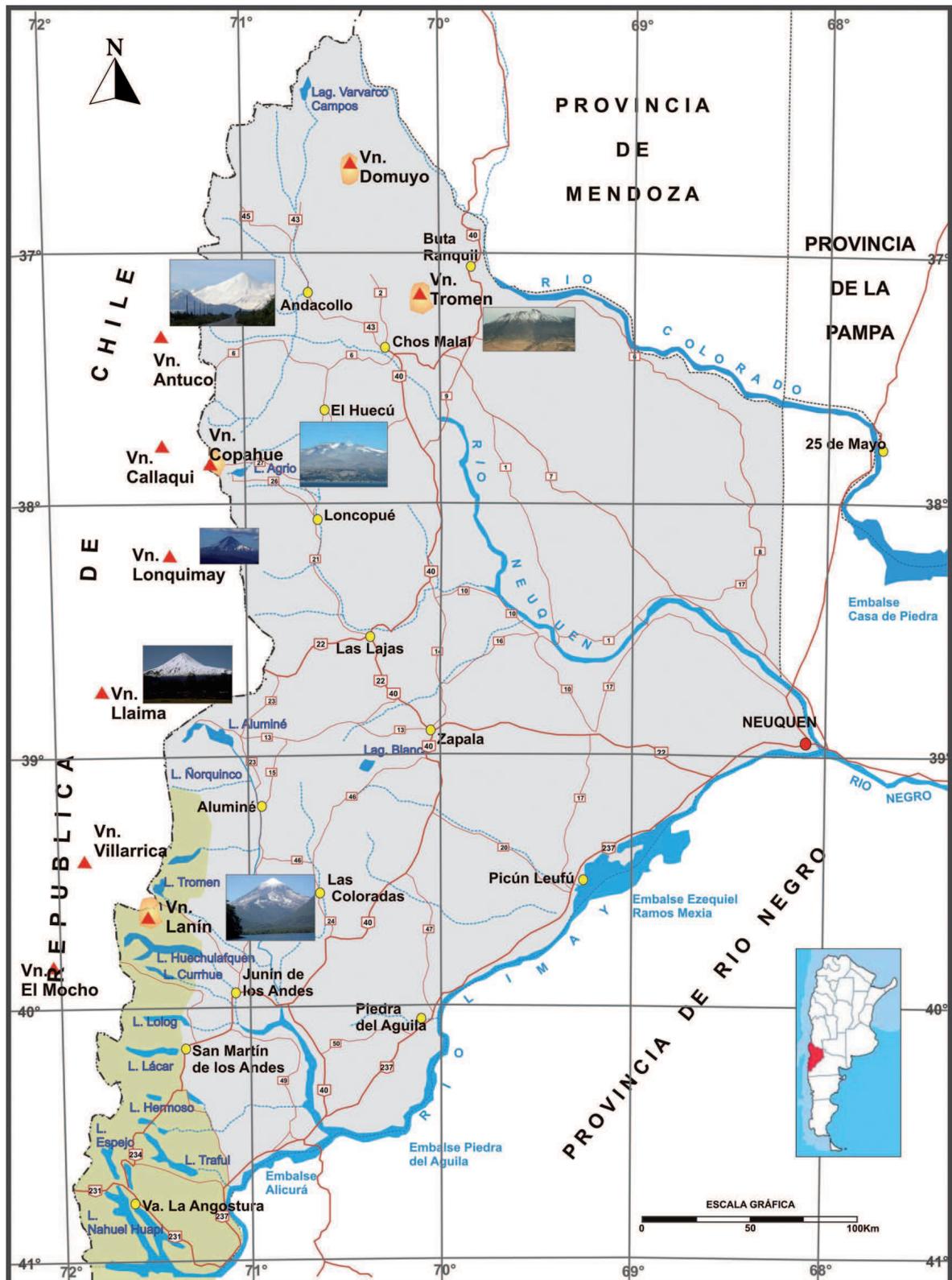


Figura 1: Mapa de la provincia del Neuquén indicando sus principales centros eruptivos y los del territorio chileno adyacente.

(pH entre 1 y 2) que alimentan al río Agrio y al lago homónimo (pH 2 a 3). Varias investigaciones fueron realizadas para el estudio geológico del área (Pesce 1989; Folguera & Ramos 2000; Mazzoni & Licitra 2000, Melnick *et al.* 2006, entre otras), suscitando en muchos casos importantes controversias. Bermúdez & Delpino (1995) realizaron un mapa de peligrosidad

volcánica donde se indican las áreas peligrosas ante derrames lávicos, flujos piroclásticos, depósitos de caída piroclástica, lahares, sismos y gases volcánicos.

La erupción de tipo freatomagmática de Julio de 1992 comprendió tres fases eruptivas principales, que produjeron columnas eruptivas de 0,3, 1,4 y 0,7 km de altura res-

pectivamente, considerándose un Índice de Explosividad Volcánica igual a 2. Las columnas generaron plumas que dispersaron cenizas hasta 20 km de distancia y dieron lugar a la formación de lahares de hasta 4 km de longitud (Delpino & Bermúdez 1993) Aunque todas las erupciones históricas del volcán Copahue han sido de baja magnitud, la ocurrida en el año 2000 mostró un cambio de estilo eruptivo y un aumento de la intensidad, tratándose del mayor ciclo eruptivo tanto en magnitud como en duración (Naranjo & Polanco 2004).

Por otra parte, la acidez del lago cratérico y las vertientes genera procesos de lixiviación que podrían estar debilitando la ladera oriental del edificio volcánico, esto se traduce un potencial peligro de colapso del flanco, especialmente teniendo en cuenta el sistema de fracturas presente (Varekamp *et al.* 2001). Esta posibilidad de colapso representa un alto riesgo para la población de Caviahue, teniendo en cuenta el volumen de fluidos provenientes del lago cratérico, el glaciar ubicado en la cima y la acumulación de nieve, pudiendo generar lahares que se extenderían por varios kilómetros.

Respecto a la peligrosidad del volcán Copahue, Naranjo & Polanco (2004) concluyen que erupciones de mayor magnitud, comparables a erupciones prehistóricas, podrían repetirse en el futuro impactando severamente las localidades turísticas sobre territorio argentino. De no implementarse un programa educacional de aplicación constante, dirigido a la población local, los planes de emergencia no serían efectivos para prevenir los efectos de tales eventos mayores, pues los habitantes de estas localidades perciben que el volcán Copahue origina solo erupciones de baja magnitud tales como las de los sesenta, noventa y la del año 2000.

EVALUACIÓN DEL RIESGO VOLCÁNICO EN LA PROVINCIA

En 1972 el Grupo de Trabajo para el estudio estadístico de desastres naturales (UNESCO, 1972) identificó el concepto de *riesgo* como la expectativa de que se produzca una pérdida, ya sea en forma de vidas humanas, de bienes naturales, o de capacidad productiva. El riesgo (R) se evalúa como el producto de tres factores: costo, vulnerabilidad y peligrosidad.

La *peligrosidad* se refiere a la probabilidad de ocurrencia, dentro de un período de tiempo determinado y en un área específica, de un fenómeno potencialmente perjudicial (Varnes & IAEG 1984). Debe realizarse la distinción entre el Peligro y la Peligrosidad. El *peligro* es el fenómeno o proceso y la peligrosidad es la probabilidad que ese proceso ocurra. La estimación de la probabilidad se establece a partir del denominado *período de ocurrencia o de retorno*, que es el intervalo de recurrencia promedio entre sucesos determinados de un evento en particular.

La *peligrosidad volcánica* es entonces, la probabilidad de que un área determinada sea afectada por procesos o productos volcánicos potencialmente destructivos en un intervalo dado de tiempo (Fournier d'Albe 1979).

La *vulnerabilidad* es la probabilidad de que dado el evento peligroso, genere daño. Hace referencia a cuan propensas son las cosas a sufrir daño.

Una evaluación del *riesgo* involucra considerar la siguiente relación:

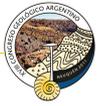
$Riesgo = (\text{costo}) \times (\text{vulnerabilidad}) \times (\text{peligro})$, donde el costo puede incluir el número de vidas humanas, las propiedades, las obras de infraestructura, la capacidad productiva amenazadas, etc.; la vulnerabilidad es una medida de la proporción (0 a 100%) del costo susceptible a ser perdido en un evento peligroso dado.

En nuestro país se ha utilizado «*Peligrosidad volcánica*» refiriéndose al peligro, por eso el análisis y mapeo de la peligrosidad volcánica, fue dirigida a la caracterización del proceso geológico (peligro geológico) o a la susceptibilidad y no a la probabilidad de ocurrencia. La peligrosidad de los volcanes activos se evalúa mediante el estudio histórico de sus erupciones (mecanismos eruptivos) como también el tipo y distribución de los productos que emiten.

Es importante tener en cuenta que una catástrofe natural ocurre cuando un **peligro potencial se actualiza en condiciones de no prevención**, a veces por no predicción o por no adopción de medidas. Si se realizan las acciones tendientes a mitigar los peligros (monitoreo volcánico, mapa de peligrosidad, planes de contingencia, etc.) se logra minimizar la vulnerabilidad de la población y así se evita una catástrofe o desastre natural. En este sentido, han sido escasas las acciones tendientes a mitigar el riesgo volcánico en Argentina y siempre se debieron a trabajos aislados de científicos vinculados al tema, que en su mayoría fueron realizados con posterioridad al evento volcánico. A nivel nacional, la Universidad de Buenos Aires (UBA), por medio de la Dirección Nacional del Antártico, y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas de España (CSIC) están realizando estudios y monitoreo conjunto de la actividad volcánica de la isla Decepción (Antártida) desde 2003, a partir de la creación del Observatorio Volcanológico Decepción.

En lo que respecta a la provincia de Neuquén, el volcán más estudiado es, sin lugar a dudas, el **Copahue**. En el año 1992, debido a la erupción que tuvo lugar ese año, el gobierno provincial crea un Grupo de Estudios Vulcanológicos (Servicio Geológico Neuquino), quienes confeccionaron el mapa de peligrosidad (Bermúdez & Delpino 1995). Con posterioridad, a partir del año 2003, el Grupo de Estudio y Seguimiento de Volcanes Activos (GESVA - UBA) lleva adelante estudios sismológicos, geoquímicos (fluidos volcánicos) y de deformación superficial, con el objeto de comprender el funcionamiento del sistema y analizar los posibles precursores volcánicos.

La peligrosidad asociada a una erupción volcánica, dependerá entonces del lugar, tipo y magnitud de la erupción, así como de la distancia, la topografía y el viento (entre otras variables meteorológicas); también debe considerarse la vulnerabilidad de la región y finalmente las medidas que se hayan tomado para mitigar el riesgo (alarmas, sistemas de vigilancia, planes de evacuación, etc.). En este sentido, la mayor peligrosidad la encontramos en poblaciones aledañas a volcanes activos como el caso de Copahue, sin embargo, el mayor riesgo a nivel provincial corresponde a caída de cenizas producto de erupciones tanto en volcanes Argentinos como Chilenos. La predominancia de vientos del sector oeste y las características de los centros eruptivos ubicados a estas latitudes indican que la mayor parte de la provincia es susceptible a sufrir este tipo de eventos, que si bien no son considerados altamente peligrosos, pueden ocasionar un fuerte impacto en las economías regionales, y afectar los sistemas vitales y la salud.



Medidas de Mitigación del riesgo volcánico

A) Métodos de estudio y monitoreo

El estudio de la actividad volcánica en una región cambia sustancialmente cuando va dirigido a la evaluación de la peligrosidad volcánica. Para esto debe planearse el estudio en dos líneas: por una parte, hay que conocer el volcán a través de su historia eruptiva, y por otra, debe establecerse el estado actual del volcán mediante estudios sismológicos y geoquímicos. En la actualidad la volcanología es una disciplina que cuenta con la presencia de numerosos especialistas de diferentes ramas que aplican su trabajo a este campo. El estudio completo de un volcán requiere aplicar conocimientos de Geología (Petrología, Geomorfología), Sismología, Geoquímica, Geodesia, etcétera.

Los volcanes son sistemas complejos, con un comportamiento condicionado por un gran número de factores de tipo geodinámicos, morfológicos y petrológicos. El estudio de una región volcánica, desde el punto de vista sismológico es importante porque nos permite conocer diferentes aspectos del sistema, entre otros la dinámica y los mecanismos de transporte de fluidos, los efectos o consecuencias derivadas de esta dinámica y el estado de esfuerzos local. El seguimiento de la actividad sísmica parte por identificar claramente las pautas de la actividad durante la fase de reposo (línea de base) y controlar cuando esta actividad se va alejando de esa línea base, variando la distribución de los distintos tipos de eventos, así como la relación con otros fenómenos (cambios de la composición de los gases, temperaturas, deformación, etc.). Las características físico-químicas de las emisiones de gas y de las aguas termales que observamos en estos ambientes son el resultado de una larga serie de interacciones sólido-líquido, sólido-gaseoso y líquido-gaseoso que suceden entre los componentes profundos (magmáticos) y superficiales (hidro-atmosféricos). Por su parte, la geodesia volcánica permite detectar y medir variaciones en la superficie del edificio volcánico. La deformación puede definirse a grandes rasgos como los cambios en la forma o dimensiones de un cuerpo como resultado de los esfuerzos actuantes. En general, la deformación detectada en volcanes se asocia a variaciones de volumen/presión en la cámara magmática o en el sistema magmático hidrotermal que lo alimenta. El modelado integrado de los datos provenientes de las distintas líneas de estudio permite alcanzar un conocimiento más acabado del estado sistema y su comportamiento.

Es importante destacar, que se necesita un tiempo inicial para acumular datos suficientes que permitan detectar en cada volcán los patrones de comportamiento, a partir de los cuales se podrán identificar fenómenos precursores, ya sea por cambios como el abultamiento o inflación del edificio volcánico, cambios en la composición de los gases o bien en la actividad sísmica.

De los tres volcanes Argentinos mencionados anteriormente, solo en el **volcán Copahue** se desarrollan tareas de estudio y seguimiento. Desde el año 2004 se realiza: el análisis sismológico de los registros obtenidos, el estudio de la composición química e isotópica de gases fumarólicos y aguas termales, y análisis de la deformación del edificio volcánico. El estudio de la actividad sísmica se realiza a partir de antenas sísmicas (*array*) de 8 y 12 canales, mediante sismómetros de periodo corto. El resul-

tado de la localización de los registros permitió observar que la mayoría de los eventos locales (terremotos) tienen sus epicentros al noroeste de Caviahue, con distancias epicentrales que varían principalmente a profundidades que varían entre 1 y 3 km (Ibañez *et al.* 2008). También se han detectado eventos de baja frecuencia, con muy baja energía, que fueron localizados aproximadamente en la misma región. La composición química de los fluidos volcánicos y termales se lleva a cabo mediante un muestreo sistemático (aunque discontinuo) de gases fumarólicos y aguas. Las muestras gaseosas son colectadas de cinco áreas termales diferentes (Chanco-Co, Anfiteatro, Las Maquinas, Las Maquinitas y la villa de Copahue) y de uno de los pozos geotérmicos (COP-2). Sin embargo, los resultados obtenidos del análisis de las emisiones gaseosas de las éstas áreas indican, que no pueden ser utilizados como indicadores de la actividad volcánica para realizar un monitoreo del sistema. En su ascenso a superficie, estos gases atraviesan un potente acuífero hidrotermal que funciona de filtro, enmascarando cualquier tipo de inyección proveniente de aguas profundas. Durante los muestreos realizados en el año 2004, las variaciones en la composición química de las aguas provenientes del volcán (cráter y vertientes), indicaban algún tipo de perturbación del sistema magmático profundo. Los conductos fumarólicos que alimentan al lago cratérico habían sido obstruidos parcial o totalmente por un lapso de tiempo, provocando la desconexión del sistema con la laguna cratérica, esto se vió reflejado en un abrupto descenso de la temperatura y estratificación de sus aguas. Posteriormente, y debido posiblemente a la acumulación de presión en el sistema, se produjo la reapertura de los conductos y el retorno a condiciones normales. Es posible que en la historia del volcán este tipo de procesos sean cíclicos y que la liberación repentina de la presión acumulada pudiera desencadenar los eventos freáticos registrados en el pasado (Caselli *et al.* 2005; Caselli *et al.* 2009). A partir de imágenes de radar de apertura sintética ENVISAT obtenidas entre el 2002 y el 2007, se examinó la deformación de superficie en el interior de la Caldera del Agrio. Se analizaron un total de 32 imágenes (18 órbita ascendente y 14 órbita descendente) y se calculó una deformación negativa de 1.8 cm/año (Euillades *et al.* 2008; Fournier *et al.* 2010), localizada principalmente en los flancos este y norte del edificio volcánico. Si bien esta medición no ha sido validada con otras técnicas geodésicas como redes de GPS o inclinómetros, se realizó un modelado inverso de los datos de deformación para obtener los parámetros de la fuente que la origina. Los resultados obtenidos de estos modelos son consistentes con los análisis de las variaciones geoquímicas y sismológicas durante este intervalo de tiempo. Los mismos indican que las perturbaciones observadas en superficie, son producidas por variaciones en el límite entre la zona plástica con presión litostática que rodea la cámara magmática y la zona fágil hidrotermal. Este límite constituye una zona de sellamiento denominada carapace en donde se produce la acumulación de fluidos magmáticos, al superar cierto umbral de presión se produce el fracturamiento del sello y la consecuente liberación de estos fluidos hacia el sistema somero. Este proceso genera: eventos sísmicos por fracturamiento, taponamiento temporal del sistema de microfracturas que conectan el lago cratérico por sobresaturación debida a los ga-

ses liberados y deflación por liberación de presión en superficie (Vélez *et al.* 2010, enviado).

B) Mitigación ante caída de cenizas volcánicas

Como vimos anteriormente, existen en la cordillera de los Andes gran cantidad de volcanes activos, si bien la mayoría están localizados en territorio chileno, los vientos predominantes del oeste transportan las cenizas volcánicas hacia nuestro territorio. Estas partículas generan importantes dificultades tanto en la salud de las poblaciones afectadas como en sus economías.

No hay registro de las acciones realizadas durante las erupciones que afectaron a nuestro territorio en el pasado reciente que sirva de experiencia para eventos futuros. En este sentido el SEGEMAR brinda en su Web algunos consejos ante estos eventos, el GESVA (Universidad de Buenos Aires) por su parte, realizó un trabajo de recopilación de la información existente, sumada a información brindada por personas afectadas por dichas erupciones. Con los datos recabados se confeccionó un Manual de Contingencias ante Caída de Cenizas (Caselli *et al.* 2010) dirigido fundamentalmente a las autoridades municipales y con información para la comunidad.

Los principales objetivos de las tareas de mitigación son contribuir a la reducción de desastres, desarrollar y fortalecer las capacidades que permitan la solución de problemas científicos y técnicos y la evaluación de la vulnerabilidad, y fundamentalmente incrementar en todos los sectores de la comunidad la percepción del riesgo y de la vulnerabilidad.

Las medidas de mitigación que deben adoptarse son:

- Identificación y análisis del riesgo y las posibles consecuencias. Zonificación.
- Desarrollo de planes de contingencia.
- Información permanente a la población sobre el evento, su peligro y el plan de emergencias.
- Establecimiento de sistemas de alerta.

De las experiencias vividas en nuestro país, los mayores daños producto de caída de cenizas ocurrieron tras las erupciones de los volcanes Hudson (1991), Quitzapu y Descabezado Grande (1932), Lonquimay (1989) y Llaima (2008). Los dos últimos ubicados en territorio chileno a latitudes de la provincia de Neuquén.

El **volcán Lonquimay** ubicado en territorio Chileno a la altura de Neuquén (38° 22' S - 71° 35' O) inició, el 25 de diciembre de 1988 un nuevo ciclo eruptivo. La columna de cenizas y gases se elevó a más de 9 km de altura. Una característica que hizo particularmente nocivas las cenizas de esta erupción, fue su alto contenido de flúor, las cuales al disolverse en el agua produjeron un alto índice de mortandad en el ganado. Las principales afecciones registradas fueron osteofluorosis (caída de dientes, calcificaciones de ligamentos y tendones y descalcificación de los tejidos óseos), también impactó fuertemente la vegetación y los cultivos (Riffo *et al.* 1989).

El **volcán Llaima** también está ubicado en territorio chileno, dentro del parque Nacional Conguillio (38° 41' S - 71° 43' O). Se trata de un estratovolcán de 3.125 m s.n.m, clasificado como uno de los más activos de la región con unas 60 erupciones históricas, y 23 registros de eventos eruptivos en el siglo XX. En enero de 2008, comenzó un nuevo ciclo eruptivo con emisión de material sólido y ga-

ses que alcanzaban los 1000 m de altura, a partir de su cráter principal. Las poblaciones más afectadas fueron las de Zapala, Las Catutos y Mariano Moreno en territorio neuquino, ascendiendo a un total de 50 mil personas que debieron permanecer en sus casas o lugares de trabajo y tomar los recaudos necesarios para prevenir los efectos nocivos de las cenizas en la salud.

CONCLUSIONES

El sector cordillerano a las latitudes de la provincia del Neuquén, constituye una de las regiones del país con mayor riesgo volcánico. Si bien, los mayores peligros corresponden a las localidades ubicadas cerca de los centros eruptivos (mayoritariamente chilenos), los productos emitidos por centros ubicados a decenas de kilómetros de distancia pueden generar un fuerte impacto en la salud de las poblaciones, sus sistemas vitales y sus economías.

Las principales medidas para la reducción del riesgo volcánico a nivel provincial la constituyen: el estudio y seguimiento volcánico (que permita la elaboración de mapas de peligrosidad), y el desarrollo de planes de prevención y contingencia (para disminuir la vulnerabilidad de las población y generar un conciencia del riesgo). En este sentido, se debe contar no solo con la acción de científicos, sino con una decisión política que apoye en forma permanente la realización de estudios orientados a la mitigación del riesgo volcánico.

Agradecimientos

Debemos un especial agradecimiento a Defensa Civil de Neuquén en particular al Dr. Manuel Rivera (Coordinador de Emergencias Sanitarias), y fundamentalmente a la población de la localidad de Caviahue que brindan apoyo a nuestras investigaciones: al Ente Provincial de Termas del Neuquén, en particular a la Dra. Ana Monasterio, y al Municipio de Caviahue, Intendente Rigoberto Ramírez.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Bermúdez, A. & Delpino, D. 1995. Mapa de los Peligros Potenciales en el área del Volcán Copahue Sector Argentino. Serie Mapas de Riesgo Geológico. Ley Provincial N 1986. Servicio Geológico Neuquino. Neuquén.
- Caselli, A.T., Vélez M.L., Augusto, M.R. & Jover M.L. 2010. Manual de Contingencia ante caída de Cenizas Volcánicas. Informe inédito Facultad Ciencias Exactas y Naturales – Universidad de Buenos Aires, pp105.
- Caselli, A.T., Augusto M.R. & Fazio A. 2005. Cambios térmicos y geoquímicos del lago cratérico del volcán Copahue (Neuquén): posibles variaciones cíclicas del sistema volcánico. 16º Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 751-756. La Plata.
- Caselli, A., Vélez, M.L., Augusto, M.R., Bengoa, C.L. Euillades, P.A. & Ibáñez, J.M. 2009. Copahue volcano (Argentina): A relationship between ground deformation, seismic activity and geochemical changes. Ed. Bean, Braiden, Lockmer, Martini and O'Brien. The Volume Project. Volcanoes: Understanding subsurface mass movement. Printed by Jaycee., pp. 309-318.
- Delpino, D. & Bermúdez, A. 1993. La actividad volcánica del volcán Copahue durante 1992. Erupción con emisión de azufre piroclástico. Provincia de Neuquén. 12º Congreso Geológico Argentino, Abstracts 4: 292-301. Mendoza.



- Euillades, P.A., Vélez, M.L., Meljem, M., Caselli, A. & Martínez Díaz, J.J. 2008. DInSAR SBAS data processing in the southern Andes: The Copahue-Agrío caldera study case. 4th Alexander von Humboldt International Conference, Eur. Geosci. Union, Santiago.
- Folguera, A. & Ramos, V.A. 2000. Control estructural del volcán Copahue (38° S - 71° O): implicancias tectónicas para el arco volcánico cuaternario (36° - 39° S). *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 55: 229-244.
- Folguera, A., Zamora Valcarce, G., Miranda, F. & Leanza, H.A. 2008. El volcán Tromen: ríos de lava. En: Lema, H. & Ardolino, A. (Eds.): *Sitios de Interés Geológico de la República Argentina. Servicio Geológico Minero Argentino, Anales* 46, 2:561-570. Buenos Aires.
- Fournier, T.J., Pritchard, M.E. & Riddick, S.N. 2010. Duration, magnitude and frequency of subaerial volcano deformation events: New results from Latin America using InSAR and a global synthesis. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 11(1), Q01003, doi:10.1029/2009GC002558.
- Fournier d'Albe, E.M. 1979. Objectives of volcanic monitoring and prediction, *our. Geol. Soc. Lond.*, 136(3): 321-326.
- Groeber, P. 1926. Toponimia araucana. *Anales de la Sociedad Argentina de estudios geográficos, GAEA*, 2 (1) Buenos Aires.
- Groeber, P. 1928. Traslado del vulcanismo de la falda oriental de la cordillera hacia la ladera occidental. *Anales de la Sociedad Argentina de Estudios Geográficos, GAEA*, 3 (1) 210-215. Buenos Aires.
- Hervé, F. 1994. The southern Andes between 39° and 44°S latitude: the geological signature of a transpressive tectonic regime related to a magmatic arc. En: Reuter, K.J., Scheuber, E. & Wigger, P.J. (Eds.): *Tectonics of the Southern Central Andes*. 243-248. Springer, Berlin
- Ibañez, J.M., Del Pezzo, E., Bengoa, C., Caselli, A., Badi, G. & Almen-dros, J. 2008. Volcanic tremor and local earthquakes at Copahue volcanic complex, Southern Andes, Argentina. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 174: 284-294.
- Inbar, M., Rizzo, C. & Párica, C. 1995. The morfological developmen of a young lava flow in the South Western Andes- Neuquen, Argentina. *Zeitschrift Geomorphologisher Natur Forschungen*, 39(4): 479-487.
- Kay, S.M., Burns, M., Copeland, P. & Mancilla, O. 2006. Upper Cretaceous to Holocene Magmatism and evidence for transient Miocene shallowing of the Andean subduction zone under the northern Neuquen basin. En: Kay, S.M. & Ramos, V.A. (Eds.): *Evolution of an Andean margin: A tectonic a magmatic view from the Andes to the Neuquen Basin (35°-39°S latitude)*. Geological Society of America, Special Paper 407: 19-60.
- Lara, L.E. 2004. Geología del volcán Lanín. Región de la Araucanía. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica. 87: 1-18 pp.
- Lara, L.E. & Moreno, H. 2004. Geología preliminar del área Liquide-Neltume: Santiago, Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 82: 1-100.
- López Escobar, L., Cembrano, J. & Moreno, H. 1995. Geochemistry and Tectonics of the Chilean Southern Andes Basaltic Quaternary Volcanism (37°-46°S). *Revista Geológica de Chile*, 22 (2): 219-234. Santiago.
- Mazzoni, M.M. & Licitra, D. 2000. Significado estratigráfico y volcanológico de ignimbritas neógenas con composición intermedia en la zona del lago Caviahue, Neuquén. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 55(3): 188-200.
- Melnick, D., Folguera, A. & Ramos, V.A. 2006. Structural control on arc volcanism: The Copahue-Agrío complex, South-Central Andes (37°50' S). *Journal of South American Earth Sciences*. 22: 66-88.
- Naranjo, J.A. & Polanco, E. 2004. The 2000 AD eruption of Copahue Volcano, Southern Andes. *Revista Geológica de Chile*, 31(2): 279-292.
- Pesce, A. 1989. Evolución volcano-tectónica del complejo efusivo Copahue-Caviahue y su modelo geotérmico preliminar. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* (44): 307-327.
- Ramos, V.A. 1999. Plate tectonic setting of the Andean Cordillera: Episodes. 22:183-190.
- Riffo, P., Fuentealba, G., Gardeweg, M & Moreno, H. 1989. Erupción del volcán Lonquimay 1988-1989. Ediciones Universidad de la Frontera, 24 pp.
- Sapper, K. 1917. *Katalog der geschitlichen Vulkanausbrüche*, 358 p. Strabburg.
- Varnes, D.J. & IAEG Commission on Landslides and other Mass Movements on Slopes, 1984. *Landslide hazard zonation: a review of principles and practice*. UNESCO. 63 pp.
- Varekamp, J., Ouimette, A., Hermán, S., Bermúdez, A. & Delpino, D. 2001. Hydrothermal element fluxes from Copahue, Argentina: A «beehive» volcano in turmoil. *Geology*, 29 (11): 1059-1062.
- Vélez, M.L., Euillades, P., Caselli, A., Blanco, M. & Martínez Díaz, J.J. 2010. Deformation of Copahue volcano: inversion of InSAR data using a genetic algorithm. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* (enviado).
- Watt, S.F.L., Pyle, D.M., & Matter, T.A. 2008. The influence of Great Earthquakes on volcanic eruption rate along Chilean subduction zone. *Earth and Planetary Science Letters* 277 (3-4): 399-407.

