

## Programa de Evaluación de Amenazas Volcánicas del SEGEMAR, Argentina

Sebastián E. García<sup>1</sup>, Patricia Sruoga<sup>2</sup>, y Manuela Elissondo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Servicio Geológico Minero Argentino, SEGEMAR, ARGENTINA

<sup>2</sup> CONICET-SEGEMAR, Argentina patysruoga@gmail.com

**Palabras clave:** Amenazas volcánicas, Monitoreo volcánico, NVEWS.

### INTRODUCCIÓN

En la República Argentina el volcanismo activo se halla directamente vinculado con la subducción de la Placa de Nazca por debajo de la Placa Sudamericana en el margen pacífico, dando lugar a un arco volcánico discontinuo. Este se halla interrumpido entre los 28° y 33° 15' de latitud sur debido a la horizontalización de la placa desde el Mioceno superior (Barazangi y Isacks 1976). Al norte, la porción de arco corresponde al extremo sur de la Zona Volcánica Central (ZVC, 16°-28°S), mientras que a partir del Vn Tupungatito se extiende la Zona Volcánica Sur (33°-46°S), vinculada a un ángulo de Benioff de 30° aproximadamente, el cual permaneció casi constante durante todo el Cenozoico superior. La Zona Volcánica Austral (ZVA, 49°-56°S) se halla asociada a la subducción de la Placa Antártica, caracterizada por un baja velocidad de subducción y centros volcánicos escasos y aislados.

A lo largo de la cordillera de los Andes, límite natural entre Argentina y Chile existen aproximadamente 120 volcanes considerados activos, con registro eruptivo durante el Holoceno y en muchos casos histórico. Entre ellos 38 se encuentran íntegramente en Argentina o en el límite internacional (Fig. 1) (Elissondo y Villegas 2011, Elissondo et al. 2016).

Durante los últimos 25 años la reiteración de emergencias producidas por erupciones volcánicas ocurridas a lo largo de la cordillera andina (Hudson 1991, Láscar 1993, Chaitén 2008, Planchón-Peteroa 1991 y 2011, Cordón Caulle 2011, Copahue 2012, Calbuco 2015) ha generado múltiples problemáticas y pérdidas materiales, causando gran preocupación en las poblaciones afectadas y en las autoridades nacionales y provinciales competentes. Si bien la mayoría de los centros mencionados se ubican en Chile, generaron un alto impacto por caída de tefras en territorio argentino.

En Argentina, el peligro volcánico más frecuente y con mayor impacto es la dispersión y caída de tefras. Debido a los patrones de circulación atmosférica los productos de erupciones explosivas son dispersados hacia el este, afectando grandes extensiones del territorio y espacio aéreo argentino.



Fig. 1 –Volcanes activos y evaluación del riesgo relativo (Elissondo et al. 2016).

Aunque la dispersión y caída de cenizas no generan pérdida de vidas humanas de forma directa, producen importantes consecuencias tanto socioeconómicas como ambientales. Uno de los impactos más frecuentes y extensos, en lo que respecta a la superficie afectada, corresponde a la interrupción del tráfico aéreo que da como resultado cuantiosas pérdidas económicas.

Por otro lado, los peligros volcánicos en áreas proximales y medio-distales (flujos piroclásticos, lahares, coladas de lava) no han sido debidamente documentados debido a las características demográficas de Argentina, donde la densidad poblacional en las cercanías de los volcanes es relativamente baja.

Sin embargo, el desarrollo creciente de actividad económica e infraestructura (turismo, minería, pasos internacionales, presas hidroeléctricas) en áreas cordilleranas plantea la necesidad de implementar medidas de reducción del riesgo volcánico, incluyendo programas de estudios sistemáticos de los volcanes activos para evaluar su peligrosidad y riesgo y monitoreo volcánico con el fin de generar alertas tempranas.



Fig. 2 – Aeropuerto de la ciudad de San Carlos de Bariloche, que permaneció cerrado durante varios meses como consecuencia de la erupción del Cordón Caulle del 4 de junio de 2011.

## PROGRAMA DE EVALUACIÓN DE AMENAZAS VOLCÁNICAS DEL SEGEMAR

Las crisis eruptivas de 1991 (Vn Peteroa y Vn Hudson) pusieron de manifiesto el enorme perjuicio que puede producir la caída de cenizas, así como también el escaso conocimiento geológico y el bajo grado de preparación para enfrentar la amenaza volcánica. A raíz de esto, el SEGEMAR, con el apoyo de Naciones Unidas (PNUD) y el SERNAGEOMIN, de Chile confeccionaron el primer mapa binacional de Geología y Peligrosidad Volcánica para el volcán Planchón Peteroa (Naranjo et al. 1999). En los años siguientes, se llevaron a cabo proyectos específicos en otros volcanes activos, tales como Copahue, Maipo, Lanín y Complejo Volcánico Laguna del Maule con el fin de reconstruir su estratigrafía eruptiva holocena y evaluar su peligrosidad.

A partir del año 2008, con motivo de la reactivación de los volcanes chilenos Llaima y Chaitén, el SEGEMAR implementó un Programa de Evaluación de las Amenazas Volcánicas (PEAV) para la República Argentina, con el objetivo de establecer la potencial afectación del territorio por los Peligros/Amenazas Volcánicas y los potenciales riesgos socioeconómicos. Se llevó a cabo la Evaluación Rápida del Riesgo Volcánico en Argentina (Elissondo y Villegas 2011; Elissondo et al. 2016) que permitió identificar los volcanes con mayor riesgo para el país y organizar futuras actividades de investigación y de monitoreo volcánico.

El primer ranking de riesgo relativo para el país (Fig. 3), arrojó como resultado un total de 38 volcanes argentinos y argentino-chilenos considerados activos, tomando como base la información del catálogo del Smithsonian Global Volcanism Program (2008), de Hojas Geológicas a escala 1:250.000 realizadas por el SEGEMAR y de numerosas publicaciones científicas. Este ranking fue posteriormente actualizado en el marco de un proyecto de colaboración entre el SEGEMAR y el Servicio Meteorológico Nacional Argentino (SMN) (Elissondo et al. 2016).

Ranking	Nombre del Volcán	Ubicación	Provincia	Riesgo	Exposición	Peligrosidad
1	Copahue	Arg-Chile	Neuquén	170,92	13,15	13
2	Planchón-Peteroa	Arg-Chile	Mendoza	154,95	10,33	15
3	Laguna del Maule	Arg-Chile	Mendoza	133,77	9,55	14
4	Tupungatito	Arg-Chile	Mendoza	119,19	9,93	12
5	Lanín	Arg-Chile	Neuquén	118,70	11,87	10
6	Maipo	Arg-Chile	Mendoza	116,00	11,60	10
7	San José	Arg-Chile	Mendoza	85,54	8,55	10
8	CV Cerro Blanco	Argentina	Catamarca	84,21	8,42	10
9	Lastaria	Arg-Chile	Catamarca	65,78	6,58	10
10	Vedma	Argentina	Neuquén	64,26	10,71	6
11	Tuzgle	Argentina	Jujuy	62,96	12,59	5
12	Tromén	Argentina	Neuquén	62,07	12,41	5
13	Socompa	Arg-Chile	Salta	56,38	8,05	7
14	Ojos del Salado	Arg-Chile	Catamarca	51,64	5,74	9
15	Overo	Argentina	Mendoza	48,16	9,63	5
16	Lullailaco	Arg-Chile	Salta	35,82	5,97	6
17	Aracar	Argentina	Salta	28,35	7,09	4
18	CV Patei-Aike	Arg-Chile	Santa Cruz	15,15	5,05	3
19	G Huanquihue	Argentina	Neuquén	13,77	6,89	2
20	Tipas	Argentina	Catamarca	13,76	6,88	2
21	Cordón del Azufre	Arg-Chile	Catamarca	11,48	5,74	2
22	Cerro Bayo	Arg-Chile	Catamarca	11,46	5,73	2
23	Infiernillo	Argentina	Mendoza	11,39	5,70	2
24	Payún Matrú	Argentina	Mendoza	8,51	4,26	2
25	Cerro Volcánico	Argentina	Río Negro	8,51	8,51	1
26	Laguna Blanca	Argentina	Neuquén	8,31	8,31	1
27	Nevado de Incahuasi	Arg-Chile	Catamarca	8,22	8,22	1
28	Cerro Esconal	Arg-Chile	Salta	7,55	7,55	1
29	Peinado	Argentina	Catamarca	6,45	6,45	1
30	Cerro El Cóndor	Argentina	Catamarca	5,89	5,89	1
31	Sierra Nevada	Arg-Chile	Catamarca	5,74	5,74	1
32	Falso Azufre	Arg-Chile	Catamarca	5,72	5,72	1
33	El Solo	Argentina	Catamarca	5,68	5,68	1
34	CV Antofagasta	Argentina	Catamarca	4,91	4,91	1
35	Cerro Negro	Argentina	Chubut	4,37	4,37	1
36	Trailhue	Argentina	Neuquén	3,85	3,85	1
37	Sal de Azúcar	Argentina	Salta	2,30	2,30	1
38	Sin Nombre	Argentina	Salta	1,60	1,60	1

Fig. 3 – Ranking de volcanes argentinos y limítrofes, en función de la evaluación de riesgo relativo (Elissondo et al. 2016).

En simultáneo, desde el año 2013, comenzó a gestarse el proyecto de creación del Observatorio Argentino de Vigilancia Volcánica (OAVV) como una nueva área especializada dentro del SEGEMAR, cuya misión principal es la mitigación del riesgo volcánico en el territorio nacional, mediante la observación continua de los volcanes utilizando métodos visuales e instrumentales con el fin de conocer su estado de actividad y detectar alguna condición anómala precursora de un proceso eruptivo, que permita la generación de alertas tempranas y la puesta en práctica de los planes operativos de emergencia previamente establecidos por las autoridades de aplicación.



Fig. 4 – Esquema que muestra los objetivos del programa de evaluación de las amenazas volcánicas del SEGEMAR (García et al. 2017).

El proyecto finalmente comenzó a materializarse en el año 2017 a partir de la adquisición de los distintos equipos necesarios para el monitoreo de los volcanes seleccionados y la construcción del OAVV.

**EVALUACION DEL RIESGO VOLCANICO RELATIVO EN ARGENTINA**

La metodología utilizada se basa en el Sistema de Evaluación del Riesgo Relativo aplicado para el NVEWS (*National Volcano Early Warning System*), desarrollado en el USGS (Ewert et al. 2005-2007), aplicado también en otros países, como Chile (Lara et al. 2006). El Riesgo Relativo (*Threat*) se refiere al riesgo cualitativo que representa un volcán. Se obtiene a través del análisis de diferentes factores de exposición y peligrosidad, que resultan en un valor de peligrosidad y exposición para cada volcán.

En Argentina se realizó la evaluación para 38 volcanes ubicados completamente en territorio argentino y sobre el límite internacional, con el objeto de completarlo posteriormente con los resultados obtenidos para los volcanes ubicados en Chile por el SERNAGEOMIN (Lara et al. 2006).

Los resultados de la evaluación permitieron subdividir los volcanes analizados en cuatro categorías de Riesgo relativo: Muy Alto, Alto, Moderado y Bajo (Fig. 5). Los valores del índice de Peligrosidad muestran que los volcanes más peligrosos son Planchón-Peteroa, Laguna del Maule y Copahue, en ese orden, en tanto que el ranking de riesgo relativo es encabezado por el Copahue. Los resultados de la evaluación de riesgo relativa varían desde el máximo de 170,9 (Copahue) hasta 1,26 (Volcán Sin Nombre). La curva presenta una distribución aproximadamente exponencial y los quiebres de la misma corresponden a los límites de

los cuatro grupos mencionados. El grupo con riesgo relativo Muy Alto incluye a los volcanes Copahue, Planchón-Peteroa y Laguna del Maule. Los valores varían entre ~171 y 133. El riesgo de la aviación es alto y los 3 han mostrado señales de “intranquilidad”, e incluso hecho erupción en período histórico (Copahue y Peteroa). El siguiente grupo con 6 volcanes corresponde al catalogado como Alto, cuyos valores varían entre 120 y 65. Todos presentan valores de peligrosidad, exposición y riesgo de la aviación altos. La mayoría ha mostrado más de una señal de “intranquilidad”, a excepción del Maipo. El siguiente grupo (Riesgo Moderado) incluye 8 volcanes con valores que varían entre 65 y 28. Incluye volcanes con valores de peligrosidad, exposición y riesgo de la aviación moderado y como máximo 1 señal de “intranquilidad”. Por último, el grupo catalogado como riesgo Bajo comprende 21 volcanes con peligrosidad y exposición baja. Sólo 2 volcanes presentan una señal de “intranquilidad” (Deformación), en tanto que los restantes son volcanes de baja explosividad y volcanes con escasos estudios de base, muchos de ellos ubicados en la Puna. El valor de riesgo para la aviación es bajo con excepción de los volcanes de la Puna.

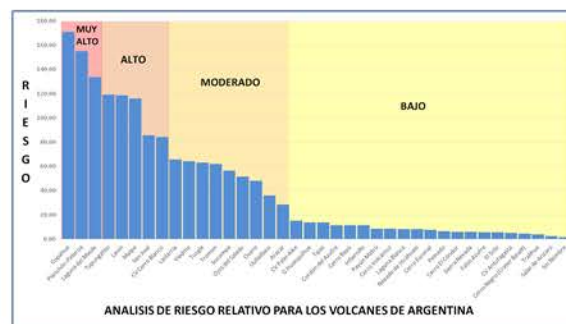


Fig. 5 – Evaluación de Riesgo Relativo de Volcanes Argentinos y limítrofes (Elissondo et al. 2016).

**PROYECTO OBSERVATORIO ARGENTINO DE VIGILANCIA VOLCÁNICA**

La mayoría de las erupciones se encuentran precedidas por cambios geofísicos y/o geoquímicos que pueden ser detectados y medidos. De tal forma que para percibir y evaluar el estado de actividad y riesgo asociado a un volcán es necesaria la observación y vigilancia sistemática de sus manifestaciones físicas como: movimientos del terreno, temblores, deformaciones, cambios en la composición química de gases y manantiales, variaciones de temperatura, cambios magnéticos, etc. (Quaas et al. 1995).

Entre los tipos de monitoreo y vigilancia comúnmente utilizados en un volcán se encuentran la vigilancia visual, el monitoreo sísmico, el monitoreo

por infrasonido, el monitoreo geodésico, el monitoreo geoquímico y el monitoreo térmico

Para definir que volcanes debían de ser monitoreados, se utilizó el ranking de riesgo relativo previamente mencionado (Elissondo y Villegas 2011, Elissondo et al. 2016) dando como resultado un proyecto inicial de monitoreo de 8 volcanes. Los cuales se dividieron en tres (3) categorías de acuerdo a la amenaza asociada a su actividad volcánica, teniendo en cuenta: tipo y frecuencia de erupciones, duración de la actividad eruptiva, actividad histórica, impacto sobre la actividad humana e infraestructura, e interés científico.

Los volcanes seleccionados fueron de sur a norte: los volcanes Lanín, Copahue y Tromen en la provincia de Neuquén, el CV Laguna del Maule en el límite entre la provincia de Neuquén y Mendoza, y los volcanes Peteroa, Maipo, Tupungatito y San José en la provincia de Mendoza (Fig. 6).

El nivel de instrumentación diseñado difiere de acuerdo a la categoría de cada volcán, tomando como base los criterios de USGS (2008) en conjunto con otras experiencias de distintos observatorios en Latinoamérica y ajustado al recurso económico disponible. Se trata de establecer una estrategia de monitoreo proactiva en lugar de reactiva, con el objetivo de detectar e interpretar correctamente el fenómeno volcánico para proveer alertas tempranas y certeras, teniendo como base una continuidad en la adquisición de datos en tiempo real, con un monitoreo 24/7.

Para los volcanes de categoría tipo I, aquellos de mayor amenaza, se propone una instrumentación que permita un monitoreo de muy alto nivel, con la posibilidad de, además de definir patrones precursores de actividad eruptiva, realizar investigaciones tal que se puedan modelar procesos volcánicos complejos. Los volcanes clasificados como tipo II tendrán la instrumentación de las mismas disciplinas que los del tipo I, pero con una cobertura menor, tal que también se puedan determinar los patrones precursores, pero la investigación se limitará a la modelación general de los procesos ocurridos en su interior. Los volcanes tipo III tendrán una instrumentación que garantice un monitoreo mínimo necesario para determinar su nivel base de actividad. Siguiendo las metodologías utilizadas en gran parte de los observatorios de Latinoamérica y el mundo, se plantea un despliegue de estaciones multiparamétricas, que intentarán generar la mayor cobertura posible sobre el edificio volcánico, conformadas por diversos sensores correspondientes a las distintas metodologías de monitoreo. Estas abarcan desde sismógrafos de banda ancha para la medición de la microsismicidad del volcán; espectrómetros que permiten determinar las concentraciones de gases traza mediante la medición de sus estructuras específicas de absorción de banda

estrecha en el UV y la región espectral visible, también conocidos como Scanning-DOAS; estaciones GPS/GNSS que permitan obtener los vectores de desplazamiento vertical en zonas de alta deformación cercanas a los cráteres o zonas fuente de deformación, inclinómetros electrónicos que permitan medir cambios muy pequeños en la inclinación en un punto sobre el volcán, sensores de infrasonido y cámaras visuales de video.

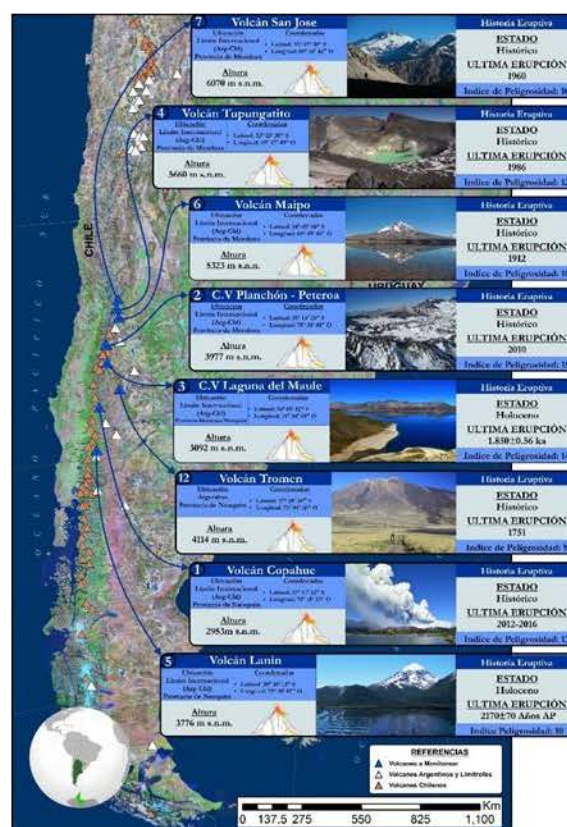


Fig. 6 – Mapa de ubicación regional de los volcanes seleccionados para su monitoreo por el OAVV (García et al. 2017).

Estas estaciones se encontrarán emplazadas en lugares remotos y sin posibilidad de conexión a una red eléctrica o de comunicación. Para el funcionamiento autónomo de las mismas se implementará un sistema de energía autosustentable por energía solar. Para la comunicación de la información desde las estaciones hasta el centro de monitoreo se planifica la implementación de un sistema mixto, utilizando en primer lugar un sistema de comunicación punto a punto/ punto-multipunto para las inmediaciones de cada volcán, mediante el uso de tecnología de espectro ensanchado. En segundo lugar, se plantea un sistema de comunicación satelital, para la extracción de toda la información desde el volcán y el envío hacia la sede del Observatorio Argentino de Vigilancia Volcánica (OAVV) en donde se ubicará el centro de almacenamiento y procesamiento de datos.

## Referencias

- Elissondo, M., Fariás, C., Collini, E., 2016. Volcanic Risk Assessment in Argentina. Cities on Volcanoes 9, Puerto Varas, Chile.
- Elissondo, M. y Villegas, D., 2011. Evaluación de Peligrosidad Volcánica en Argentina. S10a, Volcanes activos evolución y monitoreo. XVIII Congreso Geológico Argentino. Neuquén.
- Ewert, J-W., 2007. System for Ranking Relative threats of US Volcanoes. *Natural hazards Rev.*, 8:112-124.
- García, S., Badi, G., Tejedo, A., 2017. Proyecto Observatorio Argentino de Vigilancia Volcánica (OAVV) del Servicio Geológico Minero Argentino. XX Congreso Geológico Argentino, Actas. Tucumán.
- Guffanti, M., Diefenbach, A-K., Ewert, J-W., Ramsey, D-W., Cervelli, P-F., Schilling, S-P., 2010. Volcano-monitoring instrumentation in the United States, 2008: U.S. Geological Survey Open-File Report 2009-1165, 32-p. text plus Volcano-Monitoring Instrumentation Database, available only online at <https://pubs.usgs.gov/of/2009/1165>.
- Lara, L-E.; Clavero, J., Hinojosa, M., Huerta, S., Wall, R.; Moreno, H. 2006. NVEWS-CHILE: Sistema de Clasificación semicuantitativa de la vulnerabilidad volcánica. En Congreso Geológico Chileno, No. 11, Actas 2: 487-490. Antofagasta.
- Naranjo, J-A, Haller, M-J, Ostera, H-A, Pesce, A-H, Sruoga, P., 1999. Geología y peligros del complejo volcánico Planchón-Peteroa, Andes del Sur (35°15'S), región del Maule, Chile - provincia de Mendoza, Argentina. Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín 52, 55 pp. Santiago.
- Quaas R., González, R., Guevara, E., Nava, E., Mijares, H., 1995, "INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO DEL VOLCÁN POPOCATÉPETL", Memorias del X Congreso de Instrumentación, Sociedad Mexicana de Instrumentación, A.C., Xalapa, Ver, México, pp. 155-159, septiembre.