

Monitoreo de volcanes activos en Perú por el Instituto Geofísico del Perú: Sistemas de alerta temprana, comunicación y difusión de la información

Roger Machacca*, José Del Carpio, Marco Rivera, Hernando Tavera, Luisa Macedo, Jorge Concha, Ivonne Lazarte, Riky Centeno, Nino Puma, José Torres, Katherine Vargas, John Cruz, Lizbeth Velarde, Javier Vilca, Alan Malpartida

Instituto Geofísico del Perú, Observatorio Vulcanológico del Sur, Arequipa, Perú.

RESUMEN

El monitoreo volcánico en Perú es realizado por el Instituto Geofísico del Perú (IGP), a través de su Centro Vulcanológico Nacional (CENVUL). El CENVUL monitorea 12 de los 16 volcanes considerados como activos y potencialmente activos, localizados en el sur del Perú y emite boletines periódicos sobre la actividad volcánica, y dependiendo del nivel de alerta de cada volcán también emite alertas vulcanológicas de dispersión de ceniza y ocurrencia de lahares. La información generada por el CENVUL se difunde a las autoridades civiles y al público en general a través de diferentes medios de comunicación (boletines, correo electrónico, web, redes sociales, aplicativo móvil, etc.). El grupo de vulcanología del IGP se formó después de la erupción del volcán Sabancaya en 1988. Desde entonces, los estudios geofísicos y geológicos, la evaluación de peligros volcánicos y el monitoreo multidisciplinario realizado por el IGP, han permitido conocer en profundidad la actividad volcánica pasada y reciente ocurrida en Perú, para prever futuros escenarios eruptivos. Actualmente, el 80% de los volcanes activos y potencialmente activos del Perú están equipados con redes de instrumentos multiparamétricos, siendo el monitoreo sísmico el más extendido. En este artículo, presentamos la situación actual del monitoreo volcánico en el Perú, las redes de monitoreo y las técnicas empleadas, así como los esfuerzos de educación e información al público y a las autoridades responsables del manejo de riesgo de desastres.

This article is available in English at: <https://doi.org/10.30909/vol.04.S1.4971> [PDF EN].

1 INTRODUCCIÓN

El arco volcánico activo del sur de Perú es el resultado de la subducción de la placa de Nazca debajo de la placa continental Sudamericana. Esta subducción está acompañada de un alto nivel de sismicidad [Kumar et al. 2016] y vulcanismo a lo largo del margen continental activo. Los volcanes activos del sur de Perú son parte de la Zona Volcánica Central (ZVC) de los Andes [de Silva y Francis 1991], un segmento asociado con una inclinación pronunciada de la losa (25–30°) que se extiende desde la latitud 16° S (sur de Perú) a 28° S (norte de Chile). Este segmento alberga importantes calderas riolíticas y numerosos volcanes compuestos de composición andesítica a dacítica, tanto del Plioceno como del Cuaternario [de Silva y Francis 1991; Sébrier y Soler 1991; Mamani et al. 2010; Thouret et al. 2016]. El arco volcánico cuaternario es calco-alcalino y predominantemente andesítico, aunque están presentes productos con alto contenido de sílice (dacitas y riolitas), por ejemplo, en los volcanes Misti y Huaynaputina, lo que indica que los volcanes presentaron una alta actividad explosiva en el pasado reciente.

En esta parte de los Andes, 127 pueblos y más

de 1.400.000 personas están expuestas a peligros volcánicos. Por ejemplo, la ciudad de Arequipa (con más de 1 millón de habitantes; 2017 INEI census[†]), una de las principales ciudades del Perú, está expuesta a un alto riesgo volcánico asociado a una potencial reactivación del volcán Misti [Thouret et al. 2001]. Teniendo en cuenta este escenario, es fundamental contar con un sistema de alerta temprana por actividad volcánica que asegure que todos los volcanes activos sean monitoreados, con el fin de identificar cualquier signo de intranquilidad o reactivación volcánica.

1.1 Vulcanismo en Perú

En el sur de Perú, como resultado de un extenso trabajo [e.g. de Silva y Francis 1991; Fidel Smoll et al. 1997; Thouret et al. 2001; Mariño Salazar 2002; Thouret et al. 2002; Mariño Salazar y Thouret 2003; Gerbe y Thouret 2004; Thouret et al. 2005; Rivera et al. 2010; Harpel et al. 2011; Siebert et al. 2011; Rivera et al. 2014; Aguilar 2015; Samaniego et al. 2015; Macedo Sánchez et al. 2016; Samaniego et al. 2016; Bromley et al. 2019; Manrique et al. 2020; Prival et al. 2020;

*Autor de correspondencia: roger.machacca@gmail.com

[†]<http://censo2017.inei.gob.pe/resultados-definitivos-de-los-censos-nacionales-2017/>

Rivera Porras et al. 2020; Rivera et al. 2020], 16 centros volcánicos han sido catalogados como activos (al menos con una erupción en tiempo histórico ~550 años) y potencialmente activos (con actividad en el Holoceno), como se muestra en la Figura 1. Importantes erupciones explosivas han ocurrido en este segmento de arco durante el Holoceno tardío, incluidas las últimas erupciones plinianas del volcán Misti (c. 2030 AP) [Thouret et al. 2001; Harpel et al. 2011; Cobeñas et al. 2012], Ubinas (c. 1000 BP) [Thouret et al. 2005], y Huaynaputina (1600 CE) [Thouret et al. 2002], así como la erupción explosiva y el colapso del flanco NE del volcán Tutupaca (1787–1802 CE) [Samaniego et al. 2015]. Además, el Ubinas y Sabancaya, que se encuentran entre los volcanes más activos de la ZVC, han presentado durante los últimos siglos varios periodos de actividad eruptiva con Índice de Explosividad Volcánica (VEI, por sus siglas en inglés; [Newhall y Self 1982]) de 1 a 2. En Ubinas, las erupciones más recientes ocurrieron en 2006–2009, 2013–2017 y 2019 CE, y en el Sabancaya entre 1990–1998 CE. Actualmente, el volcán Sabancaya presenta actividad eruptiva continua desde noviembre de 2016.

Durante los últimos 550 años, en el sur peruano han ocurrido al menos 45 erupciones de los volcanes Misti, Ubinas, Sabancaya, Huaynaputina, Ticsani y Tutupaca [e.g., Rivera et al. 1998; Thouret et al. 2001; Mariño Salazar 2002; Thouret et al. 2002; Gerbe y Thouret 2004; Siebert et al. 2011; Samaniego et al. 2015]. Un ejemplo reciente de vulcanismo altamente explosivo ocurrió en el volcán Huaynaputina hace 421 años. En efecto, el 19 de febrero de 1600 CE, comenzó una erupción pliniana con un VEI 6. Durante los siguientes 17 días ocurrieron una sucesión de explosiones y emisiones de productos volcánicos que provocaron la devastación total en un área de 5400 km². El volumen total de la caída de tefra se estimó en 13–14 km³ [Thouret et al. 1999; Prival et al. 2020]. Esta erupción produjo la muerte de más de 1500 personas, la destrucción de más de 16 aldeas y tuvo efectos devastadores en todo el sur de Perú [Thouret et al. 1999].

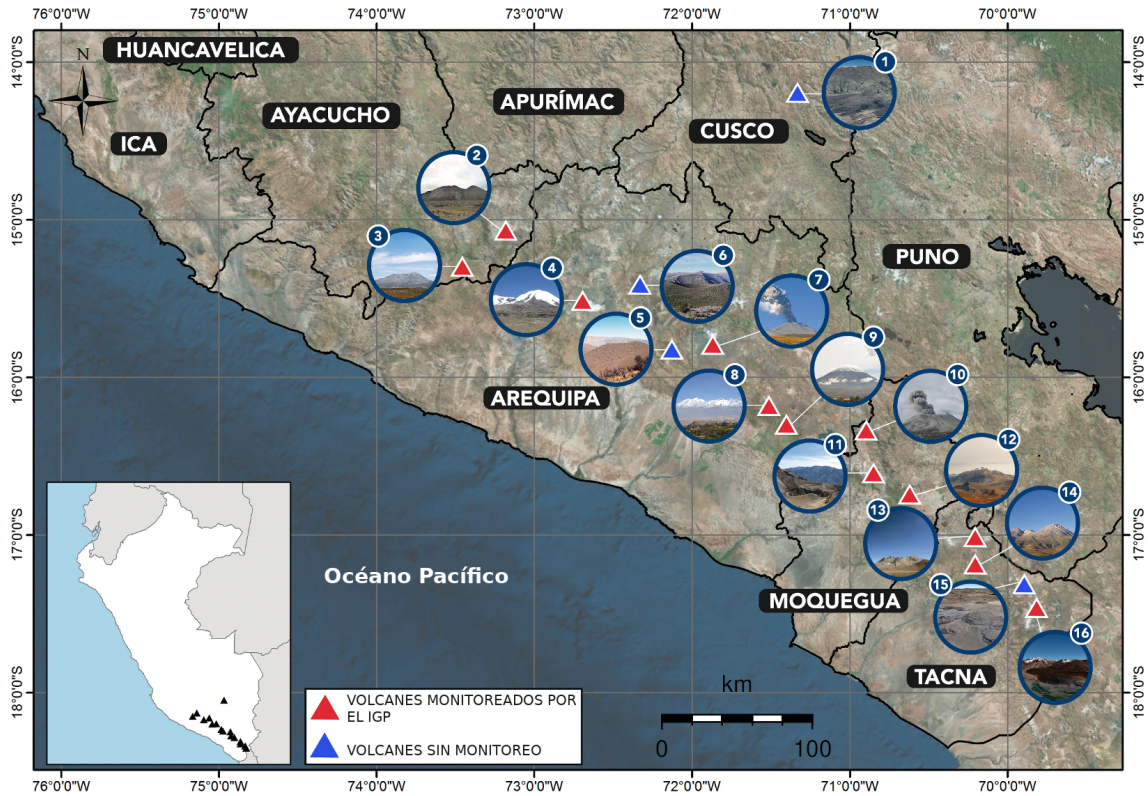
1.2 Breve historia del monitoreo de volcanes en el IGP

La reactivación del volcán Sabancaya en 1986 fue el principal catalizador para el desarrollo de la vulcanología moderna en Perú. Este episodio generó la iniciativa de establecer un programa de investigación para monitorear y estudiar los volcanes activos del país. En 1988, luego del inicio de la crisis del Sabancaya, el Instituto Geofísico del Perú (IGP) creó el Observatorio Vulcanológico del Sur (OVS) en Arequipa. En ese momento, el IGP, a través del OVS, implementó algunas redes de monitoreo en el volcán Sabancaya, que incluían cinco estaciones sísmicas. En estos primeros años, y gracias al apoyo de instituciones como el *Institut de Recherche pour le Développement* (IRD, Francia), la Universidad Nacional de San Agustín (UNSA) y la

Autoridad Autónoma de Majes-Siguas (AUTODEMA), se creó un equipo de investigación en vulcanología. Desafortunadamente, estas primeras redes fueron retiradas después de la erupción.

Años más tarde, en 2005, a través de un esfuerzo conjunto entre IGP e IRD, se instaló una red de cinco estaciones sísmicas telemétricas permanentes, de corto período, en el volcán Misti. En 2014 se implementaron otras dos estaciones telemétricas en dicho volcán. En 2006, el volcán Ubinas inició un nuevo proceso eruptivo que perduró hasta el 2009. En respuesta a esta crisis, y con el apoyo de la municipalidad de Ubinas, se instaló en este volcán la primera estación sísmica telemétrica permanente (estación UBI1). Adicionalmente, en 2007 se instalaron tres nuevas estaciones sísmicas e inclinómetros con telemetría en dicho volcán. Posteriormente, en 2019 se agregaron otras dos estaciones sísmicas telemétricas. Los datos recolectados por esta red han permitido documentar de forma detallada y precisa la evolución de la actividad volcánica del Ubinas desde 2006, incluyendo las recientes erupciones de 2006–2009, 2013–2017 y 2019 [e.g. Macedo et al. 2009; Inza et al. 2014]. Esto, a su vez, permitió al OVS emitir comunicaciones precisas sobre el estado y la probabilidad de ocurrencia de erupciones del Ubinas a las autoridades civiles locales y nacionales, y a la población del valle de Ubinas. En el 2013, en respuesta a una nueva reactivación del volcán Sabancaya, se instalaron tres estaciones sísmicas telemétricas de banda ancha en ese volcán, y posteriormente en 2015, 2016 y 2018 se implementaron un total de cuatro nuevas estaciones sísmicas, permitiendo registrar valiosas observaciones durante la fase de reactivación y la fase eruptiva en este volcán. Posteriormente, en el 2015 se instalaron cuatro estaciones sísmicas alrededor del volcán Ticsani y en 2018 se agregó una estación adicional.

En 2013, el IGP inició la formulación del proyecto de inversión pública “Mejoramiento y Ampliación del Sistema de Alerta de Riesgo Volcánico en el Sur de Perú”, el cual fue aprobado en el 2015, con apoyo de la Presidencia del Consejo de Ministros (PCM), el Ministerio de Economía y Finanzas (MEF) y el Ministerio del Ambiente (MINAM) del Perú. A través de este proyecto, el IGP ha mejorado y ampliado sus redes de monitoreo con modernos instrumentos geofísicos y con telemetría digital en los 12 volcanes de mayor riesgo del sur de Perú (Tabla 1). El proyecto permitió monitorear más volcanes e implementar otros métodos de monitoreo. En agosto de 2019, se creó oficialmente el Centro Vulcanológico Nacional (CENVUL), adscrito al OVS, para continuar con el programa de monitoreo y la evaluación de peligros volcánicos. El CENVUL, es el servicio oficial del Estado peruano encargado de monitorear y proporcionar alertas tempranas de futuras erupciones en el país a los gestores de emergencias, funcionarios públicos y público en general. Este es uno de los proyectos más ambiciosos desarrollados por el IGP y el Gobierno peruano en los últimos años, el cual también incluye la



VOLCANES ACTIVOS DEL PERÚ

CUSCO	AYACUCHO	AREQUIPA	MOQUEGUA	TACNA
<p>1.- Quimsachata</p>	<p>2.- Cerro Auquihuato 3.- Sara Sara</p>	<p>4.- Coropuna 5.- Andahua 6.- Huambo 7.- Sabancaya 8.- Chachani 9.- Misti</p>	<p>10.- Ubinas 11.- Huaynaputina 12.- Ticsani</p>	<p>13.- Tutupaca 14.- Yucamane 15.- Cerros Purupuruni 16.- Casiri</p>



Figura 1: Mapa del sur de Perú y ubicación de los volcanes activos y potencialmente activos. Los triángulos rojos representan los volcanes monitoreados. Los triángulos azules representan los volcanes que no están siendo monitoreados actualmente. Del 1 al 16 los siguientes volcanes son: 1) Quimsachata, 2) Auquihuato, 3) Sara Sara, 4) Coropuna, 5) Yahua, 6) Huambo, 7) Sabancaya, 8) Chachani, 9) Misti, 10) Ubinas, 11) Huaynaputina, 12) Ticsani, 13) Tutupaca, 14) Yucamane, 15) Purupuruni y 16) Casiri.

construcción de un edificio moderno (en fase de finalización) en el distrito de Sachaca, Arequipa.

2 MONITOREO

El monitoreo de volcanes implica la integración de una serie de disciplinas para conocer una reactivación o erupción volcánica. Por ello, el CENVUL hace uso de técnicas de sismología, deformación del suelo, geoquímica de gases, cámaras de video, infrasonido y satelitales para detectar precursores de erupciones con el fin de brindar alertas y prestar asesoramiento científico oportuno a las autoridades civiles. De los 16 volcanes pe-

ruanos catalogados como activos o potencialmente activos, actualmente 12 son monitoreados por el CENVUL. Dada la variedad de tipos de volcanes y peligros volcánicos en Perú [Macedo Sánchez et al. 2016], el nivel de monitoreo difiere de un volcán a otro, tal como se describe en la [Tabla 1](#). Las señales digitales de 24 bits se transmiten por radio telemetría UHF al CENVUL en donde son adquiridos por diferentes sistemas de adquisición de datos. La implementación de redes de monitoreo continúa hoy en día, y se contempla realizar el monitoreo de los 16 volcanes en el futuro.

Tabla 1: Distribución de los sensores de monitoreo permanente en los volcanes peruanos operados por el IGP. A excepción de los sensores DOAS e Infrasonido, todos ellos cuentan con telemetría.

Volcán	Instrumento							Total
	Sismómetro	Inclinómetro	Cámaras	GPS	DOAS	Infrasonido	Multi-Gas	
Sabancaya	7	–	4	2	2	–	1	16
Ubinas	7	3	3	2	2	1	1	19
Ticsani	5	1	1	–	–	–	–	7
Misti	6	–	2	1	–	–	–	9
Coropuna	5	2	1	–	–	–	–	8
Yucamane	3	2	1	–	–	–	–	6
Sara-Sara	2	1	1	–	–	–	–	4
Tutupaca	3	1	–	–	–	–	–	4
Huaynaputina	3	1	–	–	–	–	–	4
Casiri	2	1	–	–	–	–	–	3
Cerro Auqui huato	1	1	–	–	–	–	–	2
Chachani	1	1	–	–	–	–	–	2

2.1 Métodos de monitoreo empleados

2.1.1 Red sísmica

El monitoreo sísmico en los volcanes peruanos se remonta a la década de los 90s, cuando entró en funcionamiento la primera red sísmica en el volcán Sabancaya. En la actualidad, el CENVUL opera 45 estaciones sísmicas que se distribuyen en 12 volcanes, seis de estas son de periodo corto (Lennartz 3DLite) y 39 son sismómetros de banda ancha (3 son Guralp 40T, 4 son Guralp 3ESP y 32 son Trillium Compact 120). Todas estas estaciones sísmicas cuentan con telemetría. El número de estaciones en cada volcán depende de sus niveles de actividad. Por ejemplo, Ubinas y Sabancaya tienen siete estaciones sísmicas (Figura 2), mientras que los volcanes Casiri y Chachani tienen una estación cada uno debido a su bajo nivel de actividad. Además, utilizamos datos de la Red Sísmica Nacional (RSN) de Perú (operada por IGP) para reforzar el monitoreo volcánico de todos los volcanes activos en Perú, y viceversa. Por su parte, los sismómetros desplegados en los volcanes complementan a la red sísmica nacional para el análisis de terremotos regionales.

2.1.2 Deformación del terreno

El CENVUL utiliza diferentes métodos para detectar la deformación del suelo de los flancos de los volcanes. Estos incluyen: Sistema de Navegación por Satélite Global (GNSS, por sus siglas en inglés), inclinómetros, Medición Electrónica de Distancia (EDM, por sus

siglas en inglés) y mediciones mediante el uso de imágenes satelitales. Debido al nivel de actividad y riesgo volcánico, cinco unidades GNSS con telemetría (receptor Trimble NetR9 con antena choke ring) están distribuidos en los volcanes Sabancaya, Ubinas y Misti que registran datos a intervalos de 30 s y 0.2 s para transmisión telemétrica y almacenamiento in situ, respectivamente. Estos equipos vienen operando desde el 2018. Además, se utilizan dos equipos GNSS temporales (Trimble R10) para mediciones periódicas de campo, en un total de 37 puntos distribuidos en 12 volcanes. Además, el CENVUL cuenta con 14 inclinómetros análogos con telemetría (con $\pm 0,46$ grados de rango dinámico) distribuidos en 10 volcanes, y una estación total Leica® empleada para medir de manera temporal los desplazamientos horizontales en los volcanes Misti, Ubinas y Sabancaya. Además, empleamos la técnica de interferometría de radar (InSAR), utilizando las imágenes del radar Sentinel-1 para monitorear periódicamente todos los volcanes.

2.1.3 Geoquímica de gases

El CENVUL utiliza espectroscopia de absorción óptica diferencial (mini-DOAS), cámaras ultravioletas (UV) y un analizador Multi-GAS para el monitoreo de las emisiones de gases volcánicos (SO_2 , H_2S y CO_2). En los volcanes Ubinas y Sabancaya se han instalado dos estaciones Multi-GAS con telemetría para medir las tasas y concentraciones de gases volcánicos a lo largo del tiempo. Recientemente, se adquirieron cuatro cámaras UV y seis mini-DOAS. Las cámaras UV vienen siendo

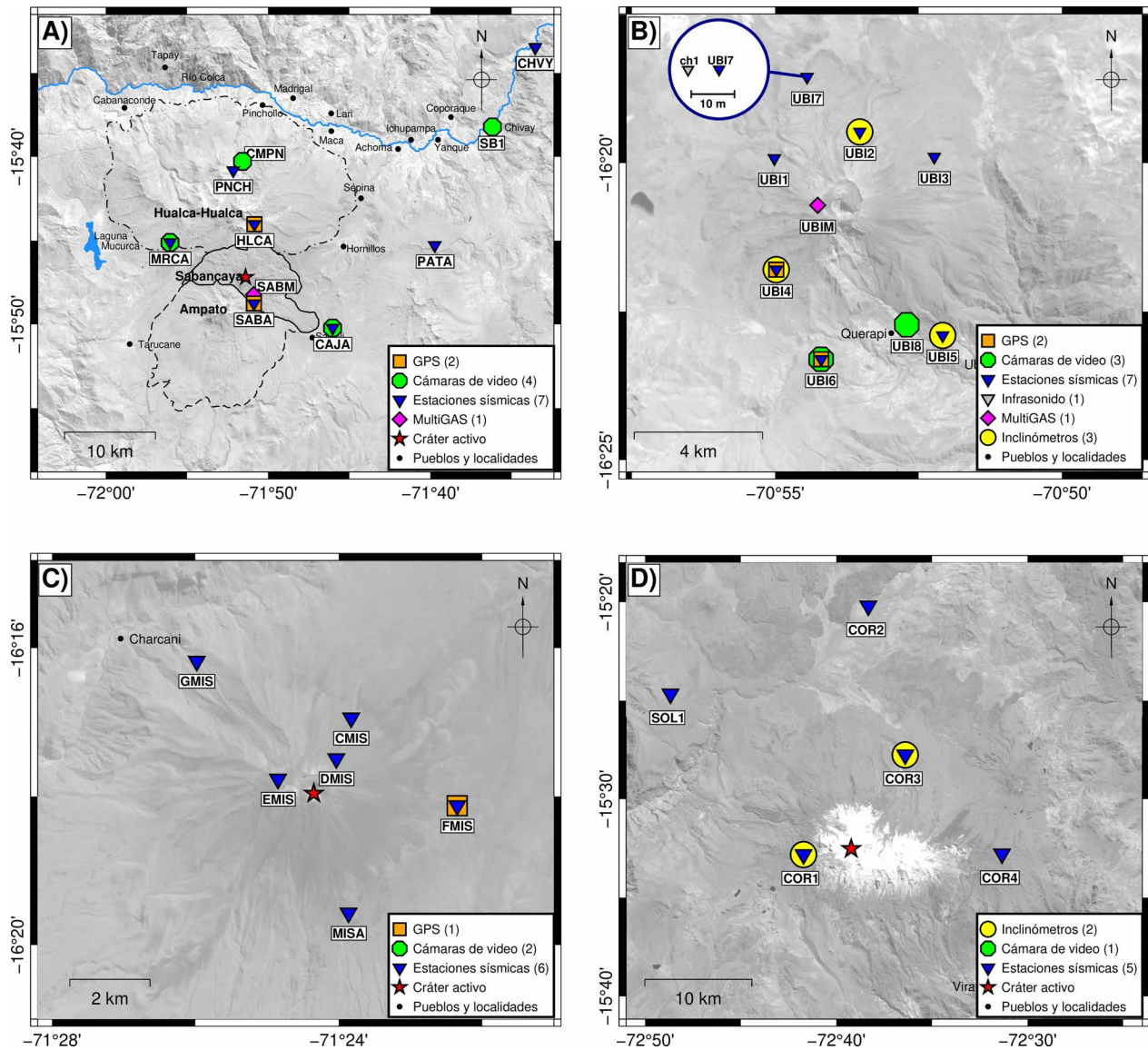


Figura 2: Mapas de la red de monitoreo instrumental operada por CENVUL en los cuatro volcanes de mayor riesgo de Perú: [A] Sabancaya, [B] Ubinas, [C] Misti y [D] Coropuna. La línea negra en a) indica el área del volcán Sabancaya. Algunas cámaras de video están situadas fuera del mapa. Todos los sensores, a excepción del sensor de infrasonido en [B], transmiten sus señales vía telemétrica a Arequipa.

utilizadas en campañas de campo (al menos dos veces al año), mientras que los mini-DOAS con telemetría se instalarán en un futuro próximo.

2.1.4 Cámaras de video

El CENVUL cuenta con 13 cámaras distribuidas en siete volcanes, que proporcionan una imagen cada 30 o 60 segundos, dependiendo del nivel de actividad de cada volcán. Gracias a estas cámaras, se monitorea la altura de las columnas eruptivas, la dispersión de ceniza y características de productos emitidos desde el cráter. En los volcanes Ubinas y Sabancaya se han instalado cámaras de video ubicadas muy cerca de las principales quebradas para el monitoreo del descenso de lahares. Asimismo, monitoreamos los volcanes a través de cá-

maras térmicas portátiles (FLIR T1020), las cuales nos ayudan a observar la dinámica de las explosiones, el rango de temperaturas de los bloques balísticos y cambios de morfología del cráter, especialmente de noche.

2.1.5 Infrasonido

El CENVUL ha iniciado la vigilancia de volcanes con sensores de infrasonido. Por el momento, debido al alto grado de recurrencia de las erupciones y estilo explosivo, se cuenta solo con un sensor de infrasonido sin telemetría en el volcán Ubinas. Sin embargo, gracias al apoyo del Programa de Asistencia para Desastres de Volcanes (VDAP, por sus siglas en inglés) del USGS, pronto se instalará en este volcán un arreglo de infrasonido de 5 elementos con telemetría.

2.1.6 Observaciones por sensores remotos

El CENVUL utiliza la teledetección por satélite para el monitoreo de volcanes a escala local y regional. Los parámetros monitoreados incluyen el flujo de SO₂, detección de puntos calientes en el cráter, dispersión de cenizas, cambios topográficos y deformación del terreno. Por ejemplo, para detectar los cambios topográficos y el emplazamiento de domos de lava en el cráter del volcán Sabancaya, empleamos imágenes Sentinel-2 Playground, de 13 bandas, obtenida cada cinco días; así mismo empleamos imágenes Planet obtenida cada día, también imágenes del satélite PERUSAT-1 y fotografías tomadas con drones (en campañas). Para el seguimiento de las columnas de ceniza de las erupciones, utilizamos imágenes meteorológicas (por ejemplo, SEVIRI, GOES y MTSAT). Para detectar anomalías térmicas, utilizamos el sistema MIROVA (Middle InfraRed Observations of Volcanic Activity) de la Universidad de Torino, que se basa en el análisis de los datos infrarrojos adquiridos por el sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), y utiliza la radiación infrarroja media (MIR, por sus siglas en inglés) registrada con una resolución de 1 km² para detectar, localizar y medir el calor irradiado por cuerpos calientes (flujo de lava, domo, etc.) en MW [Coppola et al. 2015]. Los flujos de SO₂ se obtienen a través de plataformas, como el sistema MOUNTS y también procesando datos de TROPOMI a través de Google Earth Engine. Estos datos se actualizan diariamente y se correlacionan con los métodos de monitoreo en tierra (Figura 3).

2.2 Personal del observatorio vulcanológico

El personal del CENVUL está compuesto por 24 científicos y técnicos especializados en diferentes disciplinas como: geología y evaluación de riesgos (dos geólogos), monitoreo de volcanes (seis sismólogos, dos geodestas, dos especialistas en teledetección), apoyo técnico (tres ingenieros electrónicos, dos técnicos en electrónica e informática) y apoyo administrativo (cuatro profesionales y tres conductores). Además, contamos con el apoyo administrativo, logístico y tecnológico del personal del IGP en Lima.

2.3 Acceso y almacenamiento de datos

El CENVUL recopila datos en tiempo casi real de sus instrumentos sísmicos, GPS, inclinómetros, infrasonidos, cámaras de video y multi-GAS. Toda la información es almacenada en una base de datos que utiliza MySQL. En el caso de los datos sísmicos, por ejemplo, la adquisición y el procesamiento de los datos son realizados por varios módulos de Earthworm [Friberg et al. 2010], a través del protocolo RTPD (Real Time Protocol Daemon) en un servidor DELL Power Edge R320. Además, utilizamos el software Winston para almace-

nar los datos a largo plazo y SEISCOMP3 para el preprocesamiento. Solo el personal encargado del monitoreo puede acceder a los datos brutos a nivel local y a distancia, sin embargo, las solicitudes de acceso se pueden realizar a través del Centro Nacional de Datos Geofísicos (CNDG). En el caso de convenios de investigación, el acceso a la información es libre para todos los miembros del equipo.

3 GESTIÓN DEL RIESGO VOLCÁNICO

Los volcanes en Perú proporcionan grandes beneficios, pero también amenazan las comunidades asentadas en áreas aledañas. En la actualidad, cerca de 1,4 millones de personas viven en zonas expuestas al riesgo volcánico. Por ello, la evaluación y la gestión del riesgo volcánico son preocupaciones científicas, económicas y políticas importantes en estas regiones. Desde el 2011, la gestión del riesgo de desastres en Perú está regida por el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SINAGERD). El SINAGERD tiene como miembros operativos al Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI) y el Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED). El INDECI es responsable de implementar las acciones de preparación y respuesta, mientras que el CENEPRED es encargado de la reducción del riesgo de desastres. El INDECI es responsable de la Red Nacional de Alerta Temprana (RNAT), que incluye los peligros volcánicos. La RNAT tiene cuatro componentes: (1) conocimiento del riesgo, (2) monitoreo y alerta, (3) difusión y comunicación, y (4) capacidad de respuesta. El CENVUL contribuye a los dos primeros elementos de la RNAT.

Los mapas de peligro volcánico son un componente común de las alertas volcánicas. Es por ello, que entre 1990 y 2003, el IGP, en colaboración con el IRD, elaboró los primeros mapas de peligro volcánico del Misti [Thouret et al. 1995; Suni 1999; Thouret et al. 2001], del Ubinas [Rivera et al. 1998], del Sabancaya [Thouret et al. 1994], y del volcán Ticsani [Mariño Salazar y Thouret 2003], basándose en estudios geológicos enfocados en reconstruir la cronología eruptiva de los volcanes y en evaluar el peligro volcánico. En la actualidad, los mapas de peligro son elaborados principalmente por el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET). Estos mapas (los oficiales y los anteriores) muestran tres zonas de peligro representado en colores: el color rojo corresponde a las zonas de peligro alto, el color naranja a las zonas de peligro moderado y el color amarillo a las zonas de peligro bajo. Estos mapas se utilizan como herramientas de comunicación para la educación y la planificación, proporcionando información sobre las zonas con mayor probabilidad de ser afectadas, por ejemplo, por caída de ceniza, por flujos piroclásticos y otros peligros.

El monitoreo y alerta son componentes esenciales de la RNAT, por ello, el CENVUL ha ido fortaleciendo

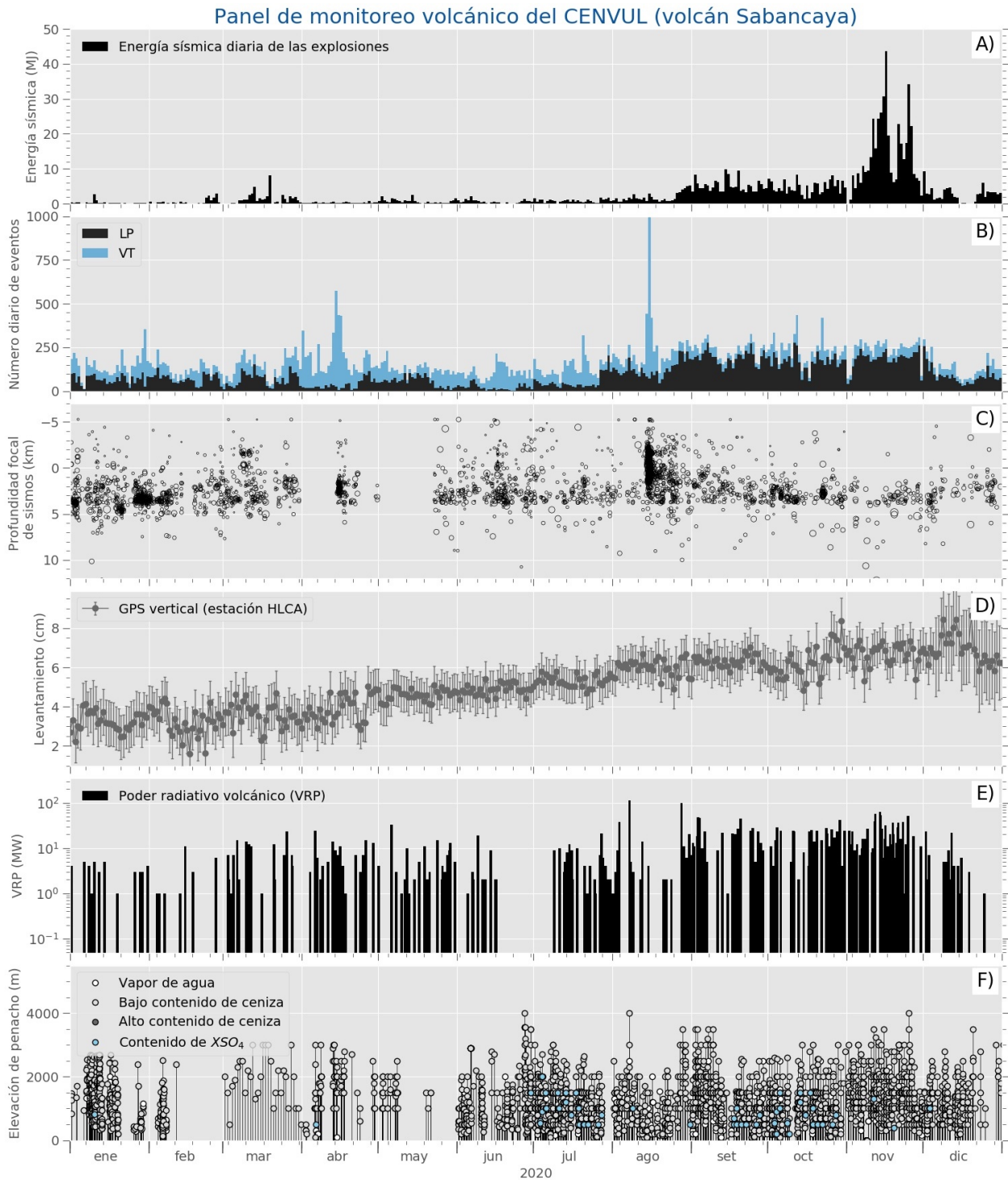


Figura 3: Ejemplo de Dashboard con los principales datos multiparamétricos obtenidos del volcán Sabancaya durante el 2020. [A] Energía sísmica diaria de las explosiones. [B] Recuento diario de eventos sísmicos. [C] Profundidad focal de la sismicidad volcano-tectónico. [D] Elevación de la componente vertical del GPS localizado en la estación HLCA (Figura 2A). [E] Anomalía térmica satelital medida por el Poder Radiativo Volcánico (VRP, por sus siglas en inglés). [F] Elevación de las columnas eruptivas con su respectivo contenido de ceniza.

y aumentando el monitoreo en los volcanes de mayor riesgo en Perú. Los datos recolectados por el CENVUL proporcionan información oportuna y precisa sobre el comportamiento volcánico, además de ayudar a prevenir erupciones inminentes e identificar los impactos en la comunidad. El CENVUL tiene el mandato de propor-

cionar información oficial (informes, boletines y alertas) de la actividad volcánica a los funcionarios locales, regionales y nacionales, y a la población en general. El CENVUL, a través de su programa de Gestión del Conocimiento, ayuda a las autoridades a elaborar planes de acción de mitigación necesarios para reducir el ries-

go volcánico. Todas estas acciones contribuyen en los planes de gestión del riesgo volcánico en el Perú, hacia la protección de la vida y la propiedad ante los eventos volcánicos.

4 DIFUSIÓN Y DIVULGACIÓN DE INFORMACIÓN

El CENVUL genera boletines periódicos, alertas y avisos sobre los cambios de actividad de los 12 volcanes monitoreados en el sur del Perú. Una vez emitidos, estos productos son entregados inmediatamente a la jefatura nacional del INDECI, el Centro de Operaciones de Emergencia Nacional (COEN), y localmente a los gobiernos regionales y a las direcciones descentralizadas del INDECI, dependiendo de donde se encuentren ubicados los volcanes. Entre 2013 y 2017, los informes vulcanológicos fueron emitidos por un comité conjunto integrado por el IGP, INGEMMET y UNSA. Sin embargo, desde 2019, la información oficial es emitida por el CENVUL.

4.1 Boletines y alertas volcánicas

4.1.1 Boletines de actividad volcánica

Los boletines de actividad volcánica son documentos técnicos-científicos que contienen información basada en el análisis y la interpretación de datos multiparamétricos que describen la actividad de un volcán en un periodo determinado. Los boletines son emitidos regularmente durante un período determinado (por ejemplo, semanal o mensualmente), en función del nivel de actividad volcánica*. Estos boletines son breves y simples, escritos con un lenguaje sencillo, dirigido al público en general, y a las autoridades e instituciones técnicas que forman parte del SINAGERD.

4.1.2 Alertas de caída de ceniza

Las alertas de caída de ceniza son comunicados enviados por el CENVUL que describen la ocurrencia de explosiones o erupción explosiva, en caso que las columnas de ceniza superen los 2000 m de altura sobre el nivel del cráter del volcán. Indican la dirección de la dispersión de las cenizas y las posibles zonas urbanas afectadas. Estas alertas sólo están disponibles en periodos de crisis volcánica, o cuando un volcán está en erupción. Las mismas son enviadas al *Volcanic Ash Advisory Centre* (VAAC) regional, y a las autoridades locales que forman parte del sistema de gestión de riesgos de desastres.

4.1.3 Alertas de lahar

Los lahares se producen con frecuencia durante la temporada de lluvias en los volcanes Misti, Ubinas, Huay-

naputina y Sabancaya, afectando a los valles situados aguas abajo. El CENVUL diseñó un sistema de detección y alerta de lahares basado en el procesamiento de datos sísmicos y cámaras de video. Tanto las estaciones sísmicas como cámaras de video se encuentran instaladas en las zonas de la cuenca superior, donde suelen generarse los lahares. Una vez detectado el lahar, se emite de manera automática un mensaje a las autoridades de Defensa Civil local y regional. Estas alertas advierten el descenso de lahar por las quebradas del volcán, indicando el nombre de la quebrada por el que desciende el lahar y las zonas urbanas posiblemente a ser afectadas.

4.1.4 Niveles de alerta volcánica

El sistema de niveles de alerta volcánica (VAL, por sus siglas en inglés) es un medio eficaz de comunicación sobre los diferentes niveles de actividad de un determinado volcán y las medidas generales de prevención que la población y sus autoridades deben adoptar para proteger su integridad. En el Perú, el sistema VAL consiste en un esquema de "semáforo" de colores, que va desde verde (nivel bajo) hasta rojo (nivel alto) y que se corresponde con un nivel de actividad de un volcán y las medidas a tomar, siguiendo las prácticas de otros observatorios vulcanológicos del mundo [Gardner y Guffanti 2006]. Sin embargo, los umbrales para determinar un nivel de actividad difieren de un volcán a otro. El nivel verde corresponde a un estado normal, no-eruptivo, mientras que el nivel amarillo corresponde a un incremento de la actividad volcánica, y el nivel naranja corresponde a un aumento de la actividad volcánica, con: actividad sísmica recurrente, altura de las columnas eruptivas superior a 3000 m, caída constante de cenizas, explosiones frecuentes que pueden expulsar bloques balísticos. El nivel rojo corresponde a una actividad volcánica crítica con riesgo inminente de una erupción mayor, con la ocurrencia de sismos intensos y prolongados, eyección constante de bloques balísticos y emisión de ceniza, formación de columnas eruptivas >4 km de altura, y la formación de corrientes de densidad piroclástica (PDC, por sus siglas en inglés) que pueden alcanzar distancias superiores a 5 km. El IGP comunica periódicamente a las autoridades de defensa civil de los gobiernos regionales y locales el estado de actividad de los volcanes sugiriendo el nivel de alerta volcánica. En caso que un volcán muestre signos de reactivación o incremento de actividad, el CENVUL emite un boletín o informe recomendando a las autoridades de defensa civil de los gobiernos regionales el cambio de nivel de alerta, ya que ellas son las encargadas de asistir a los pobladores de las localidades en riesgo.

4.1.5 Divulgación

El CENVUL genera diversos materiales educativos (folletos, cuadernillos, trípticos, etc.) para los funcionarios y público en general. Estos se diseñan con un lengua-

*<https://www.igp.gob.pe/servicios/centro-vulcanologico-nacional/productos-boletines>

je sencillo y se entregan durante las visitas al OVS que realizan los estudiantes, autoridades y grupos comunitarios. También se entregan en eventos de difusión que realiza el OVS como: charlas de capacitación, conferencias, simulacros de evacuación, ferias científicas, etc. La solicitud de estos materiales debe realizarse contactando al IGP a través del correo electrónico oficial. Adicionalmente, para el intercambio de conocimiento en materia de riesgo volcánico, el IGP organiza frecuentemente foros, seminarios y talleres.

4.2 Canales de comunicación

El CENVUL difunde los boletines y alertas a través de diferentes canales de comunicación. (1) Correo electrónico oficial*. (2) El aplicativo móvil VOLCANES PERÚ (Android e iOS). A través de esta aplicación se emiten notificaciones cada vez que un nuevo boletín es publicado. (3) En la página web se publica la información obtenida de los diferentes métodos de monitoreo†. En el sitio web también se publican las últimas notificaciones emitidas sobre la actividad volcánica y los boletines publicados. (4) Redes sociales del IGP: Facebook‡ y Twitter§, y (5) el WhatsApp, a través del cual se envía información sobre la actividad volcánica, principalmente a las autoridades y representantes de diversas instituciones públicas. Además, este último se utiliza para la comunicación con los pobladores de las localidades cercanas a los volcanes que presentan actividad eruptiva, para el intercambio de información a través de imágenes, videos y documentos.

La información del monitoreo volcánico se envía a la jefatura nacional del INDECI y a los directores de las direcciones descentralizadas del INDECI de las regiones de Ayacucho, Arequipa, Moquegua y Tacna, según el volcán monitoreado. Los boletines también son enviados a los gobernadores regionales y los responsables del Centro de Operaciones de Emergencia Regional (COER) de cada región.

5 COOPERACIÓN CON INSTITUCIONES PÚBLICAS PARA LA GESTIÓN DE RIESGO DE DESASTRES

El CENVUL coopera con los organismos gubernamentales nacionales, regionales y locales para difundir información sobre los peligros y riesgos volcánicos. Las alertas emitidas por el CENVUL son enviadas a la RNAT y a las agencias que las conforman. El INDECI es el responsable de la gestión de emergencias en el Perú, brindando asesoría técnica en los procesos de prevención, respuesta y rehabilitación de desastres naturales. También proporciona asistencia técnica a las autoridades

competentes en los diferentes niveles. En base a las alertas emitidas se establecen mecanismos de respuesta por parte de las agencias encargadas de la gestión del riesgo. El CENVUL mantiene una estrecha colaboración con los Centros de Operaciones de Emergencia Locales y Regionales (COEL y COER, respectivamente). La toma de decisión de estos organismos se realiza a partir de la información técnico-científica emitida por el CENVUL, para adoptar medidas en beneficio de la población (cambio del nivel de alerta volcánica, posibles evacuaciones de pobladores, solicitud de declaración de estado de emergencia, elaboración de planes de emergencia, etc.).

6 NECESIDADES, RETOS Y PERSPECTIVAS FUTURAS

El CENVUL es un servicio emergente del IGP adscrito al OVS. Actualmente, se están llevando a cabo mejoras de las redes de monitoreo, para lo cual se están instalando nuevos equipos de monitoreo multiparamétrico. Sin embargo, una de las principales necesidades es la adquisición de más equipos para completar el monitoreo de los 16 volcanes activos o potencialmente activos del sur peruano. El principal desafío en el futuro cercano para el CENVUL será la integración de los diferentes métodos de monitoreo, como el sísmico, geodésico, geoquímico, visual, inclinómetro, infrasonido y teledetección para una mejor caracterización de la actividad volcánica y el pronóstico de erupciones, así como la automatización en el tratamiento de todas las señales provenientes del monitoreo de volcanes.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los directores del IGP por su valioso apoyo en los trabajos de monitoreo. Agradecemos al Ing. H. Palza por su apoyo como exdirector del OVS, al equipo de Redes Geofísicas (D. Portugal, R. Chijcheapaza, W. Alvarado, J. Añamuro, M. Ramos, V. Montesinos) por su apoyo en la recolección de datos y mantenimiento de instrumentos en los volcanes, a R. Rivera y N. Limachi por su apoyo administrativo. Los autores agradecen a los expertos que revisaron el informe y proporcionaron valiosos comentarios.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

R.M. y M.R. redactaron el manuscrito, M.R. y L.M. escribieron acerca de la gestión de los peligros volcánicos. J.D.C. y J.C. redactaron acerca de la difusión de la información. H.T. escribió la historia del IGP. R.M., J.D.C., I.L., R.C., N.P., J.T., K.V., J.C. y L.V. escribieron acerca de las redes de monitoreo y proporcionaron información para la Tabla 1, Figura 1, y Figura 2. A.M. y J.V. escribieron el almacenamiento y acceso de datos, y ade-

* cenvul@igp.gob.pe

† <http://www.igp.gob.pe/servicios/centro-vulcanologico-nacionaleruptions>

‡ <https://www.facebook.com/igp.peru>

§ https://twitter.com/igp_peru

más proporcionaron información para la [Tabla 1](#). Todos los autores revisaron el manuscrito final.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los datos están disponibles a través de la página web del CENVUL (<https://www.igp.gob.pe/servicios/centro-vulcanologico-nacional/>), y a través del autor de correspondencia previa solicitud razonable.

DERECHOS DE AUTOR

© Autor(es) 2021. Este artículo se distribuye bajo los términos de la [Creative Commons Attribution 4.0 Licencia internacional](#), que permite el uso sin restricciones, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre y cuando se dé el crédito apropiado al/los autor(es) original(es) y la fuente, proporcionando un enlace a la Creative Commons License, e indicando si se realizaron cambios.

REFERENCIAS

- Aguilar, R. (2015). "Long-lived magmatic systems: the post-caldera Chachani volcanic complex case study (Peru)". Master's thesis. Université Blaise Pascal, págs. 1-56.
- Bromley, G. R., J.-C. Thouret, I. Schimmelpfennig, J. Mariño, D. Valdivia, K. Rademaker, S. d. P. V. Lopez, G. Aumaitre, D. Bourles, K. Keddadouche et al. (2019). "In situ cosmogenic ^3He and ^{36}Cl and radiocarbon dating of volcanic deposits refine the Pleistocene and Holocene eruption chronology of SW Peru". *Bulletin of Volcanology* 81 (11), págs. 1-16. doi: [10.1007/s00445-019-1325-6](https://doi.org/10.1007/s00445-019-1325-6).
- Cobeñas, G., J.-C. Thouret, C. Bonadonna y P. Boivin (2012). "The c. 2030 yr BP Plinian eruption of El Misti volcano, Peru: eruption dynamics and hazard implications". *Journal of volcanology and geothermal research* 241, págs. 105-120. doi: [10.1016/j.jvolgeores.2012.06.006](https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2012.06.006).
- Coppola, D., O. Macedo, D. Ramos, A. Finizola, D. Delle Donne, J. Del Carpio, R. White, W. McCausland, R. Centeno, M. Rivera et al. (2015). "Magma extrusion during the Ubinas 2013–2014 eruptive crisis based on satellite thermal imaging (MIROVA) and ground-based monitoring". *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 302, págs. 199-210. doi: [10.1016/j.jvolgeores.2015.07.005](https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.07.005).
- De Silva, S. L. y P. Francis (1991). *Volcanoes of the central Andes*. Vol. 219. Springer-Verlag Berlin. doi: [10.1111/j.1365-246X.1992.tb00726.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1992.tb00726.x).
- Fidel Smoll, L., W. Morche y S. Núñez Juárez (1997). "Inventario de volcanes del Perú. Proyecto: Album de mapas de riesgos volcánicos de las principales ciudades del Suroeste del Perú". INGEMMET. *Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica* 15, págs. 1-79.
- Friberg, P., S. Lisowski, I. Dricker y S. Hellman (2010). "Earthworm in the 21st century". *EGU General Assembly Conference Abstracts*. EGU General Assembly Conference Abstracts, pág. 12654.
- Gardner, C. A. y M. C. Guffanti (2006). "US Geological Survey's alert notification system for volcanic activity". *USGS Fact Sheet* 2006-3139. doi: [10.3133/fs20063139](https://doi.org/10.3133/fs20063139).
- Gerbe, M.-C. y J.-C. Thouret (2004). "Role of magma mixing in the petrogenesis of tephra erupted during the 1990–98 explosive activity of Nevado Sabancaya, southern Peru". *Bulletin of Volcanology* 66 (6), págs. 541-561. doi: [10.1007/s00445-004-0340-3](https://doi.org/10.1007/s00445-004-0340-3).
- Harpel, C. J., S. de Silva y G. Salas (2011). *The 2 ka Eruption of Misti Volcano, Southern Peru – The Most Recent Plinian Eruption of Arequipa's Iconic Volcano*. Geological Society of America. doi: [10.1130/SPE484](https://doi.org/10.1130/SPE484).
- Inza, L. A., J.-P. Métaxian, J. I. Mars, C. J. Bean, G. S. O'Brien, O. Macedo y D. Zandomenighi (2014). "Analysis of dynamics of vulcanian activity of Ubinas volcano, using multicomponent seismic antennas". *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 270, págs. 35-52. doi: [10.1016/j.jvolgeores.2013.11.008](https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2013.11.008).
- Kumar, A., L. S. Wagner, S. L. Beck, M. D. Long, G. Zandt, B. Young, H. Tavera y E. Minaya (2016). "Seismicity and state of stress in the central and southern Peruvian flat slab". *Earth and Planetary Science Letters* 441, págs. 71-80. doi: [10.1016/j.epsl.2016.02.023](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.02.023).
- Macedo Sánchez, O., E. L. Taípe Maquerhua, J. A. Del Carpio, J. Ticona Paucara, D. A. Ramos Palomino, N. Puma, V. Aguilar Purhuaya, R. Machacca Puma, J. L. Torres, C. Sandoval et al. (2016). "Evaluación del riesgo volcánico en el sur del Perú, situación de la vigilancia actual y requerimientos de monitoreo en el futuro. Informe técnico". *Informes Técnicos Instituto Geofísico del Perú (IGP)* 105, págs. 1-75.
- Macedo, O., J.-P. Métaxian, E. Taípe, D. Ramos y A. Inza (2009). "VOLUME project: volcanoes understanding subsurface mass movement". Ed. por C. Bean, A. Braidon, I. Lokmer, F. Martini y G. O'Brien. Cap. Seismicity associated with the 2006-2008 eruption, Ubinas volcano, págs. 262-270.
- Mamani, M., G. Wörner y T. Sempere (2010). "Geochemical variations in igneous rocks of the Central Andean orocline (13°S to 18°S): Tracing crustal thickening and magma generation through time and space". *GSA Bulletin* 122 (1-2), págs. 162-182. doi: [10.1130/B26538.1](https://doi.org/10.1130/B26538.1).
- Manrique, N., P. Samaniego, E. Médard, F. Schiavi, J. Mariño y C. Liorzou (2020). "Pre-eruptive magmatic processes associated with the historical (218±14 aBP) explosive eruption of Tutupaca volcano (southern Peru)". *Bulletin of Volcanology* 82 (1), págs. 1-25. doi: [10.1007/s00445-019-1335-4](https://doi.org/10.1007/s00445-019-1335-4).

- Mariño Salazar, J. (2002). “Estudio geológico vulcanológico y evaluación de peligros del volcán Ticsani (sur del Perú)”. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.
- Mariño Salazar, J. y J.-C. Thouret (2003). “Geología, historia eruptiva y evaluación de peligros del volcán Ticsani (sur del Perú)”. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú* 95, págs. 7-31.
- Newhall, C. G. y S. Self (1982). “The volcanic explosivity index (VEI) an estimate of explosive magnitude for historical volcanism”. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 87 (C2), págs. 1231-1238. DOI: 10.1029/JC087iC02p01231.
- Prival, J.-M., J.-C. Thouret, S. Japura, L. Gurioli, C. Bonadonna, J. Mariño y K. Cueva (2020). “New insights into eruption source parameters of the 1600 CE Huaynaputina Plinian eruption, Peru”. *Bulletin of Volcanology* 82 (1), págs. 1-19. DOI: 10.1007/s00445-019-1340-7.
- Rivera Porras, M. A., K. A. Cueva Sandoval, J.-L. Le Pennec, J. C. Vela Valdez, P. Samaniego Eguiguren, N. Manrique Llerena e Y. H. Soncco Calsina (2020). “Geología y evaluación de peligros del volcán Sara Sara (Ayacucho)”. *INGEMMET. Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica* 78.
- Rivera, M., J. Thouret y A. Gourgaud (1998). “Ubinas, el volcán más activo del sur del Perú desde 1550: Geología y evaluación de las amenazas volcánicas”. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú* 88, págs. 53-71.
- Rivera, M., P. Samaniego, J. Vela, J.-L. Le Pennec, H. Guillou, J.-L. Paquette y C. Liorzou (2020). “The eruptive chronology of the Yucamane-Calientes compound volcano: A potentially active edifice of the Central Andes (southern Peru)”. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 393, pág. 106787. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2020.106787.
- Rivera, M., J.-C. Thouret, J. Mariño, R. Berolatti y J. Fuentes (2010). “Characteristics and management of the 2006–2008 volcanic crisis at the Ubinas volcano (Peru)”. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 198 (1-2), págs. 19-34. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2010.07.020.
- Rivera, M., J.-C. Thouret, P. Samaniego y J.-L. Le Pennec (2014). “The 2006–2009 activity of the Ubinas volcano (Peru): Petrology of the 2006 eruptive products and insights into genesis of andesite magmas, magma recharge and plumbing system”. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 270, págs. 122-141. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2013.11.010.
- Samaniego, P., M. Rivera, J. Mariño, H. Guillou, C. Liorzou, S. Zerathe, R. Delgado, P. Valderrama y V. Scao (2016). “The eruptive chronology of the Ampato–Sabancaya volcanic complex (Southern Peru)”. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 323, págs. 110-128. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2016.04.038.
- Samaniego, P., P. Valderrama, J. Mariño, B. v. W. de Vries, O. Roche, N. Manrique, C. Chédeville, C. Liorzou, L. Fidel y J. Malnati (2015). “The historical (218±14 aBP) explosive eruption of Tutupaca volcano (Southern Peru)”. *Bulletin of Volcanology* 77 (6), págs. 1-18. DOI: 10.1007/s00445-015-0937-8.
- Sébrier, M. y P. Soler (1991). “Tectonics and magmatism in the Peruvian Andes from late Oligocene time to the present”. *Geological Society of America Special Paper* 265, págs. 259-278. DOI: 10.1130/SPE265-p259.
- Siebert, L., T. Simkin y P. Kimberly (2011). *Volcanoes of the World*. Univ of California Press.
- Suni, J. (1999). “Estudio geológico y vulcanológico del volcán Misti y sus alrededores”. Geological engineer thesis (unpublished).
- Thouret, J.-C., E. Juvigné, A. Gourgaud, P. Boivin y J. Dávila (2002). “Reconstruction of the AD 1600 Huaynaputina eruption based on the correlation of geologic evidence with early Spanish chronicles”. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 115 (3-4), págs. 529-570. DOI: 10.1016/S0377-0273(01)00323-7.
- Thouret, J.-C., J. Davila y J.-P. Eissen (1999). “Largest explosive eruption in historical times in the Andes at Huaynaputina volcano, AD 1600, southern Peru”. *Geology* 27 (5), págs. 435-438. DOI: 10.1130/0091-7613(1999)027<0435:L EEIHT>2.3.CO;2.
- Thouret, J.-C., A. Finizola, M. Fornari, A. Legeley-Padovani, J. Suni y M. Frechen (2001). “Geology of El Misti volcano near the city of Arequipa, Peru”. *Geological Society of America Bulletin* 113 (12), págs. 1593-1610. DOI: 10.1130/0016-7606(2001)113<1593:GOEMVN>2.0.CO;2.
- Thouret, J.-C., R. Guillande, D. Huaman, A. Gourgaud, G. Salas y J. Chorowicz (1994). “L'Activite actuelle du Nevado Sabancaya (sud Perou); reconnaissance geologique et satellitaire, evaluation et cartographie des menaces volcaniques”. *Bulletin de la Société Géologique de France* 165 (1), págs. 49-63.
- Thouret, J.-C., B. R. Jicha, J.-L. Paquette y E. H. Cubukcu (2016). “A 25 myr chronostratigraphy of ignimbrites in south Peru: implications for the volcanic history of the Central Andes”. *Journal of the Geological Society* 173 (5), págs. 734-756. DOI: 10.1144/jgs2015-162.
- Thouret, J.-C., F. Legros, A. Gourgaud, G. Salas, E. Juvigné, E. Gilot, M. Uribe y A. Rodriguez (1995). “Recent Eruptive Activity At El Misti Volcano (south Peru) – Implications for Hazard Assessment in Arequipa Area”. *Comptes rendus de l'Académie des sciences-Séries IIB-Mécanique, Physique, chimie, astronomie* 320 (10), pág. 923.
- Thouret, J.-C., M. Rivera, G. Wörner, M.-C. Gerbe, A. Finizola, M. Fornari y K. Gonzales (2005). “Ubinas: the evolution of the historically most active volcano in southern Peru”. *Bulletin of Volcanology* 67 (6), págs. 557-589. DOI: 10.1007/s00445-004-0396-0.