



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



ESTADO DEL CONOCIMIENTO SOBRE LA ACTIVIDAD DE LOS VOLCANES ACTIVOS EN AREQUIPA

Informe Técnico N°010-2023/IGP CIENCIAS DE LA TIERRA SÓLIDA



Lima – Perú
Mayo, 2023

Instituto Geofísico del Perú

Presidente Ejecutivo: Hernando Tavera

Director Científico: Edmundo Norabuena

Informe Técnico

Estado del conocimiento sobre la actividad de los volcanes activos de Arequipa

Autores

José Del Carpio
Marco Rivera
Riky Centeno
José Torres
Ivonne Lazarte
Katherine Vargas
Jorge Concha

Este informe ha sido producido por el Instituto Geofísico del Perú
Calle Badajoz 169 Mayorazgo
Teléfono: 51-1-3172300

ESTADO DEL CONOCIMIENTO SOBRE LA ACTIVIDAD DE LOS VOLCANES ACTIVOS DE AREQUIPA

Lima – Perú
Mayo, 2023

INDICE

1. INTRODUCCIÓN
2. VOLCANES ACTIVOS DE AREQUIPA
 - 2.1. VOLCÁN SABANCAYA
 - 2.1.1. Historia eruptiva del volcán Sabancaya
 - 2.1.2. Mapa de ubicación de los sistemas de monitoreo
 - 2.1.3. Caracterización del peligro volcánico y mapas de Peligro
 - 2.1.4. Acciones que viene realizando el IGP en el volcán Sabancaya
 - 2.1.5. Escenarios eruptivos del volcán Sabancaya
 - 2.2. VOLCÁN MISTI
 - 2.2.1. Historia eruptiva del volcán Misti
 - 2.2.2. Mapa de ubicación de los sistemas de monitoreo
 - 2.2.3. Caracterización del peligro volcánico y mapas de peligro
 - 2.2.4. Acciones que viene realizando el IGP en el volcán Misti
 - 2.2.5. Escenarios Eruptivos del volcán Misti
 - 2.3. VOLCÁN CHACHANI
 - 2.3.1. Historia eruptiva del volcán Chachani
 - 2.3.2. Mapa de ubicación de los sistemas de monitoreo
 - 2.3.3. Caracterización del peligro volcánico y mapas de Peligro
 - 2.3.4. Acciones que viene realizando el IGP en el volcán Chachani

2.4. VOLCÁN COROPUNA

2.4.1. Historia eruptiva del volcán Coropuna

2.4.2. Mapa de ubicación de los sistemas de monitoreo

2.4.3. Caracterización del peligro volcánico y mapas de Peligro

2.4.4. Acciones que viene realizando el IGP en el volcán Coropuna

2.5. SEMÁFORO DE ALERTA VOLCÁNICA

2.5.1. Umbrales de los parámetros geofísicos, geoquímicos, visuales y satelitales para la emisión de avisos

3. BIBLIOGRAFÍA

1. INTRODUCCIÓN

Desde 1990, el Instituto Geofísico del Perú (IGP) en virtud a su Ley de Creación n° 136, realiza el monitoreo geofísico y estudio de los volcanes activos del sur del Perú. En el año 2018, a través del proyecto PIP n.º 271840 "Mejoramiento y Ampliación del Sistema de Alerta ante el Riesgo Volcánico y del Observatorio Vulcanológico en la Macro Región Sur del Perú", financiado por el Estado peruano, el IGP implementa la nueva sede del Observatorio Vulcanológico del Sur (OVS) en el distrito de Sachaca (Arequipa), el mismo que alberga al Centro Vulcanológico Nacional (CENVUL), servicio oficial responsable del monitoreo permanente de 12 volcanes activos y potencialmente activos.

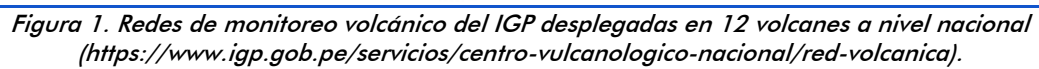
Para el monitoreo de los volcanes, el IGP utiliza 12 redes geofísicas conformadas por 48 estaciones vulcanológicas (Figura 1) que, de acuerdo con el nivel de peligrosidad volcánica, están conformados por sismómetros, estaciones GNSS, inclinómetros, videocámaras, espectrómetros DOAS, sensores de infrasonido y otros equipos instalados en cada uno de los volcanes. Este monitoreo multidisciplinario es complementado con el empleo de sistemas satelitales (SENTINEL 1 y 2, MIROVA, OMI, TROPOMI, etc.) que permiten hacer un seguimiento continuo de la actividad volcánica. En la región Arequipa, el IGP, a través del CENVUL, realiza el monitoreo de la actividad volcánica de los volcanes Misti, Sabancaya, Chachani y Coropuna, sobre los cuales operan alrededor de 20 estaciones vulcanológicas, todas ellas con la capacidad de transmisión de datos en tiempo real.

Los datos del monitoreo volcánico son procesados, analizados y plasmados en boletines y alertas vulcanológicas de fácil entendimiento que son difundidas en la página [web](#) del CENVUL

(<https://www.igp.gob.pe/servicios/centro-vulcanologico-nacional/productos-boletines>), el [aplicativo móvil](#) “Volcanes Perú” y los grupos de Whatsapp de los COE de cada región, provincia e INDECI. Asimismo, el IGP realiza talleres de inducción y capacitación a las autoridades y funcionarios de los COER de las regiones de Ayacucho, Arequipa, Moquegua y Tacna, a fin de que conozcan la actividad de los volcanes de sus regiones, tipos de peligros volcánicos e interpreten correctamente los productos de monitoreo generados por el CENVUL. Además de ello, participa en la organización de simulacros por erupción volcánica, tanto en Arequipa como en Moquegua. En caso de crisis volcánicas, el IGP asesora permanentemente a las autoridades nacionales, regionales y locales de GRD para la acertada y correcta toma de decisiones en la atención de la emergencia.

Asimismo, el IGP realiza estudios e investigaciones especializados en vulcanología orientadas a conocer el comportamiento dinámico de los volcanes y los peligros asociados con enfoque en la gestión del riesgo de desastres. Estos trabajos pueden ser descargados libremente del [Repositorio Geofísico Nacional](#) (REGEN).

El presente informe tiene el objetivo de mostrar la información generada por el IGP sobre el estudio, investigación y monitoreo de volcanes activos de la región Arequipa con enfoque en la gestión del riesgo de desastres, en atención al oficio n.º 251-2023-GRA/ORGRDDN. Esta información contribuirá en la elaboración de “los planes de contingencia frente a erupciones volcánicas” en la región Arequipa, liderada por el Gobierno Regional de Arequipa.



2. VOLCANES ACTIVOS DE AREQUIPA

Los volcanes activos de la región Arequipa como Misti, Sabancaya, Chachani y Coropuna han sido ampliamente estudiados por el IGP utilizando diferentes técnicas y disciplinas. También, estos volcanes son vigilados de manera permanente y en tiempo real a través de redes vulcanológicas conformadas por una variedad de instrumentos y sensores que tienen las funciones de adquirir información sobre la dinámica interna y externa de los volcanes y transmitirla automáticamente y en tiempo real a la sede del OVS en Sachaca, para el inmediato análisis e interpretación de los datos.

Los métodos geofísicos empleados para el monitoreo volcánico en tiempo real de la dinámica interna de los volcanes son la sismología volcánica (sensores sísmicos) y la deformación superficial (GNSS, inclinómetros, sensores satelitales), además de la geoquímica de gases (espectrómetro DOAS, cámaras UV, multigases, sensores satelitales). En tanto, para la caracterización de la dinámica externa se emplean videocámaras científicas y sensores térmicos satelitales.

A continuación, se presenta información por volcán según los puntos de interés solicitados por la Oficina Regional de Gestión del Riesgo de Desastres y Defensa Nacional (ORGRDDN) del Gobierno Regional de Arequipa.

2.1. VOLCÁN SABANCAYA

El volcán Sabancaya está ubicado a 18 km al sur del valle del Colca (Caylloma, Arequipa) y a 70 km al noroeste de la ciudad de Arequipa. Hoy en día, es el volcán más activo del sur peruano debido a que desde noviembre de 2016 mantiene un proceso eruptivo vigente que diariamente viene generando

decenas de explosiones volcánicas, generalmente acompañadas de emisiones de cenizas y gases. Dicha erupción pone en riesgo alrededor de 20 000 personas que habitan en los distritos de Chivay, Achoma, Cabanaconde, Callalli, Maca, Lari, Madrigal, Ichupampa, Yanque, Coporaque, Tapay, Lluta, Huambo y Huanca (<https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/4927>).

2.1.1. Historia eruptiva del volcán Sabancaya

El volcán Sabancaya es el más joven del complejo volcánico Ampato-Sabancaya, el cual ha presentado erupciones efusivas con emisión de flujos de lava en bloques, alternado con erupciones explosivas leves a moderadas. Estudios efectuados por Rivera et al. (2016) y Samaniego et al. (2016) muestran que el Sabancaya comprende: 1) un edificio basal y 2) un cono joven constituido por una secuencia de flujos de lava andesitas y dacitas emplazados durante los últimos mil años. A continuación, se hace una descripción de cada uno de las fases de edificación del volcán Sabancaya y los productos emitidos:

2.1.1.1 Sabancaya I: Edificio Basal

- a) **Flujos de lava andesítica y dacítica:** Durante la primera fase de edificación del Sabancaya se emplazaron diversos flujos de lava en bloques andesíticos y dacíticos (61-65 wt. % SiO₂), distribuidos en la base del edificio volcánico y que cubren parte del altiplano, y los volcanes Ampato y Hualca Hualca. Los flujos de lava del edificio basal se pueden apreciar sobre todo al pie de los flancos este y oeste del volcán. Estos flujos de lava se caracterizan por presentar bloques de tamaños métricos dispersos en superficie. Las lavas tienen entre 20 y 50 m de espesor y en total llegan a formar una secuencia de hasta 300 m de espesor. En la mayoría de los casos, las lavas no recorrieron más de 7 km del actual cráter. Las lavas se encuentran parcialmente

cubiertas por la ceniza histórica y la emitida durante la actividad 1988-1998 (Figura 2).



Figura 2. Vista del sector este del complejo volcánico Ampato-Sabancaya. Al pie del volcán Sabancaya se distinguen flujos de lava del edificio basal y lavas del cono del volcán.

Una muestra de materia orgánica tomada de la base de un flujo de lava distal asignada al Sabancaya basal localizada aproximadamente a 7 km al oeste del cráter (Figura 3, quebrada Huaraya), fue datada en 5440 ± 40 años AP (Gerbe & Thouret, 2004). Por ello, se asume que las lavas emitidas posteriormente serían del Holoceno superior.



Figura 3. Vista de la quebrada Huaraya, en cuya cabecera se distingue un flujo de lava datado en 5440 ± 40 años AP, por Gerbe y Thouret (2004), perteneciente al edificio basal.

Se incluyen en esta etapa tres flujos de lava subhorizontales andesíticas (60.9-62.5 wt.% SiO₂) emplazados en la llanura del sector de Sallalli. Bulmer et al. (1999) y Samaniego et al. (2016) correlacionan esta secuencia con un vento satélite ubicado a 4 km al suroeste del cráter activo. Dos de estos flujos de lava fueron fechados por Samaniego et al. (2016) en $6,65 \pm 0,32$ ka y $12,34 \pm 0,55$ ka por el método ³He. Más recientemente, Bromley et al. (2019) midieron las concentraciones de Helio en dos muestras tomadas aproximadamente en el mismo lugar de Samaniego et al. (2016), obteniendo edades de $5,2 \pm 0,1$ ka y $4,1 \pm 0,1$ ka. Con base en todos estos datos geocronológicos, se puede indicar que el edificio basal de Sabancaya se construyó durante el Holoceno.

b) **Domos de lava andesítico:** Al sur del cono principal del volcán Sabancaya se distingue un domo de lava (Figura 4) de composición andesítica (62 wt. % SiO₂). Este domo tiene aproximadamente 700 m de altura. El domo se halla cortando las lavas del “Sabancaya II” y en su extremo norte se halla cubierto por depósitos de ceniza gris de la actividad eruptiva 1988-1998.

Por otro lado, los estudios tefrocronológicos realizados por Juvigné et al. (2008), en bofedales aledaños al volcán Sabancaya, muestran que existen capas delgadas de ceniza emitidas por el Sabancaya. Una de ellas fue datada en 4500 ± 125 años AP y otra en 4150 ± 40 años AP, lo que sugiere que durante la etapa “Sabancaya II” este presentó principalmente actividad efusiva con emisiones de lava, alternada con erupciones explosivas leves a moderadas.

2.1.1.2 Sabancaya II: Cono Joven

a) **Flujos de lava andesítica y dacítica:** Corresponden a los flujos de lava que forman la parte superior del cono del volcán. En general, los flujos de lavas son de composición andesítica (61 - 62 wt. % SiO_2) y algunas son de composición dacítica (63 - 66 wt. % SiO_2). Los flujos de lava se caracterizan por presentar bloques de rocas dispersos en superficie. Estos flujos recorrieron hasta 4 km de distancia alrededor del ventó. Dichos flujos tienen espesores mayores de 40 m. Las lavas que conforman el cono superior del volcán Sabancaya tienen menos de 4000 años. Las lavas se encuentran cubiertas por depósitos de caída de ceniza gris oscuras emitidas durante la actividad eruptiva 1988-1998.



Figura 4. Vista de los flujos de lava en bloques del volcán Sabancaya. Se observan las unidades lávicas del Sabancaya II y III, el domo de lava y cono de ceniza.

2.1.1.3 Actividad volcánica histórica

El volcán Sabancaya ha registrado 5 erupciones desde el año de 1750 (Huamán, 1995; CERESIS, 2013; Thouret et al., 1994; Siebert et al., 2011). A continuación, se hace una breve descripción sobre la actividad eruptiva histórica del volcán Sabancaya, sobre la base de la recopilación de relatos históricos, catálogos "Volcanoes of the World"

(Siebert et al., 2011) y "The active volcanoes of Perú" (Hantke & Parodi, 1966), quienes distinguieron 5 erupciones volcánicas desde el año 1750 hasta 1998.

a) **Actividad Eruptiva de 1750:** Esta actividad corresponde a una leve actividad fumarólica mencionada por primera vez en 1750 por el cura Ventura Travada y Cordoba de la parroquia de las comarcas de Salamanca (valle del río Marán) y Pocsi en Arequipa.

b) **Actividad Eruptiva de 1784:** Zamácola & Jaúregui (1804) hacen mención a una erupción ocurrida el 11 de julio de 1784, posterior al gran terremoto registrado el 13 de mayo de ese mismo año, el cual destruyó la ciudad de Arequipa. En este relato, Zamácola & Jaúregui (1804), mencionan: *"Día 11 a las 9 y 56 minutos se sintió un temblor de tierra, con bastante remezón, pero no causó ningún daño. Se tuvo noticia de que el pueblo de Lari, jurisdicción de Caylloma, hay un cerro o volcán llamado Ambato, el que a efectos de estos terremotos, el volcán humea y bosteza fuego"* (Barriga, 1951). Ninguna de estas descripciones permitió entonces discernir a cuál de los tres volcanes se referían, aunque en la actualidad se asume que se trataría del volcán Sabancaya.

c) **Actividad eruptiva de 1988-1998:** Los primeros signos de reactivación del volcán Sabancaya fueron percibidos en 1981 por pobladores que viven en áreas aledañas, entre ellos los pobladores de Cajamarcana y Huacachiguero y, posteriormente, en 1985 por los pobladores del valle del Colca (Guillande et al., 1992). Dicha actividad se incrementó entre 1986-1996.

En 1986, después de una leve actividad sísmica, los pobladores del valle del Colca observaron inicialmente fumarolas y sintieron algunos ruidos y sismos de baja magnitud (Guillande et al., 1992). En noviembre de 1986, precedido de un período de poca actividad sísmica, una intensa actividad fumarólica se inicia en el cráter del Sabancaya. Las fumarolas grises se elevaron entre 500 a 1000 m sobre la cima del volcán, lo que pudo ser observado desde varias decenas de kilómetros a la redonda. Esto provocó alarma entre los pobladores de las localidades de Chivay, Cabanaconde, Huanca, Lluta y otros localizados en el valle del río Colca.

Entre 1986 a 1989, las fumarolas fueron más continuas y densas. Durante el mes de abril de 1989, las columnas de gases ascendieron hasta los 800 m de altura. Esta actividad permanece casi regular, pero los días 9 y 10 de mayo los habitantes de Cajamarcana y Maca escucharon ruidos y sintieron pequeños sismos en forma casi continua.

Entre el 13 y 19 de abril de 1990 ocurrieron explosiones cada 20 a 30 minutos que produjeron columnas de ceniza que ascendieron entre 3 y 4 km de altura. Desde el 28 de mayo al 3 de junio de 1990, se aprecia un incremento gradual de la actividad volcánica. Durante esas fechas se reportaron más de 3 explosiones por día, con columnas eruptivas de 700-800 m de altura que, posteriormente, generaron caídas de ceniza. El 3 de junio, una columna eruptiva ascendió hasta 1 km de altura, siendo luego dispersada por los vientos en dirección SSE del volcán. Del 12 al 23 de junio de 1990, la actividad se caracterizó por emisiones importantes de gases y ceniza de 2-3 km por encima del cráter. Los productos piroclásticos emitidos eran de poco volumen, finos, contenían mayor cantidad de fragmentos líticos

(85 %) que juveniles (15 %) y fueron dispersados alrededor del cráter. Los bloques balísticos centimétricos alcanzaron una distancia de algunos cientos de metros a pocos kilómetros de distancia respecto al volcán, mientras que la ceniza alcanzó entre 20 a 30 km de distancia.

El 13 de octubre de 1990, en la quebrada Huayuray ubicada en el flanco norte del volcán Hualca Hualca (a 14 km al norte del Sabancaya), se generó un voluminoso flujo de barro o lahar que descendió hacia el cañón del río Colca. Este flujo de barro, que pasó cerca del poblado de Pinchollo, por poco destruye el canal de irrigación del Proyecto Majes-Siguas (Huamán, 1995).



Figura 5. Fotografía que muestra una erupción del tipo vulcaniana ocurrida el 15 de abril de 1991. Fotografía tomada por Pierre V. desde el flanco este del volcán Sabancaya.

En abril y mayo de 1991 ocurre una actividad vulcaniana que generó columnas de ceniza de color gris que ascendieron entre 3 y 4 km de altura (Figura 5), y luego produjeron caídas de ceniza que se acumularon hasta 2 mm de espesor en el sector de Cajamarcana (a 9 km al SE del cráter del volcán Sabancaya). El 23 y 24 de julio de 1991

ocurrieron varios sismos importantes, probablemente ligados a la actividad volcánica, los cuales originaron deslizamientos que afectaron 4 poblados menores causando el colapso de varias casas, en especial al poblado de Maca (17 km al noreste del volcán Sabancaya).

A inicios del año 1994, el Sabancaya presentó permanentes emisiones de gases y ceniza. En el mes de marzo de 1994, la actividad vulcaniana fue moderada y las columnas de gases y ceniza alcanzaron algunos cientos metros de altura. La columna eruptiva más grande alcanzó 2.5 km de altura y fue de color gris oscura. En esta oportunidad, las cenizas fueron dispersadas hacia el oeste.

Desde 1995, la frecuencia de las explosiones decreció gradualmente, a un intervalo de una explosión cada 30 minutos a algunas horas. El 1 y 2 de mayo de 1997 se registran plumas de ceniza que alcanzaron alturas de 5 y 7 km. En el mes de julio solo se presentó actividad fumarólica.

En el mes de mayo de 1998, la actividad fumarólica continúa. En el mes de agosto del mismo año, se incrementan las emisiones de gases que ascienden a alturas de entre 300-500 m.

El 28 de abril del año 2000, las emisiones de gases eran menores que las observadas en 1998. Estas emisiones de gases se elevaron entre 200 a 300 m de altura sobre el borde del cráter. En esta oportunidad, la pluma de ceniza más grande alcanzó una altura de 1000 m. Las plumas predominantes eran de color blanco y el resto eran de color gris.

La actividad eruptiva 1988-1998 depositó una capa de ceniza de 1 cm de espesor a 12 km al este del cráter del Sabancaya, lo que sugiere que el eje de dispersión de la ceniza durante ese periodo de actividad fue predominantemente hacia el este del volcán.

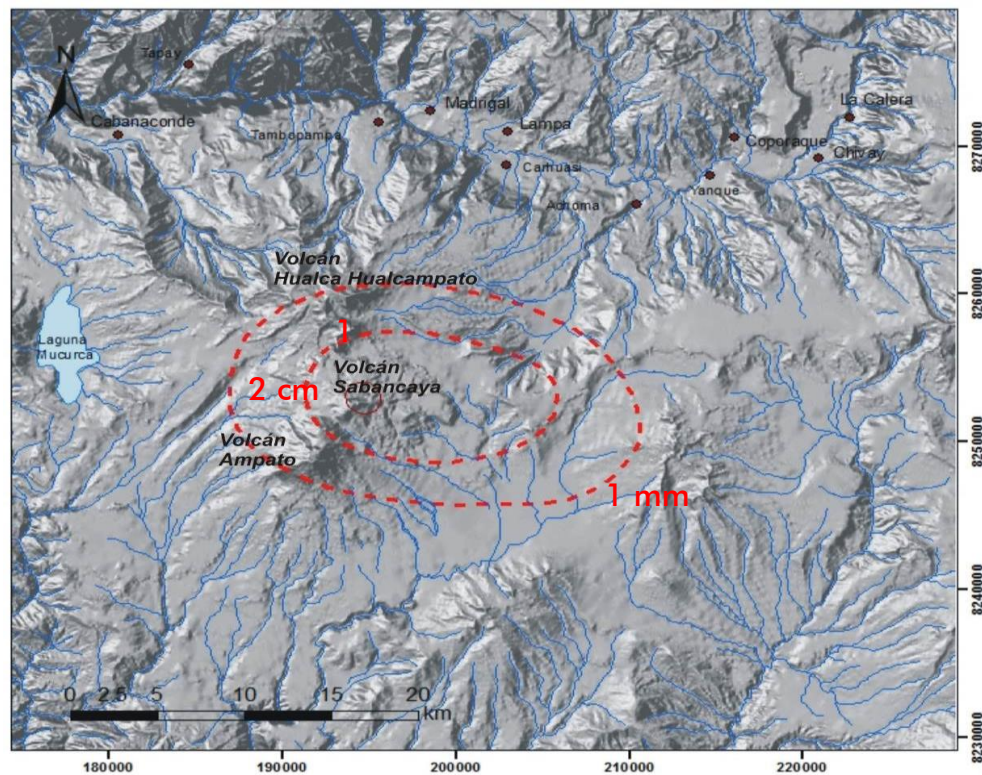


Figura 6. Mapa de distribución de cenizas durante la actividad eruptiva del volcán Sabancaya 1988-1998 (tomado de Thouret et al., 1994).

La actividad eruptiva 1988-1998 causó estragos en los poblados ubicados en áreas aledañas al volcán Sabancaya, dedicados principalmente a la ganadería. Esto ocasionó la muerte de ganado por epidemias desconocidas y destruyó terrenos de cultivo, lo que repercutió, consecuentemente, en la actividad económica a nivel local y regional. La actividad fue decreciendo hasta 1996 donde las explosiones eran raras o poco frecuentes y de menor intensidad.

- d) **Actividad actual 2016-2023:** A fines del año 2012, se nota un ligero incremento de las emisiones fumarólicas en el volcán Sabancaya, las que se tornaron cada vez más continuas y densas, y ascendían entre 100 y 200 m de altura sobre el borde del cráter.

Entre el 15 y 18 de febrero de 2013, se constató la emisión importante de fumarolas. Durante el resto del año 2013, el Sabancaya emitió gases tenues de color blanquecino y azulino. A veces esta actividad se incrementó ligeramente presentando pequeñas plumas que ascendieron entre 800 y 1200 m de altura sobre la cima del volcán. Durante el año 2014, la actividad fumarólica se fue incrementando gradualmente. Posteriormente, el 6 de noviembre del 2016, se generan las primeras explosiones que se caracterizaron por la emisión de cenizas y gases que ascendieron, en promedio, a 3000 m de altura. En los periodos de mayor actividad estas columnas alcanzan alturas de hasta 5500 m (por ej., el 4 julio de 2017) sobre el cráter del volcán, y con presencia de bloques balísticos (de 20 cm aproximadamente con un alcance de 500 m). Las cenizas emitidas han llegado a dispersarse en un radio de hasta 70 km y afectaron a los poblados de Chivay Coporaque, Ichupampa, Achoma, Lari, Madrigal, Maca, Cabanaconde, Tapay, Huanca, Lluta y Huambo. (<https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/5159>).



Figura 7. Imagen de una explosión del volcán Sabancaya registrada el 24 septiembre de 2021.

La historia eruptiva del Sabancaya muestra tanto periodos efusivos como muy violentos (periodos explosivos), pero en los tiempos más recientes su comportamiento ha sido sobre todo efusivo, tal como se puede apreciar en las amplias coladas de lava en bloques que se distribuyen por varios kilómetros alrededor del cráter. La anterior actividad volcánica registrada se produjo durante el siglo XVIII, como sugieren las crónicas españolas (<https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/5159>).

2.1.2. Mapa de ubicación de los sistemas de monitoreo

La red de vigilancia permanente del volcán Sabancaya está compuesta de un total de 7 estaciones vulcanológicas que integran 13 instrumentos: 6 sismómetros de banda ancha, 2 estaciones GNSS, 1 infrasonido, 1 equipo multigas y 3 videocámaras), los cuales están instalados sobre el complejo volcánico Ampato-Sabancaya y Hualca Hualca, así como, en su entorno. La instrumentación operativa consigna a los equipos de monitoreo de carácter

permanente y con capacidad de transmisión de datos en tiempo real (Figura 8). Sobre la figura se describe el empleo de la diversidad de instrumentos.

(<https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/5276>)

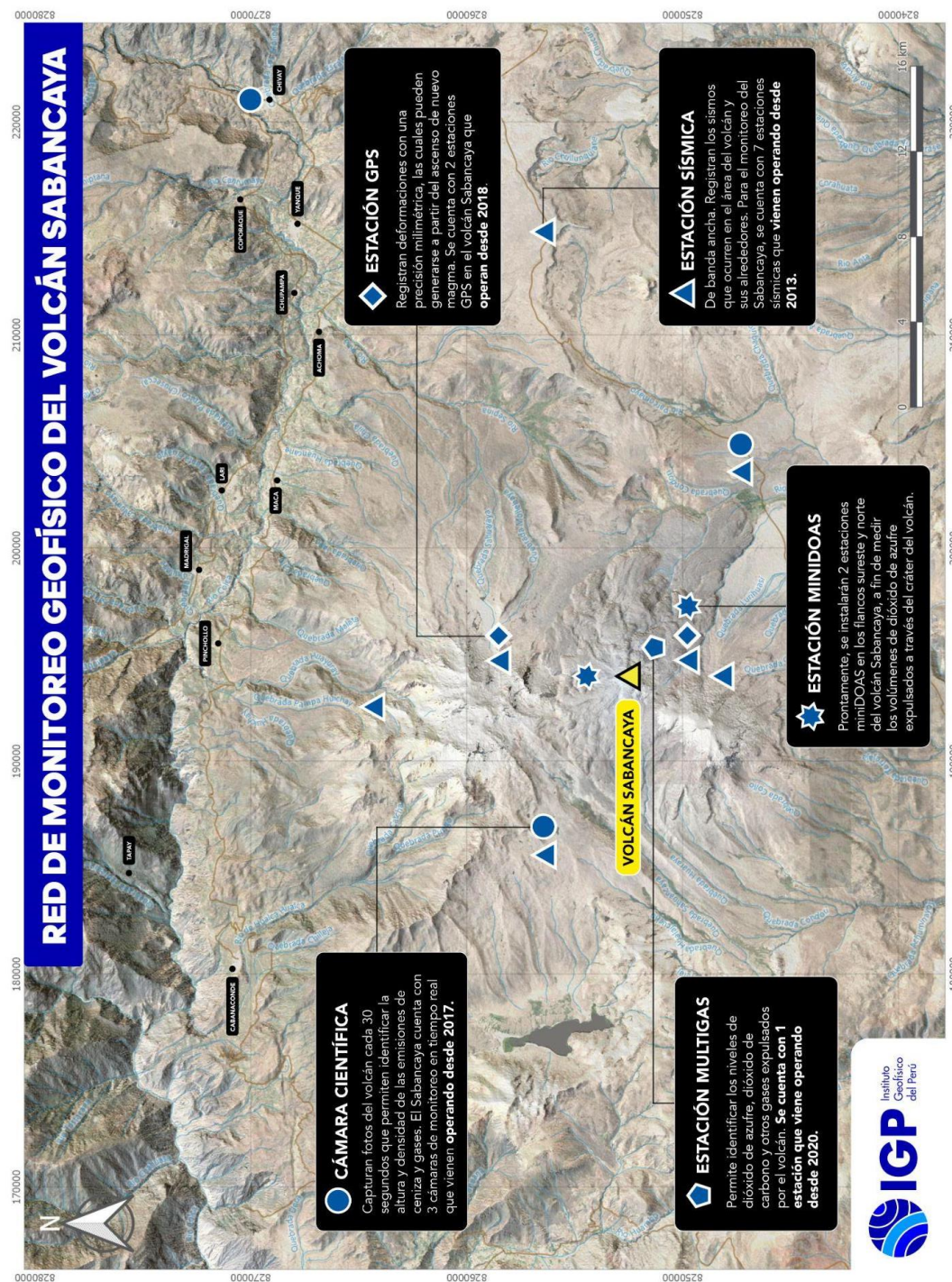


Figura 8. Red de monitoreo geofísico del volcán Sabancaya (<https://www.igp.gob.pe/servicios/centro-vulcanologico-nacional/volcanes-monitoreados>).

2.1.3. Caracterización del peligro volcánico y mapas de Peligro

El Sabancaya es considerado como el segundo volcán más activo del sur peruano. Durante su actual proceso eruptivo, afecta a aproximadamente 10 mil personas que viven en un radio de 30 km alrededor del cráter (INEI, 2018), debido a la caída de ceniza y el descenso de lahares.

Adicional a la población expuesta, se calcula que alrededor de 277 turistas por día o más de 100 000 foráneos al año visitan el valle del Colca (MINCETUR, 2021), ubicado a 20 km al norte del Sabancaya (<https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/5276>).

Se ha realizado el estudio de algunos peligros volcánicos, principalmente sobre los flujos de lodo o lahares, descritos a continuación.

2.1.3.1 Peligro por descenso de Lahares

Según (Rivera et al., 2021), en los últimos años los lahares generados en la zona del volcán Sabancaya debido a lluvias intensas han descendido principalmente por la quebrada Huayuray (Pinchollo), ubicada al norte del volcán y por el río Sallalli. Este último ubicado en el extremo sureste del volcán. Las características de estos lahares son:

- Lahares ocurridos en 2017: En diciembre de 2017, se reportó el descenso de lahares que discurrieron por el flanco sureste del Sabancaya, por la zona de Sallalli (límite del distrito de Lluta) y al noroeste del cráter, por la quebrada Mayuca, próxima a Pinchollo. Estos lahares no representaron peligro alguno.

- Lahares ocurridos en 2018: Los días 13 y 28 de marzo de 2018, el IGP, mediante el CENVUL, reportó el descenso de dos lahares (<https://www.igp.gob.pe/servicios/centro-vulcanologico-nacional/productos-alertas>), con flujos moderados que discurrieron en dirección del río Sallalli, al sureste del Sabancaya. Estos lahares no representaron peligro alguno.
- Lahares ocurridos en 2020: El 6 de enero de 2020, aproximadamente a las 14:30 horas, a consecuencia de lluvias intensas y la presencia de ceniza acumulada del volcán Sabancaya, se produjo un lahar de poco volumen que descendió por la quebrada Huayuray, ubicada en el distrito de Cabanaconde, provincia de Caylloma. Luego en febrero del mismo año, el IGP emitió 4 alertas (<https://www.igp.gob.pe/servicios/centro-vulcanologico-nacional/productos-alertas>) por descenso de lahares en el volcán Sabancaya los días 24, 26, 27 y 28 de febrero y que discurrieron por la quebrada Huayuray hacia el río Colca, sin representar peligro alguno.

2.1.3.2 Escenarios de peligro por descenso de lahares

Según [Rivera et al. \(2021\)](#), para el complejo volcánico Ampato-Sabancaya se ha elaborado el mapa de escenarios de peligro por descenso de lahares utilizando el programa LAHARZ, el mismo que permite correlacionar el volumen de un evento lahático, el área planimétrica y la sección transversal inundada por un lahar. Para este objetivo se han considerado volúmenes de flujos de 1,5 Mm³, 10 Mm³ y 20 Mm³, en base a tres escenarios críticos que podrían presentarse. Datos basados también en información de campo y eventos ocurridos.

- **Escenario 1** (Figura 9, quebradas/áreas de color rojo). En este escenario se considera la generación de lahares o flujos de barro con volúmenes de 1.5 Mm^3 que discurren por las quebradas que drenan del volcán Sabancaya (Mollebaya, Colihuiri, Sallalli y Sahuancaya-Pujro Huayjo), volcán Ampato (Jaruma-Cabana-Pujio, Colquemarca Baylillas, Collo-Chacramayo, Vizcachane, Cabadillayoc, Chullune, Condori-Huaraya, Hualaycucho y Quellocancha), y volcán Hualca Hualca (Pungo-Hualca Hualca, Japo, Huayuray, Molebaya-Sepina y Huancané).

La probabilidad de ocurrencia de estos flujos es alta sobre todo en periodos de lluvia y por la disponibilidad de la ceniza acumulada del volcán Sabancaya. Si estos lahares se producen, podrían afectar terrenos de cultivos, terrenos de pastizales, bofedales, y tramos de la carretera Taya-Sallalli-Chivay, Chivay-Cabanaconde.

- **Escenario 2** (Figura 9, quebradas/áreas de color naranja). Considera la ocurrencia de lahares con volúmenes de 10 Mm^3 que discurren por las quebradas y valles al pie de los volcanes Sabancaya, Ampato y Hualca Hualca, hasta distancias de 20 km desde dichos volcanes. Si estos lahares se producen, podrían afectar poblados como Cabanaconde, Achoma, terrenos de cultivos, terrenos de pastizales, bofedales, canales de agua, y tramos de la carretera Taya-Sallalli-Chivay, Chivay-Cabanaconde.
- **Escenario 3** (Figura 9, quebradas/áreas de color rojo). Considera la ocurrencia de lahares con volúmenes de 20 Mm^3 que discurren por las quebradas y valles al pie de los volcanes Sabancaya, Ampato y Hualca Hualca, hasta distancias mayores de 25 km desde dichos volcanes. Si estos lahares se producen afectarían

poblados como Cabanaconde, Maca, Achoma, terrenos de cultivos, canales de agua, terrenos de pastizales, bofedales, y tramos de la carretera Huanca-Taya-Sallalli-Chivay, Chivay-Cabanaconde-Huambo. Los lahares voluminosos (20 Mm³) podrían generarse debido a erupciones de gran magnitud (IEV $\geq$ 3), aunque su posibilidad de ocurrencia es baja o muy baja.

Así también, Del Carpio et al. (2022), estima que aproximadamente 423 personas están expuestas al descenso de lahares con un volumen entre 1 a 20 Mm³ (Figura 9).

2.1.3.3 Deslizamientos en el valle del Colca

El valle del Colca, principalmente la zona comprendida entre las localidades de Pinchollo y Yanque, es susceptible a la ocurrencia de procesos de remoción en masa, tales como deslizamientos, derrumbes, etc. Esto es debido a que los suelos están compuestos por sedimentos poco o no endurecidos, además de la presencia de escarpas con pendientes elevadas, suelos saturados de agua de filtración, presencia de fallas geológicas, ocurrencia de sismos, entre otros aspectos (repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/4850).

2.1.3.4 Zonas susceptibles a deslizamientos en el valle del Colca

En varios sectores del valle del río Colca se distinguen taludes verticales y terrenos conformados por depósitos de avalancha, aluviales, coluviales y sedimentos detríticos, poco o no consolidados, susceptibles a la ocurrencia de procesos de movimientos en masa, como deslizamientos o derrumbes. Vargas et al. (2020) ha identificado 3 zonas con mayor

probabilidad de ocurrencia de deslizamientos y derrumbes de suelos (Figura 10).

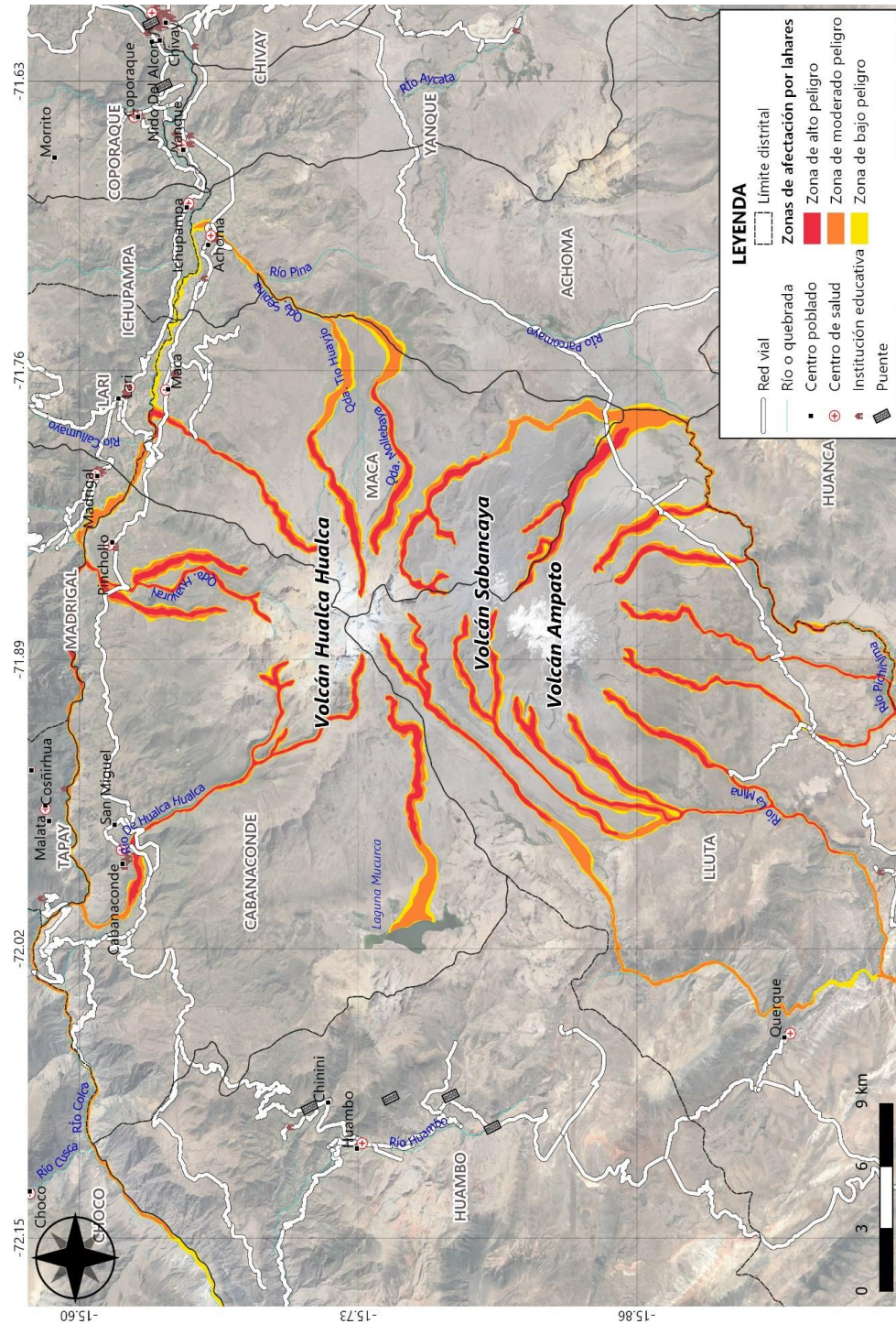


Figura 9. Mapa de peligro por descenso de lahares en el volcán Sabancaya (Extraído de Rivera et al., 2021).

El 18 de junio, el 19 y 29 de agosto de 2020, en inmediaciones de la localidad de Achoma, ocurrió un gran deslizamiento que ocasionó el embalse del río Colca. Dicho deslizamiento embalsó el río Colca por espacio de ocho meses. Por tal motivo, se recomendó a los pobladores y autoridades mejorar los sistemas de regadío, asesorados por profesionales en la materia. No es apropiado emplear la técnica de regadío por inundación, ya que ello genera a largo plazo saturación de suelos y por ende la inestabilidad del terreno (Vargas et al., 2020).

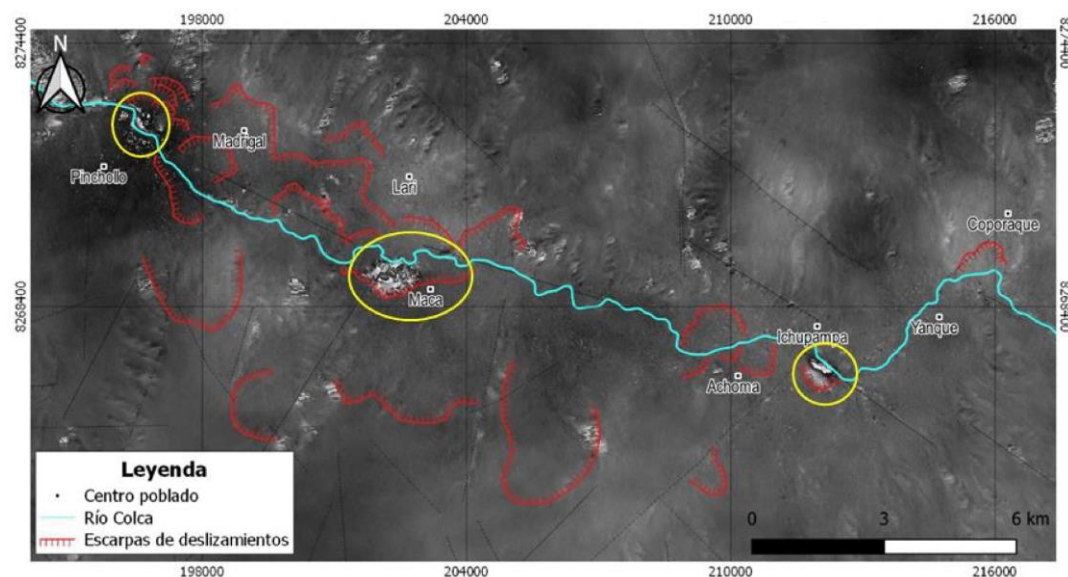


Figura 10. Zonas inestables identificadas en el cañón del Colca a partir de la técnica de interferometría utilizando imágenes de radar recientes del 25 de agosto y 06 de septiembre (intensidad del interferograma). En círculos amarillos, las zonas inestables identificadas en los distritos de Madrigal, Maca y Achoma (extraído de Vargas et al., 2020).

2.1.4. Acciones que viene realizando el IGP en el volcán Sabancaya

El IGP, a través del CENVUL, realiza el monitoreo permanente y en tiempo real del volcán Sabancaya. Además, realiza visitas e inspecciones in-situ al volcán con otra diversidad de instrumentos portátiles que permiten reforzar y mejorar los modelos de pronósticos de erupciones volcánicas.

2.1.4.1. Acceso libre a la información

Diariamente, vía whatsapp dirigido a autoridades de los 3 niveles de gobierno e INDECI, emite una actualización de las últimas 24 horas de actividad eruptiva del Sabancaya que, además, proporciona información sobre la dirección predominante de dispersión de ceniza volcánica con posibilidad de afectación a distritos de la provincia de Caylloma. También, diariamente, se reporta la actividad de todos los volcanes monitoreados por el IGP en la región Arequipa, el mismo que es compartido por correo electrónico al COEN y secretarios técnicos. Mientras que los boletines vulcanológicos detallan semanalmente el comportamiento dinámico de la actividad eruptiva del volcán Sabancaya (<https://www.igp.gob.pe/servicios/centro-vulcanologico-nacional/productos-boletines>).

Asimismo, el IGP ha elaborado una [plataforma web](#) para uso exclusivo del Centro de Operaciones de Emergencia Regional de Arequipa, que les permite monitorear en tiempo real los principales volcanes del departamento de Arequipa (Misti, Chachani, Sabancaya y Coropuna). El IGP proporcionó los accesos desde marzo de 2022, válidos únicamente para el COER y su módulo de monitoreo (Figura 11).

2.1.4.2. Capacitaciones y Asesoramiento

De manera periódica, el IGP realiza actividades educativas y de sensibilización con los funcionarios en gestión del riesgo de desastres de la región Arequipa y la provincia de Caylloma, así como a estudiantes de instituciones educativas.

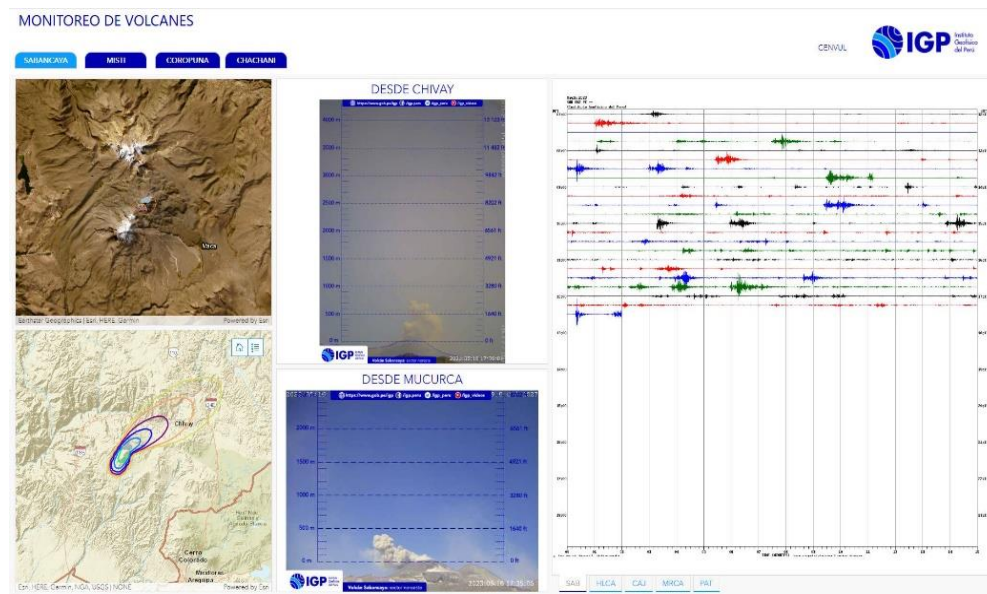


Figura 11. Dashboard de monitoreo de volcanes de Arequipa para uso exclusivo del Gobierno Regional de Arequipa, a través del Centro de Operaciones de Emergencia Regional.

En el presente año 2023, se ha realizado un primer taller de capacitación a los secretarios técnicos de GRD de los distritos del Colca. En efecto, el IGP conjuntamente con la Municipalidad Provincial de Caylloma y el Instituto Nacional de Defensa Civil organizaron dicho taller para explicar el tipo de actividad actual que presenta el volcán Sabancaya, así como las implicancias y proyecciones de su actual proceso eruptivo, además de cómo este conocimiento debe permitirles realizar una mejor gestión del riesgo volcánico en sus localidades y distritos.

El taller permitió entregar material educativo a los secretarios técnicos y estrechar lazos de comunicación para la consulta y entrega de la información oficial de monitoreo volcánico elaborada por el IGP a través del CENVAL.



Figura 12. Taller de capacitación efectuado en la Municipalidad Provincial de Caylloma en mayo de 2023.

2.1.5. Escenarios eruptivos del volcán Sabancaya

Desde noviembre de 2016, el volcán Sabancaya viene generando diariamente explosiones volcánicas que producen columnas de cenizas y gases que ascienden eventualmente hasta 5.5 km de altura. Además, desde 2019 hasta la actualidad, en el cráter del Sabancaya se visualiza la presencia de un domo de lava. En base al comportamiento que viene mostrando el volcán Sabancaya y a los datos de monitoreo continuo de la actividad volcánica registrada por la red geofísica, se proponen dos posibles escenarios eruptivos futuros que podría presentar el volcán Sabancaya (<https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/5227>).

2.1.5.1. Escenario 1: Actividad explosiva moderada

En el corto y mediano plazo la actividad explosiva del volcán Sabancaya puede continuar con su nivel habitual, es decir, continuar generando explosiones que emitan cenizas, gases y, en algunas ocasiones, bloques balísticos que caerán en áreas próximas al volcán, típico de una actividad vulcaniana. Las explosiones se dan en

intervalos de segundos a minutos generando la formación de columnas eruptivas de gases y cenizas que no superarían los 5000 m de altura. En dicho escenario también puede ocurrir la generación de pequeños flujos piroclásticos que viajarían a algunos kilómetros de distancia de la cima.

2.1.5.2. Escenario 2: Ligero incremento de la actividad volcánica

Un segundo escenario considera un incremento de la actividad explosiva por la sobrepresurización del sistema magmático y con la consecuente generación de erupciones explosivas que emiten mayor cantidad de cenizas, que afectarían a diversas localidades a lo largo del valle del Colca y alrededores. Las columnas de cenizas y gases pueden ascender a más de 6 km de altura, y posteriormente pueden ser dispersadas por los vientos a varias decenas de kilómetros de distancia del volcán.

A pesar de existir un domo o cuerpo de lava al interior del cráter, las emisiones de gases y cenizas siguen ocurriendo a través de orificios ubicados en los extremos sureste, suroeste, norte y sur del domo. La actividad explosiva continua del Sabancaya puede destruir y erosionar parte del domo de lava.

2.2. VOLCÁN MISTI

El volcán Misti se emplaza en el borde oeste de la Cordillera Occidental de los Andes del Sur del Perú, colindante con el volcán Chachani, al noroeste y Pichu Pichu al sureste. Al pie de su flanco suroeste se ubica la ciudad de

Arequipa, cuyo desnivel respecto a la cima es de 3500 m. Al pie del flanco norte y noroeste discurre el río Chili seccionando un profundo cañón en donde se ubican las centrales hidroeléctricas de Charcani; asimismo, algunos kilómetros aguas arriba se ubican importantes represas (Aguada Blanca y El Frayle) que constituyen la principal fuente de agua para los habitantes de la ciudad de Arequipa y para la agricultura local. También, a una veintena de kilómetros hacia el sureste del Misti, se encuentra la laguna de Salinas que forma parte de la Reserva Nacional Aguada Blanca – Salinas (<https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/797>).

2.2.1. Historia eruptiva del volcán Misti

El volcán Misti, en los últimos 40 000 años, presentó al menos 12 erupciones explosivas importantes que dieron lugar a al menos 12 depósitos de caídas de lapilli de pómez que se sucedieron con intervalos de 2000 a 4000 años (Thouret et al., 2001). La última gran erupción del Misti, de tipo pliniana y que tuvo un Índice de Explosividad Volcánica 5 (en una escala del 0 al 8), ocurrió hace 2050 años (Thouret et al., 1994; Harpel et al., 2011). Esta habría generado la formación de una columna de gases y cenizas de hasta 25 km de altura, que depositó una capa de pómez y ceniza de hasta 30 cm de espesor en la ciudad de Arequipa. Reportes históricos dan cuenta de erupciones explosivas moderadas que ocurrieron durante el reinado del Inca Pachacútec, entre los años 1438-1471 d. C., las que provocaron daños en el actual distrito de Cayma, además de depositar una capa de ceniza negra de hasta 10 cm de espesor en Arequipa

(<https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/5164>).

2.2.2. Mapa de ubicación de los sistemas de monitoreo

El Instituto Geofísico del Perú opera desde el año 2005 una red de monitoreo geofísico en el volcán Misti. Con el paso de los años la instrumentación originalmente instalada ha sido reemplazada y modernizada por una diversidad de instrumentos que transmiten la información recabada en tiempo real y de forma permanente. Actualmente, la red de monitoreo en tiempo real del Misti, operada por el Centro Vulcanológico Nacional (CENVUL), está conformada por 6 sismómetros, 1 estación GNSS y 2 videocámaras de vigilancia (<https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/5276>). Ver Figura 13.

Además, se realizan campañas temporales de medición con otros métodos geofísicos, como Potencial Espontáneo, mediciones de GPS y técnicas satelitales, como la interferometría radar y la detección de anomalías térmicas sobre el cráter del volcán.

2.2.3. Caracterización del peligro volcánico y mapas de peligro

De acuerdo a Del Carpio et al. (2022), el Misti es considerado como el volcán de más alta peligrosidad en el Perú. Dicho volcán puede reactivarse y generar una erupción explosiva pequeña a moderada (IEV 1-2), como la ocurrida en el siglo XV (1440-1470), poniendo en riesgo y/o afectando las actividades socio-económicas de la ciudad de Arequipa, que actualmente cuenta con una población de más de 1 millón de habitantes (INEI, 2018). También, el Misti puede presentar una erupción explosiva mayor con un IEV 4 o 5, tal como ocurrió hace aproximadamente 2 mil años, con el emplazamiento de más de 1 km³ de caídas de tefras y flujos piroclásticos que pueden impactar parte de la ciudad de Arequipa.

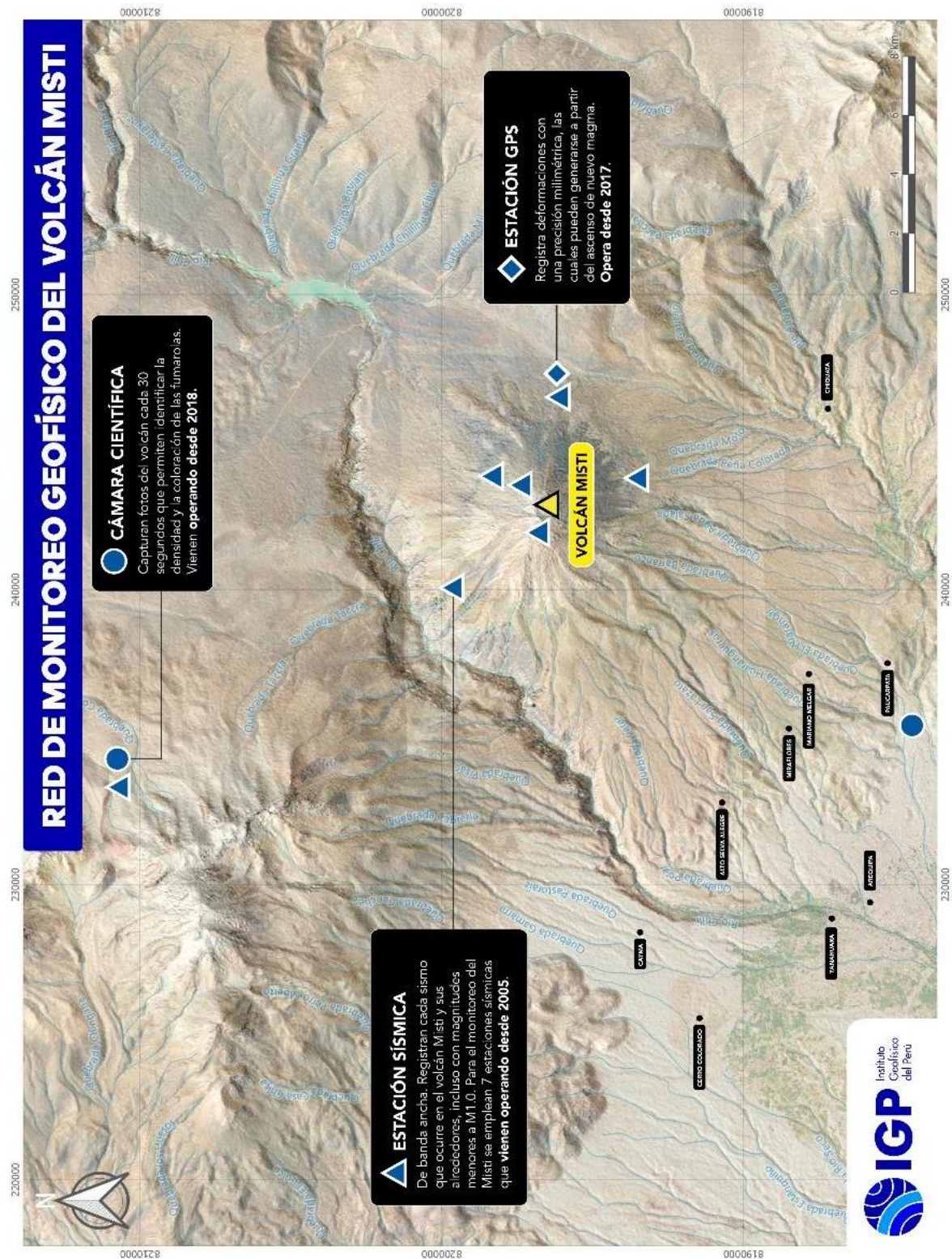


Figura 13. Red de monitoreo geofísico del volcán Misti (<https://www.igp.gob.pe/servicios/centro-vulcanologico-nacional/volcanes-monitoreados>).

Uno de los principales peligros volcánicos analizados por el IGP es debido al descenso de flujos de barro o lahares. Asimismo, se realizaron estudios de peligros en algunos distritos, como serán mostrados más adelante.

2.2.3.1. Peligro por descenso de lahares

Rivera et al. (2021), indica que en las quebradas que nacen del volcán Misti y se prolongan hasta la ciudad de Arequipa como la quebrada San Lázaro, Huarangal y otros existen varios depósitos de lahares. Entre los depósitos se encuentran aquellos generados durante la erupción del volcán Misti hace 2050 años, muy visibles en el cercado de Arequipa; mientras que, en las cercanías del volcán, nuevos lahares con espesores de 0.2 a 1 m sobreyacen a los depósitos de la erupción antes indicada. En la quebrada San Lázaro, los lahares se distribuyen a lo largo de 9 km, con un ancho de 100 m y espesores de al menos 4 m ocupando un volumen del orden de 3.6 Mm^3 .

Desde el punto de vista del riesgo, en los últimos años, la mayoría de las quebradas que descienden por el sector sureste y sur del volcán Misti en los distritos de Alto Selva Alegre, Miraflores, Mariano Melgar y Paucarpata, han sido invadidas por pobladores que han “extrangulado” los cauces naturales, lo que impide el flujo normal de las torrenteras originando daños en las viviendas precarias. Por otro lado, en la quebrada Matagente (cañón del río Chili), la presencia de flujos evidencia su continua recurrencia que afectan principalmente a obras de infraestructura como la planta de tratamiento de agua potable de la Tomilla II de la Empresa de Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Arequipa (SEDAPAR), tal como

ocurrió en febrero de 2017
(<https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/4927>).

Así también, Del Carpio et al. (2022), estima que al menos 149 751 personas están expuestas al peligro por descenso de lahares que comprenderían volúmenes de 0.5 Mm³ a 11 Mm³ (Figura 14).

Con base en datos de campo y con ayuda del programa "LAHARZ", Rivera et al. (2021) ha elaborado el mapa de escenarios de peligros por descenso de lahares del volcán Misti. Los volúmenes máximos de lahares registrados en épocas pasadas en las quebradas del Misti están en el orden de 1.5 Mm³ a 4 Mm³, para periodos entre 300 a 1000 años, asociados a veces a erupciones explosivas moderadas (IEV 1-2). Los lahares con volúmenes del orden de 9 Mm³ a 10 Mm³ son menos frecuentes y ocurren cada 1000 a 5000 años asociados a erupciones explosivas grandes. En tal sentido, para este objetivo se ha considerado volúmenes de flujos de 1.5 Mm³, 3 Mm³ y 9 Mm³ en base a tres escenarios de peligros que podrían presentarse (<https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/4927>) y los resultados obtenidos se muestran en la Figura 14.

- **Escenario 1: Alto peligro** (Figura 14, quebradas/áreas de color rojo). En este escenario se considera la generación de lahares con volúmenes de 1.5 Mm³ que discurren por las quebradas que drenan por el flanco sur del volcán, como Peral, Pato, San Lázaro y Huarangal, siendo su probabilidad de ocurrencia alta sobre todo en periodos de lluvia. Los lahares pueden afectar los distritos de Alto Selva Alegre, Miraflores, Mariano Melgar, Paucarpata, Cercado Arequipa, José Luis Bustamante y Rivero, y Sachaca. Además, de descender lahares por las quebradas ubicadas al

sureste del Misti, como Agua Salada y Honda, estas afectarían los distritos de Chiguata, Sabandía y Socabaya.

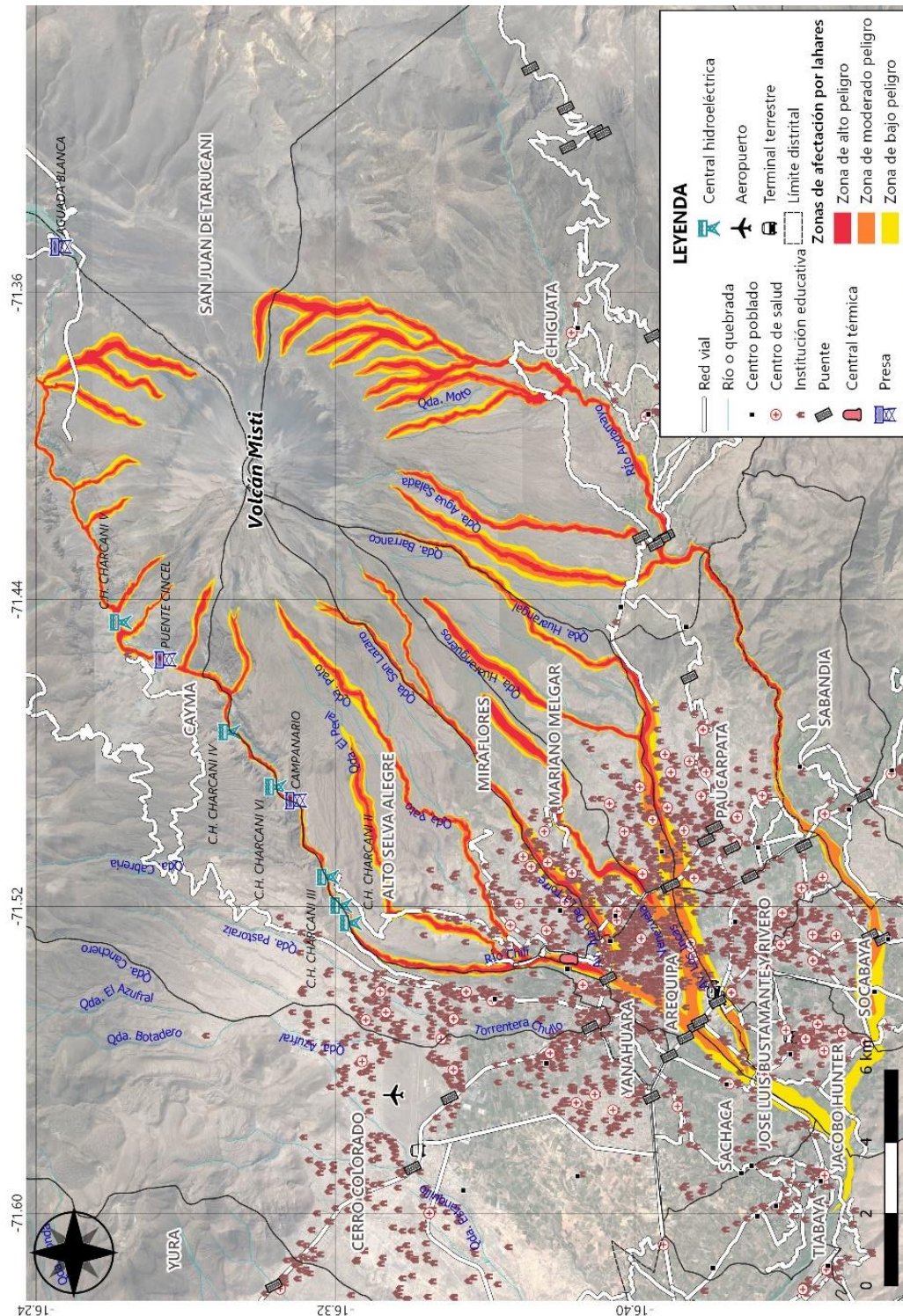


Figura 14. Mapa de peligro por descenso de lahares en el volcán Misti (Extraído de Rivera et al., 2021).

- **Escenario 2: Moderado peligro** (Figura 14, quebradas/áreas de color naranja). Considera la ocurrencia de lahares con volúmenes de 3 Mm^3 que podrían discurrir por las quebradas del flanco sur, sureste, oeste y noroeste el flanco sur del volcán, como Peral, Pato, San Lázaro, Huarangueros y Barranco, Huarangal, hasta distancias de 20 km desde el cráter del volcán. Si estos lahares se producen pueden afectar los distritos de Alto Selva Alegre, Miraflores, Mariano Melgar, Paucarpata, Cercado Arequipa, José Luis Bustamante y Rivero, Yanahuara, Sachaca y Jacobo Hunter. De descender lahares por las quebradas ubicadas al sureste del Misti, como Agua Salada, Honda con dirección al río Andamayo-Socabaya, estas afectarían los distritos de Chiguata, Sabandía, Socabaya y Jacobo Hunter hasta alcanzar el río Chili.
- **Escenario 3: bajo peligro** (Figura 14, quebradas/áreas de color amarillo). Considera la ocurrencia de lahares con volúmenes de 9 Mm^3 que podrían discurrir por las quebradas que drenan por el flanco sur, sureste, oeste y noroeste del volcán Misti hasta distancias de más de 27 km desde el cráter del volcán. Si estos lahares se producen afectarían severamente los distritos de Alto Selva Alegre, Miraflores, Mariano Melgar, Paucarpata, Cercado Arequipa, José Luis Bustamante y Rivero, Yanahuara, Sachaca, Jacobo Hunter, Tiabaya, Chiguata, Sabandía y Socabaya. La probabilidad de ocurrencia es baja, la cual puede estar ligada a una eventual erupción del Misti o lluvias muy intensas.

2.2.3.2. Peligro por avalancha de escombros en el distrito de Mariano Melgar

Vargas et al. (2021) realizaron simulaciones numéricas de avalanchas de escombros en el volcán Misti utilizando el software TITAN2D. El software TITAN2D ha sido diseñado para simular flujos granulares secos con un área original de colapso sobre una superficie de terreno natural y utilizando un término de fricción de Coulomb para la interfaz entre el material granular y la superficie basal; y un término de fricción interna del flujo. (<https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/4945>)

Vargas et al. (2021) propusieron los siguientes escenarios de peligros que podrían ocurrir y afectar el distrito de Mariano Melgar.

- **Zona de peligro alto** (Figura 15, área de color rojo): La avalancha de escombros se desplazaría desde la cima del volcán hasta distancias de 5 a 9 km en un tiempo de aproximadamente 15 minutos con velocidades de hasta 80 m/s en el primer minuto, para finalmente culminar su recorrido con una velocidad promedio de 0.5 m/s. En este escenario de peligro, la avalancha ocuparía un área de $\sim 8.2 \text{ km}^2$ del distrito de Mariano Melgar, y considerando el límite urbano actual, no afectaría población ni área urbana. Es importante tener en cuenta este escenario al momento de planificar la expansión urbana y planes de desarrollo para el futuro, en especial para la seguridad y la gestión del riesgo volcánico en favor de la población del distrito.
- **Zona de peligro moderado** (Figura 15, zona de color naranja): La avalancha de escombros generada en el Misti recorrería, desde

la cima del volcán, hasta distancias entre 6 a 13.3 km en un tiempo de aproximadamente 50 minutos con velocidades de hasta 76 m/s en el primer minuto, para finalmente culminar su recorrido con una velocidad promedio de 1 m/s. La zona de peligro moderado cubre aproximadamente 12.6 km² del distrito (un poco menos del 50 % del área total), pero aún sin llegar al límite urbano.

Es importante considerar que cerca del límite de avance de la avalancha de escombros existen áreas urbanas delimitadas, posiblemente para venta de lotes y futura ocupación. En este caso, es necesario considerar estos resultados y no consolidar la ocupación, por cuanto la atención de una emergencia de origen volcánico podría ser bastante complicada.

- **Zona de peligro bajo** (Figura 15, zona de color amarilla): La avalancha de escombros se desplazaría, desde la cima del volcán, hasta distancias entre 6 a 15 km, en un tiempo de aproximadamente 1 hora y 15 minutos con velocidades máximas de hasta 80 m/s en el primer minuto, para finalmente terminar su recorrido con una velocidad promedio de 1.5 m/s. El área afectada en este escenario es de ~26.1 km²; por lo tanto, serían afectados los sectores noreste y noroeste del distrito de Mariano Melgar. Es importante considerar que tipo de escenario de peligro no es ajeno al volcán Misti, por cuanto ya ocurrió hace 2050 años y podría volver a presentarse en una próxima reactivación; por lo tanto, se debe evitar el crecimiento poblacional hacia el volcán Misti a fin de reducir el riesgo del distrito.

2.2.3.3. Peligro por flujos de lava en el distrito de Mariano Melgar

Vargas et al. (2021) realizaron simulaciones de flujos de lava en el volcán Misti utilizando el software VolcFlow. Este algoritmo es un código euleriano de diferencias finitas dentro de la interfaz MATLAB y está basado en el enfoque promediado en profundidad y desarrollado para la simulación de flujos geofísicos isotérmicos, siendo idóneo para la simulación de la velocidad del flujo de lava, así como para la extensión de flujos de lava solidificada (<https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/4945>).

Así también, Del Carpio et al. (2022) estiman que aproximadamente 27 456 personas están expuestas al peligro de flujos de lava, considerando esta población que actualmente vive sobre depósitos de lava emplazados hace menos de 112 000 años AP (<https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/5276>).

De acuerdo con Vargas et al. (2021), los escenarios de peligros obtenidos han sido clasificados en alto, moderado y bajo peligro, aun considerando que los flujos de lava no afectarían al distrito de Mariano Melgar debido a que las lavas emitidas por el Misti son viscosas y por lo tanto, su recorrido es predecible y además, recorren distancias cortas.

(<https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/4945>).

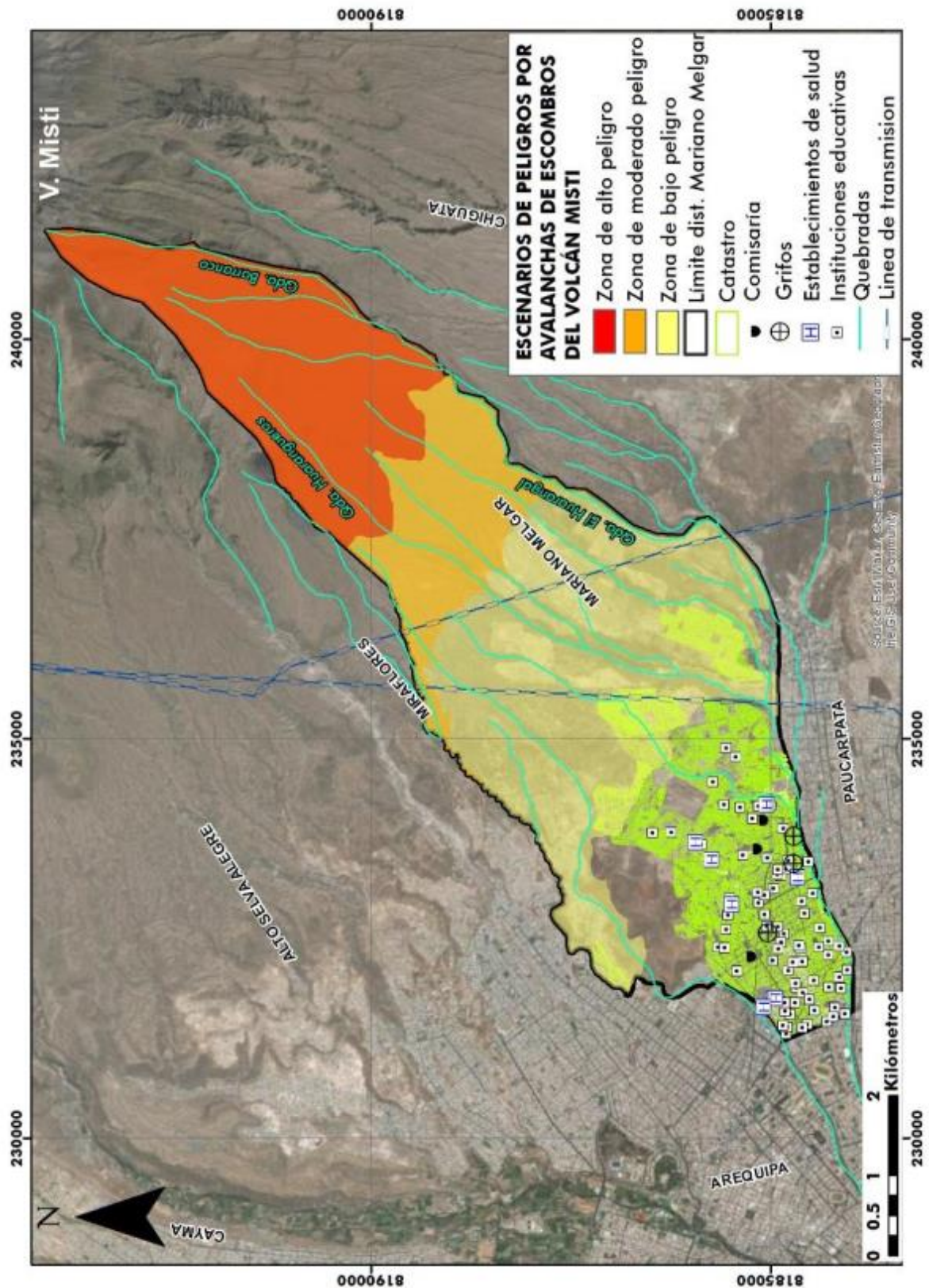


Figura 15. Escenarios de peligro por avalancha de escombros del volcán Misti en el distrito de Mariano Melgar (Extraído de Vargas et al., 2021).

- **Zona de peligro alto** (Figura 16, zona de color rojo): En este escenario, las lavas se desplazarían, desde la cima del volcán hasta distancias entre 1 a 5 km en un tiempo de 19 minutos con una velocidad máxima de 23 m/s. La distancia recorrida por el flujo de lava, es similar a la alcanzada durante erupciones pasadas, por ejemplo, durante la etapa "Misti 3" (Thouret et al., 2001). El área crítica alcanzaría los $\sim 0.2 \text{ km}^2$ sin afectar al área urbana.
- **Zona de peligro moderado** (Figura 16, zona color naranja): Los flujos de lava recorrerían, desde la cima del volcán hasta una distancia de 3 a 9 km, en un tiempo de 23 minutos con una velocidad máxima de 36 m/s. El mayor desplazamiento de flujos de lava llegaría al sector suroeste por la quebrada Barranco, ocupando el sector noreste del distrito de Mariano Melgar. El área afectada en el distrito es de $\sim 1.1 \text{ km}^2$, pero no corresponde a área urbanizada.
- **Zona de peligro bajo** (Figura 16, zona de color amarillo): En este escenario, los flujos de lava se desplazarían, desde la cima del volcán hasta distancias de 4 a 10 km en un tiempo de aproximadamente 28 minutos, con velocidades máximas de hasta 43 m/s. El flujo cubriría parte de la zona este del distrito de Mariano Melgar sobre un área de $\sim 2.4 \text{ km}^2$. En caso de producirse este escenario, los flujos de lava no afectarían a la población asentada en la actualidad, pero es una zona crítica porque la expansión urbana en los últimos años tiende a crecer hacia ese sector, lo cual sería muy complicado al momento de ocurrir este fenómeno por la logística que involucra la atención de una emergencia volcánica.

2.2.3.4. Peligro por flujos piroclásticos en el distrito de Mariano Melgar

Vargas et al. (2021) realizaron simulaciones de flujos piroclásticos en el volcán Misti utilizando el software VolcFlow que, en este caso, simula el flujo isotérmico de fluidos Newtonianos o Bingham sobre un modelo de elevación digital - DEM. Los volúmenes considerados fueron (<https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/4945>):

- Primer escenario: En la simulación se estimó un volumen de $1\text{E}+07 \text{ m}^3$.
- Segundo escenario: En el modelamiento se estimó un volumen de $5\text{E}+07 \text{ m}^3$.
- Tercer escenario: En la simulación se consideró un volumen de $1\text{E}+08 \text{ m}^3$.

Así también, Del Carpio et al. (2022) estiman en 2548 personas están expuestas eventualmente a los flujos piroclásticos del Misti, considerando la población que actualmente vive sobre depósitos piroclásticos ocurridos hace 2050 años AP.

Vargas et al. (2021) clasificaron los escenarios de peligro en alto, moderado y bajo peligro, siendo sus características las siguientes (<https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/4945>):

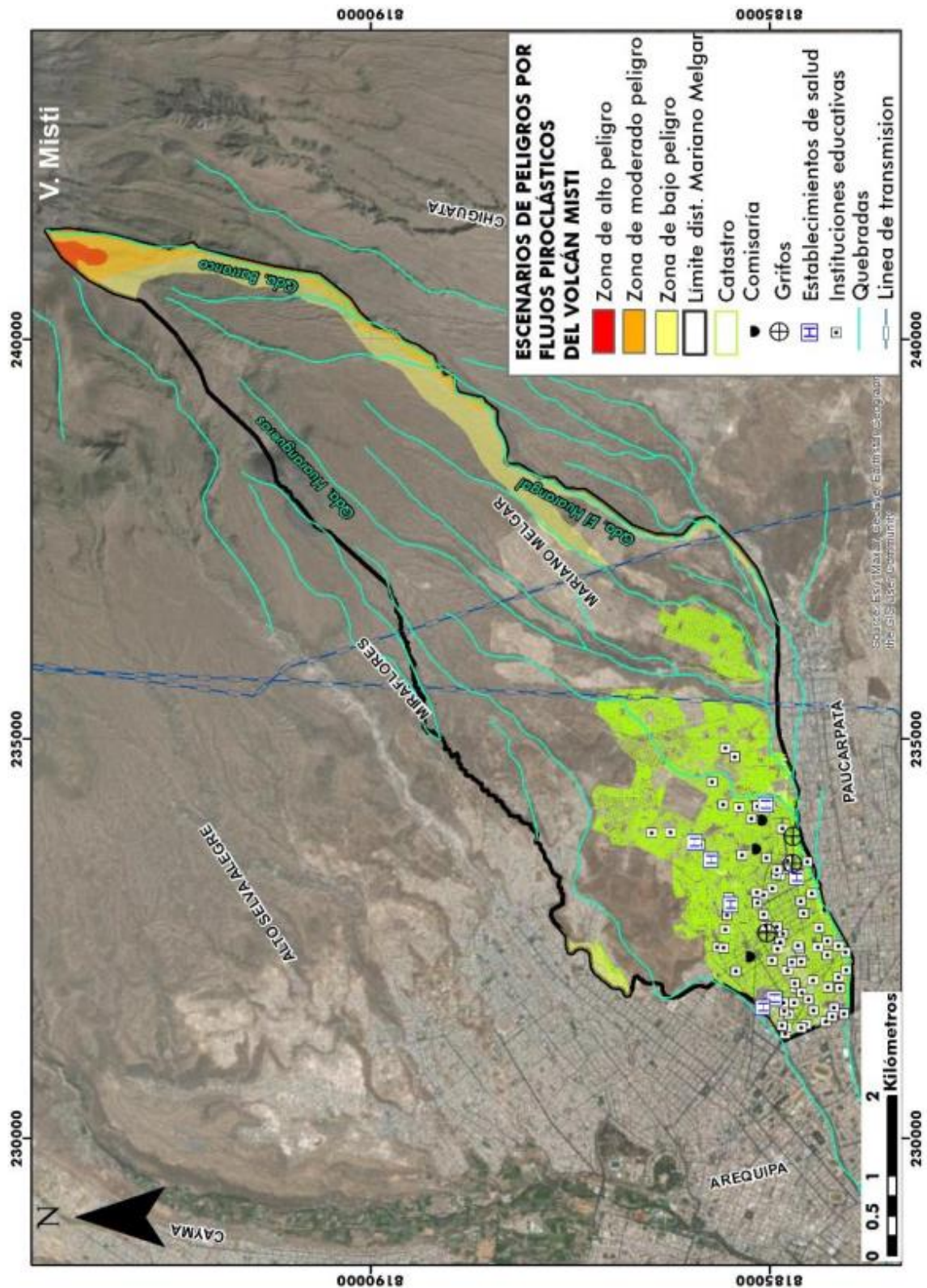


Figura 17. Escenarios de peligro por flujos piroclásticos del volcán Misti en el distrito de Mariano Melgar (Extraído de Vargas et al., 2021).

- **Zona de peligro alto** (Figura 17, zona de color rojo): Los flujos piroclásticos se desplazarían, desde la cima del volcán hasta distancias de 2 a 4.2 km en un tiempo de aproximadamente 75 segundos con una velocidad máxima de 41 m/s. El área afectada ocupa un área de $\sim 0.1 \text{ km}^2$ y no afectaría población ni viviendas.
- **Zona de peligro moderado** (Figura 17, zona de color naranja): Los flujos piroclásticos recorrerían, desde la cima del volcán hasta distancias de 4 a 11.5 km en un tiempo de aproximadamente 6 minutos con una velocidad máxima de 50 m/s. La zona de moderado peligro ocupa un área de $\sim 1 \text{ km}^2$ del distrito y tampoco llegaría hasta el límite urbano actual.
- **Zona de peligro bajo** (Figura 17, zona de color amarillo): Los flujos piroclásticos se desplazarían desde la cima del volcán hasta distancias de 4 a 17.3 km en un tiempo de aproximadamente 12 minutos. El área afectada por el peligro de flujos piroclásticos ocupa $\sim 3.4 \text{ km}^2$. Según el escenario obtenido, el flujo se desplazaría por la quebrada Barranco y cubriría parte del área este de Mariano Melgar. De ocurrir este fenómeno en este momento, no afectaría a la población; sin embargo, es considerado como un escenario crítico porque la expansión urbana en los últimos años tiende a crecer justamente hacia la zona este del distrito.

2.2.3.5. Peligro por caída de ceniza del volcán Misti

Según Lazarte et al. (2021), las simulaciones de dispersión de ceniza emitida durante las erupciones volcánicas, usando modelos numéricos, tienen como propósito predecir las zonas que podrían ser potencialmente afectadas por caída de ceniza en una ventana de

tiempo definida. En este sentido, el uso del programa Ash3d ha permitido construir escenarios de peligro de caída de cenizas para tres procesos eruptivos del volcán Misti (vulcaniano, subpliniano y pliniano) con el objetivo de evaluar el nivel de afectación al distrito de Mariano Melgar, provincia y región Arequipa.

Ante una eventual erupción del volcán Misti, en cualquiera de los tres escenarios: vulcaniano, subpliniano y pliniano, considerados en el estudio, el distrito de Mariano Melgar y en general la ciudad de Arequipa, se verían afectados por la caída de cenizas. Estas áreas se encuentran en las zonas de ALTO PELIGRO debido a que las cenizas formarían capas con espesores máximos de 5 mm, en el caso de una erupción vulcaniana, y hasta 1 m en el caso de una erupción pliniana.

Asimismo, para escenarios eruptivos de tipo subpliniano y pliniano, la dirección predominante de los vientos es hacia el SE, dirección en el cual se encuentra emplazado el distrito de Mariano Melgar; por lo tanto, sería afectado por la caída de tefras. En este escenario, la vulnerabilidad del distrito aumenta debido a múltiples factores como la fragilidad y resiliencia, los cuales generarían pérdidas humanas, de infraestructura, económicas, problemas en salud, saneamiento e higiene, entre otras (<https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/5002>).

Del Carpio et al. (2022), estima en 978 278 personas expuestas ante la caída de tefras de generarse la erupción similar a la de hace 2050 años y la erupción del siglo XV (1440-1470).

a) Escenarios de peligro por caída de ceniza del volcán Misti

Lazarte et al. (2021) describen los resultados obtenidos del modelamiento de dispersión y caída de ceniza para una posible erupción del volcán Misti con afectación al distrito de Mariano Melgar sobre la base de 3 escenarios eruptivos: erupción de tipo vulcaniana (VEI 1-2), subpliniana (VEI 3-4) y pliniana (VEI 5). <https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/5002>.

Erupción de tipo vulcaniana

- **Alto Peligro** (Figura 18, zona roja): considera la zona que puede ser afectada por caída de cenizas que formarían capas con espesores menores a 5 cm sobre un área proximal con radio de 10 km alrededor del volcán Misti. Estos valores son coherentes con los correspondientes a la erupción presentada por el volcán Misti entre los años 1440-1470 que tuvo un IEV-2.
- **Moderado Peligro** (Figura 18, zona naranja): considera la zona que puede ser afectada por caída de cenizas que formarían una capa con espesores de algunos centímetros a milímetros sobre un área con radio de 30 km alrededor del volcán Misti. Estos valores son coherentes con los correspondientes a la erupción del volcán Ubinas en los años 2006-2009 con IEV 2. Esta erupción dejó depósitos de ceniza con espesores de 1 mm en un radio de 30 km del cráter del volcán Ubinas (Rivera et al., 2014).
- **Bajo Peligro** (Figura 18, zona amarilla): considera la zona que puede ser afectada por caída de cenizas que formarían una capa con espesores menores a 1 mm sobre un área distal de radio igual

a 60 km desde el volcán Misti. Estos valores son coherentes con los datos de la última erupción del volcán Ubinas del año 2019. Después de esta erupción, se identificaron capas de ceniza con espesores de 1 mm a más de 90 km (Aguilar et al., 2021).

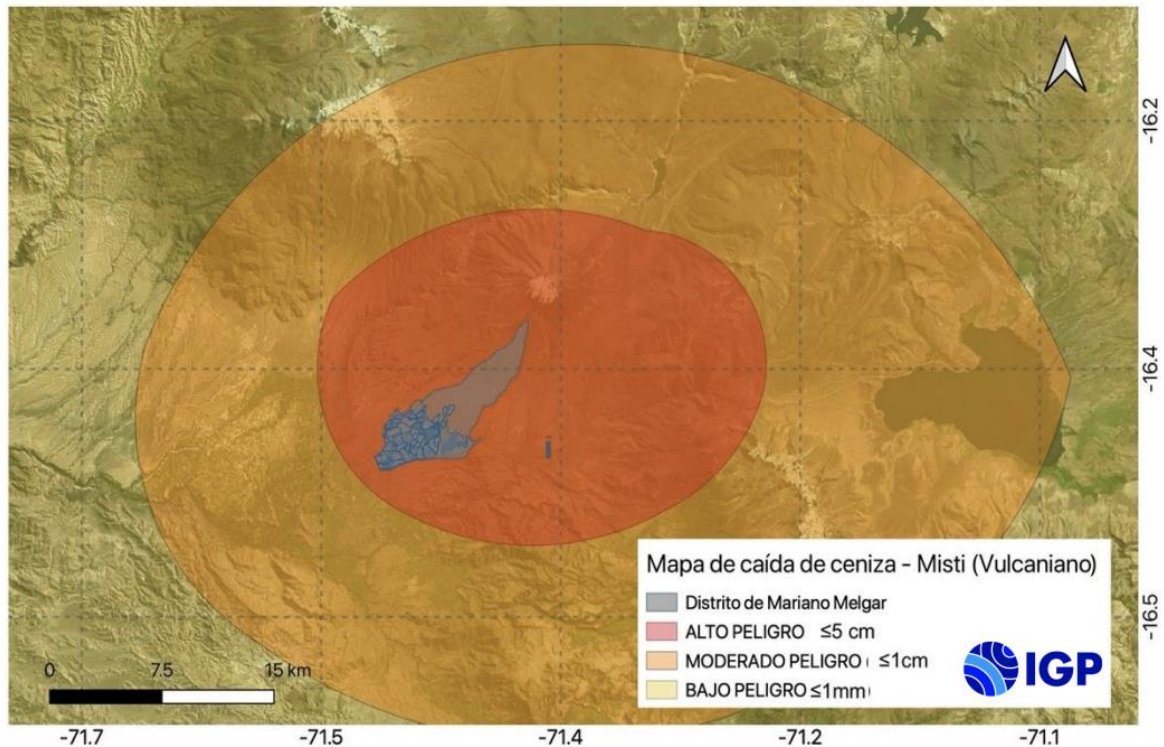


Figura 18. Mapa de peligro por caída de ceniza del volcán Misti para un escenario eruptivo de tipo vulcaniano con VEI 1-2. El área en azul indica la ubicación del distrito de Mariano Melgar. Las zonas de peligro consideran cenizas en capas con espesores variables de 1 mm hasta 5 cm (Extraído de Lazarte et al., 2021).

Erupción de tipo subpliniana

- **Alto Peligro** (Figura 19, zona roja): corresponde a la zona que puede ser afectada por caída de ceniza y pómez que formarían una capa de hasta 40 cm de espesor sobre un área proximal de radio igual a 10 km alrededor del volcán Misti. Estos resultados son coherentes con los depósitos de ceniza correspondientes a la

erupción subpliniana del volcán Yucamane (Tacna) ocurrida hace 3085 años AP (IEV 4). Después de esta erupción se observó la presencia de depósitos de cenizas de similar espesor en áreas aledañas a dicho volcán (Rivera et al., 2020).

- **Moderado Peligro** (Figura 19, zona naranja): corresponde a la zona que puede ser afectada por caída de cenizas que formarían capas de varios centímetros de espesor sobre un área de radio igual a 10 y 30 km de distancia del volcán Misti. Estos resultados son coherentes con la información basada en los depósitos emitidos por el durante erupciones subplinianas de hace 833 y 112 Ka. Las cenizas alcanzaron un área medial de 10 a 23 km del volcán Misti.
- **Bajo Peligro** (Figura 19, zona amarilla): corresponde a la zona que puede ser afectada por caída de ceniza que formarían capas con espesores de algunos centímetros a varios milímetros sobre un área distal de radio entre 30 y 60 km de distancia del volcán Misti. Esta información es coherente con los depósitos de ceniza del volcán Misti emplazados los últimos 40 Ka.

Erupción de tipo Pliniana

- **Alto Peligro** (Figura 20, zona roja): corresponde a la zona que puede ser afectada por caída de pómez que formarían una capa de 1 m a 50 cm de espesor sobre un área proximal con radio de 12 km alrededor del volcán Misti. Estos resultados son coherentes con los depósitos de pómez correspondientes a la erupción pliniana del volcán Misti ocurrida hace 33 700 años. En esta erupción los depósitos de ceniza presentaron espesores de 1.20

cm en una zona proximal de radio entre 11 a 15 km al SO del volcán Misti.

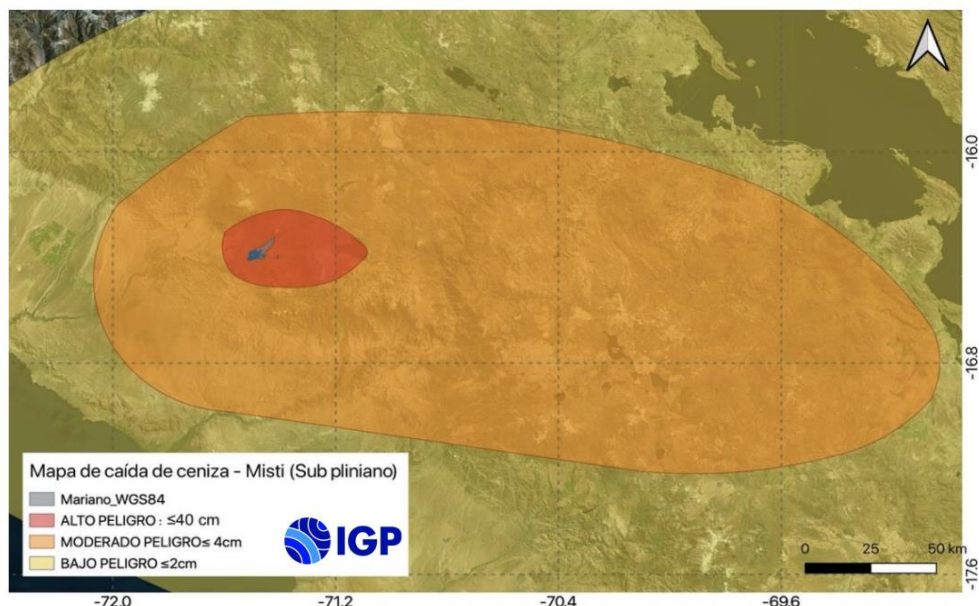


Figura 19. Mapa de peligro por caída de ceniza del volcán Misti para un escenario eruptivo de tipo subpliniano con VEI 3- 4. El área en azul indica la ubicación del distrito de Mariano Melgar. Las zonas de peligro consideran cenizas en capas con espesores variables de algunos milímetros hasta 40 cm (extraído de Lazarte et al., 2021).

- **Moderado Peligro** (Figura 20, zona naranja): corresponde a una zona que puede ser afectada por caída de cenizas que formarían capas con espesores menores a 50 cm en un radio de 12 a 25 km de distancia del volcán Misti. Estos resultados son coherentes con los depósitos de ceniza de 40 a 80 cm de espesor hasta distancias de 15 km en dirección suroeste del volcán y que correspondería a la erupción pliniana del volcán Misti ocurrida hace 33,700 años AP.
- **Bajo Peligro** (Figura 20, zona amarilla): corresponde a una zona que puede ser afectada por caída de cenizas que formarían capas con espesores de algunos centímetros hasta 25 cm sobre un área

de radio entre 20 a 30 km de distancia del volcán Misti. Estos resultados son coherentes con los depósitos de cenizas de 8 a 40 cm de espesor formados durante la erupción pliniana del volcán Misti ocurrida hace 33 700 años AP. Estas capas fueron visibles a distancias mayores a 15 km en dirección suroeste del volcán.

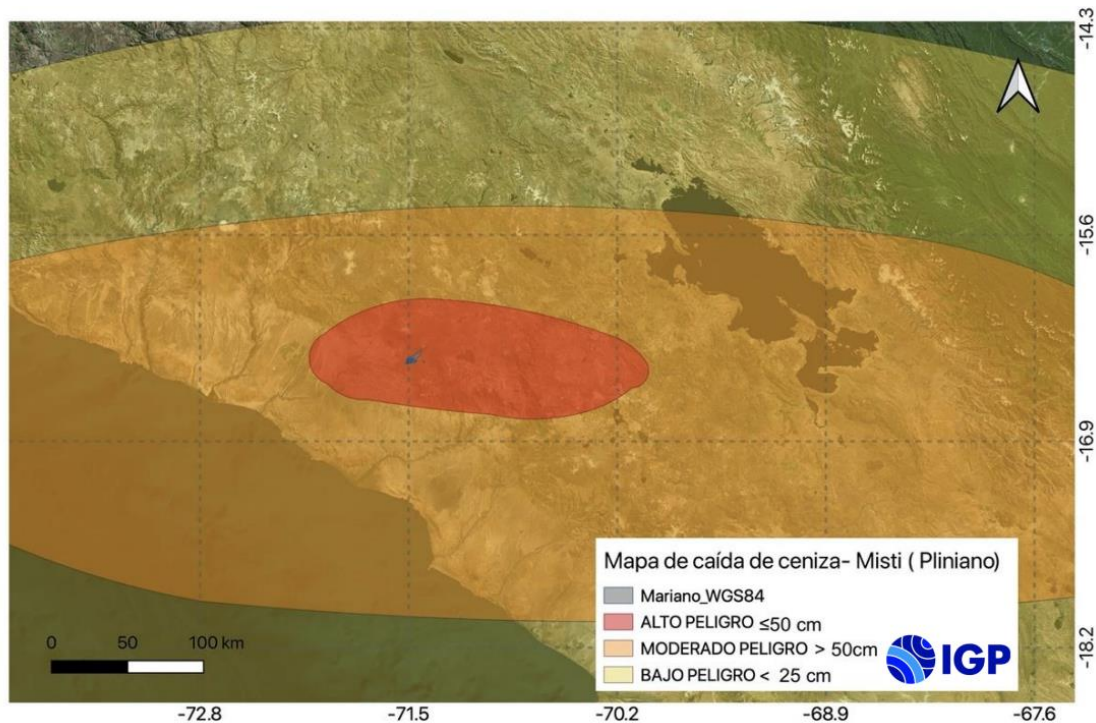


Figura 20. Mapa de peligro por caída de ceniza del volcán Misti para un escenario eruptivo tipo pliniano con VEI. El área de color azul indica la ubicación del distrito de Mariano Melgar. Las zonas de peligro consideran cenizas en capas con espesores variables de 50 cm hasta 1 m y 5 m. (Extraído de Lazarte et al., 2021).

2.2.4. Acciones que viene realizando el IGP en el volcán Misti

Diariamente, se reporta la actividad de todos los volcanes monitoreados por el IGP en la región Arequipa, el mismo que es compartido por correo electrónico al COEN y secretarios técnicos. Mientras que los boletines vulcanológicos detallan quincenalmente el comportamiento dinámico de la actividad del volcán Misti (<https://www.igp.gob.pe/servicios/centro-vulcanologico-nacional/productos-boletines>).

Asimismo, el IGP ha elaborado una [plataforma web](#) para uso exclusivo del Centro de Operaciones de Emergencia Regional de Arequipa, que les permite monitorear en tiempo real los principales volcanes del departamento de Arequipa (Misti, Chachani, Sabancaya y Coropuna). El IGP proporciona los accesos desde marzo de 2022, válidos únicamente para el COER y su módulo de monitoreo (Figura 21).

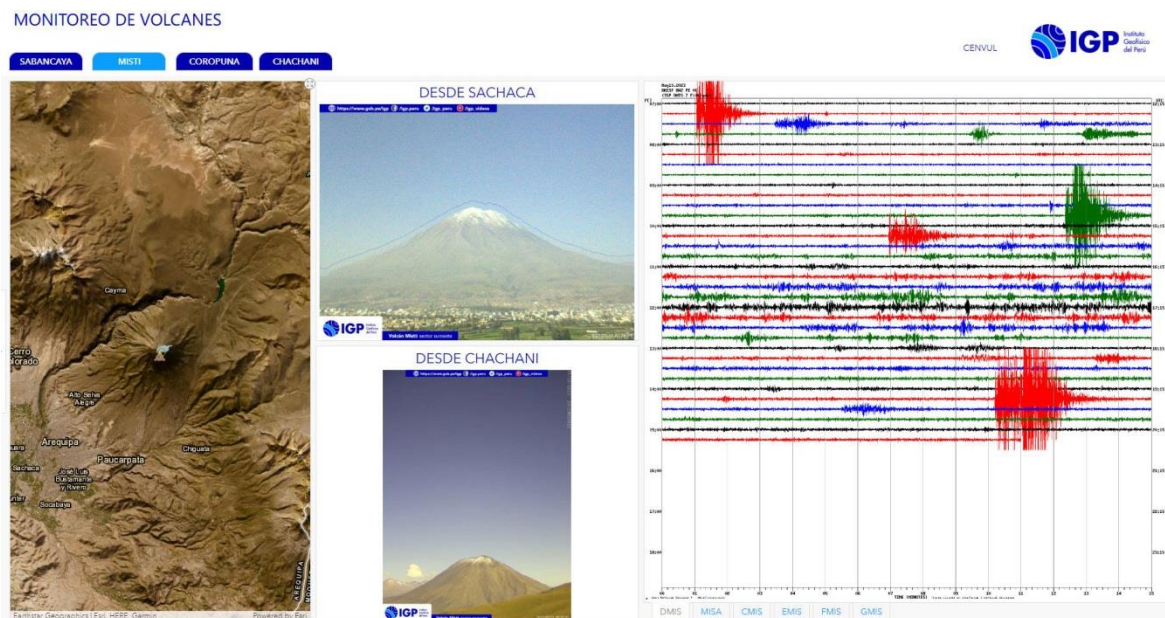


Figura 21. Dashboard de monitoreo de volcanes de Arequipa.

2.2.4.1. Capacitaciones y asesoramiento

En el 2023 , el IGP ha sostenido reuniones con las máximas autoridades responsables de la gestión del riesgo volcánico en Arequipa, es decir, tanto con el gobernador regional, Rohel Sánchez, así como con la jefa de la Oficina Regional de Gestión del Riesgo de Desastres y Defensa Nacional, la Arq. Guadalupe Suclla. En ambas reuniones, en las que participaron el presidente ejecutivo del IGP, el Dr. Hernando Tavera, además del director del Observatorio Vulcanológico del Sur, el Dr. Marco Rivera, se les explicó de manera

sustentada el rol y responsabilidades del IGP en el monitoreo volcánico en Perú.



Figura 22. Reunión de los funcionarios del IGP con las autoridades regionales de Arequipa en febrero de 2023.

Por otro lado, otro de los aspectos importantes para el IGP es afianzar las relaciones de trabajo y comunicación con los secretarios técnicos en GRD de los distritos de la provincia de Arequipa, quienes deben conocer el rol del IGP, en su condición de entidad oficial del Estado responsable de hacer el monitoreo de la actividad de los volcanes Misti y Chachani con fines de alerta volcánica.

Así, de este modo, en 2023 se han realizado dos actividades puntuales con estos funcionarios, quienes han visitado la sede del Observatorio Vulcanológico del Sur en Sachaca, donde han participado de una visita guiada y también de la explicación de la labor del IGP con respecto al volcán Misti. Esto ha permitido fortalecer

los canales de comunicación para la entrega de información de los volcanes Misti y Chachani.

La primera de estas actividades fue una visita guiada y capacitación sobre la actividad actual del Misti y Chachani, la cual fue coordinada con el subgerente de Defensa Civil de la Municipalidad Provincial de Arequipa. Mediante esta coordinación, distintos secretarios técnicos en GRD asistieron al OVS en marzo de 2023 para conocer sus modernas instalaciones y estrechar lazos de trabajo en la temática de volcanes y sismos.

La segunda actividad fue la presentación del proyecto de investigación financiado por PROCENCIA “Evaluación de la amenaza y exposición por lahares en Arequipa e implementación de un sistema de monitoreo de lahares”, mediante el cual el IGP realizará un aporte importante para la gestión del riesgo volcánico en Arequipa para el caso de lahares provenientes del volcán Misti. En esta actividad participó la Oficina Regional de Gestión del Riesgo de Desastres y Defensa Nacional, el subgerente de GRD de la Municipalidad Provincial de Arequipa, numerosos secretarios técnicos en GRD de distritos arequipeños, además de representantes de instituciones que conforman la plataforma regional de Defensa Civil.



Figura 23. Visita de los secretarios técnicos en GRD y capacitación por profesionales del IGP.



Figura 24. Participantes del evento de presentación de los proyectos del IGP, bajo financiamiento de Prociencia del Concytec, que contribuirá con la gestión del riesgo volcánico en Arequipa.

2.2.4.2. Socializando la información

Es importante cambiar el lenguaje técnico-científico a un lenguaje sencillo sobre los procesos eruptivos y sus peligros asociados, con el único objetivo de permitir el entendimiento de toda la población, especialmente de aquella que está expuesta al peligro volcánico. En ese sentido, se han elaborado una diversidad de documentos que pueden ser accedidos en el REGEN a través de los siguientes enlaces:

<https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/5164>;

<https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/5274>

2.2.5. Escenarios Eruptivos del volcán Misti

El volcán Misti es un estratovolcán que ha presentado históricamente erupciones explosivas con la emisión de cenizas. También en el pasado geológico reciente ha presentado avalancha de escombros, flujos piroclásticos, lahares y flujos de lava. En base al tipo de actividad que presento en el pasado es posible tener los siguientes escenarios eruptivos (<https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/5167>).

2.2.5.1. Erupción vulcaniana con IEV 1-2

Un escenario probable de ocurrir en el volcán Misti, es que este en el futuro, genere una erupción vulcaniana con la emisión de ceniza y proyectiles balísticos. En este tipo de actividad las columnas eruptivas de ceniza ascienden de 5 a 10 km de altura. La última erupción de este tipo se dio entre los años 1440-1470 d.C., y puede presentarse en un periodo de 500 a 1500 años (Thouret et al., 2001), por lo cual es uno de los escenarios más probables de ocurrir.

2.2.5.2. Erupción pliniana con IEV 5-6

Este tipo de erupción es violenta debido a que involucra un mayor volumen de magma y gases que generan columnas de ceniza, lapilli y gases mayores a 20 km de altura. Los peligros volcánicos ligados a este tipo de erupción son las caídas de cenizas, flujos piroclásticos, avalanchas de escombros, lahares, etc. La última gran erupción del Misti ocurrió hace aproximadamente 2050 años, la cual fue de este tipo, y tuvo un índice de explosividad volcánica (IEV) igual a 5 (Harpel et al., 2011).

2.3. VOLCÁN CHACHANI

El Chachani es un complejo volcánico potencialmente activo ubicado a aproximadamente 22 km del centro de la ciudad de Arequipa. Este complejo es uno de los más voluminosos de los andes centrales. Ocupa un área de 601 km², un volumen de 248-289 km³ y está compuesto por 12 edificios volcánicos (conos volcánicos, cumulo de domos y domos coladas de composición andesítica y dacítica). En el pasado, el volcán Chachani ha generado voluminosos depósitos de lavas, tefras y flujos piroclásticos, así como la ocurrencia de lahares que evidencian la elevada magnitud de sus procesos eruptivos, algunos más violentos que los asociados al volcán Misti. Depósitos de lahares recientes y pasados son visibles en las quebradas existentes al pie del flanco sur del volcán Chachani (<https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/4927>).

En la última década, debido a la migración de la población de las zonas rurales o zonas alto andinas a las importantes ciudades; en Arequipa se ha

incrementado el número de asentamientos humanos en las cercanías y en las quebradas que descienden del volcán Chachani (flanco sur). Este volcán, actualmente “dormido”, tiene aún el potencial de generar un proceso eruptivo que afectaría a las áreas pobladas ubicadas en su entorno.

2.3.1. Historia eruptiva del volcán Chachani

Reconocimiento por imágenes satelitales, así como estudios geológicos muestran que este complejo ha tenido tres periodos de evolución volcánica que va desde el Pleistoceno inferior (volcanes Chingana, Nocarane y Estribo, así como el domo y colada El Colorado), Pleistoceno medio-superior (volcanes El Angel y Chachani, y domos Horqueta, El Rodado y Cruzado) y Pleistoceno superior (domos colada Aeropuerto y Volcancillo, así como flujos de lava Uyupampa. (<https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/797>). Aunque no ha presentado una erupción volcánica probablemente desde el Holoceno o la época histórica, aún muestra condiciones de generar actividad eruptiva.

2.3.2. Mapa de ubicación de los sistemas de monitoreo

La red de vigilancia permanente del volcán Chachani está compuesta por dos estaciones vulcanológicas que integran: 1 sismómetro de banda ancha, 1 inclinómetro y 1 videocámara. La instrumentación operativa consigna a los equipos de monitoreo de carácter permanente y con capacidad de transmisión de datos en tiempo real (Figura 25). Sobre la figura se describe el empleo de la diversidad de instrumentos. Las señales de monitoreo es recepcionada en tiempo real y de manera permanente a las instalaciones del CENVUL, en Arequipa.

(<https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/5276>).

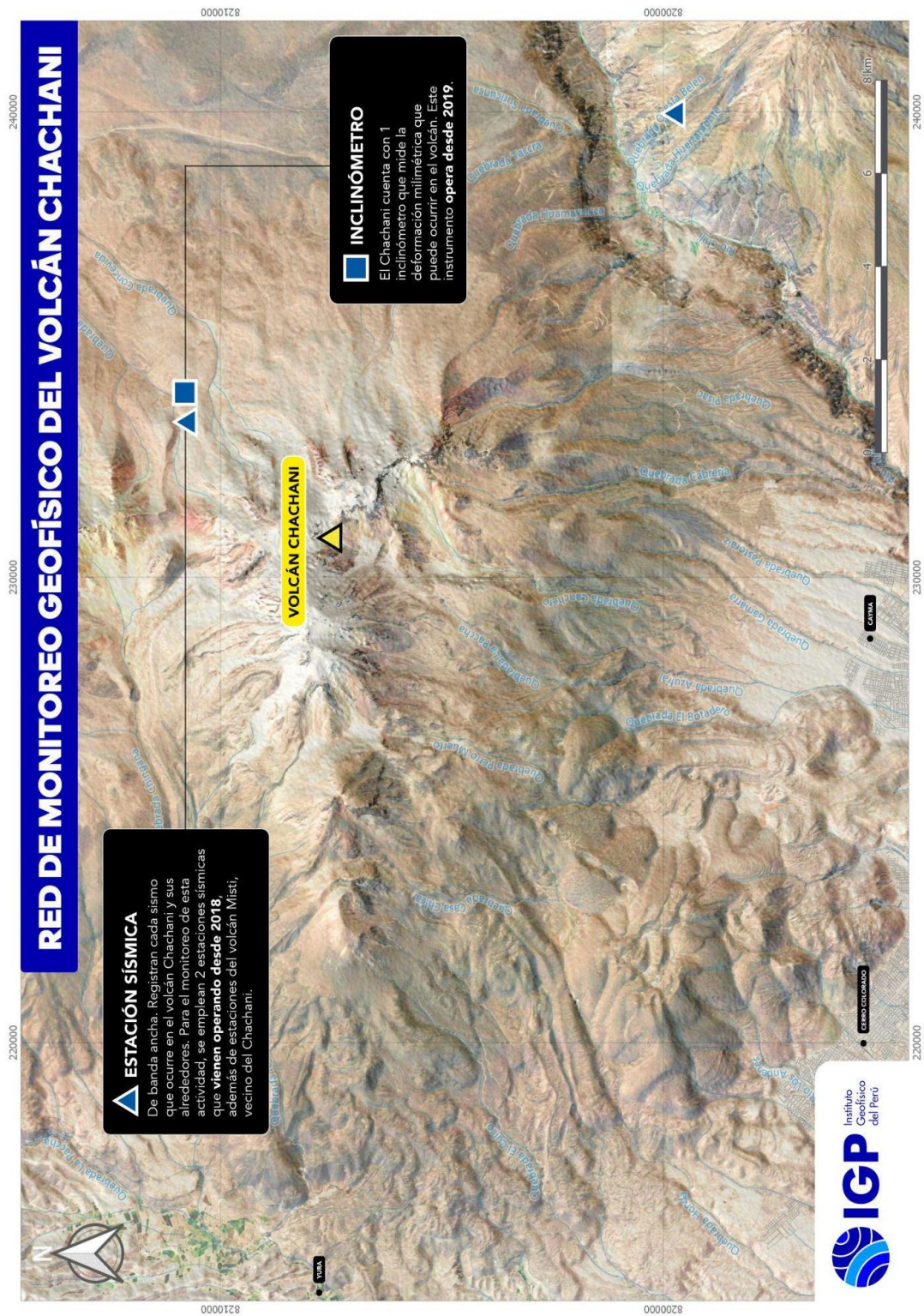


Figura 25. Red de monitoreo geofísico del volcán Chachani (<https://www.igp.gob.pe/servicios/centro-vulcanologico-nacional/volcanes-monitoreados>).

2.3.3. Caracterización del peligro volcánico y mapas de Peligro

El Chachani es considerado como un volcán de alta peligrosidad, debido que aún existen manifestaciones de actividad sísmica y presencia de fuentes termales al pie de su flanco suroeste que muestran que el volcán está en estado latente. Además, al pie de su flanco sur y sueste se ubica la ciudad de Arequipa donde habitan más de 1 millón de personas, asentadas en un radio de 30 km de este volcán. Además, al sur del Chachani se ubica el aeropuerto internacional Alfredo Rodríguez Ballón y otros tipos de obras de infraestructura importante de la ciudad pueden ser afectados por los productos emitidos durante una erupción del volcán Chachani (<https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/5276>).

En las quebradas que se prolongan del volcán Chachani se distinguen lahares que evidencian que este tipo de peligro es latente y probable de ocurrir en temporadas de lluvias o erupciones volcánicas.

2.3.3.1. Peligro por descenso de lahares

En los últimos años, lahares generados en el volcán Chachani tras la ocurrencia de fuertes lluvias permitieron la formación de un flujo de lodo (lahares) que descendió por la Quebrada de Añashuayco, ubicada en el distrito de Cerro Colorado. Flujos de lodo descendieron por algunas torrenteras de este distrito inundando la Avenida Vía-54 y la Villa Magisterial, situación que ocasionó el desborde de la torrentera El Nazareno en el mismo distrito. Igualmente, varias quebradas en la parte alta de Cayma también se activaron. Asimismo, se produjo el ingreso de flujos de lodo en los distritos de Sachaca y Yanahuara, donde la torrentera Chullo aumentó su caudal y originó preocupación entre los residentes que

habitan próximo a su cauce. En el distrito de Sachaca, la avenida Fernandini quedó bloqueada por el desborde de la torrentera Chullo (<https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/4927>).

Del Carpio et al. (2022), estima que aproximadamente 117 196 personas están expuestas al descenso de lahares (Figura 25). (<https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/5276>)

2.3.3.2. Escenarios de peligros por descenso de lahares

El estudio realizado por Rivera et al. (2020) sobre los peligros por descenso de lahares del volcán Chachani, ha identificado quebradas por donde podrían discurrir flujos de lodo provenientes del volcán Chachani (sector sur), como: quebrada Los Andenes, Estanquillo-Añashuayco, Azufral, Pastoraiz y la torrentera Chullo. Por su extremo noroeste, las quebradas drenan los flujos de lodo hacia el río Yura, constituyéndose como un peligro importante que pone en riesgo a un importante número de viviendas (<https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/4927>). En base a dos volúmenes de agua: 2 Mm³ y 5 Mm³, que podrían generarse durante lluvias intensas, se han establecido dos escenarios de peligro por descenso de lahares, detallados a continuación.

- **Escenario 1: Alto peligro** (Figura 26, quebradas/áreas de color rojo). En este escenario se considera la generación de flujos de lodo con volúmenes de 2 Mm³ que discurren por las quebradas que drenan por el flanco sur del volcán, siendo su probabilidad de ocurrencia alta sobre todo durante periodos de lluvias intensas. Estos lahares tendrían un alcance aproximado de 13 km y podrían afectar viviendas de algunos asentamientos humanos y

urbanizaciones ubicados en los distritos de Cayma, Cerro Colorado, Yura y Yanahuara: Alto Cayma, Nazareno, Montoneros, San Miguel, Zamácola, La Tomilla, Acequia Alto Chilina, Carmen Alto, Santa Luisa, Galendulas, Umacollo, La Victoria, Las Flores, Las Canteras, Virgen de Chapi, Granjeros Unidos, Ciudad Municipal, Río Seco, Los Camineros, Apipa, Cuesta Blanca, San Jancinto, Tambillo, La Rinconada, Piedra Grande, Los Milagros y Las Laderas.

- **Escenario 2: Moderado peligro** (Figura 26, quebradas/áreas de color naranja). Considera la ocurrencia de lahares con volúmenes de 5 Mm^3 que discurren por las quebradas que drenan por el flanco sur del volcán, causados por las precipitaciones pluviales intensas y/o por una posible erupción del volcán Chachani.

Estos lahares podrían tener un alcance aproximado de 20 km y afectarían viviendas y avenidas de diferentes asentamientos humanos y urbanizaciones ubicados en los distritos de Cayma, Cerro Colorado, Yura, Yanahuara y Sachaca: Alto Cayma, Nazareno, Montoneros, San Miguel, Zamácola, La Tomilla, Acequia Alto Chilina, Carmen Alto, Santa Luisa, La Victoria, Las Flores, Las Canteras, Virgen de Chapi, Granjeros Unidos, Ciudad Municipal, Río Seco, Los Camineros, Apipa, Cuesta Blanca, San Jancinto, Tambillo, Uchumayo, La Rinconada, Piedra Grande, Los Milagros, Las Laderas, Umacollo, Montevello, Vallecito y Socosani.

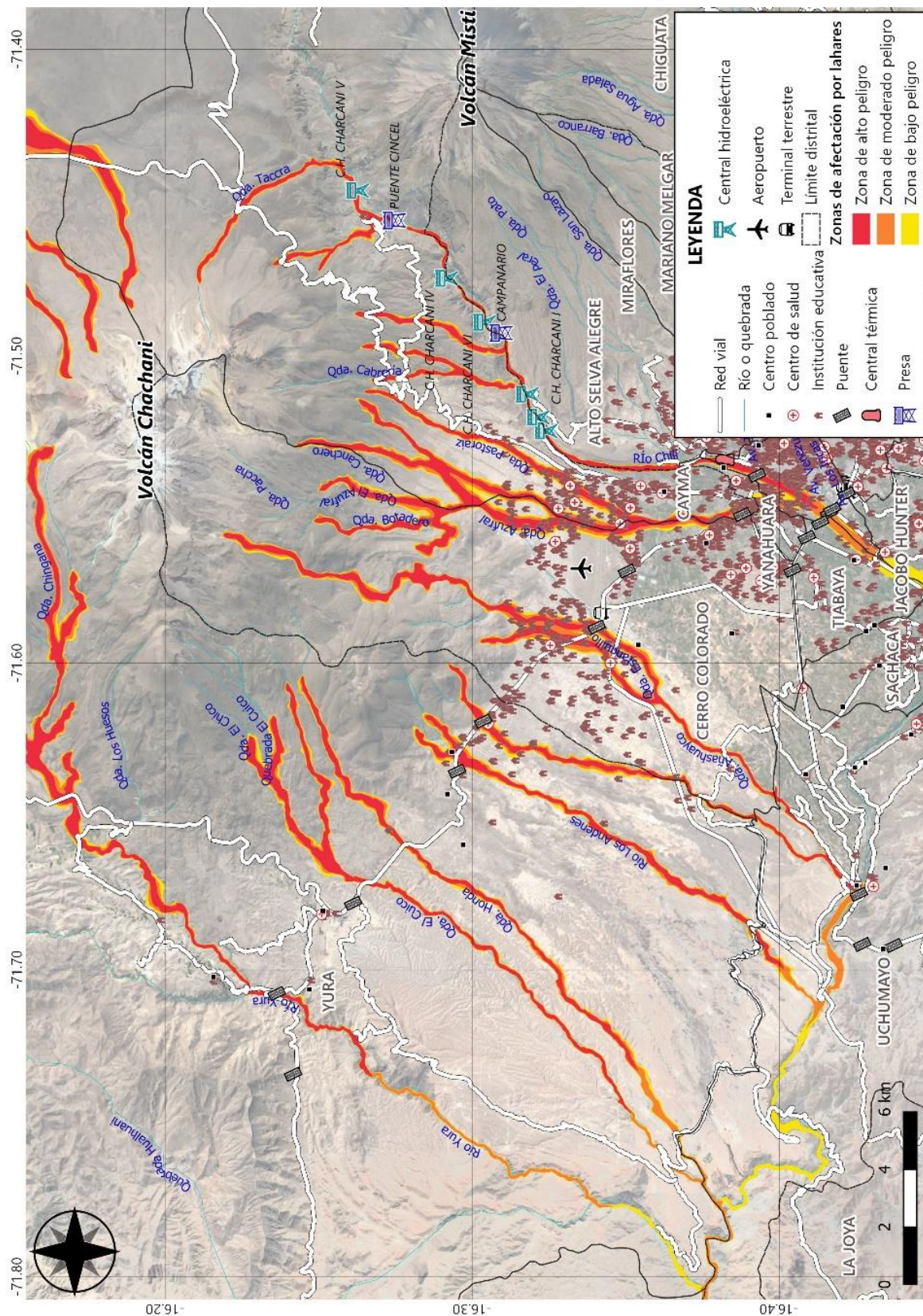


Figura 26. Mapa de peligro por descenso de lahares en el volcán Chachani (Extraído de Rivera et al., 2021).

Escenario 3: Bajo peligro (Figura 26, quebradas/áreas de color amarillo). La zona de bajo peligro puede ser afectada por lahares de gran volumen (9 Mm^3). Estos lahares pueden tener un alcance igual o superior a 40 km. Estos lahares de gran volumen afectarían algunos asentamientos humanos y urbanizaciones, tales como Alto Cayma, Nazareno, Montoneros, San Miguel, Zamácola, La Tomilla, Acequia Alta Chilina, Carmen Alto, Santa Luisa, Galendulas, La Victoria, Las Flores, Las Canteras, Virgen de Chapi, Granjeros Unidos, Ciudad Municipal, Río Seco, Los Camineros, Apipa, Cuesta Blanca, San Jancinto, Tambillo, Uchumayo, La Rinconada, Piedra Grande, Los Milagros, Las Laderas, Umacollo, Montevello, Vallecito, Mollebaya Chico, Mollebaya Grande y Socosani, La Aparecida, Alata, Tingo Grande y Alto Cerro Verde, las cuales corresponde a los distritos de Cayma, Cerro Colorado, Yura, Yanahuara, Sachaca, Tiabaya y Uchumayo.

2.3.4. Acciones que viene realizando el IGP en el volcán Chachani

El IGP, a través del CENVUL, realiza el monitoreo permanente y en tiempo real del volcán Chachani. Además, realiza visitas e inspecciones in-situ al volcán con otra diversidad de instrumentos portátiles que permiten reforzar y mejorar los modelos de pronósticos de erupciones volcánicas.

2.3.4.1. Acceso libre a la información

Diariamente, se reporta la actividad de todos los volcanes monitoreados por el IGP en la región Arequipa, el mismo que es compartido por correo electrónico al COEN y secretarios técnicos. Mientras que los boletines vulcanológicos detallan mensualmente el

comportamiento dinámico de la actividad del volcán Chachani (<https://www.igp.gob.pe/servicios/centro-vulcanologico-nacional/productos-boletines>).

Asimismo, el IGP ha elaborado una [plataforma web](#) para uso exclusivo del Centro de Operaciones de Emergencia Regional de Arequipa, que les permite monitorear en tiempo real los principales volcanes del departamento de Arequipa (Misti, Chachani, Sabancaya y Coropuna). El IGP proporciono los accesos desde marzo de 2022, válidos únicamente para el COER y su módulo de monitoreo (Figura 26).

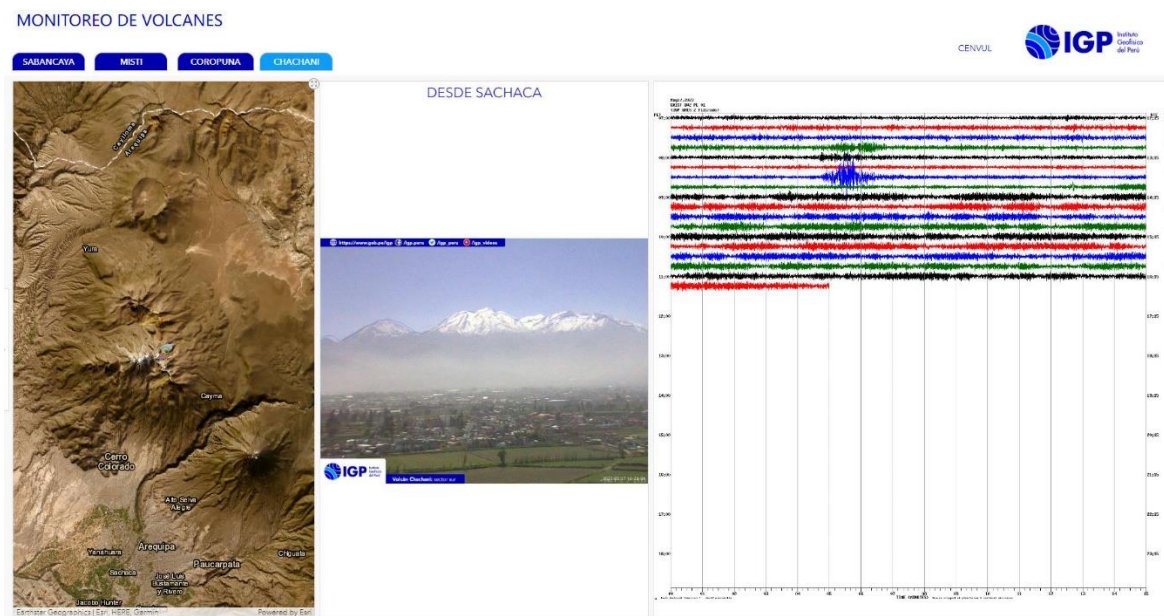


Figura 27. Dashboard de monitoreo de volcanes de Arequipa.

2.4. VOLCÁN COROPUNA

El Complejo Volcánico Nevado Coropuna (CVNC) está ubicado a 150 km al noroeste de la ciudad de Arequipa, en las provincias de Condesuyos y Castilla, cerca al extremo septentrional de la Zonal Volcánica Central (ZVC) de

los Andes (<https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/5116>). El CVNC, es considerado como un volcán “activo” y de alta peligrosidad (<https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/5276>).

2.4.1. Historia eruptiva del volcán Coropuna

En la parte central y más alta del complejo volcánico se han identificado al menos cinco edificios o estratovolcanes y domos de lava que se distribuyen en dirección este-oeste, denominados Yanaranra (6305 m s.n.m.), Coropuna (6161 m s.n.m.), Paiche (6330 m s.n.m.), Casulla (6377 m s.n.m.) y Escalera (6171 m s.n.m.). El complejo tiene aproximadamente 25 km de largo y 17 km de ancho. A continuación, se describen las características geológicas de cada edificio volcánico.

2.4.1.1. Edificio Coropuna

Es considerado como el edificio volcánico más antiguo de los 5 edificios que componen el CVNC. Se encuentra en la parte central, entre los edificios Yanaranra y Paiche. Al edificio se le asocian tres flujos de lava emplazados en el sector sur del volcán: (i) Flujo de lava andesítica porfirítica, datado en 270.1 ± 6.2 ka; (ii) flujo de lava andesítica porfirítica y (iii) flujo de lava andesítica afanítica.

2.4.1.2. Edificio Paiche

Este edificio volcánico está ubicado en el extremo suroccidental del complejo volcánico Coropuna, entre los edificios Escalera y Coropuna. Este edificio presenta 6 flujos de lava en bloques, así como domo y domos colada. Este estratocono presenta un cráter de 0.8 km de diámetro, el cual está cubierto por una gruesa capa de glaciación.

2.4.1.3. Edificio Escalera

Se ubica en el extremo occidental del Complejo Volcánico Coropuna, al oeste de los edificios de Casulla y Paiche. A este edificio se le asocian 4 flujos de lavas andesíticos emplazados en dirección oeste. Los flujos de lavas son denominados: (i) flujos de lava andesítica porfirítica oscuro, (ii) secuencias de flujos piroclásticos y flujos de lavas, (iii) flujos de lava andesítica porfirítica, datados en 118 ± 2.3 ka (Bromley et al., 2019), y (iv) flujos de lava andesítica afírica, datados en 255 ± 5.4 ka.

2.4.1.4. Edificio Casulla

Está ubicado en el extremo noroccidental del Complejo Volcánico Coropuna. En la parte de la cima de este edificio Casulla se ha identificado un conjunto de domos de lava, así como un cráter de aproximadamente 0.5 km de diámetro, todos cubiertos por el glaciar. Al edificio se le asocian extensos flujos de lava en bloques de espesor variable que se encuentran emplazados al norte y noroeste del Coropuna, hasta poco más de 15 km de distancia. Se distinguen al menos 8 flujos de lava andesítica. El flujo de lava mejor preservado puede ser observado en el sector noroeste y se extiende aproximadamente a lo largo de 6 km. Un flujo de lava ha sido datado en 12.5 ± 0.2 ka (Bromley et al., 2019).

2.4.1.5. Edificio Yanaranra

Se encuentra ubicado en el extremo oriental del complejo volcánico Coropuna y está emplazado sobre secuencias lávicas y piroclásticas. El edificio es considerado el más joven de dicho complejo, en el cual se han identificado 4 flujos de lava de composición andesítica. El flujo de lava más reciente se extiende en el

sector noreste y sureste y tiene edades de 2.1 ± 0.2 ka y 0.7 ± 0.4 ka (Bromley et al., 2019; Ubeda, 2011).

Las estructuras volcano-tectónicas de este complejo tienen direcciones NNE-SSO, NE-SO y NO-SE. Este complejo se encuentra emplazado por sobre una serie de al menos cuatro secuencias de ignimbritas y posibles calderas de edad Mio-Pleistoceno cuyos afloramientos se extienden ampliamente hacia el Sur, Suroeste y Sureste del complejo. (<https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/797>).

2.4.2. Mapa de ubicación de los sistemas de monitoreo

La red de vigilancia permanente del volcán Coropuna, está conformada por 5 estaciones sísmicas, 2 inclinómetros y 1 videocámara (<https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/5276>). Además, se realizan campañas temporales de medición de GPS y técnicas satelitales, como la interferometría radar y la detección de anomalías térmicas sobre el cráter del volcán. Las señales de monitoreo son recepcionadas en tiempo real y de manera permanente a las instalaciones del CENVUL, en Arequipa. Sobre la figura se describe el empleo de la diversidad de instrumentos (Figura 28).

2.4.3. Caracterización del peligro volcánico y mapas de Peligro

El Coropuna es el volcán más alto de los 16 volcanes activos y potencialmente activos del sur del Perú, y alberga un casquete glaciar de 44.1 km² que representa la mayor reserva de agua en este sector de los Andes. Ello beneficia a más de 25 000 personas que habitan en las provincias de Castilla, Condesuyos y Camaná en la región de Arequipa, zonas de influencia de este volcán y cuyas principales actividades económicas son la agricultura y la ganadería. En la actualidad, aunque el CVNC no presenta un proceso eruptivo,

es latente la ocurrencia de lahares por desprendimiento del casquete glaciar (<https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/5116>).

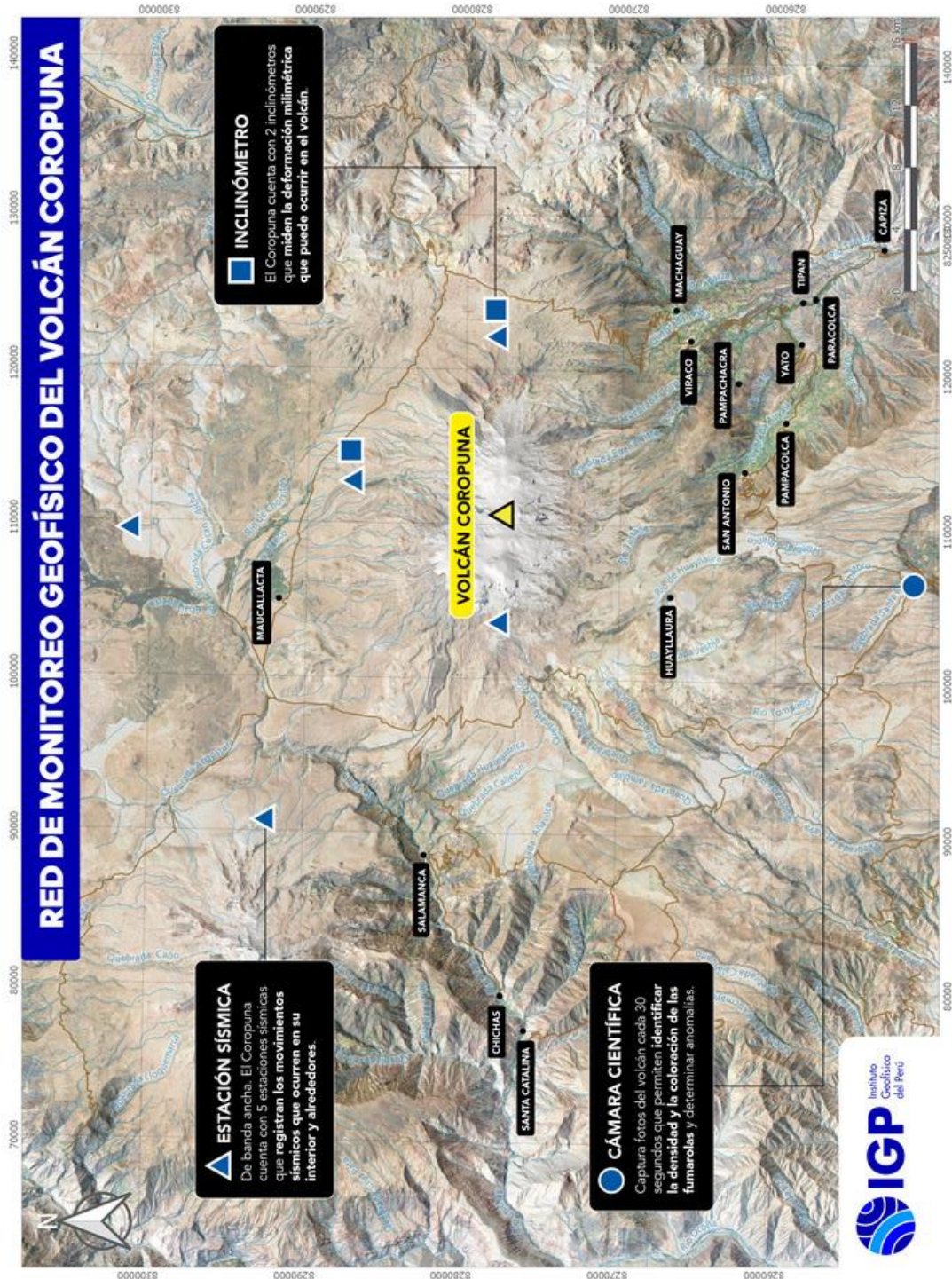


Figura 28. Red de monitoreo geofísico del volcán Coropuna (<https://www.igp.gob.pe/servicios/centro-vulcanologico-nacional/volcanes-monitoreados>).

2.4.3.1. Peligro por descenso de lahares

Rivera et al. (2021) ha recopilado información sobre la ocurrencia de lahares en la zona del Coropuna, es así que, según la Autoridad Nacional del Agua (ANA), el 22 de diciembre de 2016 ocurrió un lahar de volumen importante en el sector sur del volcán Coropuna, afectando la zona conocida como “Nevados” y según los datos tomados de la estación Huatiapa, el río Majes habría incrementado su caudal hasta en 18 m³/s. El lahar del 22 de diciembre, ocasionó daños en bocatomas y canales de agua de las localidades de Tipán, Pampacolca y Viraco, además de pérdida de zonas de pastoreo por afectación del bofedal “Los Nevados”. (<https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/4927>). Eventos de este tipo podrían incrementarse en el futuro, ocasionados por la precipitación pluvial o por el deshielo de parte del glaciar producto de la reactivación del volcán Coropuna.

Del Carpio et al. (2022), estima que aproximadamente 1473 personas estarían expuestas a la ocurrencia de lahares voluminosos (Figura 28). (<https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/5276>)

2.4.3.2. Escenarios de peligros por descenso de lahares

Rivera et al. (2021), en la zona de influencia del volcán Coropuna ha identificado alrededor de 28 quebradas que bien pueden activarse por la ocurrencia de lahares, de modo que, su estudio propone tres escenarios de peligros en caso de ocurrencia de lahares (<https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/4927>).

- **Escenario 1: Alto peligro** (Figura 29, áreas en color rojo): Considera la generación de lahares con volúmenes próximos a los 2 Mm^3 con origen en la desglaciación del Coropuna o por precipitaciones pluviales intensas con un alcance aproximado de 22 km que discurriría por las quebradas que descienden por la zona de Tipan y Jollpa. En su recorrido, los poblados de Palljaruta, Rituy, Yato, Cotcota y Paracolca podrían ser afectados. Asimismo, algunos tramos de las carreteras afirmadas Capiza-Pampacolca, Capiza-Viraco, Chuquibamba-Salamanca, Chuquibamba-Cotahuasi y la carretera Pampacolca-Maucallacta-Andahua. Igualmente, están en esta zona varios canales de regadío ubicados a lo largo del valle de Pampacolca y Tipan.
- **Escenario 2: Moderado peligro** (Figura 29, áreas de color naranja): En este escenario se considera la generación lahares con volúmenes moderados del orden de 10 Mm^3 y que afectarían parte de los poblados de Sullunja, Sora Kcasa, Iray, Salamanca, Tipan, MaucallactaYachanguillo, Santa Catalina, Andamayo, Ongoro y Quicay. Además, de algunos tramos de las carreteras Andamayo-Tipan, Acoy-Iray- Chuquibamba y Chuquibamba-Andaray-Yanaquihua.
- **Escenario 3: Bajo peligro** (Figura 29, áreas de color amarillo): Para este caso, se considera la generación de lahares de gran volumen de 20 Mm^3 y de presentarse, alcanzarían distancias mayores o iguales a 50 km desde el volcán pudiendo represar el río Majes y generar lahares secundarios que afectarían los valles de Majes (Aplao, Corire) y Ocoña, así como las instalaciones de la minera Yanaquihua. También podrían afectar los poblados de Chichas, Arhuin, Viraco, San Antonio, Huami y Acoy. En general,

la posibilidad de ocurrencia de estos lahares es muy baja, ya que se producirían por el derrumbe de una parte del casquete glaciar o por la erupción del volcán Coropuna.

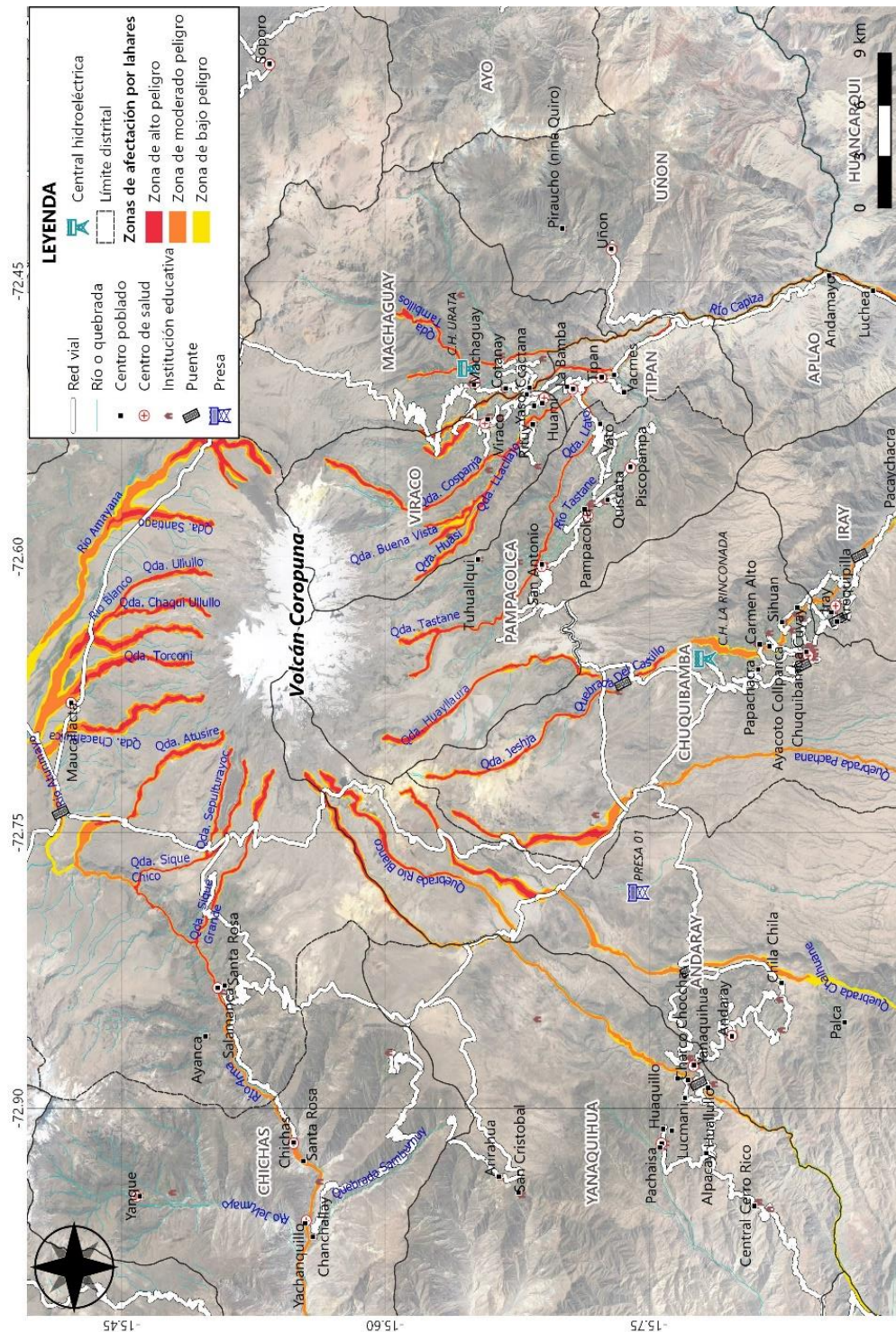


Figura 29. Mapa de peligro por descenso de lahares en el volcán Coropuna (Extraído de Rivera et al., 2021).

2.4.4. Acciones que viene realizando el IGP en el volcán Coropuna

El IGP, a través del CENVUL, realiza el monitoreo permanente y en tiempo real del volcán Coropuna. Además, realiza visitas e inspecciones in-situ al volcán con otra diversidad de instrumentos portátiles que permiten reforzar y mejorar los modelos de pronósticos de erupciones volcánicas.

2.4.4.1. Acceso libre a la información

Diariamente, se reporta la actividad de todos los volcanes monitoreados por el IGP en la región Arequipa, el mismo que es compartido por correo electrónico al COEN y secretarios técnicos.

Mientras que los boletines vulcanológicos detallan mensualmente el comportamiento dinámico de la actividad del volcán Coropuna (<https://www.igp.gob.pe/servicios/centro-vulcanologico-nacional/productos-boletines>).

Asimismo, el IGP ha elaborado una [plataforma web](#) para uso exclusivo del Centro de Operaciones de Emergencia Regional de Arequipa, que les permite monitorear en tiempo real los principales volcanes del departamento de Arequipa (Misti, Chachani, Sabancaya y Coropuna). El IGP proporciono los accesos desde marzo de 2022, válidos únicamente para el COER y su módulo de monitoreo (Figura 30).

2.4.4.2. Capacitaciones y asesoramiento

Con respecto a este apartado, el IGP ha establecido una relación de comunicación con el alcalde provincial de Castilla, Sr.

Renzo Pastor, quien ha visitado en marzo de 2023 la sede del Observatorio Vulcanológico del Sur del IGP en el marco de reuniones de coordinación para la renovación de categoría de geoparque de la UNESCO del “Colca y volcanes de Andagua”.

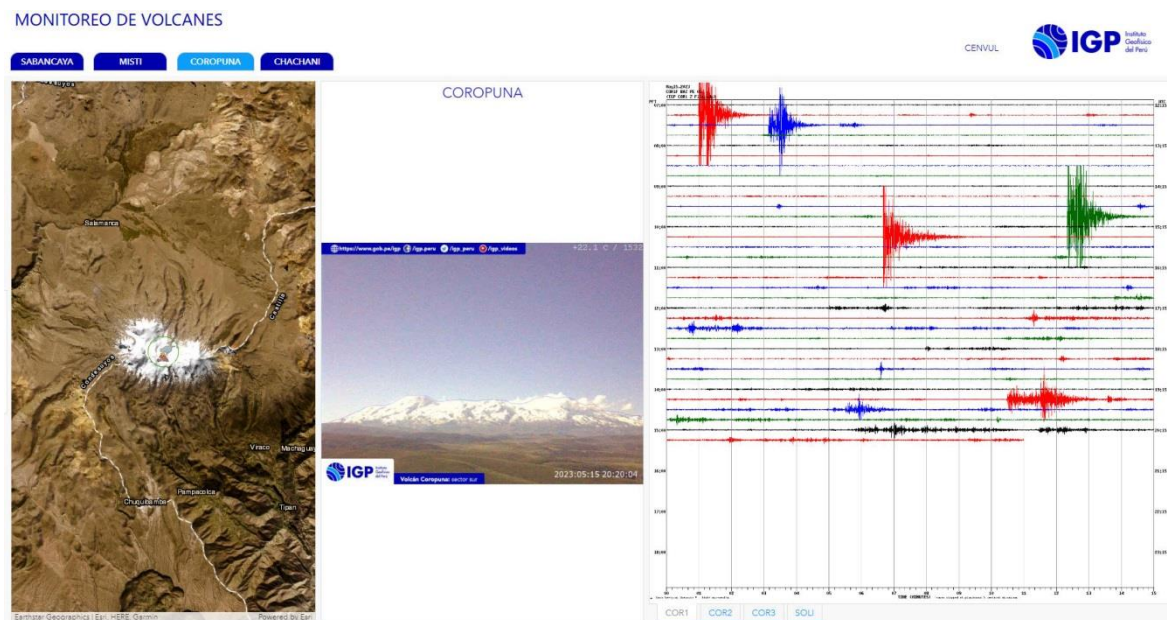


Figura 30. Dashboard de monitoreo de volcanes de Arequipa.

Durante su visita al OVS, se le ha explicado la situación del volcán Coropuna y los peligros que podría dar lugar en caso de una futura reactivación. Así, se ha sentado el compromiso para realizar una actividad de capacitación a las autoridades y población de los distritos cercanos al Coropuna, tales como Viraco y Machaguay, con el fin de sensibilizarlos respecto a lo que significa convivir con un volcán activo.



Figura 31. Visita del alcalde provincial de Castilla al IGP en marzo de 2023.

2.4.4.3. Socializando la información

Es importante cambiar el lenguaje técnico-científico sobre los procesos dinámicos que rigen sobre un proceso eruptivo y sus peligros asociados, con el objetivo de permitir el entendimiento de toda la población, especialmente de aquella que está expuesta al peligro volcánico. En ese sentido, se han elaborado una diversidad de documentos que pueden ser accedidos en el REGEN a través de los siguientes enlaces:

<https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/5157>

2.5. SEMÁFORO DE ALERTA VOLCÁNICA

El semáforo volcánico es un sistema de información que muestra los diferentes niveles de actividad (pre-eruptiva y eruptiva) que presenta un volcán

con base en los parámetros sísmicos, deformación, térmico, geoquímico y visual. El semáforo de alerta volcánico considera cuatro (04) colores relacionados con niveles de actividad volcánica (Tabla 1). Dicha información ha sido proporcionada a INDECI y la PCM para su incorporación en el documento del Sistema de Alerta Temprana en caso de erupciones volcánicas, actualmente en proceso de elaboración

2.5.1. Umbrales de los parámetros geofísicos, geoquímicos, visuales y satelitales para la emisión de avisos

Los umbrales son valores numéricos que se obtienen en base a registros instrumentales procedentes de las disciplinas de monitoreo volcánico: sísmicos, deformación, térmicos, geoquímicos y visuales obtenidos desde el año 2005 (Tabla 1). Se consideran los siguientes umbrales de actividad volcánica consignado en el semáforo de alerta volcánica para la emisión de avisos.

Periodo de actividad	Manifestaciones físicas y químicas de acuerdo al método y técnica de monitoreo					
	Nivel de Actividad	Nivel de sismicidad volcánica	Nivel de deformación	Actividad Visual	Anomalías geoquímicas y/o térmicas	Acciones
Periodo de inactividad	VERDE	- La sismicidad se encuentra en su nivel base y/o presenta leve variación en el número y energía de los sismos. - Algunos volcanes presentan usualmente decenas de sismos Volcano Tectónicos (VT) diarios, menos frecuente es la ocurrencia de sismos Largo Periodo (LP) y algunos presentan señales sísmicas de tipo Híbrido.	No hay cambios en la deformación superficial del volcán, tanto en la componente vertical y/o horizontal (nivel base).	- Ausencia o escasa actividad fumarólica (principalmente vapor de agua). - A veces la actividad fumarólica es esporádica y puede sobrepasar los 500 m de altura sobre la cima.	Los valores de temperatura superficial del cráter, así como, la temperatura y composición de las fuentes térmicas próximas a los volcanes están dentro de los parámetros normales.	- Mantener el monitoreo constante. - Emilitr boletín vulcanológico de manera mensual informando sobre el nivel de actividad volcánica.
	AMARILLO	- El número de sismos diarios, de altas frecuencias (VT) y/o bajas frecuencias (LPs y Tornillos), se incrementa en un 25% en un periodo que puede variar entre horas, días o semanas. - En algunas ocasiones se presentan enjambres sísmicos.	- Incremento de velocidad de las componentes vertical y/o horizontal producto de deformación superficial por encima del nivel base (próximo a cero). - Registro de anomalías de deformación que evidencian el ascenso de magma.	- Emisiones fumarólicas constantes con alturas superiores a los 500 m sobre el cráter. - Se observa pequeños pulsos de ceniza y/o aparición de nuevos puntos de emisión observados en el cráter y/o en las laderas del volcán. - Se detectan anomalías térmicas.	- Incremento del 5% al 20% de la temperatura de fumarolas en el cráter y/o fuentes térmicas próximas al volcán. - Los niveles de densidad de SO₂ sobrepasan continuamente los 10 DU.	- Emilitr boletín vulcanológico de manera semanal. - Mantener el monitoreo constante.
Periodo de actividad	NARANJA	- Detección de sismos tremor, asociados al ascenso de magma y a la perturbación del sistema hidrotermal. - Incremento de la sismicidad con respecto al nivel anterior. - Generalmente, las señales sísmicas de tipo Híbrido y LPs, ambas asociadas a la circulación de fluidos volcánicos, se incrementan en más del 25%. - Se registran explosiones por día.	- Incremento de velocidad de deformación de las componentes vertical y/o horizontal respecto al nivel anterior. - Registro de anomalías de deformación que evidencian el ascenso de magma. - Detección de emplazamiento de domos mediante imágenes radar.	- Se registra constantemente emisión de térras (ceniza, lapilli, escoria, etc.) con alturas inferiores a 6 km sobre la cima del volcán que tendrían alcance local y regional. - Detección de anomalías térmicas menores a 100 megavatios (MW). - Se observa el emplazamiento de domos de lava.	- Emanaciones constantes de vapor de agua y gases (SO₂, CO₂, etc.). - Incremento sostenido de la temperatura de la superficie del cráter y/o fuentes térmicas, con respecto al nivel anterior. - Aparición de nuevas fuentes térmicas, campos fumarólicos y/o geiser próximo al volcán. - Los niveles de densidad de SO₂ sobrepasan continuamente los 15 DU.	- Emilitr un boletín de manera semanal informando sobre el incremento de la actividad. - Mantener el monitoreo constante, y el seguimiento de la actividad volcánica debe ser riguroso.
	ROJA	- Se incrementa en más del 50% el número y la energía de las señales sísmicas (Explosiones, LP, VT, Tremor, etc.), considerados como de nivel crítico. - Se registran señales asociadas a nuevos aportes de magma y/o incremento de señales de tipo Híbrido. - Explosiones más frecuentes y energéticas	- Incremento crítico de velocidad de los componentes vertical y/o horizontal. - Registro de importantes anomalías de deformación que evidencian el ascenso de magma. - Detección de emplazamiento de domos de lava con riesgo de colapso y generación de flujos piroclásticos y/o avalanchas.	- Se registra emisión de térras con alturas superiores a 5 km que tendrían alcance regional, nacional y/o continental. - Se observa el descenso de flujos piroclásticos y/o flujos de lava. - Generación de lahares asociados al emplazamiento de flujos piroclásticos y/o fusión de hielo y nieve. - Presencia de anomalías térmicas, muchas veces mayores a 100 MW. - Se observa el colapso de domos.	- Incremento de la tasa de emisión de gases volcánicos, principalmente, SO₂ y CO₂, con respecto al nivel anterior. - Cambio de composición de las fuentes térmicas y/o incremento del pH del agua. - Aparición de nuevas fuentes fumarólicas en amplias áreas. - Los niveles de densidad de SO₂ sobrepasan los 20 DU.	- Reunión permanente del grupo de especialistas. - Emilitr reporte vulcanológico diario informando sobre la actividad. - Evaluar permanentemente el estado de las variables de monitoreo. - Emisión de pronósticos sobre la actividad con una ventana máxima de 7 a 15 días.

Tabla 1. Umbrales de los parámetros geofísicos, geoquímicos, visuales y satelitales para la emisión de avisos.

3. BIBLIOGRAFÍA

- Barriga, V. (1951). Los terremotos en Arequipa (1582-1868)). *Arequipa, La Colmena*, 1-426.
- Bromley, G., Thouret, J., Schimmelpfennig, I., Mariño, J., Valdivia, D., Rademaker, K., & ASTER-Team. (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*, 64.
- Bulmer, M., Johnston, A., & Engle, F. (1999). Analysis of Sabancaya volcano, southern Peru using RADARSAT and LANDSAT TM Data. *Application Development and Research Opportunity (ADRO)*.
- CERESIS. (01 de Abril de 2013). *Centro Regional de Sismología para América del Sur*. Obtenido de Catálogo de Hipocentros: <https://www.ceresis.org/catalogo.php?id=58>
- Del Carpio, J., Rivera, M., Torres, J., Tavera, H., & Puma, N. (2022). *Evaluación del Peligro Volcánico en Perú: una herramienta para la gestión del riesgo de desastres*. Informe Técnico N°029-2022/IGP, Instituto Geofísico del Perú, Ciencias de la Tierra Sólida, Lima. Obtenido de <https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/5276>
- Gerbe, M., & Thouret, J. (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*, 541-561.
- Global Volcanism Program. (1997). Report on Sabancaya (Peru) (Wunderman, R., ed.). (S. Institution, Ed.) *Bulletin of the Global Volcanism Network*, 22(7). doi:<https://doi.org/10.5479/si.GVP.BGVN199707-354006>
- Guillande, R., Thouret, J., Huamán, D., Gourgaud, A., & Le Guern, F. (1992). L'activité éruptive actuelle du volcan Nevado Sabancaya (Sud du Pérou) et l'évaluation des menaces et des risques. *Géologie, cartographie et imagerie satellitaire*.

- Hantke, G., & Parodi, A. (1966). Catalogue of the active volcanoes of the world; Part XIX, Colombia, Ecuador and Perú. *IAVCEI*, 1-73.
- Harpel, C., De Silva, S., & Salas, G. (2011). The 2 ka eruption of Misti Volcano, southern Peru— the most recent plinian eruption of Arequipa's iconic volcano. *Geological Society of America, Special Papers*, 484, 1-72.
- Huamán, M. (1995). *Métodos y aplicaciones de las imágenes de satélite en cartografía geológica: el caso del seguimiento y evolución de la amenaza volcánica del Sabancaya (región del Colca, Arequipa, Perú)*. Tesis pregrado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa.
- INEI. (2018). Censos Nacionales XII de Población y VII de Vivienda, 22 de octubre del 2017, Perú: Resultados Definitivos. *Instituto Nacional de Estadística e Informática*.
- Juvigné, E., Thouret, J.-C., Loutsch, I., Lamadon, S., Frechen, M., Fontugne, M., . . . Mariño, J. (2008). Retombées volcaniques dans des tourbières et lacs autour du massif des Nevados Ampato et Sabancaya (Pérou méridional, Andes Centrales). *Quaternaire*, 19(2), 157-173. doi:doi.org/10.4000/quaternaire.3362
- Lazarte, I., Macedo, L., Vargas, K., & Cruz, J. (2021). *Evaluación del peligro por caída de cenizas del volcán Misti y afectación al distrito de Mariano Melgar - Arequipa*. Informe Técnico n° 022-2021/IGP, Instituto Geofísico del Perú. Obtenido de <https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/5002>
- Rivera, M., Del Carpio, J., Tavera, H., Cruz, J., Vargas, K., Torres, J., & Concha, J. (2021). *Análisis y evaluación de escenarios críticos por descenso de lahares en volcanes peruanos*. Instituto Geofísico del Perú, Lima. Obtenido de <https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/4927>
- Rivera, M., Mariño, J., Samaniego, P., Delgado, R., & Manrique, N. (2016). *Geología y evaluación de peligros del complejo volcánico Ampato - Sabancaya (Arequipa)*. Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Lima.

- Samaniego, P., Rivera, M., Mariño, J., Guillou, H., Liorzou, C., Zerathe, S., . . . Scao, V. (2016). The eruptive chronology of the Ampato–Sabancaya volcanic complex (Southern Peru). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 323, 110-128.
- Siebert, L., Simkim, T., & Kimberly, P. (2011). *Volcanoes of the world: Third Edition*. Los Angeles, California: University of California Press.
- Thouret, J., Finizola, A., Fornari, M., Legeley-Padovani, A., Suni, J., & Frechen, M. (2001). Geology of El Misti volcano near the city of Arequipa, Peru. *Boletín de la Sociedad Geológica de América*, 1593-1610.
- Thouret, J., Guillande, R., Huaman, D., Gourgaud, A., Salas, G., & Chorowicz, J. (1994). L'activité actuelle du Nevado Sabancaya (Sud Pérou): reconnaissance géologique et satellitaire, évaluation et cartographie des menaces volcaniques. *Bull. Soc. géol. France*, 165(1), 49-63.
- Ubeda, J. (2011). *El impacto del cambio climático en los glaciares del complejo volcánico nevado Coropuna, (cordillera occidental de los andes centrales)*. Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid, Madrid.
- Vargas, K., Macedo, L., Lazarte, I., & Cruz, J. (2021). *Análisis de los escenarios de peligros volcánicos con origen en el volcán Misti: Aplicación al Distrito de Mariano Melgar*. Informe Técnico 011-2021/IGP, Instituto Geofísico del Perú, Lima. Obtenido de <https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/4945>
- Vargas, K., Rivera, M., & Torres, J. (2020). *Análisis geofísico de zonas susceptibles a deslizamientos en el valle del Colca (Caylloma – Arequipa)*. técnico, Instituto Geofísico del Perú. Obtenido de <https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/4850>
- Zamácola, & Jaúregui. (1804). *Apuntes Para la Historia de Arequipa*, Año de 1804. 96.

