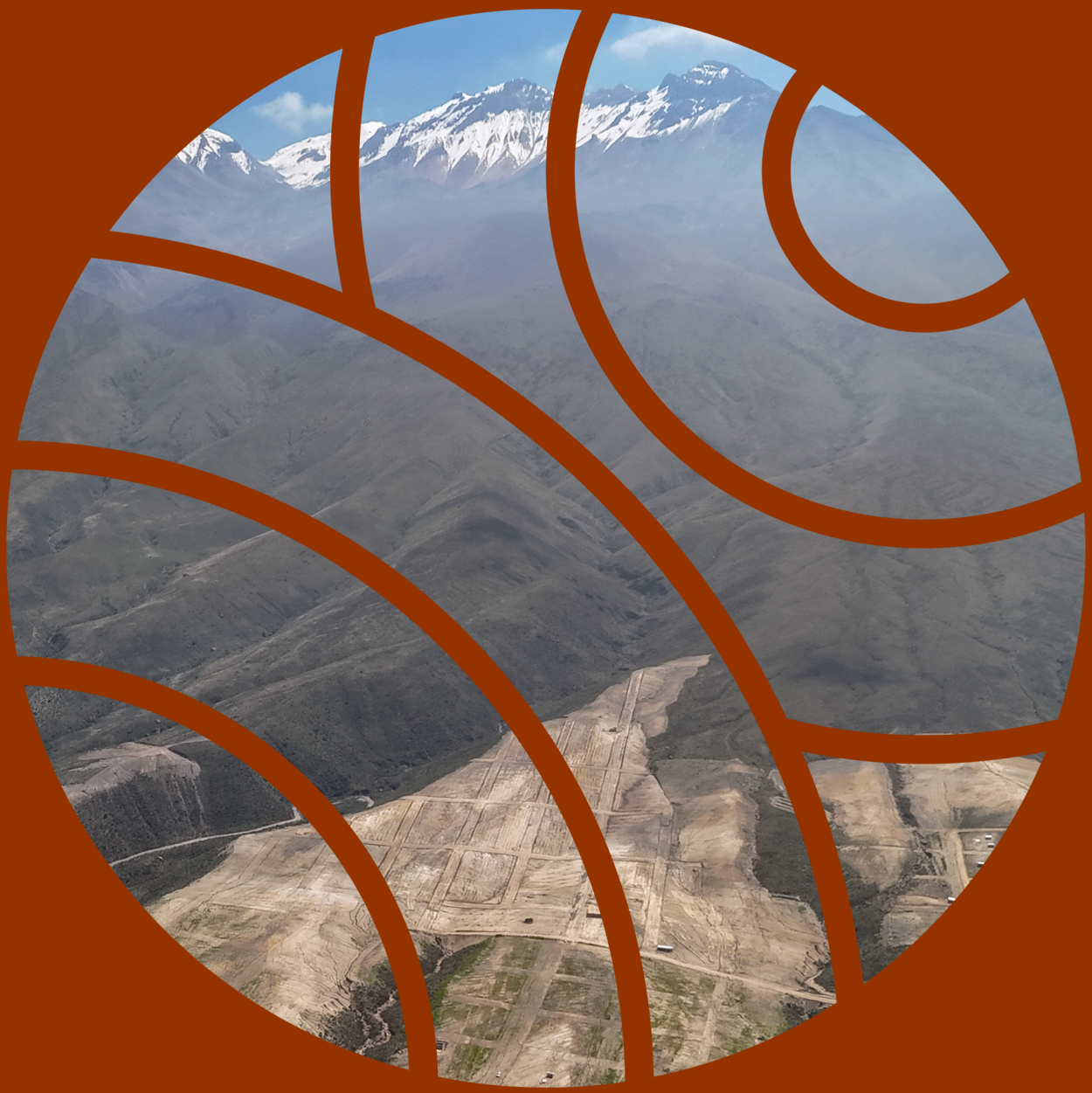
PERÚ | Ministerio del Ambiente

IGP Instituto Geofísico del Perú

EVALUACIÓN DE LA EXPOSICIÓN DEL DISTRITO DE CAYMA (AREQUIPA) FRENTE A LOS PROCESOS VOLCÁNICOS DEL MISTI Y SU CONTRIBUCIÓN A LA GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES

Informe Técnico n.° 022-2026/IGP CIENCIAS DE LA TIERRA SÓLIDA



Lima-Perú
Agosto de 2026

CRÉDITOS

Vladimiro Huaroc Portocarrero
Ministro del Ambiente

Hernando Tavera
Jefe institucional del IGP

Juan Carlos Gómez
Director de la Dirección de Ciencias de la Tierra Sólida del IGP

Evaluación de la exposición del distrito de Cayma (Arequipa) frente a los procesos volcánicos del Misti y su contribución a la gestión del riesgo de desastres
Informe técnico

John Cruz
Barbara Cuadros
Carla Arias
Marco Rivera
Lady Quispe
David Valdivia
Autores

Hernando Tavera
Jorge Concha
Edición de contenido

Jorge Concha
Diseño y diagramación

Este informe ha sido elaborado por el Instituto Geofísico del Perú (IGP)
Calle Badajoz 169, Mayorazgo, Ate, Lima
Teléfono: +51 1 317 2300

Accede libremente al Repositorio Geofísico Nacional (REGEN) para descargar este informe:
https://repositorio.igp.gob.pe/

REGEN

Lima, agosto de 2026

Programa Presupuestal 068
REDUCCIÓN DE LA VULNERABILIDAD Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS POR DESASTRES

ESTUDIOS PARA LA ESTIMACIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES

Actividad
Generación de información y monitoreo de peligro volcánico

EVALUACIÓN DE LA EXPOSICIÓN DEL DISTRITO DE CAYMA (AREQUIPA) FRENTE A LOS PROCESOS VOLCÁNICOS DEL MISTI Y SU CONTRIBUCIÓN A LA GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES

Lima, Perú
Agosto de 2026

RESUMEN

Se evalúan los niveles de exposición del distrito de Cayma (Arequipa) frente a los procesos volcánicos asociados a una eventual erupción del volcán Misti, con el propósito de generar información técnico-científica que contribuya a la gestión del riesgo de desastres en dicho distrito. Los resultados muestran que al menos 56 núcleos urbanos ubicados en las márgenes de la quebrada Chullo y sus afluentes están expuestos al descenso de lahares. Asimismo, viviendas, infraestructura estratégica y zonas de cultivo ubicadas en el valle del río Chili están expuestas a eventuales flujos piroclásticos y avalanchas de escombros provenientes del Misti durante una erupción con IEV ≥ 3. Por otro lado, todo el distrito de Cayma podría verse afectado por la caída de ceniza; en contraste, no sería afectado por flujos de lava, debido a su alta viscosidad y corto alcance.

Ante una erupción subpliniana o pliniana del volcán Misti (IEV ≥ 3), se propone un proceso organizado de evacuación, la identificación de 21 puntos de concentración y la definición de rutas de evacuación hacia zonas seguras. Se sugieren tres zonas de albergue temporal ubicadas en el distrito de Mollendo, con un tiempo estimado de traslado de tres horas. Estas propuestas constituyen insumos técnicos para fortalecer la planificación de la evacuación y las acciones de preparación y respuesta ante una eventual emergencia volcánica.

CONTENIDO

5 Resumen
9 Introducción
10 Distrito de Cayma
10 Ubicación
10 Clima
11 Hidrología y pendientes
12 Aspectos demográficos
14 Contexto geológico del distrito de Cayma
14 Geomorfología
16 Geología
21 Procesos volcánicos
21 Lahares
22 Flujos piroclásticos
22 Avalanchas de escombros
23 Flujos de lava
23 Caídas de tefra
25 Escenarios eruptivos
25 Erupción vulcaniana con IEV 1–2
25 Erupción subpliniana a pliniana con IEV 3–5
26 Colapso de flanco y emplazamiento de avalanchas de escombros
26 Erupción efusiva con emisión de flujos de lava
26 Erupción con crecimiento y colapso de domos

27 Modelamiento numérico de procesos volcánicos

27 Lahares

29 Flujos piroclásticos

30 Avalanchas de escombros

32 Mapas de peligro y nivel de exposición

32 Mapa de peligros por lahares

43 Mapa de peligros por flujos piroclásticos

45 Mapa de peligros por avalancha de escombros

47 Mapa de peligros por flujos de lava

48 Mapa de peligros por caída de tefra

52 Aportes a una gestión reactiva

52 Proceso de evacuación por peligros volcánicos del Misti

52 Puntos de concentración

56 Rutas de evacuación

58 Etapas de evacuación

60 Albergues temporales

64 Sitios de interés vulcanológico en Cayma para la comunicación y sensibilización

66 Conclusiones

67 Recomendaciones

68 Referencias



Áreas de expansión urbana en el distrito de Cayma en dirección del volcán Chachani.

1. Introducción

El volcán Misti forma parte del conjunto de volcanes activos del sur del Perú y se ubica dentro de la Zona Volcánica Central de los Andes (ZVC). Este volcán puede erupcionar en el futuro y generar daños en la ciudad de Arequipa debido a su proximidad al área metropolitana, donde reside una población superior al millón de habitantes (INEI, 2017). A lo largo de su historia eruptiva, el Misti ha presentado erupciones explosivas de diferente índice de explosividad volcánica (IEV), entre ellas la gran erupción pliniana ocurrida hace aproximadamente 2000 años AP y una erupción vulcaniana durante el siglo XV (Thouret et al., 2001; Harpel et al., 2011). Actualmente, el volcán mantiene actividad fumarólica intermitente y es monitoreado permanentemente por el Instituto Geofísico del Perú (IGP).

El crecimiento urbano de la ciudad de Arequipa ocurrido en los últimos 70 años ha favorecido la ocupación progresiva de las laderas del volcán Misti y de las quebradas que descienden tanto del Misti como del Chachani. En consecuencia, diversos sectores urbanos del distrito de Cayma se encuentran expuestos a peligros por caída de tefras, flujos piroclásticos, avalanchas de escombros y lahares (Rivera et al., 2024). Los daños y efectos ocasionados por las lluvias intensas ocurridas en febrero de 2026 evidenciaron la necesidad de fortalecer las acciones de preparación y respuesta frente al peligro por lahares (Rivera et al., 2026).

En el marco de las competencias conferidas al Instituto Geofísico del Perú (IGP) por su Ley de Creación (Decreto Ley n.° 136) y el Reglamento de Organización y Funciones (ROF) (Decreto Supremo n.° 005-2025-MINAM), el IGP cumple un rol fundamental en la generación de conocimiento e información científica sobre los procesos dinámicos del planeta Tierra, a fin de contribuir a la reducción del riesgo de desastres. En el caso de los volcanes, desarrolla investigación y monitoreo para generar información que respalde la planificación territorial y la toma de decisiones por parte de las autoridades locales y regionales (Rivera et al., 2024).

El presente estudio evalúa la exposición del distrito de Cayma frente a los principales procesos asociados a una eventual erupción del volcán Misti. Para ello, se recolectó información sobre los depósitos volcánicos durante los trabajos de campo, que luego fue integrada con información geológica, cartográfica y sociodemográfica. Este análisis se complementó con el empleo de sistemas computacionales y modelamientos numéricos que permitieron elaborar mapas de peligro e identificar las zonas y la infraestructura potencialmente expuestas a los procesos volcánicos.

El estudio fue desarrollado en coordinación con la Municipalidad Distrital de Cayma y con la participación de instituciones integrantes del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, entre ellas:

- Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI)
- Sociedad Eléctrica del Sur Oeste S. A. (SEAL)
- Organismo de Formalización de la Propiedad Informal (COFOPRI)
- Autoridad Nacional del Agua (ANA)
- Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (OSINERGMIN)
- Centro de Mantenimiento Aeronáutico del Ejército (CEMAE)
- Comando Operacional del Sur (COS)
- Ejército del Perú (EP)
- Marina de Guerra del Perú (MGP)
- Fuerza Aérea del Perú (FAP)
- Policía Nacional del Perú (PNP)
- Cruz Roja Peruana
- Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED)
- Asociación Mundial de Psicología en Emergencias (AMPE)
- Gerencia Regional de Educación de Arequipa (GREA)
- Corporación Peruana de Aeropuertos y Aviación Comercial S. A. (CORPAC)
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC)
- Instituto Municipal de Planeamiento de Arequipa (IMPLA)
- Municipalidad Provincial de Arequipa (MPA)
- Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Arequipa (SEDAPAR)
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI)
- Empresa de Generación Eléctrica de Arequipa S. A. (EGASA)

Las reuniones técnicas, las inspecciones de campo y el intercambio de información permitieron fortalecer el análisis de la exposición del distrito de Cayma y generar insumos para la planificación de las acciones de preparación y respuesta.

Los resultados de este estudio constituyen una base técnico-científica para la implementación de un plan de gestión del riesgo ante procesos eruptivos en el distrito de Cayma. Esta información permitirá fortalecer la preparación y la respuesta, así como orientar la toma de decisiones de las autoridades frente a una eventual erupción del volcán Misti.

2. Distrito de Cayma

2.1 Ubicación

El distrito de Cayma se encuentra en la provincia de Arequipa, región Arequipa. Presenta una superficie de aproximadamente 228.3 km^2 y un rango altitudinal comprendido entre 2200 m s. n. m. y 5820 m s. n. m. Limita por el norte con los distritos de Yura y San Juan de Tarucani; por el este, con Alto Selva Alegre, Miraflores y Mariano Melgar; por el sur, con los distritos de Yanahuara y Cerro Colorado; y por el oeste, con el distrito de Cerro Colorado (Figura 1).

El distrito de Cayma se ubica aproximadamente a 17.5 km al oeste del volcán Misti y a 20 km al sureste del volcán Chachani. Ambos volcanes activos son monitoreados permanentemente por el Instituto Geofísico del Perú (IGP).

2.2 Clima

El distrito de Cayma presenta un clima semiárido templado, caracterizado por condiciones secas durante gran parte del año y por la ocurrencia de precipitaciones entre los meses de diciembre y marzo. Las temperaturas son similares a las registradas en la ciudad de Arequipa, mientras que las lluvias presentan una marcada estacionalidad asociada al periodo lluvioso (Rivera et al., 2024).

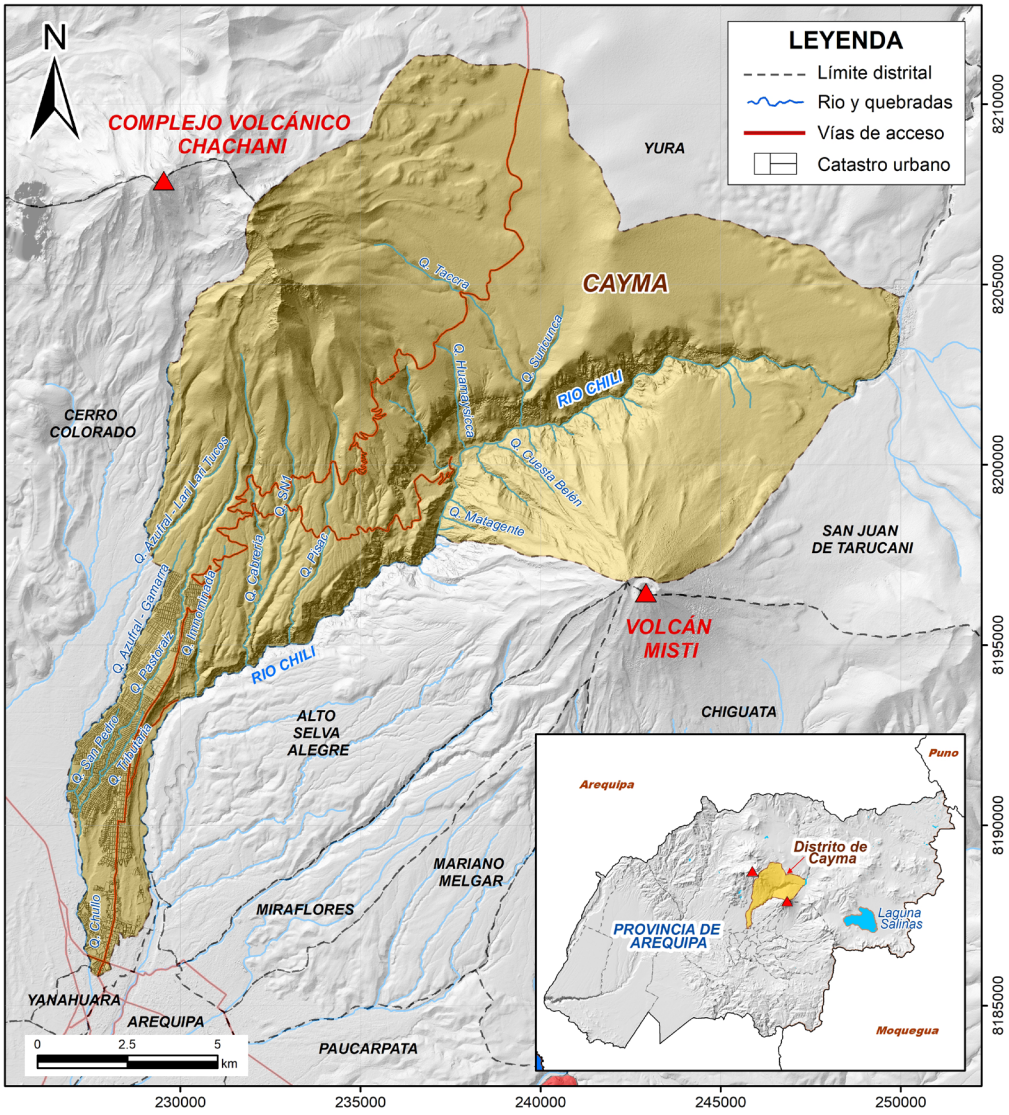


Figura 1. Ubicación geográfica y límites del distrito de Cayma.

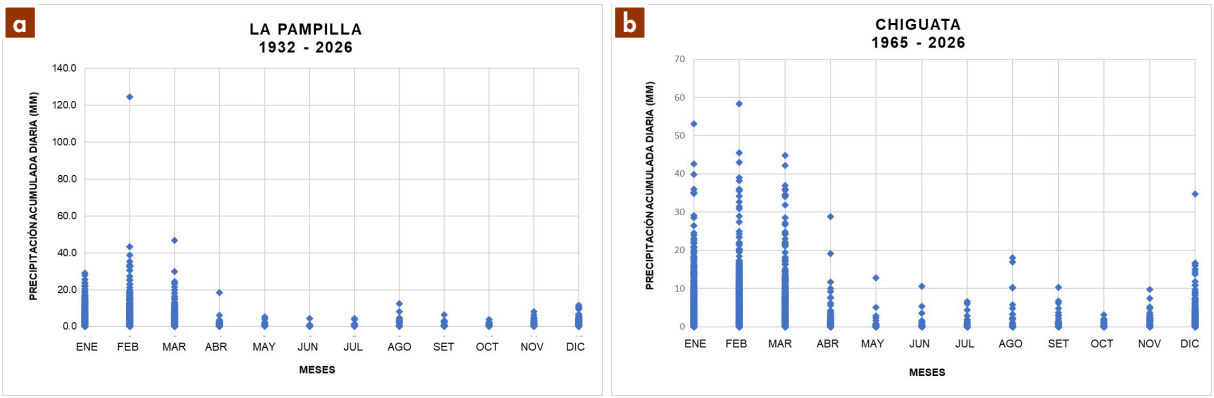


Figura 2. Precipitación acumulada diaria registrada en las estaciones meteorológicas La Pampilla (a) y Chiguata (b), utilizadas para la caracterización del régimen de precipitaciones en el área de estudio (modificado de Rivera et al., 2024).

Con el propósito de caracterizar el régimen de precipitaciones en el área de estudio, se analizaron los registros de las estaciones meteorológicas La Pampilla y Chiguata (Arequipa), administradas por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). Estos registros evidencian que las precipitaciones de mayor intensidad ocurren durante los meses de diciembre a marzo, lo que favorece la ocurrencia de flujos de detritos y lahares en las quebradas que drenan de los volcanes Misti y Chachani hacia el distrito de Cayma. La información pluviométrica obtenida constituye un insumo fundamental para la evaluación de los escenarios de lahares desarrollados en el presente estudio (Figura 2).

2.3 Hidrología y pendientes

El distrito de Cayma forma parte de la cuenca hidrográfica del río Chili y presenta una amplia red de drenaje controlada por el tipo de litología y la pendiente de las laderas de los volcanes Chachani y Misti (Figura 1). El río Chili constituye el principal colector de la cuenca y atraviesa el distrito de noreste a suroeste, formando un profundo cañón en su curso superior. Además, constituye el límite natural entre los distritos de Cayma y Alto Selva Alegre.

Las principales quebradas que drenan el sector urbano del distrito de Cayma y nacen en el volcán Chachani son Azufral Lari Lari Tucos (13.3 km), Pastoraíz (12 km) y Azufral Gamarra (6.3 km), las cuales confluyen para formar la quebrada Chullo. En sus cabeceras presentan cauces de aproximadamente 50 m a 350 m de ancho y pendientes entre 25 % y 75 % (Figura 3). En el curso medio, correspondiente al sector de Alto Cayma, los anchos de los cauces se reducen progresivamente hasta 30–100 m y las pendientes disminuyen de 8 % a 15 %. Finalmente, en su curso inferior (parte baja de Cayma), la quebrada Chullo presenta entre 3 m y 10 m de ancho y pendientes de 2 % a 4 %, antes de desembocar en el río Chili, luego de recorrer aproximadamente 6.3 km.

En el sector norte del distrito existen otras quebradas que drenan directamente al río Chili, entre ellas Cabrerías, SN1, Pisac, Huamaysicca, Taccra y Suricunca, con longitudes que varían entre 3.1 km y 8.8 km y pendientes predominantemente empinadas (25–75 %). Asimismo, desde el flanco noroeste del volcán Misti se prolongan las quebradas Cuesta Belén (2.11 km), Huertamonte (2.18 km) y Matagente (1.01 km), las cuales presentan pendientes empinadas a extremadamente empinadas (>50 %). La mayor parte del año, los cauces de estas quebradas permanecen secos y solo se activan durante lluvias intensas; en ocasiones, transportan lahares hacia zonas urbanas.

El relieve del distrito de Cayma es heterogéneo y está condicionado por la presencia de los volcanes Chachani y Misti y por el cañón del río Chili (Figuras 1 y 3). En la parte alta, las laderas de los volcanes Misti y Chachani presentan pendientes empinadas a extremadamente empinadas (>25 %). En la parte media de las laderas y quebradas, las pendientes son moderadas a empinadas (8–25 %). Finalmente, en la parte baja, donde se concentra gran parte del desarrollo urbano, la pendiente del terreno es baja (2–8 %), de acuerdo con la clasificación propuesta por MIDAGRI (2022).

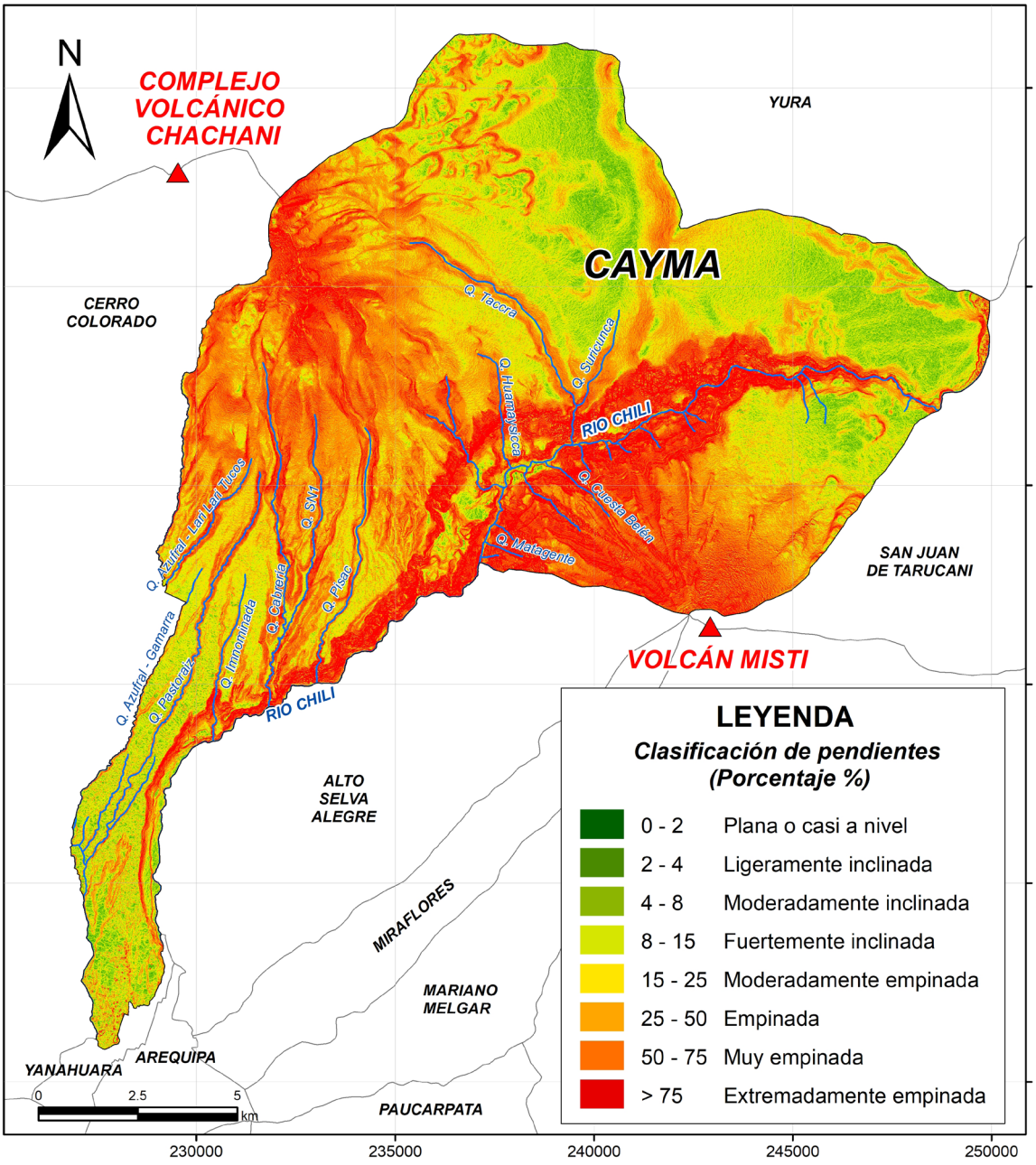


Figura 3. Mapa de pendientes del distrito de Cayma.

2.4 Aspectos demográficos

- Población

De acuerdo con el Censo Nacional de 2025, el distrito de Cayma registra una población de 111 190 habitantes (INEI, 2026), lo que representa un incremento respecto de los 91 935 registrados en el Censo Nacional de 2017 (INEI, 2017). Del total, 53 968 son hombres y 57 222 son mujeres, tal como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Principales indicadores demográficos del distrito de Cayma.

Indicador	Valor
Población total	111 190
Población masculina	53 968
Población femenina	57 222
Población censada (2017)	91 935
Incremento poblacional (2017–2025)	19 255 habitantes

- Vivienda

De acuerdo con el Censo Nacional de 2017, en el distrito de Cayma predominan las viviendas construidas con ladrillo o bloques de cemento, seguidas por aquellas construidas con piedra o sillar con cal o cemento (INEI, 2017), tal como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Principales indicadores de vivienda del distrito de Cayma.

Indicador	Valor
Total de viviendas	24 581 (100 %)
Viviendas con paredes de ladrillo o bloque de cemento	21 674 (89 %)
Viviendas con paredes de piedra o sillar con cal o cemento	1476 (6 %)
Viviendas con paredes de adobe	1134 (4 %)
Viviendas con otros materiales	297 (1 %)

La expansión urbana registrada en las últimas décadas ha favorecido la ocupación progresiva de sectores próximos a quebradas y laderas de los volcanes Misti y Chachani. Esta dinámica constituye un aspecto relevante para la evaluación de la exposición frente a los peligros volcánicos, desarrollada en los capítulos siguientes.

3. Contexto geológico del distrito de Cayma

3.1 Geomorfología

La geomorfología del distrito de Cayma es el resultado de la interacción de procesos volcánicos, glaciales y fluviales, asociados principalmente con la actividad eruptiva y la evolución de los volcanes Chachani y Misti, así como con la acción erosiva del río Chili. Las geoformas existentes en el área condicionan la ocurrencia de procesos como lahares, flujos de detritos, flujos piroclásticos, entre otros. En Cayma se reconocen las siguientes unidades geomorfológicas (Figuras 4 y 5).

- Morrenas (MO)

Corresponden a geoformas de origen glacial ubicadas por encima de los 4500 m s. n. m., al pie del volcán Chachani. Se reconocen morrenas de

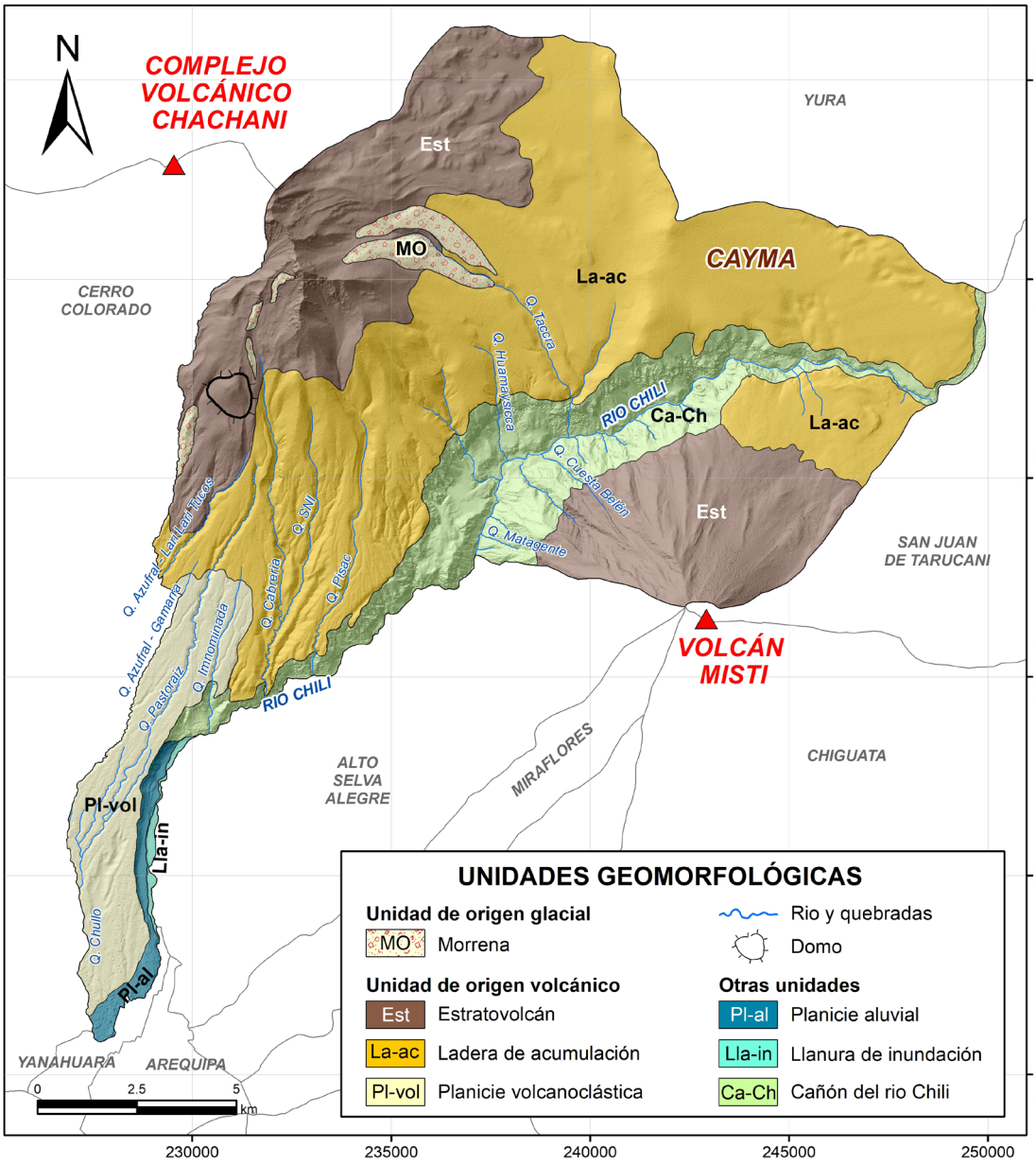


Figura 4. Mapa geomorfológico del distrito de Cayma.

diferentes edades, desde depósitos pleistocénicos hasta holocénicos (Figura 5a), que constituyen evidencias de los últimos episodios glaciales registrados en la zona (Alavi, 2020).

- ## Domo (DO)

En el sector norte de Cayma se identifica el domo Cabrerías, ligado a la actividad pasada del volcán Chachani (Figuras 5a y 5b). Esta geoforma presenta una morfología elevada, con pendientes moderadas a empinadas, producto de la acumulación de lavas viscosas, cuya edad aproximada es de 56.5 ± 31.6 ka (Aguilar et al., 2022).

- ## Estratovolcán (Est)

En el distrito de Cayma se ubican los estratovolcanes Misti y Chachani (Figuras 5a, 5b y 5d), constituidos por acumulaciones sucesivas de lavas y depósitos piroclásticos generados durante diferentes etapas eruptivas (Thouret et al., 2001; Mariño et al., 2016; Aguilar et al., 2022).

- ## Ladera de acumulación (La-ac)

Esta unidad se ubica en los flancos de los volcanes Chachani y Misti, en los sectores norte y noreste del distrito de Cayma (Figuras 5a y 5b). Corresponde a superficies inclinadas constituidas por la acumulación de depósitos de flujos piroclásticos, lavas, depósitos volcanoclásticos y avalanchas de escombros. Actualmente, dicha zona es disectada por numerosas quebradas que drenan hacia el río Chili (Alavi, 2020).

- ## Planicie volcanoclástica (Pl-vol)

Se ubica en los sectores sur y suroeste del distrito de Cayma. Esta geoforma consiste en una superficie relativamente plana o suavemente ondulada (Figura 5b), conformada por depósitos volcanoclásticos y sedimentos provenientes de los volcanes Misti y Chachani (Mariño et al., 2016; Alavi, 2020). Sobre dicha geoforma se ha establecido gran parte de la expansión urbana del distrito de Cayma.



Figura 5. Unidades geomorfológicas presentes en el distrito de Cayma. a) Morrenas, domo Cabrerías, estratovolcán, laderas de acumulación y cañón del río Chili. b) Vista panorámica de las principales unidades geomorfológicas asociadas al volcán Chachani. c) Planicie aluvial y llanura de inundación desarrolladas a lo largo del río Chili. d) Cañón del río Chili y sectores del volcán Misti.

- **Planicie aluvial (Pl-al)**

Se ubica de manera restringida en el extremo sur del distrito de Cayma y en sectores próximos al río Chili (Figura 5c). Esta geoforma está constituida por una secuencia de sedimentos transportados y depositados por la dinámica fluvial y actualmente es utilizada para actividades agrícolas y recreativas (Alavi, 2020).

- **Llanura de inundación (Lla-in)**

Se ubica en ambas márgenes del río Chili (Figura 5c) y está constituida por depósitos aluviales recientes generados por procesos recurrentes de inundación y sedimentación del río Chili (Alavi, 2020).

- **Cañón del río Chili (Ca-Ch)**

Corresponde al valle profundo y angosto del río Chili, constituido por secuencias volcánicas (ignimbritas y lavas), así como rocas sedimentarias y metamórficas (Figura 5d) (Alavi, 2020).

3.2 Geología

En el distrito de Cayma se distinguen depósitos volcánicos y volcanoclásticos asociados a los volcanes Chachani y Misti, además de depósitos de ignimbritas que registran la evolución geológica de la región, tal como se muestra en la Figura 6.

- **Ignimbritas Aeropuerto, La Joya y Río Chili**

La Ignimbrita Aeropuerto (1.65 ± 0.04 Ma) corresponde a un depósito volcánico generado por erupciones explosivas de alto índice de explosividad volcánica, que rellenaron gran parte de la depresión de Arequipa; es conocida localmente como sillar. Por debajo aflora la Ignimbrita La Joya (4.89 ± 0.02 Ma), ampliamente

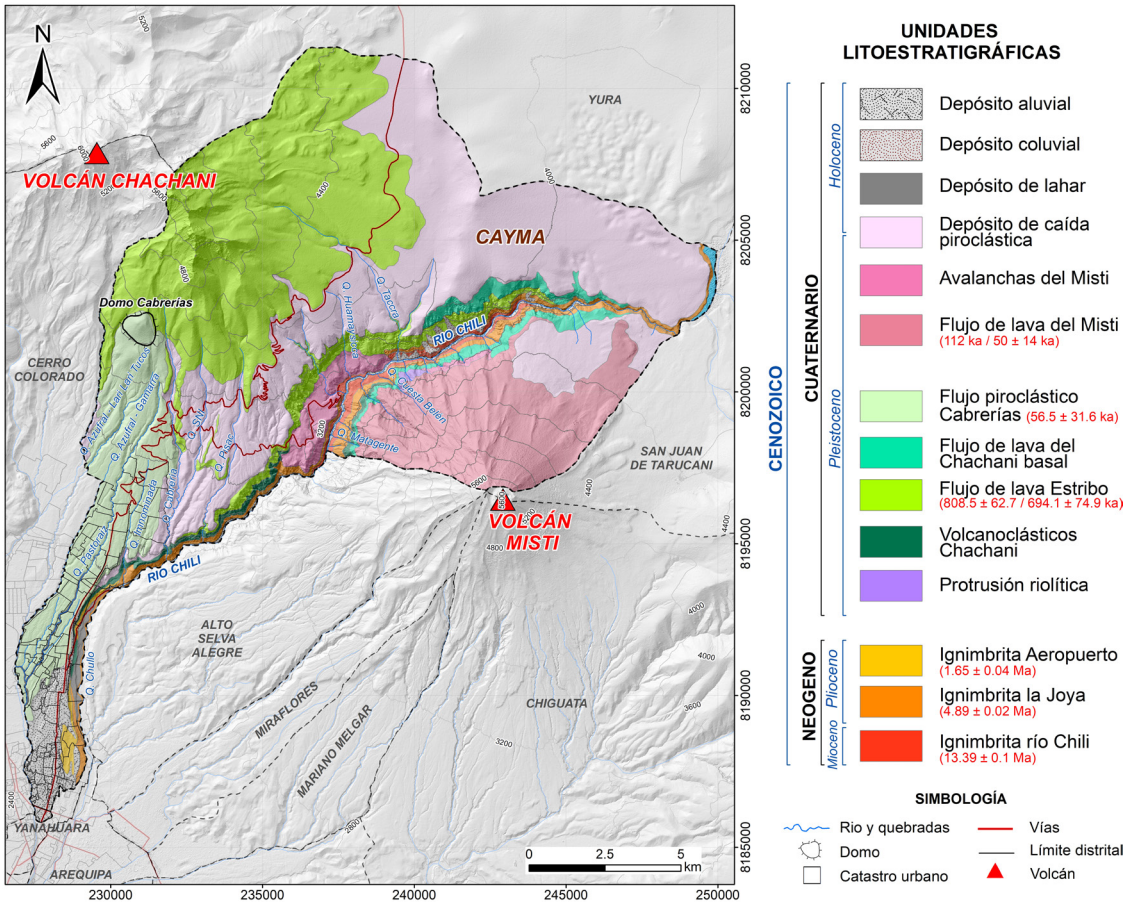


Figura 6. Mapa geológico del distrito de Cayma.



Figura 7. Vista del valle del río Chili, donde resaltan afloramientos de las ignimbritas «La Joya» y «Aeropuerto», así como depósitos volcanoclásticos del volcán Chachani y flujos piroclásticos «Cabrerías».

distribuida en los valles de los ríos Chili, Yura, Sumbay y Vítor (Figuras 7 y 9). Por su parte, la Ignimbrita Río Chili (Figura 8), la más antigua de la región (13.39 ± 0.1 Ma), aflora principalmente en el cañón superior del río Chili y en el sector de Charcani (Paquereau et al., 2006).

• Depósitos volcanoclásticos del Chachani

Corresponden a una secuencia intercalada de depósitos de lahares, flujos de lava y depósitos piroclásticos que aflora en los sectores sureste y este del volcán Chachani, principalmente en el cañón del río Chili (Mariño et al., 2016), como se muestra en la Figura 7.

• Flujos de lava Estribo (808.5 ± 62.7 y 694.1 ± 74.9 ka)

Son flujos de lava ubicados en el sector sureste del volcán Chachani, con afloramientos en ambas márgenes del cañón del río Chili. Forman parte del sustrato del distrito de Cayma y del valle del río Chili (Figura 8) (Aguilar et al., 2022; Thouret et al., 2001).

• Protrusión riolítica

Corresponde a una estructura rocosa vertical ubicada al pie del flanco noroeste del volcán Misti, conocida localmente como el «hijo del Misti». Pertenece a una unidad rocosa más antigua que el volcán Misti (Figura 8).

• Flujos de lava del Misti (112 ka / 50 ± 14 ka)

Corresponden a flujos de lava distribuidos principalmente en los sectores noroeste y suroeste del volcán Misti. Estos flujos forman parte del edificio volcánico, tal como se muestra en la Figura 8 (Mariño et al., 2016).

• Flujos de lava del Chachani basal

Corresponden a flujos de lava de composición andesítica del volcán Chachani que afloran en el cañón del río Chili, al norte y noroeste del volcán Misti, sobre las lavas del edificio Estribo (volcán Chachani), como se observa en la Figura 8. Dichas lavas se encuentran cubiertas por niveles de caída de tefra (Mariño et al., 2016).

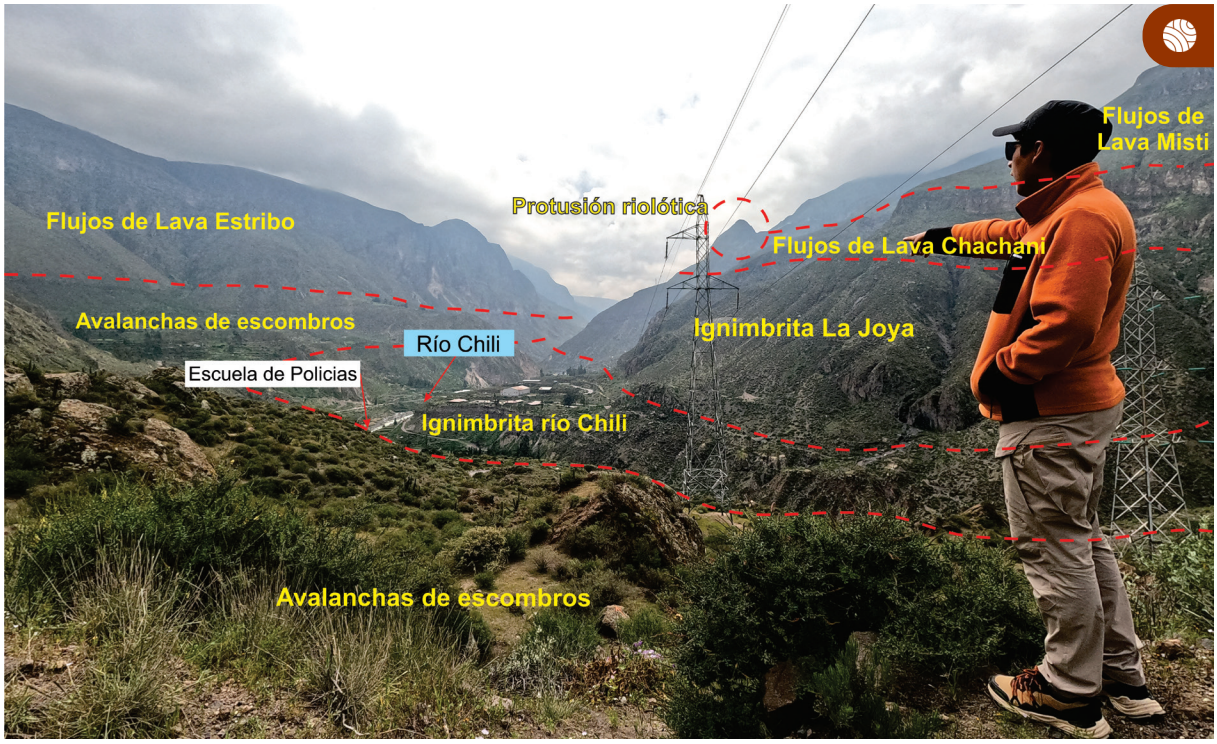


Figura 8. Vista del valle del río Chili, donde se observan la protrusión riolítica, las ignimbritas Río Chili y La Joya, avalanchas de escombros del Misti y flujos de lava.



Figura 9. Vista del valle del río Chili con afloramientos de los flujos de lava del Chachani basal, la Ignimbrita La Joya y depósitos asociados.

- ## Depósitos de avalanchas de escombros del Misti

Se distribuyen en los sectores sur, oeste y suroeste del volcán Misti y alcanzan el valle del río Chili. Estos depósitos son masivos y presentan bloques de lava densa incluidos en una matriz fina de limo y arena; se originaron por antiguos colapsos del volcán Misti (Figura 10c–d) (Mariño et al., 2016).



Figura 10. Afloramientos de flujos piroclásticos del domo Cabrerías, flujos de lava y depósitos de avalanchas de escombros del volcán Misti: a–b) depósitos de flujo piroclástico del domo Cabrerías; c–d) depósitos de avalanchas de escombros y flujos de lava del Misti.

• Depósitos de flujos piroclásticos y domo Cabrerías (56.5 ± 31.6 ka)

Dichos depósitos de flujos piroclásticos y el domo Cabrerías afloran en el sector sureste del volcán Chachani. Los depósitos de flujos piroclásticos se extienden a más de 9 km de distancia hacia el flanco sur del Chachani, en el sector de Alto Cayma, y representan uno de los flujos piroclásticos más recientes del volcán Chachani (Figura 10a–b) (Manrique et al., 2024).

• Depósitos de caída piroclástica

Corresponden a capas de ceniza, lapilli de pómez y otros fragmentos volcánicos que afloran principalmente en los sectores de Alto Cayma y en las zonas más elevadas del distrito de Cayma (Figura 11). En estos afloramientos se identifican depósitos de lapilli de pómez de las principales erupciones explosivas del volcán Misti ocurridas durante los últimos 45 000 años AP, entre ellas «Cogollo» (44.9–38.7 ka), «Sacarosa» (38.5–32.4 ka), «Conchito» (37.1–30.5 ka) y la gran erupción pliniana de aproximadamente 2000 años AP (Harpel et al., 2011; Cuno, 2018; Harpel et al., 2023). Asimismo, en los sectores más altos se reconocieron los depósitos de caída de lapilli de pómez «Sandwich» y «Autopista» (Escobar, 2021; Cacya et al., 2007). En diferentes sectores, estas caídas aparecen intercaladas con depósitos de lahares, flujos piroclásticos de bloques y ceniza y niveles de suelo. También se identifican depósitos de la erupción del año 1600 d. C. del volcán Huaynaputina.

• Depósitos aluviales, coluviales y de lahares

Los depósitos aluviales se distribuyen principalmente en ambas márgenes de las quebradas, donde forman terrazas y acumulaciones de sedimentos. Por su parte, los depósitos coluviales afloran en laderas de los volcanes Misti y Chachani, mientras que los depósitos de lahar se concentran en el fondo de las quebradas Azufral Lari Lari Tucos, Azufral Gamarra y Pastoraíz, afluentes de la quebrada Chullo (Figura 12). Estos depósitos evidencian antiguos y recientes eventos, como los lahares ocurridos en febrero de 2026 (Manrique et al., 2024; Mariño et al., 2016; Rivera et al., 2026).



Figura 11. Depósitos de caída piroclástica del volcán Misti en sectores de Alto Cayma: a) sector Mujeres con Esperanza; b) fundo Cabrerías I Zona B; c) Villa Ecológica; d) Villa Embajada de Japón.



Figura 12. Depósitos de lahares y flujos piroclásticos presentes en el distrito de Cayma: a) quebrada Azufral Lari Lari Tucos; b) quebrada Pastoraíz; c–d) quebrada Azufral Gamarra.

4. Procesos volcánicos

Los procesos volcánicos generados por la actividad de un volcán pueden ocasionar pérdidas humanas, daños a la infraestructura, afectación de las actividades económicas e impactos sobre el medio ambiente. Estos procesos pueden presentarse durante una erupción, inmediatamente después de ella o incluso en periodos de aparente tranquilidad, como consecuencia de lluvias intensas, la remoción de depósitos volcánicos o la inestabilidad del edificio volcánico (Blong, 1984; Tilling, 1989).

Diversos estudios vulcanológicos han permitido identificar y clasificar los principales procesos asociados a los volcanes activos. En el caso del volcán Misti, se reconocen los lahares (flujos de lodo y escombros), los flujos piroclásticos, las avalanchas de escombros, la caída de tefras y los flujos de lava (Blong, 1984; Tilling, 1989; Blong, 2000; Bignami et al., 2012; Rivera et al., 2024).

4.1 Lahares

Los lahares son flujos de lodo volcánico constituidos por una mezcla de agua y materiales volcánicos como ceniza, arena y bloques de roca que descienden por quebradas y cauces naturales debido a la acción de la gravedad. Estos flujos pueden alcanzar velocidades superiores a 60 km/h y recorrer distancias mayores a 200 km desde el volcán, dependiendo del volumen movilizado, la pendiente del terreno y las características del cauce. Debido a su elevada densidad y capacidad erosiva, representan uno de los peligros volcánicos más destructivos, ya que pueden destruir o sepultar viviendas, puentes, carreteras y otras obras de infraestructura (Tilling & Beate, 1993; Vallance & Iverson, 2015).

En periodos de lluvia, el agua remueve los depósitos de ceniza, los flujos piroclásticos y los depósitos volcanoclásticos acumulados en las laderas de los volcanes Misti y Chachani, generando lahares. Estudios recientes sobre lahares en quebradas del volcán Misti han identificado al menos 58 depósitos formados durante los últimos 2000 años,



Figura 13. Vista de la quebrada Chullo (distrito de Cayma) donde se observa la acumulación de sedimentos y bloques de rocas transportados por lahares ocurridos en febrero de 2026. Dichos lahares ocasionaron daños a vehículos e infraestructura urbana.

lo que evidencia la recurrencia de este fenómeno (Delaite et al., 2005; Rivera et al., 2021; Rivera et al., 2024). En el distrito de Cayma, al pie del flanco sureste del volcán Chachani, los depósitos de lahares son visibles principalmente en la quebrada Chullo y sus afluentes (Azufral Lari Lari Tucos, Azufral Gamarra y Pastoraíz). En febrero de 2026 ocurrieron lahares generados por lluvias intensas, los cuales ocasionaron daños en viviendas e infraestructura y confirmaron la alta susceptibilidad del distrito frente a este tipo de fenómeno (Figura 13) (Rivera et al., 2026).

4.2 Flujos piroclásticos

Los flujos piroclásticos, también denominados corrientes de densidad piroclástica (PDC), son mezclas de gases volcánicos, ceniza y fragmentos de roca que descienden por las laderas de un volcán durante erupciones explosivas importantes. Estos flujos pueden alcanzar temperaturas superiores a 700 °C y velocidades mayores a 100 km/h, así como recorrer más de 10 km desde el centro eruptivo, destruyendo o sepultando todo lo que encuentran a su paso (Figura 14) (Sparks, 1997; Sigurdsson et al., 1999; Tilling & Beate, 1993; Druitt, 1998).

El registro geológico del volcán Misti evidencia que este fenómeno ha ocurrido frecuentemente durante el Pleistoceno tardío y el Holoceno. En varios sectores de Arequipa, como el valle del río Chili, se observan depósitos de flujos piroclásticos. Entre ellos destaca el depósito de flujo de pómez y ceniza de hace aproximadamente 20 000 años, visible en la margen derecha del río Chili, en el sector de Chapi Chico, donde alcanza más de 12 m de espesor (Thouret et al., 2001; Mariño et al., 2016).

En el distrito de Cayma, la principal zona susceptible corresponde al cañón del río Chili, la cual puede ser afectada por flujos piroclásticos generados durante una eventual erupción del volcán Misti.

4.3 Avalanchas de escombros

Las avalanchas de escombros corresponden a depósitos generados por el colapso de los flancos de un volcán. El desplazamiento de dichos materiales es rápido debido a la gravedad.



Figura 14. Depósitos de flujos piroclásticos emplazados en el flanco norte del volcán Sabancaya durante la erupción vulcaniana (IEV 2) del 13 de septiembre de 2025.

Pueden originarse por erupciones explosivas, crecimiento de domos, inestabilidad del edificio volcánico, alteración hidrotermal o sismos de gran magnitud. Entre las principales evidencias de estos eventos destacan las cicatrices de colapso y los depósitos con morfologías irregulares tipo *hummocks* o lomadas (Siebert, 1992; Ui & Glicken, 2000; Tilling et al., 1990; Vallance et al., 2000).

Los depósitos de avalanchas de escombros ligados al volcán Misti afloran principalmente en los sectores sur, oeste y suroeste del edificio volcánico, entre 8 km y 14 km del cráter, cubriendo una superficie cercana a 40 km² (Mariño et al., 2016). Constituyen evidencias de antiguos colapsos del edificio volcánico. En el distrito de Cayma, estos depósitos se reconocen en el sector de Alto Cayma, la carretera Cayma-Charcani y la margen izquierda del río Chili. La presencia de estos depósitos demuestra que este tipo de fenómeno ha ocurrido durante la evolución del volcán Misti (Figura 9c–d).

En un escenario de erupción explosiva de gran magnitud, el colapso parcial de un flanco del volcán Misti podría generar una nueva avalancha de escombros que descendería por los flancos del edificio volcánico y las quebradas adyacentes, pudiendo canalizarse en el cañón del río Chili.

4.4 Flujos de lava

Los flujos de lava se generan durante erupciones efusivas, cuando el magma asciende hasta la superficie y luego se desplaza por las laderas del volcán, siguiendo la pendiente del terreno. La velocidad y el alcance de estos flujos dependen principalmente de la tasa de emisión, la viscosidad de la lava y la topografía. En los volcanes peruanos, las lavas son generalmente de composición andesítica a dacítica (Figura 10d), por lo que presentan alta viscosidad y un alcance limitado en comparación con las lavas basálticas (Walker, 1973).

El volcán Misti ha emitido flujos de lava durante su evolución; los más distales recorrieron entre 6 km y 9 km desde el cráter, principalmente hacia los flancos oeste y suroeste del volcán. Sin embargo, durante los últimos 30 000 años, las erupciones efusivas han sido menos frecuentes que las explosivas, por lo que la ocurrencia de este tipo de eventos se considera poco probable en comparación con otros peligros volcánicos. En caso de producirse una erupción efusiva, los flujos de lava tendrían un alcance limitado y se emplazarían principalmente sobre los flancos norte, sur y este del edificio volcánico. En consecuencia, Cayma no se vería afectado por este tipo de fenómeno.

4.5 Caídas de tefra

Las caídas de tefra se generan durante erupciones explosivas y están constituidas por ceniza, pómez y otros fragmentos volcánicos expulsados a la atmósfera. La dispersión y acumulación de estos materiales dependen principalmente de la magnitud de la erupción, la altura de la columna eruptiva y las condiciones del viento, por lo que pueden afectar extensas áreas alrededor del volcán (Tilling, 1989; Tilling & Beate, 1993).

El volcán Misti ha presentado una actividad eruptiva principalmente explosiva durante el Pleistoceno tardío y el Holoceno, lo que ha generado numerosos depósitos de caída de tefra en los alrededores de la ciudad de Arequipa (Legros, 2001; Mariño et al., 2016; Harpel et al., 2021). Los estudios tefroestratigráficos realizados en Alto Cayma permitieron identificar al menos 20 depósitos de caída de tefras asociados a erupciones de diferente magnitud, entre ellos las unidades «Cogollo», «Sacarosa», «Conchito», «Autopista» y «Sandwich», ampliamente distribuidas en el distrito (Cacya et al., 2007; Cuno, 2018; Escobar, 2021; Harpel et al., 2011; Harpel et al., 2023).

Entre los eventos eruptivos relativamente recientes y más importantes destaca la erupción pliniana ocurrida hace aproximadamente 2000 años, que generó extensos depósitos de pómez y ceniza aún visibles en diversos sectores de Alto Cayma (Figura 15). Asimismo, se han identificado niveles de ceniza asociados a la erupción del volcán Misti ocurrida durante 1440–1470 d. C., además de depósitos de ceniza provenientes de la erupción del volcán Huaynaputina del año 1600 d. C. (Thouret et al., 2001; Harpel et al., 2023).

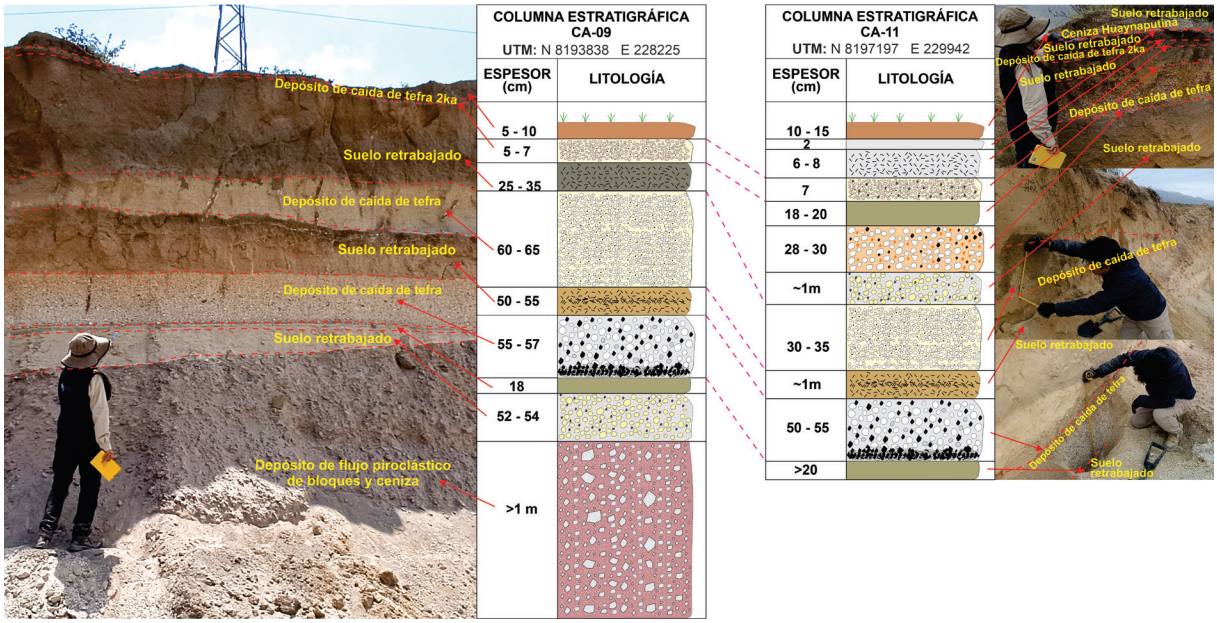


Figura 15. Columnas estratigráficas representativas (CA-09 y CA-11) de los depósitos de caída de tefra identificados en Alto Cayma, donde se reconocen niveles asociados a erupciones del volcán Misti.

5. Escenarios eruptivos

La evaluación de los peligros volcánicos en el distrito de Cayma se basa en la definición de escenarios eruptivos representativos del comportamiento esperado del volcán Misti, a partir de su historia eruptiva y de los tipos de depósitos volcánicos emitidos. Estos escenarios constituyen la base para el modelamiento numérico de los diferentes fenómenos volcánicos y la elaboración de los mapas de peligro. A continuación, se detallan los principales escenarios eruptivos del Misti:

5.1 Erupción vulcaniana con IEV 1–2

Las erupciones vulcanianas corresponden a eventos explosivos de magnitud moderada, caracterizados por la emisión de columnas eruptivas compuestas por ceniza, gases y fragmentos volcánicos, entre ellos bloques, bombas y, ocasionalmente, lapilli de pómez (Sigurdsson et al., 1999). El volcán Misti presentó una erupción vulcaniana durante 1440–1470 d. C., la cual constituye el ejemplo más representativo de este tipo de actividad eruptiva. Durante este evento se depositó una capa de ceniza gris oscura con espesores del orden de 1 cm a 20 km al suroeste del cráter, lo que evidencia la capacidad del volcán para dispersar ceniza sobre amplios sectores de la ciudad de Arequipa (Thouret et al., 2001).

Además de la caída de ceniza, una erupción vulcaniana puede generar proyectiles balísticos, flujos piroclásticos de volumen limitado y lahares. La ocurrencia de flujos piroclásticos durante este tipo de erupciones ha sido documentada en volcanes andesíticos activos, como el volcán Tungurahua (Ecuador), el cual, durante la erupción de 2004, desarrolló flujos piroclásticos que alcanzaron aproximadamente 4 km de distancia (Hall et al., 2013). En el caso del volcán Misti, hasta la fecha no se han identificado depósitos de flujos piroclásticos asociados a erupciones vulcanianas; sin embargo, su ocurrencia no puede descartarse dentro de un escenario eruptivo de este tipo.

Durante una erupción vulcaniana también podrían generarse lahares que desciendan por las quebradas del volcán Misti y por la cuenca del río Chili. Estudios estratigráficos realizados en Cayma indican que varios depósitos de lahares visibles en las quebradas que drenan del volcán Chachani fueron emplazados durante los últimos 2000 años, en episodios vinculados con lluvias intensas y actividad eruptiva vulcaniana.

En este estudio, el escenario vulcaniano representa un nivel de actividad explosiva moderada (IEV 1–2) y constituye uno de los escenarios considerados en la evaluación de los principales peligros volcánicos. Los trabajos de evaluación de peligro incluyen el modelamiento numérico de los fenómenos asociados a este tipo de erupción, tales como la caída de tefras, los flujos piroclásticos, los lahares, los flujos de lava y las avalanchas de escombros, en el distrito de Cayma.

5.2 Erupción subpliniana a pliniana con IEV 3–5

Las erupciones subplinianas a plinianas corresponden a eventos explosivos de gran magnitud, caracterizados por el desarrollo de columnas eruptivas de gran altura, compuestas por ceniza, lapilli de pómez y otros piroclastos, que se elevan a decenas o cientos de kilómetros del volcán. El colapso parcial o total de la columna eruptiva puede originar flujos y oleadas piroclásticas que descienden por las laderas del edificio volcánico y alcanzan distancias superiores a 10 km del cráter. Durante la erupción pliniana del volcán Misti ocurrida hace aproximadamente 2000 años AP (IEV 5), los depósitos de flujos piroclásticos alcanzaron alrededor de 13 km de distancia, lo que evidencia la capacidad de este tipo de eventos para afectar extensas áreas alrededor del volcán (Cobeñas et al., 2012; Thouret et al., 2001; Harpel et al., 2011).

Estos antecedentes demuestran la capacidad del Misti para producir erupciones de gran magnitud con efectos regionales, por lo que este constituye el escenario de mayor impacto considerado para la evaluación de los peligros volcánicos en el distrito de Cayma. En un escenario pliniano o subpliniano podrían generarse de manera simultánea caídas de tefra, flujos y oleadas piroclásticas, así como lahares producto de la removilización de los depósitos volcánicos. Debido a la configuración del relieve de los volcanes Misti y Chachani, los lahares podrían discurrir preferentemente por las quebradas que drenan hacia la cuenca del río Chili, lo que incrementaría el potencial de afectación en el distrito de Cayma.

5.3 Colapso de flanco y emplazamiento de avalanchas de escombros

En el futuro, el volcán Misti podría presentar el colapso de alguno de sus flancos debido a una erupción explosiva de gran magnitud, al crecimiento de domos de lava o a un sismo de elevada magnitud. En el volcán Misti se han identificado al menos dos depósitos de avalanchas de escombros asociados al colapso de sus flancos sur, suroeste y noroeste. Uno de estos depósitos aflora entre 13 km y 15 km al sur y suroeste del volcán, lo que constituye una evidencia de que este tipo de fenómeno ha ocurrido durante su evolución geológica (Rivera et al., 2024).

El flanco noroeste del Misti presenta pendientes pronunciadas y está atravesado por fallas de orientación noroeste–sureste, condiciones que favorecen su inestabilidad estructural. Si el colapso se produjera en el flanco oeste o noroeste del volcán Misti, la avalancha de escombros podría represar temporalmente el río Chili y, posteriormente, generar lahares por el desembalse de dicho represamiento, los cuales se desplazarían a lo largo del valle del río Chili y podrían afectar sectores ubicados aguas abajo. En cambio, un colapso del flanco sur favorecería el desplazamiento de las avalanchas hacia los sectores sur, sureste y suroeste del volcán. El alcance de estos depósitos dependerá del volumen del material movilizado, estimándose recorridos de entre 6 km y 15 km desde la cima del volcán (Vargas et al., 2021).

5.4 Erupción efusiva con emisión de flujos de lava

Las erupciones efusivas se caracterizan por la emisión de flujos de lava que descienden por las laderas de un volcán, siguiendo la pendiente del terreno y las quebradas. En el volcán Misti, este tipo de actividad ha ocurrido durante distintas etapas de su evolución, generando flujos de lava que alcanzaron entre 8 km y 10 km de distancia respecto al cráter. No obstante, las erupciones efusivas han sido menos frecuentes que las explosivas, por lo que su probabilidad de ocurrencia es relativamente baja.

En un escenario de erupción efusiva, los flujos de lava se desplazarían preferentemente por las quebradas y laderas del volcán, siguiendo trayectorias controladas por la topografía. Debido a su elevada viscosidad, su movilidad sería limitada y difícilmente alcanzarían zonas urbanas ubicadas en el valle del río Chili.

5.5 Erupción con crecimiento y colapso de domos

Durante una erupción del volcán Misti, este puede desarrollar domos de lava en el interior del cráter debido al ascenso de magma altamente viscoso. El crecimiento de estos domos puede ir acompañado de colapsos parciales o totales capaces de generar flujos piroclásticos que desciendan rápidamente por las quebradas del edificio volcánico. Este tipo de proceso ha sido observado en volcanes andesíticos activos, como el Merapi (Indonesia), donde el colapso de domos produjo flujos piroclásticos que alcanzaron hasta 7 km de distancia (Charbonnier & Gertisser, 2008).

En el volcán Misti existen evidencias de antiguos colapsos de domos que han generado depósitos de flujos piroclásticos de bloques y ceniza, preservados principalmente en las quebradas de los flancos sur, sureste y suroeste, entre ellas la quebrada Huarangal (Rivera et al., 2024). Estos antecedentes indican que la probabilidad de ocurrencia de este evento es moderada. En caso de una futura erupción con crecimiento de un domo de lava, la morfología del cráter sería favorable tanto para el desarrollo del domo como para la formación de flujos piroclásticos, que se canalizarían por las quebradas y podrían alcanzar hasta 10 km de distancia.

6. Modelamiento numérico de procesos volcánicos

Con el propósito de identificar las áreas del distrito de Cayma que podrían ser afectadas por los diferentes productos volcánicos generados durante una eventual erupción del volcán Misti, así como de elaborar los respectivos mapas de peligros volcánicos, se realizaron modelamientos numéricos mediante programas informáticos y códigos especializados. Las simulaciones consideran las características topográficas del terreno, los parámetros físicos de cada proceso volcánico y escenarios eruptivos representativos, lo que permite estimar el alcance potencial de lahares, flujos piroclásticos, avalanchas de escombros, flujos de lava y caída de tefras.

6.1 Lahares

Para simular el descenso de lahares y elaborar el mapa de peligros se utilizó el código numérico VolcFlow (Kelfoun et al., 2009). Este *software* permite modelar el desplazamiento de flujos sobre la superficie del terreno a partir de modelos digitales de elevación (DEM) y, así, identificar las áreas potencialmente inundables y las zonas susceptibles de ser afectadas por estos procesos.

El modelo se basa en las ecuaciones de conservación de masa y momento, promediadas bajo el supuesto de un flujo en agua poco profunda. Asimismo, permite incorporar diferentes leyes reológicas y condiciones de fuente para representar el comportamiento de los lahares. Las ecuaciones son resueltas mediante un esquema numérico euleriano por diferencias finitas.

Los principales parámetros de entrada considerados en las simulaciones fueron el volumen inicial del flujo, el tiempo de simulación, la densidad, la cohesión y la viscosidad, cuyos valores se presentan en la Tabla 3. Para el modelamiento se emplearon modelos digitales de elevación (DEM) con resoluciones espaciales de 3 m, 4 m y 5 m. Las simulaciones se realizaron en las quebradas Azufral Lari Lari Tucos, Azufral Gamarra y Pastoraíz, afluentes de la quebrada Chullo, así como en quebradas ubicadas en el sector noreste del volcán Chachani y en el sector oeste del volcán Misti que drenan hacia el río Chili (Figura 16).

Se definieron tres escenarios de modelamiento de lahares, correspondientes a zonas de peligro alto, moderado y bajo, considerando la recurrencia de precipitaciones intensas registradas por el SENAMHI. El escenario de peligro alto considera un volumen de flujo de 150 000 m^3; el de peligro moderado, 350 000 m^3; y el de peligro bajo, 500 000 m^3 (Tabla 3). Estos escenarios representan la movilización de depósitos volcánicos sueltos acumulados en las quebradas del distrito de Cayma como consecuencia de lluvias intensas.

Tabla 3. Principales parámetros de entrada utilizados en el código VolcFlow para la simulación de flujos de lahares.

Escenario	Volumen	Tiempo	Densidad	Cohesión	Viscosidad
	m^3	s	(kg/m^3)	Pa	Pa·s
Peligro alto	150 000	10 800	1300	1	1
Peligro moderado	350 000	10 800	1300	10	1
Peligro bajo	500 000	10 800	1300	20	1

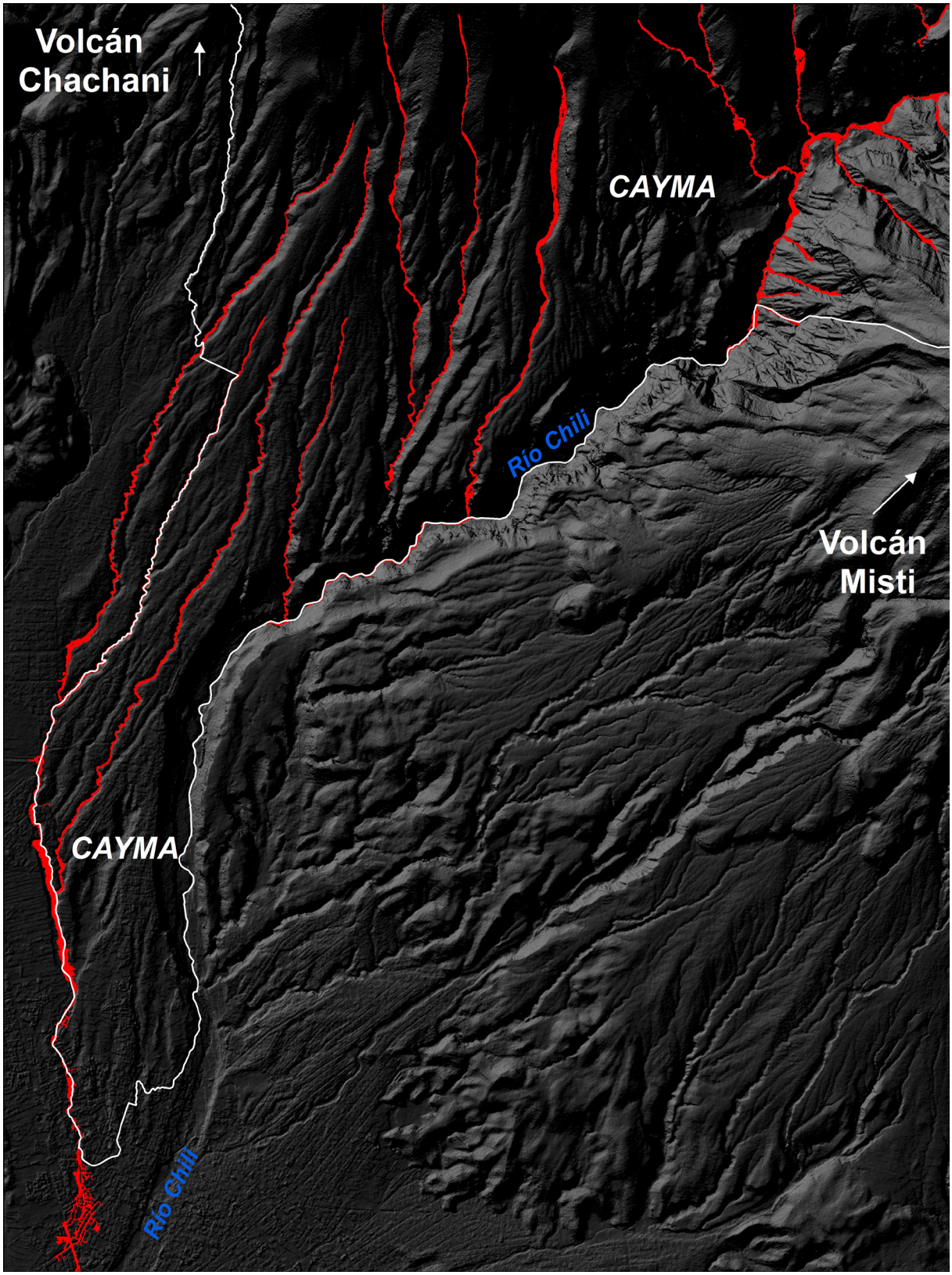


Figura 16. Resultado del modelamiento numérico de lahares.

6.2 Flujos piroclásticos

Para simular el emplazamiento de flujos piroclásticos y elaborar el mapa de peligros también se utilizó el código numérico VolcFlow (Kelfoun et al., 2009; Kelfoun et al., 2021). Las simulaciones se realizaron empleando la versión de dos fases del modelo, la cual permite representar tanto la fase densa del flujo piroclástico como la fase diluida u oleada piroclástica (*surge*) (Kelfoun et al., 2021). La fase densa contiene una mayor concentración de fragmentos volcánicos densos y tiende a canalizarse siguiendo la topografía, mientras que la oleada piroclástica o fase diluida contiene una mayor proporción de ceniza y gases, lo que le permite expandirse lateralmente, superar obstáculos topográficos y alcanzar áreas más extensas. Esta aproximación representa de manera más realista el comportamiento de las corrientes de densidad piroclástica generadas por el colapso de columnas eruptivas (Kelfoun et al., 2021).

La selección de los escenarios eruptivos se basó en los antecedentes eruptivos del volcán Misti y en la comparación con volcanes análogos al Misti. Charbonnier et al. (2020) estimaron que la erupción pliniana del Misti ocurrida hace aproximadamente 2000 años AP generó un volumen total de depósitos de flujos piroclásticos de 406 ± 140 × 10^6 m^3, mientras que Harpel et al. (2011) estimaron para este mismo evento eruptivo (IEV 5) un volumen del orden de 10 × 10^6 m^3. Asimismo, Cobeñas et al. (2012) reportaron volúmenes de al menos 10 × 10^8 m^3, canalizados por diversos valles que se extienden hacia la ciudad de Arequipa.

Con el fin de representar distintos niveles de actividad explosiva, se consideraron tres escenarios eruptivos. Para el escenario vulcaniano (IEV 1–2) se empleó un volumen de 5 × 10^6 m^3, tomando como referencia erupciones vulcanianas de los volcanes Reventador (Ecuador), Colima (México), Mayon (Filipinas) y San Pedro (Chile) (Bernard, 2016; Saucedo et al., 2002; Moore & Nelson, 1969; Alcozer, 2021). Para el escenario subpliniano (IEV 3–4) se consideró un volumen de 50 × 10^6 m^3, basado en eventos eruptivos de los volcanes Tungurahua (Ecuador), Reventador (Ecuador), Fuego (Guatemala) y San Pedro (Chile) (Kelfoun et al., 2009; Hall et al., 2013; Bernard, 2016; Ferrés & Escobar, 2018; Alcozer, 2021). Finalmente, para el escenario pliniano (IEV ≈ 5) se consideró un volumen de 500 × 10^6 m^3, tomando como referencia erupciones con generación de flujos piroclásticos de los volcanes Popocatépetl (México), Monte Pelée (Martinica), Calbuco (Chile), Villarrica (Chile) y San Pedro (Chile) (Martin del Pozzo et al., 2015; Carazzo et al., 2019; Romero et al., 2016; Jorquera, 2018; Alcozer, 2021). Estos escenarios representan un rango de actividad explosiva del volcán Misti, desde eventos frecuentes de menor magnitud hasta erupciones subplinianas y plinianas de mayor alcance.

Las simulaciones se realizaron empleando un modelo digital de elevación (DEM) con resolución espacial de 20 m, considerado adecuado para representar la dinámica regional de flujos piroclásticos de gran volumen. Asimismo, se definió el cráter del volcán Misti como punto de inicio de los flujos (Figura 17). Los principales parámetros de entrada considerados en las simulaciones se presentan en la Tabla 4. Finalmente, los resultados con VolcFlow se utilizaron como insumos para la delimitación de las zonas de peligro (Figura 17).

Tabla 4. Principales parámetros de entrada utilizados en el código VolcFlow para la simulación de flujos piroclásticos.

Escenario	Volumen	Densidad	Tiempo de simulación	Cohesión
	× 10^6 m^3	kg/m^3	s	Pa
Peligro alto	5	4000	400	5000
Peligro moderado	50	4000	800	5000
Peligro bajo	500	4000	1200	5000

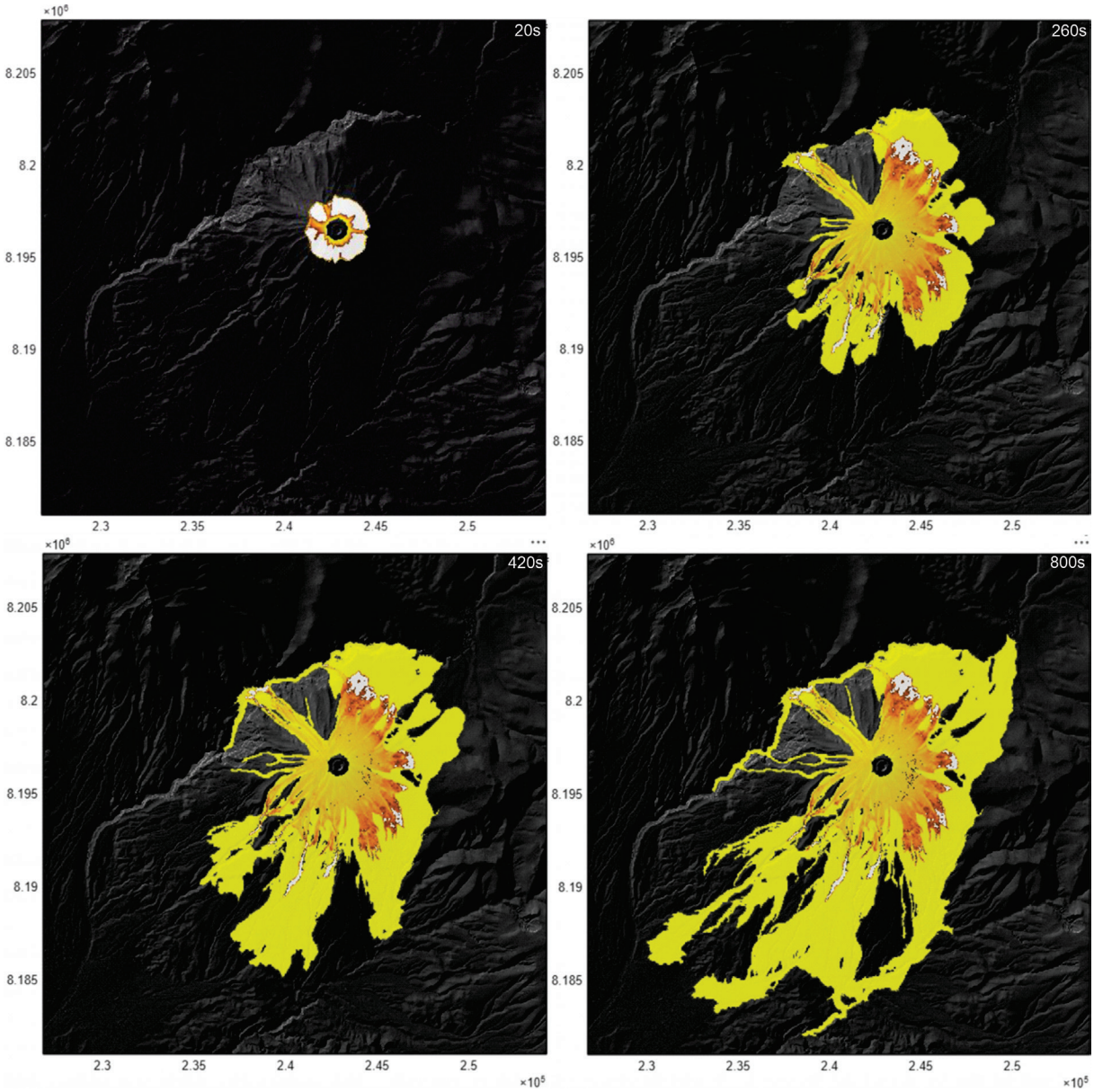


Figura 17. Proceso secuencial de simulación haciendo uso del código VolcFlow para los flujos piroclásticos del Misti.

6.3 Avalanchas de escombros

Mediante el código numérico VolcFlow (Kelfoun et al., 2009; Kelfoun et al., 2021) también se realizó la simulación de avalanchas de escombros de gran volumen sobre un modelo digital de elevación (DEM) de 20 m de resolución, considerando la geometría del colapso, las propiedades físicas del material y su propagación sobre la topografía.

La selección de los volúmenes se basó en el análisis de avalanchas de escombros registradas en volcanes análogos al Misti. Entre los eventos de menor volumen destacan los ocurridos en los volcanes Unzen (0.48 km³; Ui & Glicken, 2000), Sillapaca (0.55–0.9 km³; Calderón et al., 2017), Tutupaca (~1 km³; Samaniego et al., 2015) y Colima (1–1.3 km³; Roverato & Capra, 2013). Como eventos de volumen intermedio se consideraron las avalanchas del volcán Firura (~1.6 km³; Gómez et al., 2012) y del Monte Santa Helena (~2.5 km³; Siebert & Reid, 2023). Finalmente, entre los colapsos de mayor magnitud se incluyeron los volcanes Parinacota (~6 km³; Clavero et al., 2004), Ticsani (~12 km³; Mariño & Thouret, 2003), Ritter (~5 km³; Day et al., 2015) y Socompa (~36 km³; de Vries et al., 2001).

Considerando estos antecedentes, así como el área potencialmente inestable del Misti, que corresponde a su flanco oeste-suroeste, se definieron tres volúmenes de colapso: 0.8 km³, 2 km³ y 2.7 km³. Como archivos de entrada

se utilizaron un modelo correspondiente a la superficie modificada que representa la cicatriz de colapso y otro asociado al volumen potencialmente inestable que sería removido durante el evento. La modificación topográfica se efectuó en el flanco oeste-suroeste del volcán Misti, considerando un escenario de colapso orientado hacia el cañón del río Chili y el distrito de Cayma (Figura 18).

Los principales parámetros de entrada considerados en las simulaciones se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Principales parámetros de entrada utilizados en el código VolcFlow para la simulación de avalanchas de escombros.

Escenario	Volumen	Tiempo de simulación	Cohesión	Viscosidad
	km^3	s	Pa	Pa·s
Peligro alto	0.8	400	52 000	1000
Peligro moderado	2	500	52 000	1000
Peligro bajo	2.7	600	52 000	1000

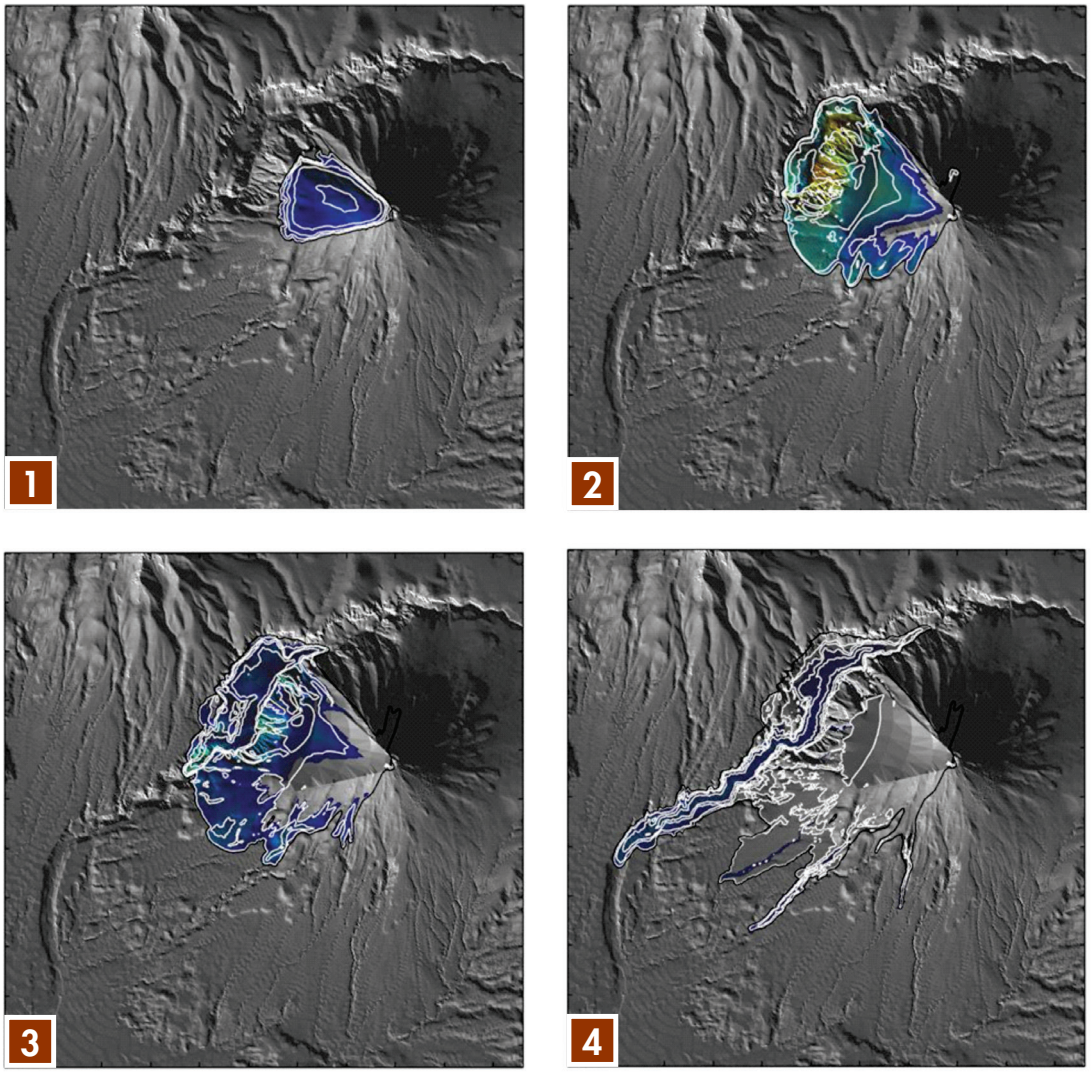


Figura 18. Proceso secuencial de simulación (1, 2, 3, 4) utilizando el código VolcFlow para las avalanchas de escombros en el sector oeste-suroeste del Misti.

7. Mapas de peligro y nivel de exposición

En este capítulo se presentan los mapas de peligros volcánicos para el distrito de Cayma, elaborados a partir de los resultados del modelamiento numérico y del análisis de la información vulcanológica disponible. Los mapas muestran la distribución espacial de las áreas que serían potencialmente afectadas por la ocurrencia de lahares, flujos piroclásticos, avalanchas de escombros, flujos de lava y caída de ceniza, y constituyen una herramienta técnica para la planificación del territorio y la gestión del riesgo de desastres.

7.1 Mapa de peligros por lahares

El mapa de peligro por lahares para el distrito de Cayma muestra tres zonas de peligro: alto, moderado y bajo (Figura 19), que se describen a continuación.

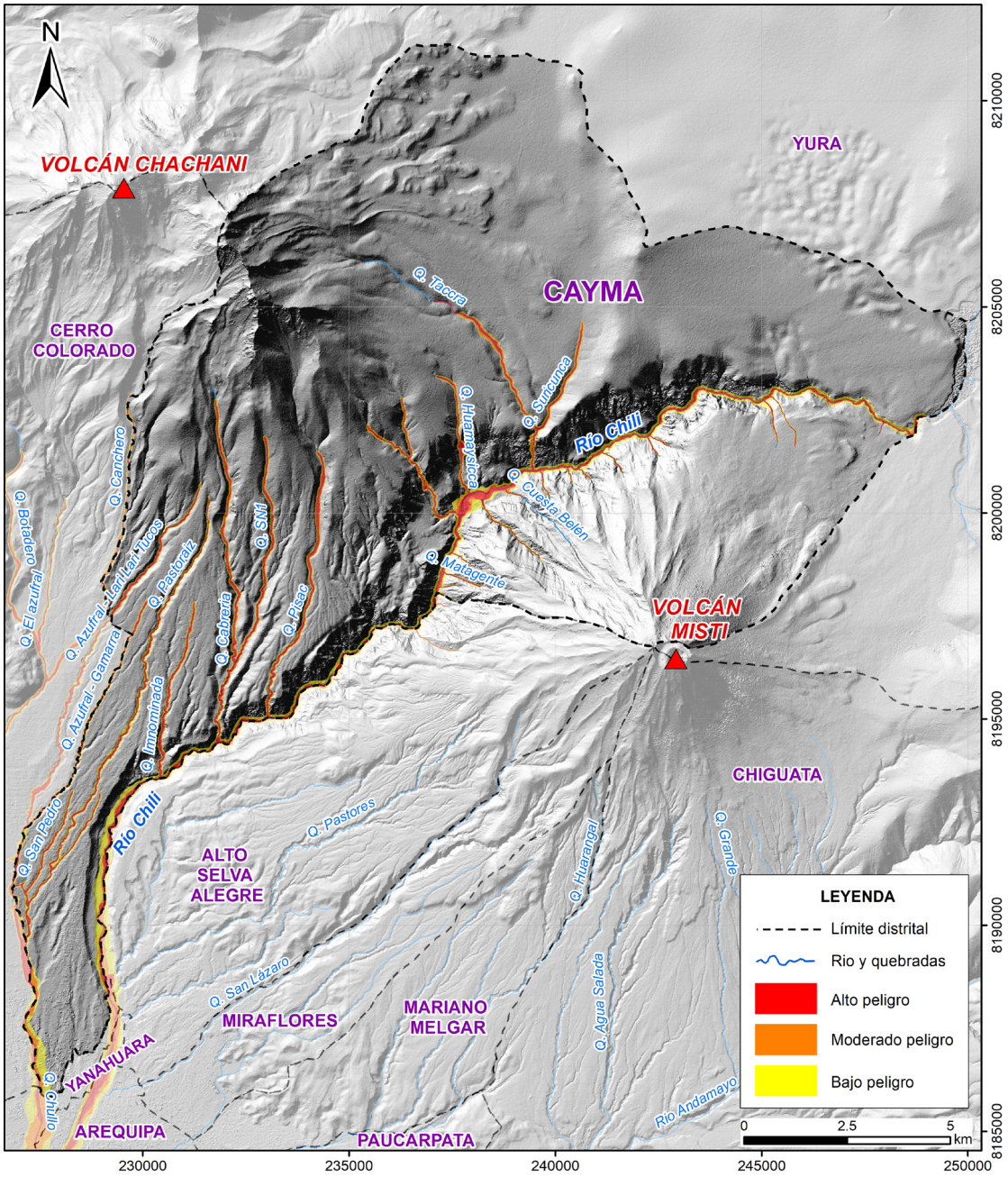


Figura 19. Mapa de peligro por descenso de lahares del distrito de Cayma.

- Zona de peligro alto

Representada en color rojo, comprende los sectores con mayor probabilidad de ser afectados por lahares con volúmenes de hasta 150 000 m³. Estas áreas se localizan principalmente a lo largo de la quebrada Chullo y de sus principales afluentes: Azufral Lari Lari Tucos, Azufral Gamarra, Pastoraíz, San Pedro y Tributaria, las cuales se prolongan desde el volcán Chachani hacia el distrito de Cayma. Este escenario está asociado a la ocurrencia de fuertes precipitaciones que favorecen la movilización del material volcánico acumulado en las partes altas de las microcuencas.

- Zona de peligro moderado

Representada en color naranja, agrupa las áreas que podrían ser afectadas por lahares con volúmenes de hasta 350 000 m³. En comparación con el escenario anterior, los flujos presentan un mayor alcance y una expansión lateral más amplia, comprometiendo sectores adicionales en ambas márgenes de las quebradas y extendiendo el área de afectación hacia zonas urbanas del distrito. Lahares de ese volumen podrían originarse durante episodios de lluvias intensas concentradas en cortos periodos de tiempo, o ligadas a erupciones volcánicas.

- Zona de peligro bajo

Representada en color amarillo, incluye las áreas que podrían verse afectadas por lahares con volúmenes de hasta 500 000 m³. Aunque este escenario presenta una menor probabilidad de ocurrencia, estaría asociado a precipitaciones extraordinarias o también a la ocurrencia de erupciones volcánicas, capaces de generar el desborde de los cauces e incrementar significativamente el alcance de los flujos, afectando sectores ubicados a mayor distancia de las quebradas principales.

Además de las quebradas que drenan hacia el distrito de Cayma, el mapa de peligro identifica áreas potencialmente afectadas en inmediaciones de las quebradas Innominada, Cabrería, SN1, Pisac, Huamaysicca y Suricunca, ubicadas en el sector noreste del volcán Chachani, cuyos drenajes desembocan en el cañón del río Chili. Asimismo, las quebradas Matagente y Cuesta Belén, localizadas en el flanco noroeste del volcán Misti, constituyen zonas susceptibles al descenso de lahares que podrían alcanzar el valle del río Chili (Figura 19).

7.1.1 Exposición de núcleos urbanos y viviendas al peligro por descenso de lahares

A partir de los trabajos de campo, el análisis de imágenes satelitales, los resultados del modelamiento numérico y la información del Censo Nacional del INEI (2017), se identificaron los núcleos urbanos, viviendas e infraestructuras en el distrito de Cayma que se encuentran expuestos al peligro por descenso de lahares. Tomando como referencia el mapa de peligros por descenso de lahares (Figura 19) y su correspondiente mapa de zonas expuestas (Figura 20), fue posible evaluar el nivel de exposición de los principales elementos ubicados en las quebradas que se prolongan desde el volcán Chachani hacia el área urbana del distrito.

Las áreas expuestas al peligro por descenso de lahares fueron categorizadas en tres zonas de peligro: alto (rojo), moderado (anaranjado) y bajo (amarillo), representadas en la Figura 20. En dichas zonas se contabilizaron 481 viviendas en la zona de peligro alto, 1476 en la zona de peligro moderado y 3413 en la zona de peligro bajo, tal como se muestra en la Tabla 6. Estas cifras no deben sumarse entre sí, debido a que las áreas de afectación de los escenarios modelados se superponen y una misma vivienda puede estar comprendida en más de un escenario de peligro.

La mayor cantidad de viviendas se encuentra expuesta al escenario de peligro bajo, de menor probabilidad de ocurrencia, pero de mayor alcance. Las viviendas expuestas se distribuyen principalmente en ambas márgenes de las quebradas Azufral Gamarra, Azufral Lari Lari Tucos, Pastoraíz, San Pedro y Chullo, así como en sus tributarias, donde el crecimiento urbano ha ocupado progresivamente áreas próximas a los cauces naturales.

Es importante señalar que las quebradas Azufral Gamarra, Azufral Lari Lari Tucos, Pastoraíz, San Pedro y otras quebradas tributarias confluyen hacia la quebrada Chullo, que desemboca en el río Chili. En consecuencia, la quebrada Chullo concentra los caudales y volúmenes provenientes de las quebradas ubicadas aguas arriba, lo que incrementa el potencial de impacto de los lahares y, por consiguiente, la exposición de las viviendas e infraestructuras ubicadas en su zona de influencia.

Tabla 6. Núcleos urbanos y viviendas expuestas al peligro por descenso de lahares en el distrito de Cayma.

n.°	Núcleo urbano	Quebrada	n.° viviendas	Peligro alto	n.° viviendas	Peligro moderado	n.° viviendas	Peligro bajo
1	Asoc. Viv. Mirador Transoceánica	Azufral Gamarra	1	X	13	X	60	X
2	A. H. Cabrerías	Azufral Gamarra	2	X	9	X	53	X
3	A. H. Pallpata	Azufral Gamarra					3	X
4	Villa 11 de Mayo	Azufral Gamarra y Pastoraíz	15	X	26	X	73	X
5	A. H. La Estrella, Sol de Oro	Azufral Gamarra y Azufral Lari Lari Tucos	16	X	59	X	104	X
6	A. H. Villa Continental	Azufral Lari Lari Tucos, Villa y San Pedro			23	X	84	X
7	A. H. César Vallejo	San Pedro			4	X	9	X
8	A. H. Buenos Aires de Cayma Zona C	Azufral Lari Lari Tucos y Pastoraíz	17	X	51	X	119	X
9	A. H. El Mirador de Buenos Aires	Azufral Lari Lari Tucos	14	X	23	X	37	X
10	Villa Embajada de Japón	Pastoraíz	3	X	20	X	66	X
11	A. H. Señor de los Milagros II	Pastoraíz			11	X	49	X
12	Villa 20 de Enero	Pastoraíz					2	X
13	A. H. Las Lomaditas de Cayma	Pastoraíz					2	X
14	A. H. Primero de Junio	Pastoraíz	6	X	19	X	75	X
15	A. H. Mariano Melgar	Pastoraíz	23	X	46	X	79	X
16	A. H. Deán Valdivia II	San Pedro y Pastoraíz	11	X	14	X	139	X
17	A. H. Santa Rosa de Lima	San Pedro y Pastoraíz	24	X	53	X	82	X
18	A. H. Los Descendientes	Pastoraíz	2	X	23	X	52	X
19	A. H. Virgen de Chapi	Pastoraíz y Tributaria	48	X	94	X	189	X
20	A. H. San Miguel	San Pedro	24	X	50	X	77	X
21	A. H. 19 de Enero	San Pedro y Pastoraíz	15	X	32	X	56	X
22	A. H. Sol de Oro	San Pedro					6	X
23	A. H. Señor de Huanca	San Pedro			11	X	40	X
24	A. H. José Carlos Mariátegui	San Pedro y Pastoraíz	13	X	20	X	56	X
25	A. H. Juan Pablo II	San Pedro	11	X	18	X	33	X
26	A. H. Rafael Belaúnde Diez Canseco	Pastoraíz y Tributaria	27	X	55	X	139	X
27	A. H. 20 de Febrero	Tributaria	11	X	11	X	25	X

28	Asoc. Viv. Taller Ciudad de los Pioneros	Pastoraíz					2	X
29	Asoc. Viv. Los Jazmines de Cayma	Pastoraíz e Innominada					6	X
30	A. H. Las Caba	Innominada					8	X
31	A. H. José Abelardo Quiñones	Pastoraíz y Tributaria	34	X	62	X	95	X
32	A. H. Virgen de la Candelaria	Pastoraíz	6	X	13	X	35	X
33	A. H. Manuel A. Odría	Pastoraíz	3	X	7	X	7	X
34	A. H. Ramiro Prialé	Pastoraíz	13	X	32	X	61	X
35	A. H. Casimiro Cuadros I	San Pedro y Pastoraíz	64	X	100	X	162	X
36	A. H. Casimiro Cuadros II	Pastoraíz					9	X
37	A. H. Buenos Aires de Cayma Zona B	Pastoraíz	11	X	28	X	61	X
38	A. H. La Tomilla Zona A	Pastoraíz y Chullo			2	X	5	X
39	Urbanización Mirasol	Chullo	21	X	110	X	131	X
40	Urbanización Santa Elisa	Chullo			32	X	49	X
41	Urbanización Jorge Basadre	Chullo	3	X	40	X	80	X
42	Urbanización Los Ángeles de Cayma	Chullo	13	X	95	X	169	X
43	Villa Quinta Samay	Chullo					6	X
44	Urbanización Monte Rosa	Chullo	5	X	5	X	5	X
45	Urbanización Los Frutales	Chullo	4	X	57	X	58	X
46	Urbanización Boulevard de Cayma	Chullo	4	X	24	X	37	X
47	Urbanización Los Portales	Chullo					3	X
48	Urbanización El Remanso de Cayma	Chullo					41	X
49	Urbanización AVIDGE	Chullo			60	X	131	X
50	Urbanización Los Arces	Chullo	2	X	12	X	50	X
51	Urbanización La Explanada	Chullo	1	X	32	X	84	X
52	Urbanización Mediterráneo	Chullo					15	X
53	Urbanización Cooperativa de Ingenieros	Chullo	4	X	25	X	77	X
54	Urbanización León XIII	Chullo	10	X	24	X	230	X
55	Pueblo Tradicional Señor de la Caña	Chullo			31	X	80	X
56	A. H. Charcani Chapi Chico	Río Chili					7	X

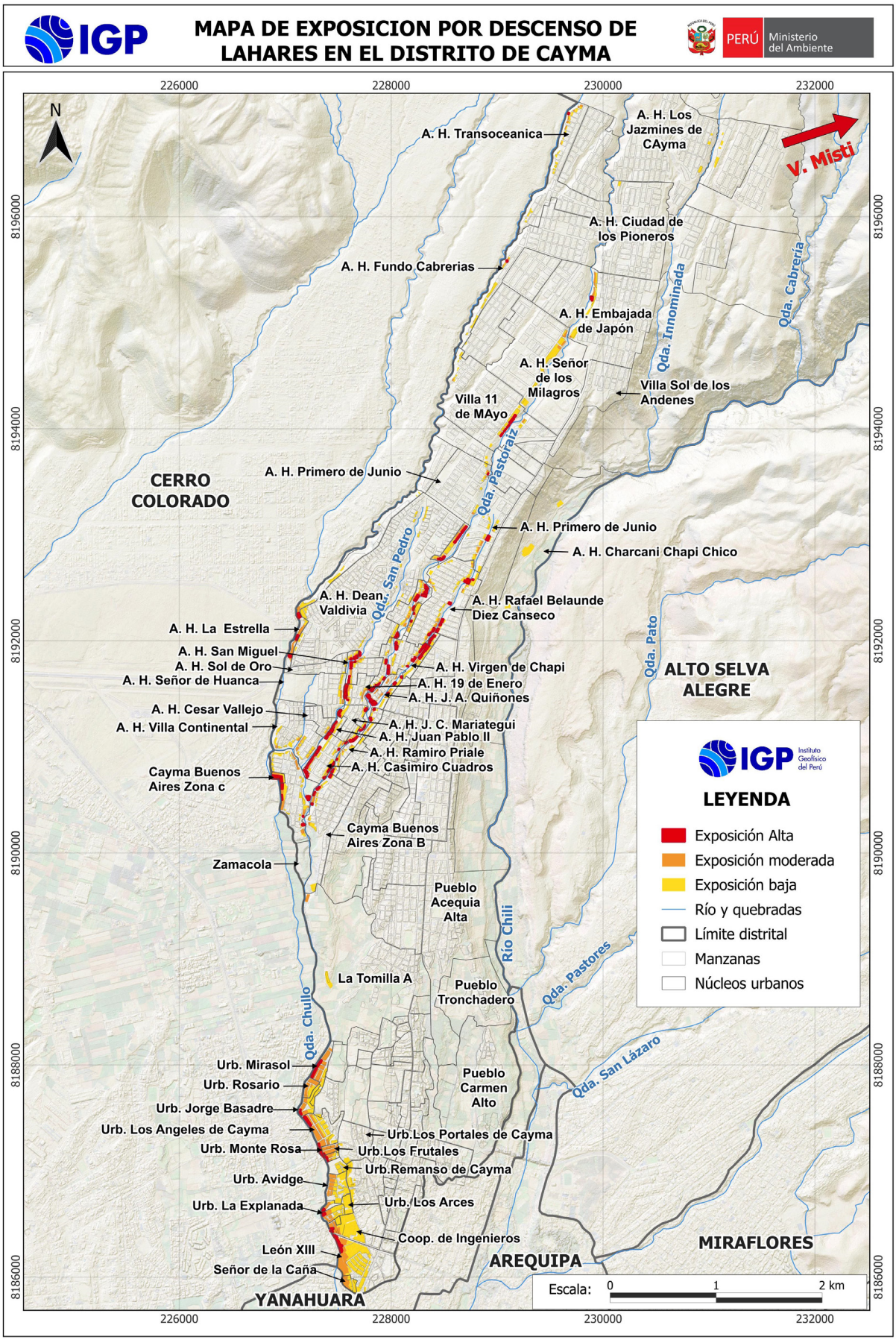


Figura 20. Mapa de exposición ante el peligro por descenso de lahares del distrito de Cayma.

- ## Zonas urbanas próximas a la quebrada Azufral Gamarra

Según el análisis realizado, las zonas urbanas ubicadas en ambas márgenes de la quebrada Azufral Gamarra (Figura 21) y expuestas al peligro por descenso de lahares son la asociación de vivienda Mirador Transoceánica, la asociación de vivienda Jardines de Cayma, el asentamiento humano Cabrerías, Pallpata y Sol de Oro. Durante los trabajos de campo se identificaron vías deterioradas y redes de servicios básicos expuestas, producto de la erosión y socavamiento del terreno. Asimismo, se observan viviendas ubicadas próximas al cauce y escasas obras de drenaje.

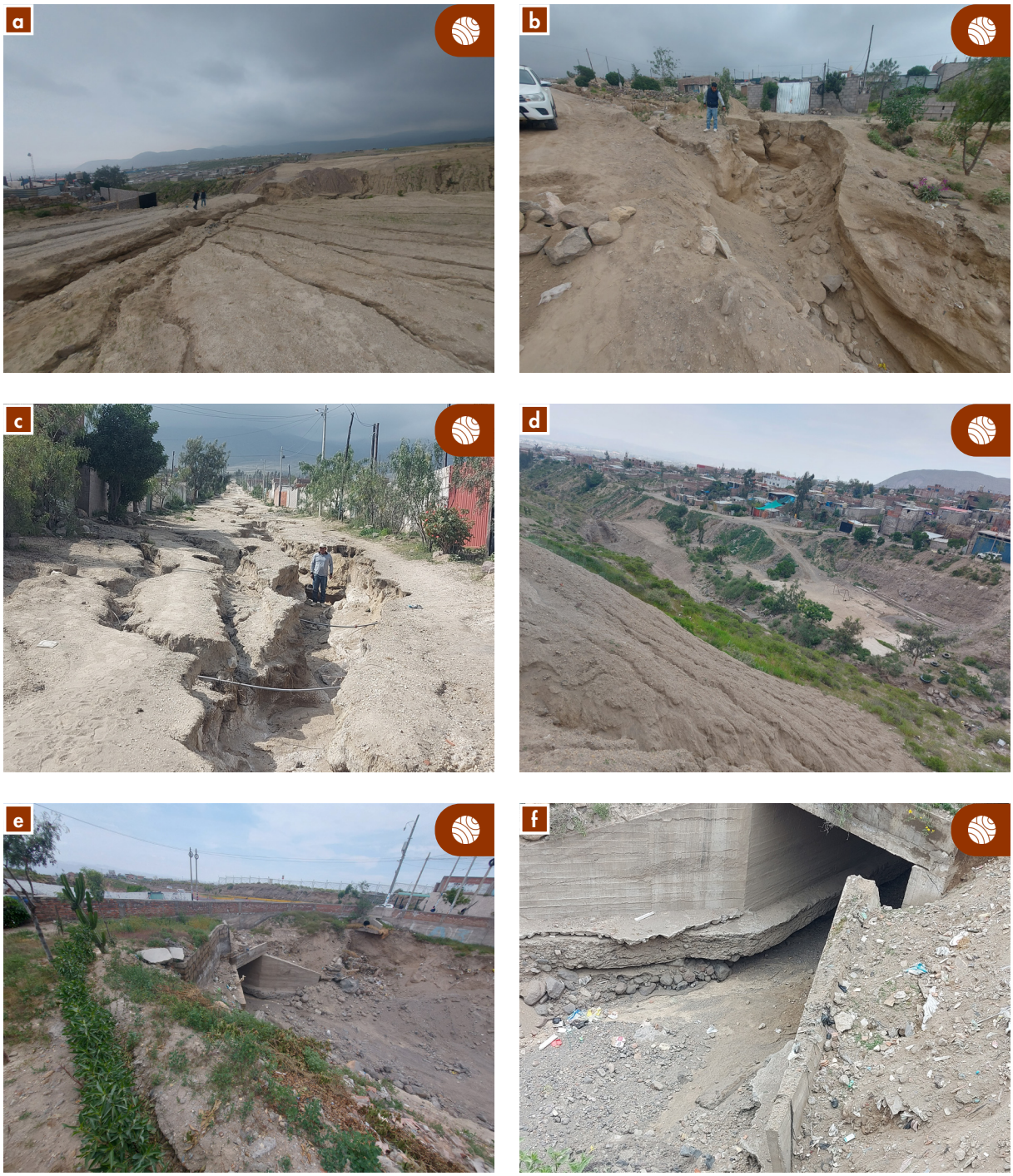


Figura 21. Fotografías de las zonas expuestas al descenso de lahares en la quebrada Azufral Gamarra: a) Asoc. Viv. Mirador Transoceánica. b) Asoc. Viv. Jardines de Cayma. c) A. H. Cabrerías. d) A. H. Pallpata. e) y f) A. H. Sol de Oro.

- ## Zonas urbanas próximas a la quebrada San Pedro

En inmediaciones de la quebrada San Pedro existen diversos núcleos urbanos expuestos al peligro por descenso de lahares (Figura 22). Entre ellos se encuentran el A. H. San Miguel y el A. H. Villa Continental. Los trabajos de campo evidenciaron procesos de erosión y socavamiento del cauce de la quebrada, así como viviendas e infraestructura ubicadas en sus márgenes y tuberías de agua y desagüe expuestas, condiciones que evidencian la alta susceptibilidad de la zona frente al descenso de lahares.



Figura 22. Vistas de las zonas expuestas al descenso de lahares en la quebrada San Pedro: a) A. H. San Miguel. b), c), d), e) y f) A. H. Villa Continental.

- ## Zonas urbanas próximas a la quebrada Chullo

En el área de influencia de la quebrada Chullo existen diversos núcleos urbanos expuestos al peligro por descenso de lahares (Figura 23). Entre ellos se encuentran las urbanizaciones Terrazas de Cayma, Mirasol, Jorge Basadre y Los Ángeles de Cayma. Durante la inspección de campo se identificaron procesos de erosión y socavamiento en ambas márgenes de la quebrada Chullo, así como el deterioro de muros de contención. Además, existen viviendas próximas al cauce, expuestas al descenso de lahares. En febrero de 2026, dichos núcleos urbanos fueron afectados por desbordes e inundaciones, lo que evidencia la elevada exposición de este sector.



Figura 23. Vistas de las zonas expuestas al descenso y desborde de lahares en la quebrada Chullo: a) Terrazas de Cayma. b) Mirasol de Cayma. c) y d) Urb. Jorge Basadre. e) Urb. Los Ángeles de Cayma. f) P. T. Señor de la Caña.



Figura 24. Fotografías de las zonas expuestas al descenso de lahares en la quebrada Pastoraíz: a) A. H. Embajada de Japón. b) A. H. Santa Rosa de Lima. c) Asoc. Viv. Santa María. d) A. H. Ramiro Prialé.

• Zonas urbanas próximas a la quebrada Pastoraíz

En inmediaciones de la quebrada Pastoraíz existe un importante desarrollo urbano. En su área de influencia se identifican diversos núcleos urbanos expuestos al peligro por descenso de lahares (Figura 24), entre ellos A. H. Embajada de Japón (Zona C), A. H. Primero de Junio, A. H. Santa Rosa de Lima, Asociación Viv. Santa María y A. H. Ramiro Prialé. Durante la evaluación de campo se identificaron puentes, alcantarillas, losas deportivas y viviendas construidas próximas al cauce, así como sectores con procesos activos de erosión y socavamiento, que podrían afectar la infraestructura y la transitabilidad durante el descenso de lahares.

• Zonas urbanas próximas a la quebrada Innominada

En ambas márgenes de la quebrada Innominada existen diversos núcleos urbanos expuestos al peligro por descenso de lahares (Figura 25), como el A. H. Sol de los Andes, la Asociación de Vivienda Los Jazmines de Cayma y el A. H. Las Caba. Durante el trabajo de campo se identificó una losa deportiva afectada por lahares recientes. En dichas zonas, la existencia de suelos poco consolidados y la ausencia de obras de drenaje favorecen los procesos de erosión y colmatación durante lluvias intensas.



Figura 25. Vista de una losa deportiva del A. H. Sol de los Andes expuesta al descenso y desborde de lahares por la quebrada Innominada.

7.1.2 Infraestructura expuesta al peligro por descenso de lahares

A partir de los trabajos de campo y la superposición del mapa de peligros por descenso de lahares con la infraestructura existente, en el distrito de Cayma se identifican diversas obras de infraestructura e instalaciones que pueden ser afectadas por lahares. Entre ellas destacan puentes vehiculares y peatonales, un badén rústico, redes de agua y desagüe, muros de contención, así como instituciones educativas y establecimientos de salud (Figura 26). La evaluación permitió reconocer sectores donde existe infraestructura vulnerable asociada a procesos de erosión y socavamiento ante el descenso de lahares.

Las Tablas 7 y 8 resumen la infraestructura, las instituciones educativas y los establecimientos de salud ubicados en las principales quebradas del distrito y expuestos al peligro, según el nivel correspondiente.

Tabla 7. Infraestructura educativa y de salud ubicada en zonas expuestas al peligro por descenso de lahares en el distrito de Cayma.

Tipo de infraestructura	Peligro alto	Peligro moderado	Peligro bajo
Instituciones educativas	Learning Kids, Lord Byron, Regalitos de Ternura	Pequeñeces	I. E. 40 081 César Augusto Mazeyra Acosta, El Ave María, CRIP San Juan de Dios, Rey de Reyes, Dulces Sonrisas, Pasitos de Jesús
Establecimientos de salud	—	—	Óptica Britania, Clínica San Juan de Dios

Tabla 8. Infraestructura ubicada en zonas expuestas al peligro por descenso de lahares en el distrito de Cayma.

Quebrada	Infraestructura expuesta	Observaciones
Chullo	5 puentes viales, 3 puentes peatonales y 1 zona deportiva	Se observan muros de contención con evidencias de deterioro y pérdida de estabilidad próximos a la urbanización Mirasol.
Pastoraíz	10 puentes viales, 3 puentes peatonales, 6 pasos de trocha tipo badén y 8 áreas deportivas	Se observan muros de contención con alturas menores a 1 m en diversos tramos de la quebrada, principalmente en el sector de Ramiro Prialé.
San Pedro	7 puentes viales, 1 puente peatonal y 4 áreas deportivas	Se identifican tuberías de agua y desagüe expuestas en el sector de Villa Continental.
Azufral Gamarra	2 puentes peatonales, 3 pasos de trocha tipo badén y 3 áreas deportivas	Se identifican tuberías de agua y desagüe expuestas en las asociaciones Los Jardines de Cayma y Don Alejandro, así como en el A. H. Cabrerías.
Innominada	2 pasos de trocha tipo badén, 3 áreas deportivas	Se identifican áreas deportivas cubiertas por lahares recientes.
Río Chili	Centrales hidroeléctricas Charcani, Santuario de Chapi, centro de instrucción de la PNP	Se observan afectaciones en el Santuario de Chapi ocasionadas por los lahares de febrero de 2026.

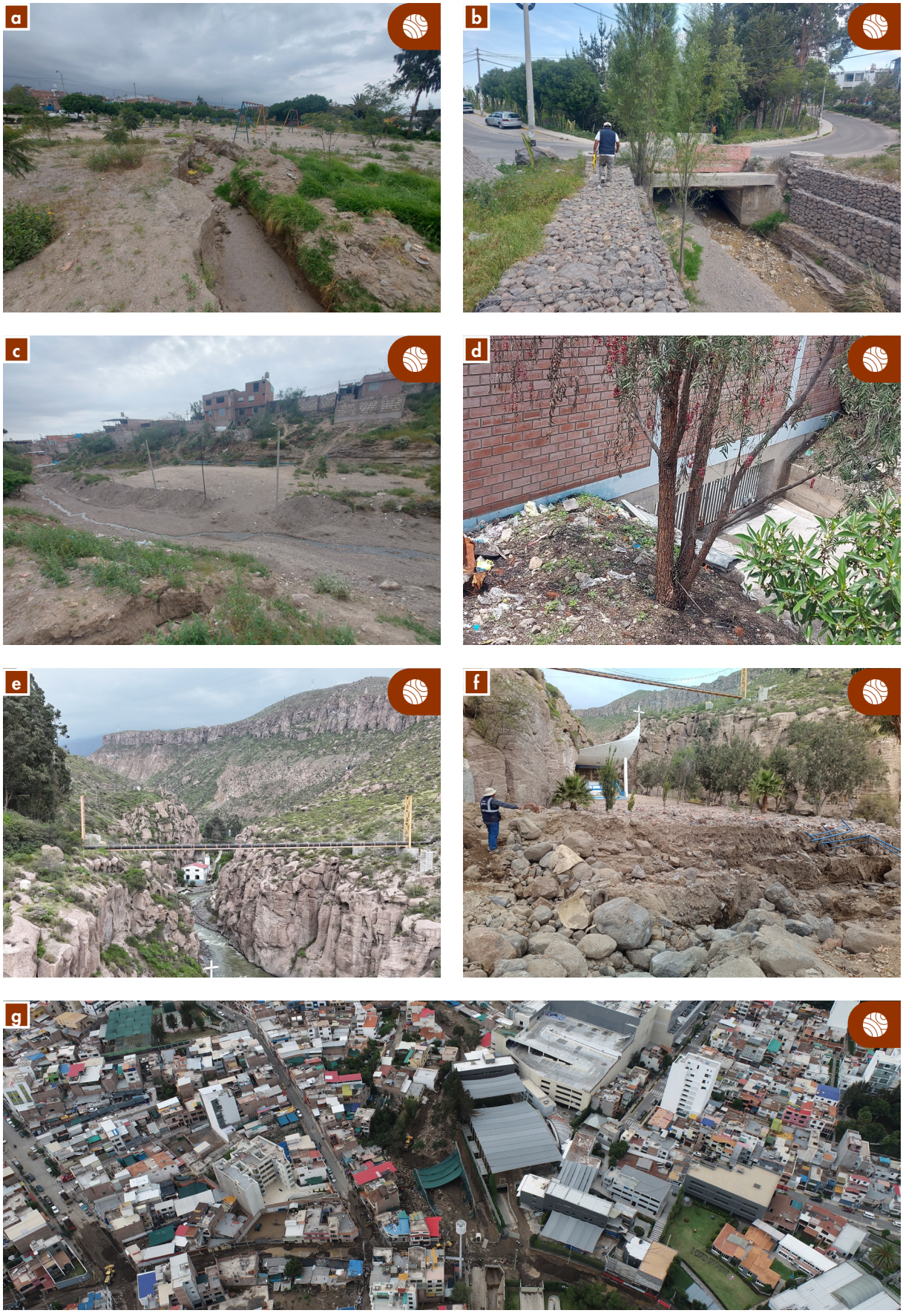


Figura 26. Fotografías de zonas expuestas en el distrito de Cayma. a) Zona deportiva sepultada en A. H. Primero de Junio. b) Puente con escasa altura libre sobre el cauce en Alto Cayma. c) Zona deportiva sepultada en A. H. Abelardo Quiñones. d) Zona de quebrada reducida en el P. J. Juan Velasco Alvarado. e) Estación Charcani V. f) Santuario de Chapi. g) Colegio Lord Byron.

7.2 Mapa de peligros por flujos piroclásticos

El volcán Misti tiene el potencial de generar erupciones explosivas de tipo vulcaniano, subpliniano y pliniano, capaces de producir flujos piroclásticos de diferentes volúmenes y alcances. A partir de los resultados del modelamiento numérico, los trabajos de campo y el análisis de la información geológica disponible, se elaboró el mapa de peligros por flujos piroclásticos para el distrito de Cayma (Figura 27). En función de los alcances obtenidos en las simulaciones, se definieron tres zonas de peligro.

- Zona de peligro alto

Representada en color rojo, comprende las áreas con mayor posibilidad de ser afectadas por flujos piroclásticos asociados a erupciones vulcanianas de menor volumen. Estos flujos podrían alcanzar distancias menores a 8 km del cráter del volcán Misti y se restringen principalmente a los sectores proximales del edificio volcánico.

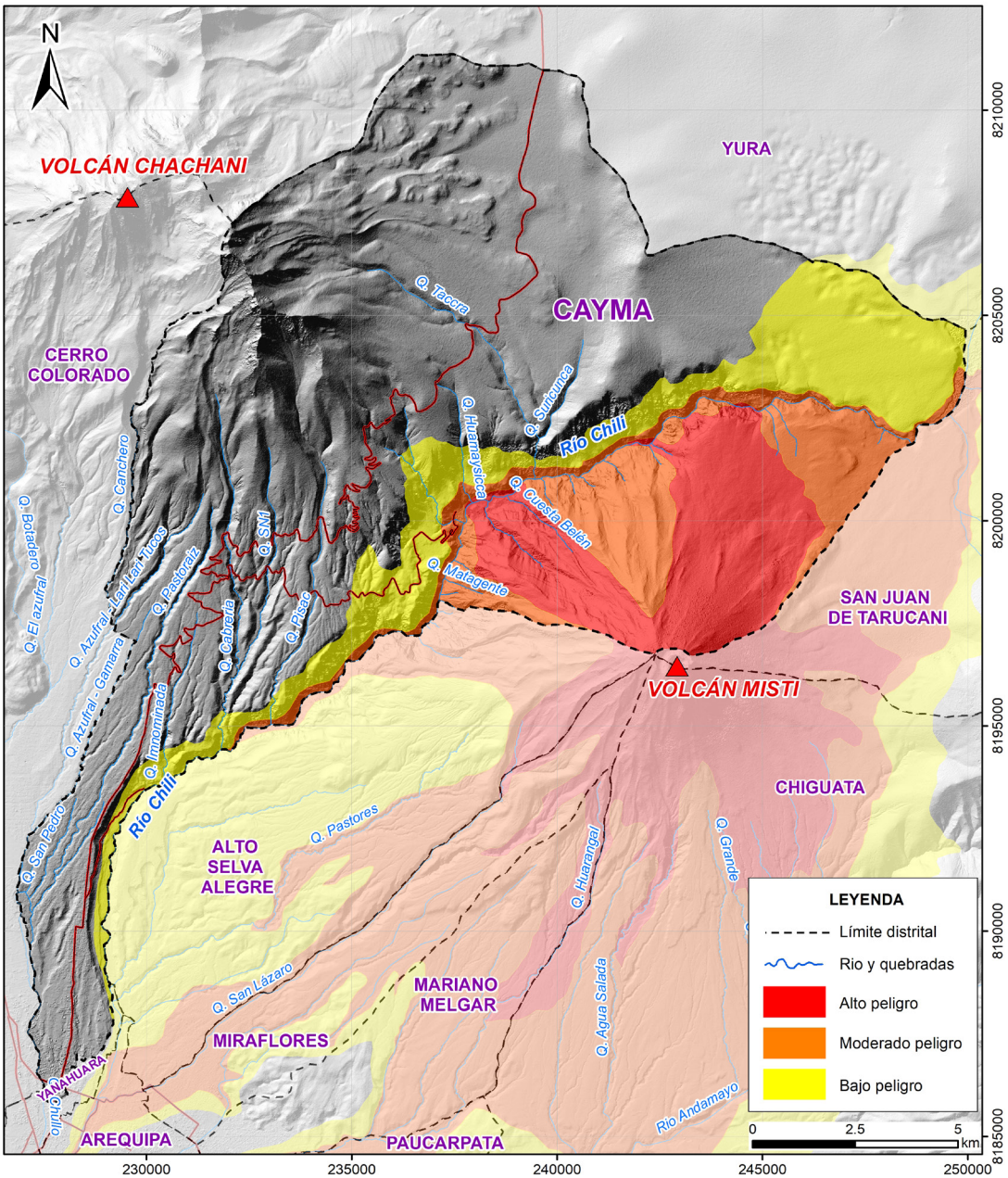


Figura 27. Mapa de peligro por descenso de flujos piroclásticos para el distrito de Cayma.

- **Zona de peligro moderado**

Representada en color naranja, incluye las áreas que podrían ser potencialmente afectadas por flujos piroclásticos generados durante erupciones de mayor magnitud (subpliniana), cuyos alcances pueden extenderse entre 12 km y 18 km del cráter. En este escenario, los flujos descienden por las quebradas ubicadas en los flancos oeste y noroeste del volcán Misti, canalizándose progresivamente en el valle del río Chili.

- **Zona de peligro bajo**

Representada en color amarillo, comprende las áreas que podrían ser afectadas por flujos piroclásticos de gran volumen, asociados a erupciones explosivas de tipo subpliniano o pliniano. Bajo este escenario, los flujos podrían recorrer de 18 km a 24 km desde el cráter, alcanzando el cañón del río Chili y sectores ubicados dentro del distrito de Cayma (Figura 27). Entre las principales infraestructuras potencialmente expuestas se encuentran la Escuela de Policía de Charcani, las instalaciones y centrales hidroeléctricas de EGASA ubicadas en el valle del río Chili, así como el Santuario de la Virgen de Chapi, localizado en la margen izquierda del río Chili.

7.2.1 Exposición ante el peligro por descenso de flujos piroclásticos

Los elementos expuestos al peligro por descenso de flujos piroclásticos en el distrito de Cayma se concentran principalmente en el valle del río Chili (Tabla 9). Entre ellos destaca la infraestructura del sistema hidroeléctrico Charcani, cuyas centrales dedicadas a la generación de energía eléctrica se encuentran ubicadas en zonas de peligro. Asimismo, la Escuela de la Policía también presenta exposición debido a su ubicación en el sector de Charcani Grande.

De acuerdo con la Tabla 9, el Santuario de la Virgen de Chapi se encuentra ubicado en una zona de peligro bajo. Si bien su nivel de exposición es menor respecto a otros elementos, una eventual ocurrencia de flujos piroclásticos podría restringir el acceso y afectar el desarrollo de actividades religiosas y turísticas en este importante centro de peregrinación.

También se identifican viviendas y áreas de cultivo ubicadas sobre la margen derecha del río Chili (Tabla 9), en zonas de peligro bajo.

Tabla 9. Exposición de infraestructura y viviendas ante el peligro por descenso de flujos piroclásticos en el distrito de Cayma.

Infraestructura/ vivienda	Quebrada	n.°	Peligro alto	n.°	Peligro moderado	n.°	Peligro bajo	Observaciones
Centrales hidroeléctricas de Charcani	Río Chili	1	X	3	X	6	X	Se ubican a lo largo del valle del río Chili. Dichas centrales se encuentran expuestas a los tres niveles de peligro.
Escuela de la Policía	Río Chili	1	X	1	X	1	X	Se localiza en el sector de Charcani Grande. Su ubicación hace que se encuentre dentro de las zonas de peligro alto, moderado y bajo.
Santuario de Chapi	Río Chili					1	X	Ubicado a 12 km al oeste del volcán Misti, en el valle del río Chili. Dicho santuario se encuentra ubicado en zona de peligro bajo.
Viviendas	Río Chili					8	X	Las viviendas se encuentran distribuidas sobre la margen derecha del río Chili, próximas a áreas de cultivo.

7.3 Mapa de peligros por avalancha de escombros

A partir de las simulaciones realizadas mediante el *software* VolcFlow y los datos de campo, se elaboró el mapa de peligros por avalanchas de escombros para el distrito de Cayma (Figura 28). Los resultados permitieron definir tres zonas de peligro, establecidas en función del volumen de las avalanchas simuladas y de las características geomorfológicas del volcán Misti.

- Zona de peligro alto

Representada en color rojo, comprende las áreas que podrían ser afectadas por avalanchas de escombros con volúmenes cercanos a 0.8 km³, asociadas al colapso parcial de un sector del edificio volcánico. Estos flujos podrían alcanzar distancias de hasta 12 km desde la zona de colapso y descender principalmente por las quebradas ubicadas en los flancos oeste y suroeste del volcán Misti.

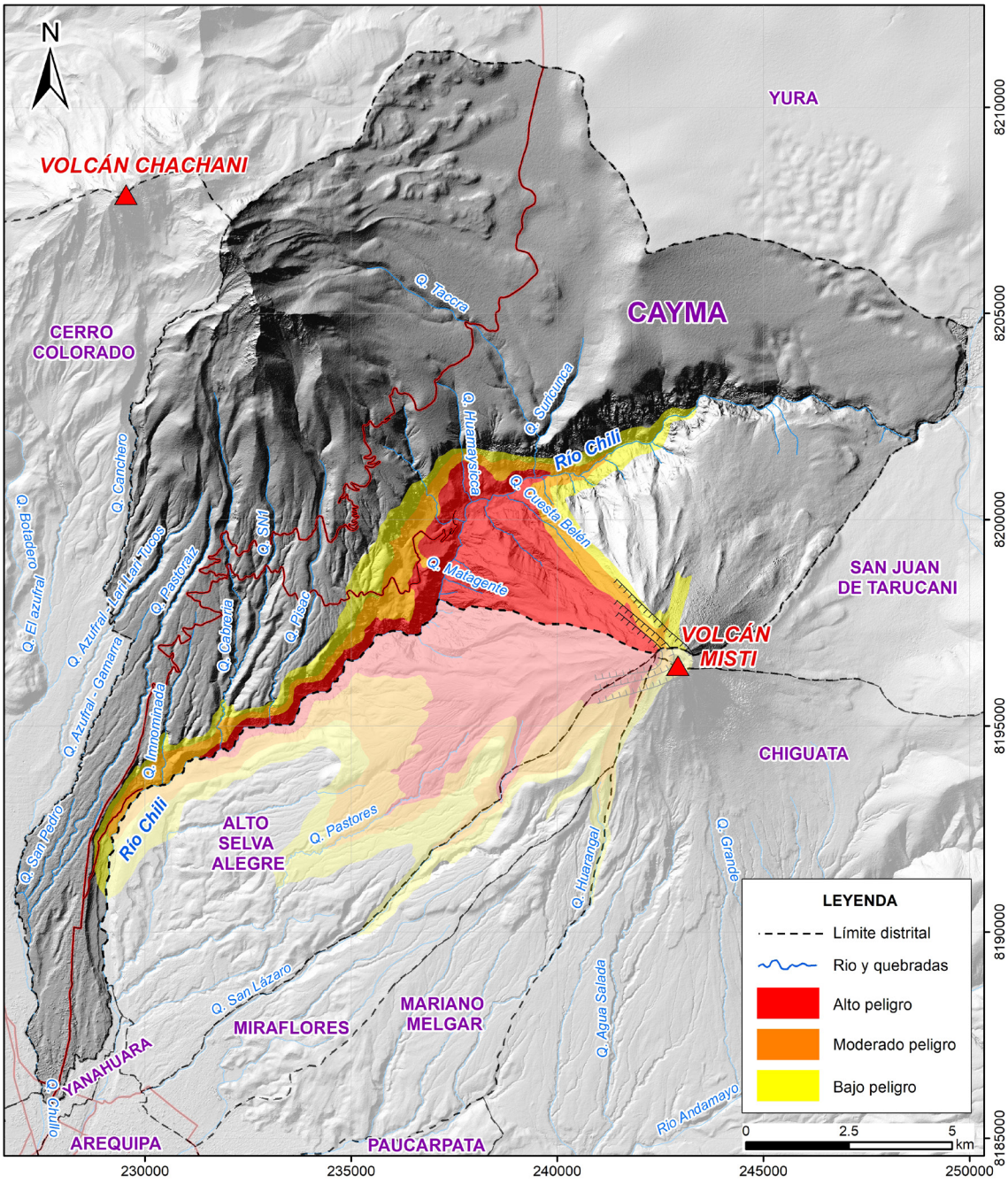


Figura 28. Mapa de peligros por avalancha de escombros en el distrito de Cayma.

- **Zona de peligro moderado**

Representada en color naranja, incluye las áreas susceptibles de ser afectadas por avalanchas de escombros con volúmenes del orden de 2 km³. En este escenario, las avalanchas presentan una mayor movilidad y alcance, pudiendo recorrer aproximadamente 14 km, antes de canalizarse progresivamente en el cañón del río Chili.

- **Zona de peligro bajo**

Representada en color amarillo, comprende las áreas que podrían ser afectadas por avalanchas de escombros de gran volumen, cercano o mayor a 2.7 km³. Bajo este escenario, las avalanchas podrían recorrer más de 16 km de distancia, afectando principalmente el cañón del río Chili y sectores adyacentes.

Las simulaciones muestran que las avalanchas de escombros descienden preferentemente por los flancos oeste y suroeste del volcán Misti, canalizándose posteriormente a lo largo del cañón del río Chili (Figura 28). En un escenario de erupción de gran magnitud, estas avalanchas podrían generar el represamiento temporal del río Chili, favoreciendo la acumulación y posterior removilización de material.

La principal zona de afectación potencial para el distrito de Cayma se concentra en el cañón del río Chili, donde podrían verse comprometidas las instalaciones y centrales hidroeléctricas de EGASA, la Escuela de Policía de Charcani, el Santuario de la Virgen de Chapi y otras infraestructuras ubicadas en ambas márgenes del valle.

7.3.1 Exposición ante el peligro por descenso de avalancha de escombros

Los elementos expuestos al peligro por avalanchas de escombros en el distrito de Cayma se concentran principalmente en el valle del río Chili (Tabla 10). En este sector destaca la presencia de las centrales hidroeléctricas de Charcani, cuya distribución a lo largo del valle determina distintos niveles de exposición al peligro. Asimismo, la Escuela de la Policía, el Santuario de la Virgen de Chapi, las viviendas y las áreas de cultivo ubicadas sobre terrazas fluviales en ambas márgenes del río Chili forman parte de los elementos potencialmente expuestos a este tipo de peligro.

Tabla 10. Exposición de infraestructura y viviendas ante el peligro por descenso de avalancha de escombros en el distrito de Cayma.

Infraestructura/ vivienda	Quebrada	n.°	Peligro alto	n.°	Peligro Moderado	n.°	Peligro bajo	Observaciones
Centrales hidroeléctricas de Charcani	Río Chili	4	X	6	X	6	X	Centrales hidroeléctricas distribuidas de manera escalonada a lo largo del valle del río Chili presentan distintos niveles de exposición al peligro.
Escuela de la Policía	Río Chili	1	X	1	X	1	X	Ubicada en el sector de Charcani Grande, próxima al valle del río Chili. Se ubica dentro de las zonas de peligro alto, moderado y bajo.
Santuario de Chapi	Río Chili			1	X	1	X	Está ubicado a 12 km al oeste del volcán Misti. Se encuentra expuesto a zonas de peligro moderado y bajo.
Viviendas	Río Chili			8	X	24	X	Viviendas construidas en la margen derecha del río Chili, próximas a áreas de cultivo desarrolladas sobre terrazas fluviales.

De acuerdo con los resultados del modelamiento numérico, las avalanchas de escombros presentan un alcance más restringido respecto a los flujos piroclásticos, depositándose principalmente en el valle del río Chili. Sin embargo, una eventual avalancha puede ocasionar daños significativos en las instalaciones del sistema hidroeléctrico Charcani, así como afectar viviendas, terrenos de cultivo y otras infraestructuras existentes en el fondo del valle del río Chili (Tabla 10). En consecuencia, estos aspectos deben ser considerados en la planificación territorial y en las acciones de preparación y respuesta frente a un escenario de colapso del edificio del volcán Misti.

7.4 Mapa de peligros por flujos de lava

Con base en los resultados del modelamiento numérico realizado por Vargas et al. (2021) y en la información geológica disponible, se elaboró el mapa de peligros por flujos de lava del volcán Misti (Figura 29). El modelamiento consideró diferentes escenarios de emplazamiento de flujos de lava asociados a una eventual erupción efusiva del volcán Misti.

Los resultados indican que, debido a la elevada

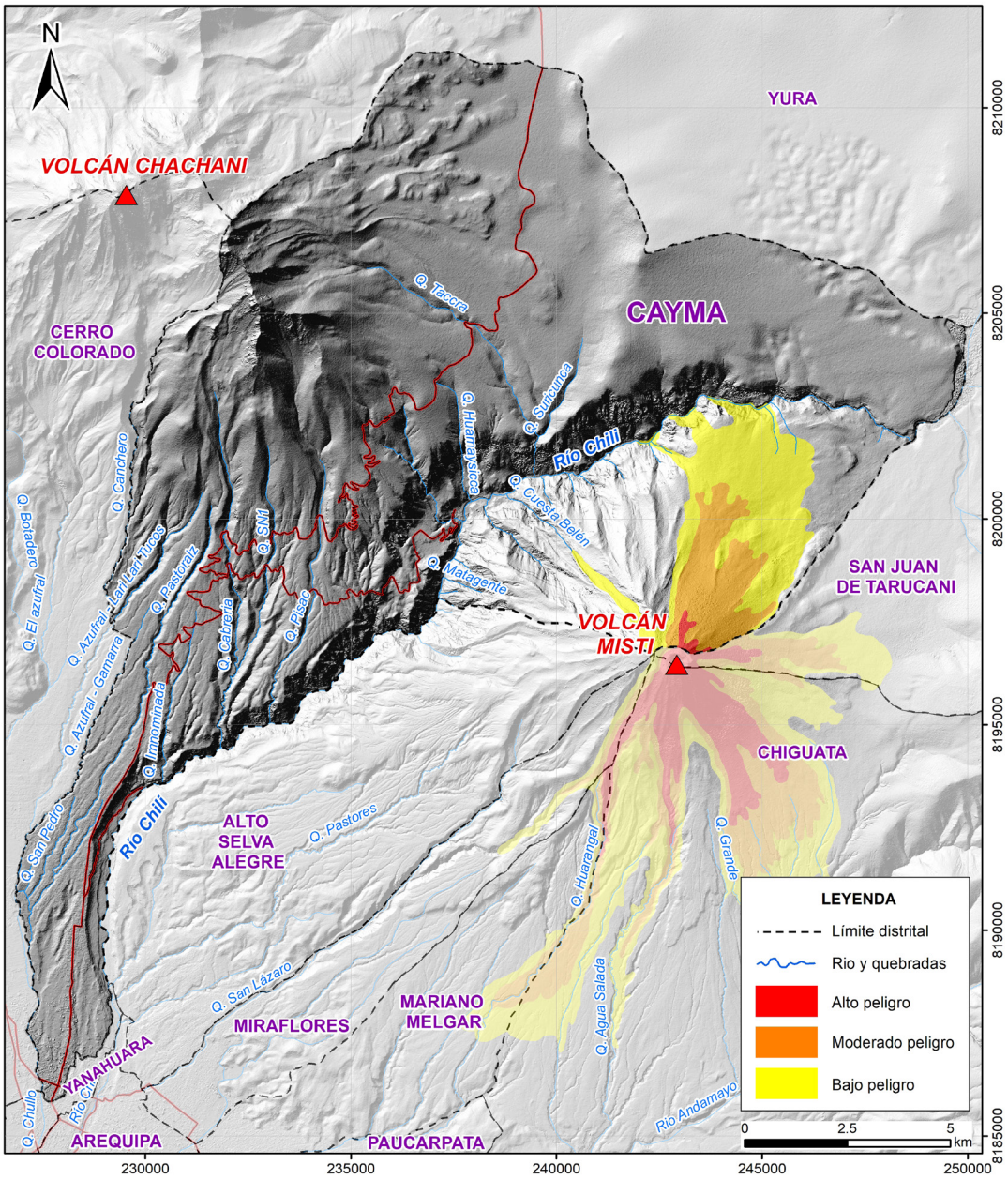


Figura 29. Mapa de peligros por flujos de lava para el distrito de Cayma. Los flujos de lava no alcanzan las zonas urbanas de dicho distrito.

viscosidad de las lavas del Misti, los flujos tendrían un alcance limitado y se emplazarían principalmente sobre los flancos norte, sur y este del edificio volcánico. En consecuencia, el distrito de Cayma no se vería afectado por este tipo de fenómeno. Por lo tanto, no se identifican zonas de peligro por flujos de lava dentro de dicha jurisdicción.

7.5 Mapa de peligros por caída de tefra

Los resultados del modelamiento numérico de dispersión de ceniza con diferentes volúmenes permitieron elaborar mapas de peligro por caída de tefra del volcán Misti para el distrito de Cayma. Se consideraron dos escenarios eruptivos representativos: una erupción de tipo vulcaniano (IEV 1–2) y otra de tipo subpliniano a pliniano (IEV 3–5).

7.5.1 Mapa de peligros por caída de tefra para un escenario de erupción vulcaniana (IEV 1–2)

Este mapa muestra tres zonas de peligro (Figura 30):

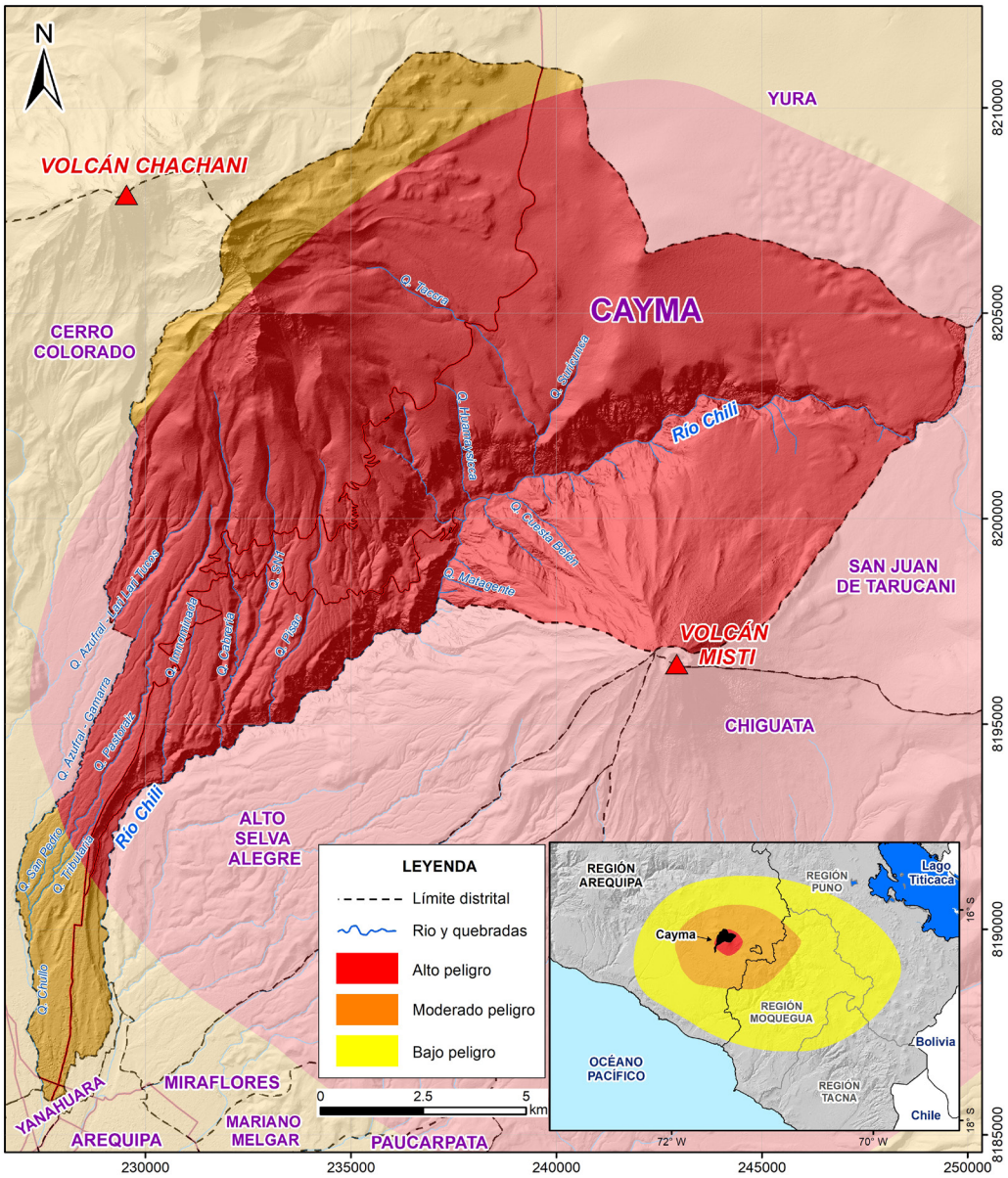


Figura 30. Mapa de peligro por caída de tefra para un escenario de erupción vulcaniana (IEV 1–2), modificado de Rivera et al. (2024).

- Zona de peligro alto

Representada en color rojo, comprende el área más próxima al volcán Misti, extendiéndose aproximadamente hasta 14 km del cráter. En este sector, la ceniza acumulada tendría un espesor aproximado de hasta 5 cm, valor consistente con el espesor del depósito de ceniza de la erupción del Misti, ocurrida en el intervalo 1440–1470 (IEV 2) (Thouret et al., 2001). Bajo este escenario, la dispersión de ceniza podría alcanzar sectores del distrito de Cayma.

- Zona de peligro moderado

Representada en color naranja, abarca el área adyacente a la zona de peligro alto, localizada entre 14 km y 73 km del cráter del volcán. En este sector se espera la acumulación de depósitos de ceniza con espesores que varían desde algunos milímetros hasta centímetros. Este comportamiento es comparable con el observado durante la erupción del volcán Ubinas de 2006–2009 (IEV 2), la cual produjo depósitos de ceniza de aproximadamente 1 mm a una distancia cercana a 30 km del cráter (Rivera et al., 2014).

- Zona de peligro bajo

Representada en color amarillo, comprende las áreas ubicadas a más de 73 km del cráter del volcán Misti, donde la ceniza acumulada tendría espesores menores a 1 mm. Este escenario representa la dispersión de partículas más finas, las cuales pueden ser transportadas a mayores distancias por efecto del viento. Un comportamiento similar fue observado durante la erupción del volcán Ubinas en 2019, cuando se registraron depósitos de ceniza de hasta 7 mm en localidades ubicadas a más de 6 km del cráter (Aguilar et al., 2019).

7.5.2 Mapa de peligros por caída de tefra para un escenario de erupción subpliniana a pliniana (IEV 3–5)

El mapa de peligro por caída de tefras (lapilli, ceniza) para un escenario de erupción subpliniana a pliniana (IEV 3–5) también identifica tres zonas de peligro: alto, moderado y bajo, como se detalla en la Figura 31.

- Zona de peligro alto

Representada en color rojo, esta zona corresponde al área de mayor peligrosidad por caída de tefra y se extiende a distancias superiores a 400 km hacia el oeste y el este del volcán Misti. A distancias de entre 10 km y 12 km del cráter, la acumulación de tefra alcanzaría aproximadamente 0.5 m de espesor. Estos resultados son consistentes con el depósito de lapilli de pómez «Autopista», asociado a una erupción pliniana (IEV 4) del volcán Misti, que presenta un espesor de 40 cm a una distancia de 20 km al oeste del cráter (Cacya et al., 2007). Asimismo, son coherentes con los depósitos de caída de lapilli de pómez correspondientes a la erupción pliniana del volcán Misti ocurrida hace aproximadamente 2000 años AP.

- Zona de peligro moderado

Representada en color naranja, esta zona comprende el área adyacente a la zona de peligro alto y se extiende hasta aproximadamente 700 km hacia el oeste y el este del volcán Misti, donde el espesor de la capa de ceniza podría ser superior a 1 mm. Un comportamiento similar se observa en el depósito de lapilli de pómez «Sacarosa», asociado a una erupción pliniana (IEV 5) del volcán Misti ocurrida hace aproximadamente 38 500 años AP. Este depósito presenta un espesor de 40 cm a una distancia de 20 km al suroeste del volcán Misti, en el distrito de Cayma (Harpel et al., 2023).

- Zona de peligro bajo

Representada en color amarillo, esta zona comprende las áreas ubicadas más allá de la zona de peligro moderado y presenta una configuración elíptica, con un alcance superior a 1000 km desde el volcán Misti. En este escenario, la tefra podría alcanzar espesores superiores a 0.1 mm. Como referencia, durante la erupción subpliniana (IEV 4) del volcán Calbuco (Chile), ocurrida en 2015, se registraron depósitos de ceniza de aproximadamente 1 mm de espesor a una distancia de 510 km al noroeste del cráter, en la provincia de Neuquén, Argentina (Romero et al., 2016).

7.5.3 Exposición de núcleos urbanos, habitantes y viviendas al peligro por caída de tefras

En un escenario de erupción subpliniana a pliniana (IEV 3–5), gran parte del distrito de Cayma podría verse afectada por la caída de ceniza. Bajo este escenario, se encontrarían expuestos aproximadamente 111 190 habitantes, además de los núcleos urbanos y viviendas ubicados dentro de las zonas de peligro moderado y bajo. Asimismo, podrían verse afectados centros educativos, establecimientos de salud, vías de comunicación, puentes vehiculares y peatonales, reservorios de agua, grifos y comisarías por la caída de ceniza y por eventos asociados, como los lahares. La dispersión de ceniza también alcanzaría otros distritos adyacentes. La exposición a este fenómeno podría ocasionar problemas respiratorios por la inhalación de ceniza. Asimismo, se produciría la contaminación de fuentes de agua, la afectación de cultivos y diversas alteraciones en las actividades cotidianas de la población.

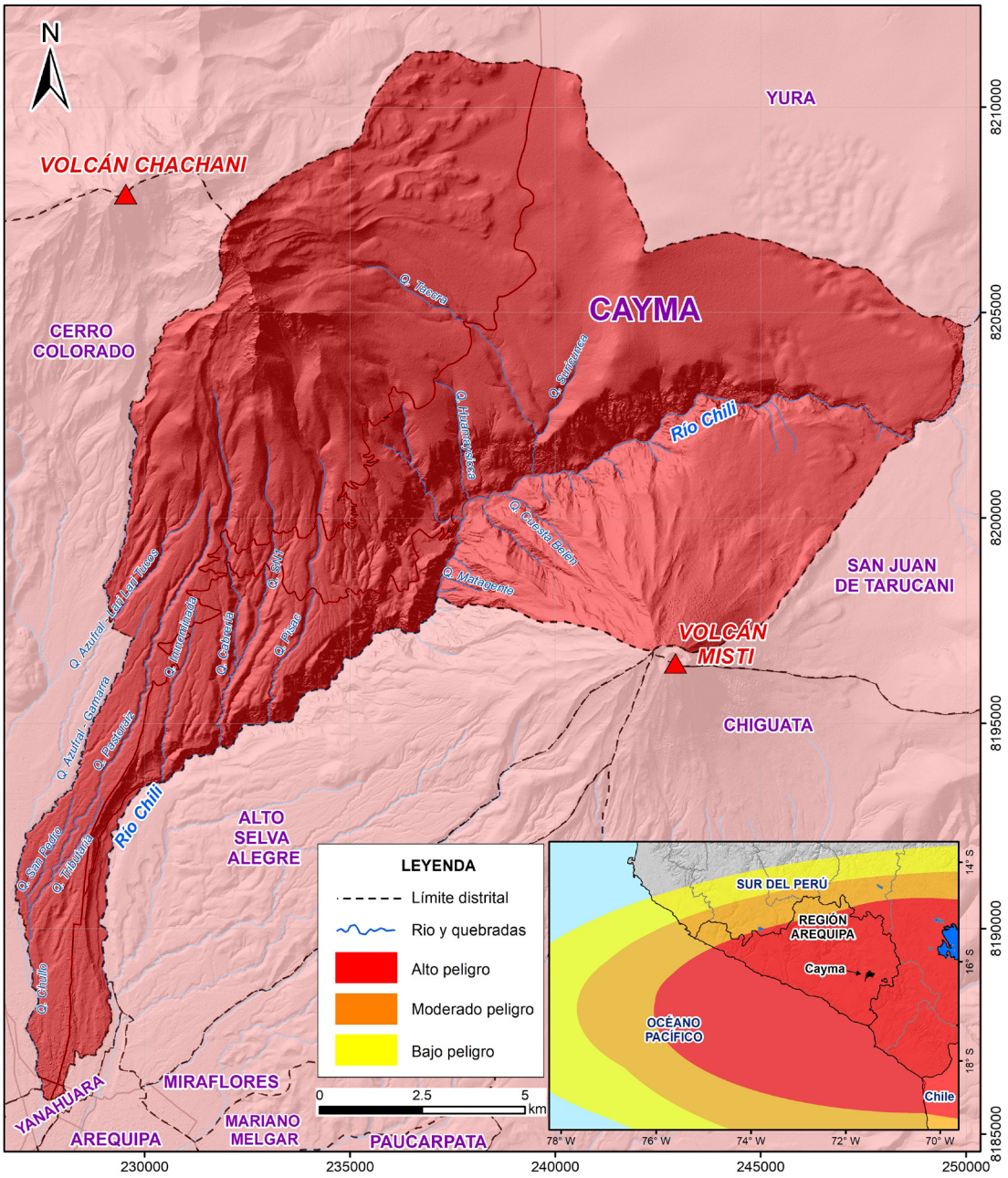


Figura 31. Mapa de peligro por caída de tefra para un escenario de erupción pliniana (IEV 5), modificado de Rivera et al. (2024).

En un escenario de erupción subpliniana a pliniana (IEV 3–5), el distrito de Cayma podría verse afectado por la caída de lapilli de pómez y otros fragmentos volcánicos con tamaños comprendidos entre 2 mm y 64 mm. La acumulación de este material podría alcanzar espesores del orden de 20 cm a 60 cm, generando severas afectaciones en las viviendas, la infraestructura y los servicios básicos, además de provocar la interrupción del tránsito vehicular y peatonal. Asimismo, se contaminarían los recursos hídricos y se paralizarían las actividades agrícolas. Debido a la magnitud de este escenario, resulta fundamental fortalecer las medidas de preparación y respuesta, considerando que la caída de tefra representa uno de los peligros volcánicos de mayor alcance espacial para el distrito de Cayma y los sectores ubicados en el entorno del volcán Misti.

8. Aportes a una gestión reactiva

En el presente estudio se elaboraron mapas de peligro volcánico para el distrito de Cayma, en los que se identificaron tres zonas de peligro (alto, moderado y bajo), y se establecieron escenarios eruptivos futuros del Misti. Esta información permitió definir etapas y rutas de evacuación para un sector de la población de Cayma, establecer puntos de concentración y proponer zonas de albergue temporal.

El presente estudio constituye un instrumento técnico para la implementación de un plan de gestión reactiva en el distrito de Cayma ante una eventual erupción del volcán Misti, orientado a mejorar la capacidad de preparación y respuesta de las autoridades.

8.1 Proceso de evacuación por peligros volcánicos del Misti

Ante un escenario eruptivo subpliniano o pliniano (IEV 3–5) del Misti, se plantea la eventual evacuación de determinados sectores del distrito de Cayma, ya que este tipo de erupciones puede generar impactos severos en la población, la infraestructura y los servicios esenciales, especialmente en las áreas próximas al volcán (Tabla 11). En ese sentido, un escenario de erupción subpliniana o pliniana justifica la evacuación debido, principalmente, a la caída de grandes volúmenes de tefra (ceniza y lapilli de pómez), que cubrirían el distrito de Cayma y distritos aledaños. En este tipo de erupciones también es común la ocurrencia de flujos piroclásticos, lahares y avalanchas de escombros, que podrían afectar principalmente los sectores ubicados en el valle del río Chili; por ello, la evacuación constituye la principal medida de protección para la población expuesta.

La decisión de evacuar a la población corresponde a las autoridades competentes, en el marco del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SINAGERD), quienes adoptarán dicha medida siguiendo el protocolo establecido en su plan de gestión reactiva y sobre la base de la evaluación técnica del nivel de actividad del volcán realizada por el Instituto Geofísico del Perú (IGP). La información científica emitida por el IGP constituye el sustento técnico para la toma de decisiones por parte de las autoridades responsables de la gestión de la emergencia.

Emitida la orden de evacuación por parte de las autoridades competentes, el presente estudio propone un modelo referencial para la evacuación de la población del distrito de Cayma, basado en la sectorización de la población, la identificación de puntos de concentración y la definición de vías y etapas de evacuación. En este modelo, la población se desplazará desde sus viviendas hacia los puntos de concentración asignados a cada sector y, posteriormente, será trasladada por las rutas de evacuación establecidas hacia los albergues temporales. Estos últimos se establecen fuera de las áreas de influencia de los peligros volcánicos.

Los criterios empleados para el proceso de evacuación se presentan en la Tabla 11.

8.2 Puntos de concentración (PC)

Los puntos de concentración (PC) son áreas abiertas previamente identificadas, evaluadas y georreferenciadas dentro del proceso de planificación de la gestión del riesgo de desastres. Se ubican fuera de las zonas de afectación inmediata por peligros volcánicos de impacto directo, tales como flujos piroclásticos, lahares, flujos de lava y avalanchas de escombros. Los puntos de concentración están destinados a reunir temporalmente a la población evacuada para su organización y posterior traslado hacia los albergues temporales.

La selección de los puntos de concentración constituye un elemento fundamental en la planificación de la evacuación, ya que facilita el desplazamiento ordenado de la población y reduce los tiempos de respuesta durante una emergencia. Para su identificación se consideraron los siguientes criterios:

- Ubicación fuera de las zonas de peligro inmediato.
- Accesibilidad mediante vías vehiculares y peatonales en adecuadas condiciones y conectadas con las rutas de evacuación establecidas.
- Disponibilidad de áreas abiertas y amplias, con capacidad suficiente para concentrar temporalmente a la población, preferentemente correspondientes a estadios, plazas, parques o complejos deportivos.

Tabla 11. Tipo de actividad volcánica, exposición al peligro volcánico y recomendaciones de evacuación.

Tipo de erupción e Índice de Explosividad Volcánica (IEV)	Peligro volcánico	Zona de peligro	Evacuación	Exposición	Descripción
1–2 Vulcaniana	Lahares	Alto	NO	SÍ	Viviendas e infraestructura próximas a quebradas del distrito de Cayma presentan exposición. No requieren evacuación, pero sí se deben tomar medidas preventivas.
		Moderado	NO	SÍ	Viviendas e infraestructura próximas a quebradas de Cayma presentan exposición. No requieren evacuación, pero sí se deben tomar medidas preventivas.
	Caída de ceniza	Moderado	NO	SÍ	La caída de ceniza de considerable volumen tiene alcance a todo el distrito de Cayma y distritos vecinos.
		Bajo	NO	SÍ	La caída de ceniza tiene alcance a todo el distrito de Cayma y distritos vecinos.
≥3 Subpliniana a pliniana	Lahares	Bajo	SÍ	SÍ	Viviendas expuestas en zonas próximas a las quebradas de Cayma. Sí requieren evacuación y acciones de prevención.
	Flujos piroclásticos	Moderado	SÍ	SÍ	El sector este del distrito de Cayma, próximo al río Chili, presenta condiciones de exposición que requieren acciones de prevención. Evaluar la evacuación de la población.
		Bajo	SÍ	SÍ	El sector este del distrito de Cayma, próximo al río Chili, presenta condiciones de exposición que requieren acciones de prevención. Evaluar la evacuación de la población.
	Caída de ceniza	Alto	SÍ	SÍ	Todo el distrito de Cayma se encuentra expuesto al peligro por caída de tefra, la cual podría acumularse formando depósitos con espesores superiores a 5 cm.
		Moderado	SÍ	SÍ	Todo el distrito de Cayma se encuentra expuesto al peligro por caída de ceniza, la cual podría alcanzar espesores de hasta 40 cm.
		Bajo	SÍ	SÍ	Todo el distrito de Cayma se encuentra expuesto a caídas de ceniza que alcanzarían espesores de más de 40 cm.
	Avalancha de escombros	Bajo	SÍ	SÍ	Viviendas expuestas en el sector este del distrito de Cayma, en las inmediaciones del río Chili, que requerirían evacuación.
		Moderado	SÍ	SÍ	Viviendas expuestas en el sector este del distrito de Cayma, en las inmediaciones del río Chili, que requerirían evacuación.

- Pendientes moderadas que faciliten el desplazamiento seguro de las personas.
- Condiciones adecuadas de seguridad estructural, evitando elementos con riesgo de colapso, como muros inestables, árboles de gran porte, postes o tendidos eléctricos.
- Señalización visible y permanente, complementada con sistemas de alerta sonora que faciliten la concentración de la población durante una emergencia.

En el marco del presente estudio, luego de un trabajo técnico realizado en coordinación con la Municipalidad Distrital de Cayma, se identificaron 21 puntos de concentración, distribuidos estratégicamente en el área urbana. Su selección consideró la información contenida en los mapas de peligros del volcán Misti, la topografía local, la red vial, la capacidad de acogida de cada espacio y la dirección probable de los peligros volcánicos, los cuales se originarían en las zonas altas del distrito. Asimismo, se realizó el reagrupamiento y la unificación de determinados núcleos urbanos, con el propósito de optimizar la asignación de los puntos de concentración para cada sector poblacional, de acuerdo con su nivel de exposición, accesibilidad y cercanía.

Según la información del INEI (2020), aproximadamente el 51 % de la población del distrito de Cayma se encuentra en estratos socioeconómicos alto, medio alto y medio, caracterizados por mayores niveles de ingreso per cápita. Esta condición favorecería una mayor capacidad de respuesta frente a una situación de emergencia, por lo que es probable que una parte importante de la población pueda desarrollar procesos de autoevacuación con menor dependencia de la asistencia estatal.

La ubicación de los puntos de concentración (PC) y la distribución de los sectores de concentración (SC), definidos estos últimos como agrupaciones de núcleos urbanos que convergen hacia un mismo punto de concentración durante la evacuación, se presentan en la Tabla 12 y la Figura 32.

Tabla 12. Puntos de concentración del distrito de Cayma ante una erupción subpliniana a pliniana (IEV 3–5) del Misti.

Puntos de concentración (PC)	Sectores de concentración (SC) conformados por núcleos urbanos	n.° de manzanas
PC 1: Losa deportiva Pallpata	SC 1: A. H. Pallpata y A. H. 11 de Mayo Zona D	94
PC 2: Losa deportiva Villa Sol de los Andes	SC 2: A. H. Embajada de Japón Zona B y A. H. Sol de los Andes	53
PC 3: I. E. 11 de Mayo	SC 3: A. H. Las Lomaditas, A. H. 11 de Mayo Zona B y A. H. 11 de Mayo Zona C	52
PC 4: Estadio Primero de Junio Zona B	SC 4: Asoc. Peq. Ind. Granjeros El Triunfo y A. H. Primero de Junio	120
PC 5: Losa deportiva Asoc. Primero de Junio Zona C	SC 5: Asoc. Viv. 11 de Mayo Zona A, A. H. 11 de Enero, A. H. 30 de Marzo y Asoc. Viv. Pedro Paulet Mostajo	35
PC 6: Parque Recreacional Sector 12-Deán Valdivia	SC 6: Urb. Alto Cayma IV, P. H. Alto Cayma III, P. H. Deán Valdivia, A. P. Asoc. Viv. 28 de Julio y A. H. Sol de Oro	88
PC 7: Parque San Miguel	SC 7: Asoc. Viv. Santa Rosa de Lima, A. H. San Miguel, Asoc. Viv. Abelardo Quiñones, Asoc. Viv. Juan Pablo II, A. H. Manuel A. Odría y A. H. Casimiro Cuadros I	130
PC 8: Cancha de fútbol Las Malvinas	SC 8: Asoc. Viv. Rafael Belaúnde Diez Canseco, A. H. Virgen de Chapi, A. H. José Abelardo Quiñones, A. H. José Abelardo Quiñones 2.ª Etapa, Asoc. Viv. José Olaya Zona B, A. U. I. S. Virgen de la Candelaria, Asoc. Viv. Las Malvinas y Coop. Víctor Raúl Haya de la Torre	252
PC 9: Estadio Francisco Bolognesi, Alto Cayma	SC 9: Asoc. Viv. 20 de Febrero, Asoc. Viv. Micaela Bastidas, A. H. José Olaya Zona A, A. H. San Martín de Porras, A. H. María Parado de Bellido, C. P. Pago del Pichu, Asoc. Viv. Nuevo Amanecer, P. J. Francisco Bolognesi y Urb. Cortaderas	126
PC 10: Estadio Juan Velasco Alvarado de Alto Cayma	SC 10: UPIS Deán Valdivia, Urb. Monte Verde, P. J. Juan Velasco Alvarado, A. H. Andrés Avelino Cáceres, P. J. Chachani, Villa El Mirador, A. H. San Pedro y A. H. Jesús Divina Misericordia	61
PC 11: Parque del Comité 14	SC 11: UPIS Señor de Huanca, A. H. César Vallejo y A. H. Villa Continental	26
PC 12: Losa deportiva Jirón Buenos Aires	SC 12: A. H. Ramiro Prialé, A. H. Casimiro Cuadros II y Asoc. Viv. Santa María	102
PC 13: Estadio Acequia Alta	SC 13: Asoc. Viv. Santuario Chapi Chico y P. T. Acequia Alta	31
PC 14: Estadio La Tomilla	SC 14: P. J. La Tomilla	48
PC 15: Parque La Almudena	SC 15: Urb. Las Terrazas de Cayma, Urb. Mirasol, Urb. Santa Elisa, Urb. Cuesta de Los Ángeles, Urb. Jorge Basadre, Quinta La Campiña, Urb. Las Flores, Urb. Bello Amanecer, Urb. San Doria, Quinta Samay, Urb. Los Ángeles de Cayma y Urb. Bello Campo	26
PC 16: Losa deportiva Carmen Alto	SC 16: P. T. Tronchadero y P. T. Carmen Alto	138
PC 17: Plaza de Cayma	SC 17: P. T. Cayma, Urb. La Marina, Urb. Un Rincón en la Chacrita, Urb. Valle Escondido, Urb. Los Girasoles, Urb. Puerta del Sol, Urb. Los Sauces de Cayma, Urb. Los Delfines, Urb. El Mirador, Residencial Las Condes, Urb. Olimpo, P. T. Cerro San Jacinto y Asoc. Los Faroles	61
PC 18: Losa de la Cooperativa de Ingenieros	SC 18: Urb. Las Efigies, Urb. Monte Rosa, Urb. Los Portales, Boulevard de Cayma, Urb. El Remanso, Asoc. Viv. Mater Inmaculada, Urb. Macondo, Urb. Linda Vista, Urb. Colegio de Ingenieros, Urb. Bello Monte, Quinta Chávez, Asoc. Viv. El Balcón, Urb. AVIDGE, Urb. El Retiro, Urb. El Carmen, Urb. Heresi, Urb. Los Altitos, Urb. La Candelaria, Urb. La Encantada, Urb. Los Guindos, Urb. Tronco de Oro, Urb. Señorial, Urb. Alto de la Gloria, Urb. El Bosque, Urb. Chávez, Asoc. Urubamba, Quinta Gamero y Urb. La Explanada	61

PC 19: Losa deportiva Señor de la Caña	SC 19: Urb. León XIII, P. T. Señor de la Caña y Urb. Los Arces	35
PC 1A: Parque Mujeres con Esperanza	SC 1A: Asoc. Viv. Mirador Transoceánica, A. H. Casa Blanca Zona B, Asoc. Viv. Los Jardines de Cayma, Asoc. Viv. Don Alejandro, A. H. Mujeres con Esperanza, A. H. Cabrerías y A. H. Embajada de Japón Zona C	92
PC 2A: Losa deportiva Pioneros de Cayma	SC 2A: A. H. Los Jardines de Cayma, Asoc. Viv. Biohuerto de Cayma, A. H. Las Caba, A. H. Casa Blanca Zona A, A. H. Avitca, Asoc. Viv. Taller Ciudad de los Pioneros, Asoc. Viv. Los Jazmines de Cayma y Asoc. Viv. Villa Luz	186

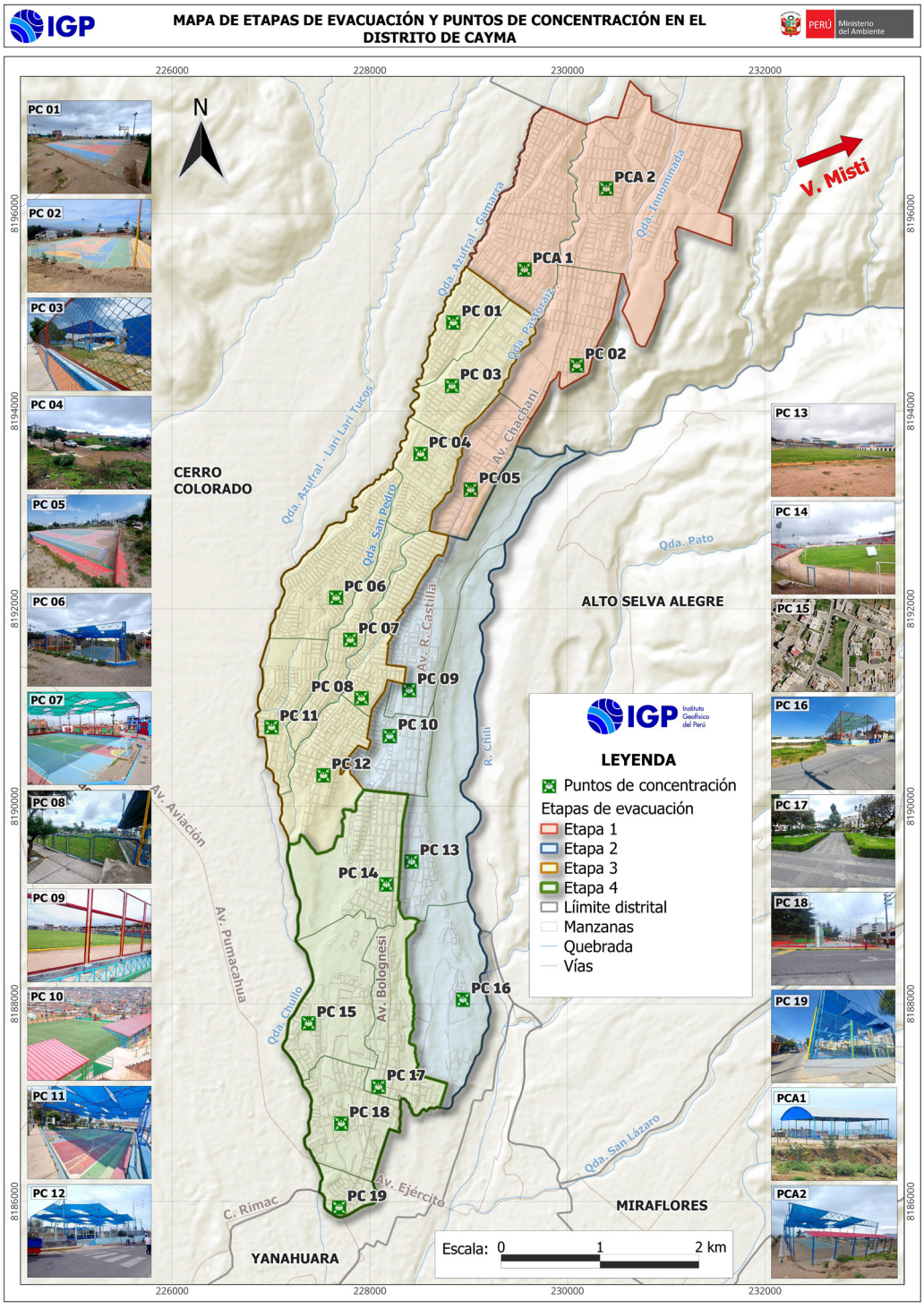


Figura 32. Ubicación de los puntos de concentración (PC).

8.3 Rutas de evacuación

Las vías de evacuación son caminos previamente identificados como seguros, cuya función es facilitar el traslado de la población en el menor tiempo posible desde los puntos de concentración hacia las zonas de albergue temporal ubicadas fuera del área de influencia de los peligros volcánicos.

En la presente evaluación las rutas fueron definidas a partir de inspecciones de campo y del análisis de la red vial del distrito. La identificación de las rutas de evacuación se realizó considerando los siguientes criterios técnicos:

- Accesibilidad y conectividad mediante calles y avenidas que permitan el tránsito fluido de vehículos y peatones.
- Priorización de vías asfaltadas y afirmadas con capacidad para el desplazamiento de vehículos particulares, transporte público y unidades de emergencia.
- Topografía favorable, evitando zonas con pendientes pronunciadas o con alta probabilidad de ser afectadas por lahares, flujos piroclásticos o acumulación de ceniza.
- Evitar el uso de cauces naturales y valles fluviales, debido al potencial descenso de lahares durante una eventual erupción.
- Selección de rutas alejadas de infraestructura vulnerable, zonas de deslizamiento y pasos estrechos que puedan generar congestión durante la evacuación.
- Cercanía a los principales núcleos urbanos y a los puntos de concentración previamente establecidos.

En el distrito de Cayma, las rutas de evacuación fueron definidas de manera longitudinal, de norte a sur, evitando, en lo posible, atravesar las quebradas Chullo, Pastoraíz, Innominada y Azufral Lari Lari Tucos, por donde descenderían eventuales lahares.

La ubicación de las rutas de evacuación y sus principales características se presentan en la Tabla 13 y la Figura 33 del presente informe.

Tabla 13. Rutas de evacuación ante una erupción subpliniana a pliniana (IEV 3–5) del volcán Misti.

Ruta	Puntos de concentración asociados	Recorrido	Tipo de vía	Tiempo estimado (min) de traslado
Ruta 1	PC 1A → PC 1 → PC 3 → PC 4 → PC 6 → PC 7 → PC 11	Parque Mujeres con Esperanza (PC 1A) → PC 1 (losa deportiva Pallpata) → PC 3 (I. E. 11 de Mayo) → Av. 28 de Julio → PC 4 (estadio Primero de Junio Zona B) → PC 6 (parque recreacional Sector 12-P. H. Deán Valdivia) → Av. Sol de Oro → Villa Corpac → Av. Aeropuerto → Av. Aviación → PC 7 (parque San Miguel) → Av. Héroes del Cenepa → Av. La Libertad → PC 11 (parque del Comité 14) → Av. Simón Bolívar, Jirón Cusco Gueppi → Av. Idelfonso López → Av. Aviación → Tahuaycani Longitud ~15 km	90 % asfaltada	45–50
Ruta 2	PC 2A → PC 2 → PC 5 → PC 9 → PC 10 → PC 13 → PC 17 → PC 15	Losa deportiva Pioneros de Cayma (PC 2A) → AR-109 → PC 2 (losa deportiva Villa Sol de los Andes) → Av. Charcani → PC 5 (losa deportiva Asoc. Primero de Junio Zona C) → Av. Charcani → Av. Bolognesi → PC 9 (estadio Francisco Bolognesi, Alto Cayma) → Calle Chachani → PC 10 (estadio Juan Velasco Alvarado de Alto Cayma) → Calle Revolución → Calle Tacna → Calle Chachani → Av. Ramón Castilla → PC 13 (estadio Acequia Alta) → Calle La Libertad → Calle Polar → Calle Gral. Varela → Av. Bolognesi → PC 17 (plaza de Cayma) → Calle Melgar → Calle Macón → Calle Pancho Fierro → PC 15 (parque La Almudena) → Av. Hernando de Luque → Prolongación Av. Ejército → Calle Challapampa → Av. Villa Hermosa → Tahuaycani. Longitud ~10 km	85 % asfaltada	45–50

Ruta 3	PC 8 → PC 12 → PC 14 → PC 19 → PC 16	Cancha de fútbol Las Malvinas (PC 8) → Calle Zoraida Montes Revilla → Ayacucho → Jirón José Carlos Mariátegui → Jirón Lima → PC 12 (losa deportiva Jirón Buenos Aires) → Pasaje Las Malvinas → Calle Ayacucho → Jirón José Carlos Mariátegui → PC 14 (estadio La Tomilla) → El Progreso → Lari Lari → Calle Macón → Calle Los Arces → Av. Ejército → Av. Trinidad Morán → PC 19 (losa deportiva Señor de la Caña) → PC 16 (losa deportiva Carmen Alto) → Calle Cahuide → Calle Tumbes → Calle Huáscar → Calle Cusco → Calle Alfonso Ugarte → Jerusalén → Av. Ejército → Av. Trinidad Morán → Av. José Abelardo Quiñones → Av. Víctor Andrés Belaúnde → Tahuaycani. Longitud ~9 km	95 % asfaltada	20–30

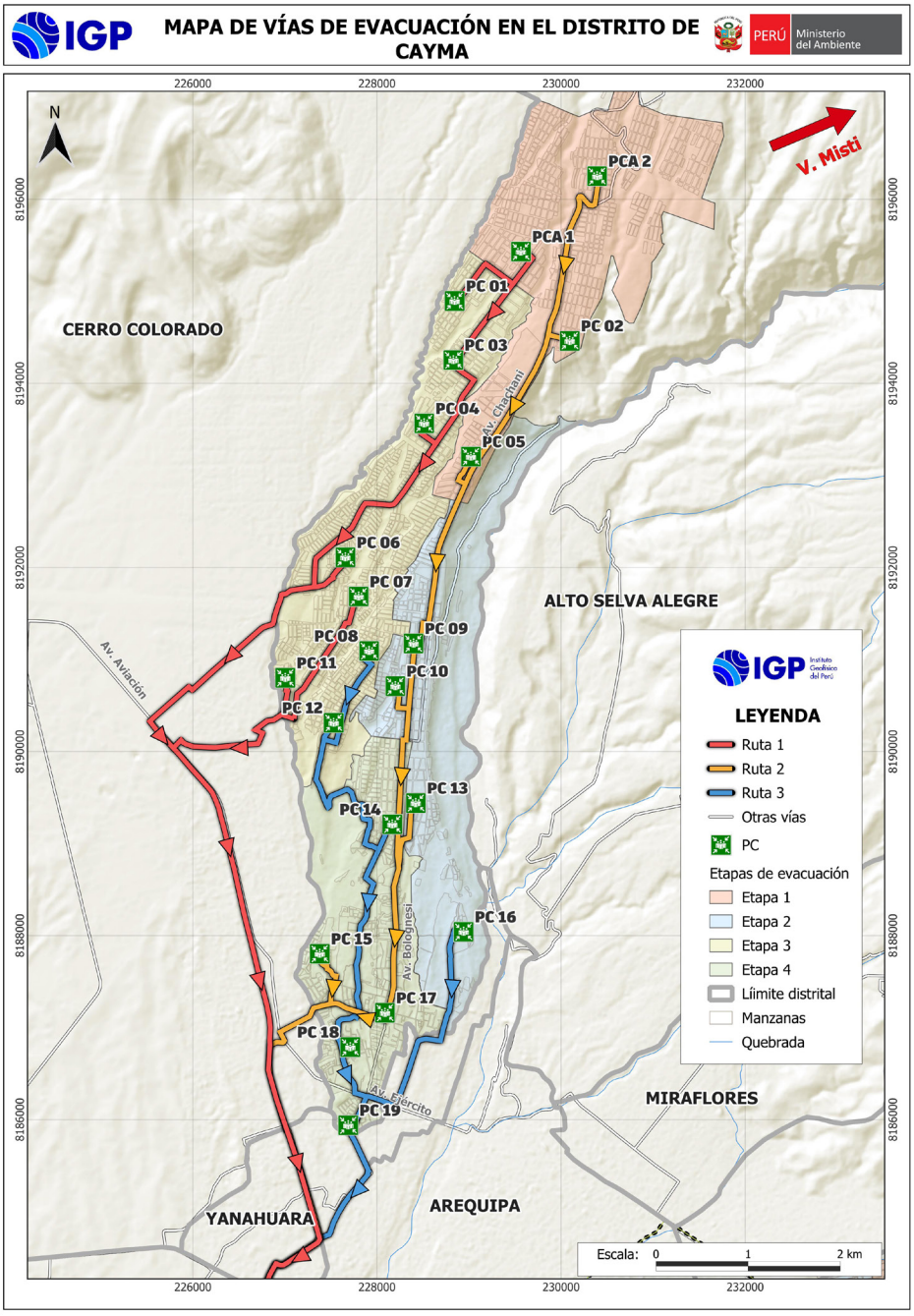


Figura 33. Rutas de evacuación en un escenario de erupción subpliniana a pliniana (IEV 3–5) del volcán Misti para el distrito de Cayma.

8.4 Etapas de evacuación

La evacuación de las áreas expuestas a los peligros volcánicos del Misti, ya sea parcial o total, se ejecutará únicamente cuando las autoridades competentes emitan la orden correspondiente, momento en el cual se activarán los planes de gestión reactiva previamente establecidos. En el presente estudio se propone un esquema de evacuación por etapas para un escenario eruptivo de tipo subpliniano a pliniano (IEV ≥ 3), con el propósito de organizar el desplazamiento progresivo de la población hacia las zonas de albergue temporal.

Las etapas de evacuación para el distrito de Cayma fueron definidas a partir del agrupamiento de los núcleos urbanos y los sectores de concentración, priorizando la evacuación de aquellos núcleos ubicados próximos al volcán Misti. Asimismo, se consideraron la distribución espacial de la población, la configuración geográfica del territorio, la presencia de quebradas que condicionan la conectividad, la red vial disponible y la capacidad operativa de las unidades de transporte.

En este sentido, se proponen cuatro etapas de evacuación, organizadas de acuerdo con el nivel de exposición de los sectores poblacionales y su proximidad al volcán Misti, iniciando con las áreas más cercanas y culminando con aquellas ubicadas a mayor distancia. La distribución de los núcleos urbanos, sectores de concentración y puntos de concentración correspondientes a cada etapa se presenta en la Tabla 14 y la Figura 34.

Tabla 14. Etapas de evacuación y núcleos urbanos.

Etapas de evacuación	Núcleos urbanos	Puntos de concentración
ETAPA 1	A. H. Los Jardines de Cayma, Asoc. Viv. Biohuerto de Cayma, A. H. Las Caba, A. H. Casa Blanca Zona A, A. H. Avitca, Asoc. Viv. Taller Ciudad de los Pioneros, Asoc. Viv. Los Jazmines de Cayma, Asoc. Viv. Villa Luz, Asoc. Viv. Mirador Transoceánica, A. H. Casa Blanca Zona B, Asoc. Viv. Los Jardines de Cayma, Asoc. Viv. Don Alejandro, A. H. Mujeres con Esperanza, A. H. Cabrerías, A. H. Embajada de Japón Zona C, A. H. Embajada de Japón Zona B, A. H. Sol de los Andes, Asoc. Viv. 11 de Mayo Zona A, A. H. 11 de Enero, A. H. 30 de Marzo y Asoc. Viv. Pedro Paulet Mostajo.	PC 2A, PC 1A, PC 2 y PC 5
ETAPA 2	Asoc. Viv. 20 de Febrero, Asoc. Viv. Micaela Bastidas, A. H. José Olaya Zona A, A. H. San Martín de Porras, A. H. María Parado de Bellido, C. P. Pago del Pichu, Asoc. Viv. Nuevo Amanecer, P. J. Francisco Bolognesi, UPIS Deán Valdivia, Urb. Monte Verde, P. J. Juan Velasco Alvarado, A. H. Andrés Avelino Cáceres, P. J. Chachani, Villa El Mirador, A. H. San Pedro, A. H. Jesús Divina Misericordia, Urb. Cortaderas, Asoc. Viv. Santuario Chapi Chico, P. T. Acequia Alta, P. T. Tronchadero y P. T. Carmen Alto.	PC 9, PC 10, PC 13 y PC 16
ETAPA 3	A. H. Pallpata, A. H. 11 de Mayo Zona D, A. H. Las Lomaditas, A. H. 11 de Mayo Zona B, A. H. 11 de Mayo Zona C, Asoc. Peq. Ind. Granjeros El Triunfo, A. H. Primero de Junio, Urb. Alto Cayma IV, P. H. Alto Cayma III, P. H. Deán Valdivia, A. P. Asoc. Viv. 28 de Julio, A. H. Sol de Oro, Asoc. Viv. Santa Rosa de Lima, A. H. San Miguel, Asoc. Viv. Abelardo Quiñones, Asoc. Viv. Juan Pablo II, A. H. Manuel A. Odría, A. H. Casimiro Cuadros I, Asoc. Viv. Rafael Belaúnde Diez Canseco, A. H. Virgen de Chapi, A. H. José Abelardo Quiñones, A. H. José Abelardo Quiñones 2.ª Etapa, Asoc. Viv. José Olaya Zona B, A. U. I. S. Virgen de la Candelaria, Asoc. Viv. Las Malvinas, Coop. Víctor Raúl Haya de la Torre, UPIS Señor de Huanca, A. H. César Vallejo, A. H. Villa Continental, A. H. Ramiro Prialé, A. H. Casimiro Cuadros II y Asoc. Viv. Santa María.	PC 1, PC 3, PC 4, PC 6, PC 7, PC 8, PC 11 y PC 12
ETAPA 4	P. J. La Tomilla, Urb. Las Terrazas de Cayma, Urb. Mirasol, Urb. Santa Elisa, Urb. Cuesta de Los Ángeles, Urb. Jorge Basadre, Quinta La Campiña, Urb. Las Flores, Urb. Bello Amanecer, Urb. San Doria, Quinta Samay, Urb. Los Ángeles de Cayma, Urb. Bello Campo, P. T. Cayma, Urb. La Marina, Urb. Un Rincón en la Chacrita, Urb. Valle Escondido, Urb. Los Girasoles, Urb. Puerta del Sol, Urb. Los Sauces de Cayma, Urb. Los Delfines, Urb. El Mirador, Residencial Las Condes, Urb. Olimpo, P. T. Cerro San Jacinto, Asoc. Los Faroles, Urb. Las Efigies, Urb. Monte Rosa, Urb. Los Portales, Boulevard de Cayma, Urb. El Remanso, Asoc. Viv. Mater Inmaculada, Urb. Macondo, Urb. Linda Vista, Urb. Colegio de Ingenieros, Urb. Bello Monte, Quinta Chávez, Asoc. Viv. El Balcón, Urb. AVIDGE, Urb. El Retiro, Urb. El Carmen, Urb. Heresi, Urb. Los Altitos, Urb. La Candelaria, Urb. La Encantada, Urb. Los Guindos, Urb. Tronco de Oro, Urb. Señorial, Urb. Alto de la Gloria, Urb. El Bosque, Urb. Chávez, Asoc. Urubamba, Quinta Gamero, Urb. La Explanada, Urb. León XIII, P. T. Señor de la Caña y Urb. Los Arces.	PC 14, PC 15, PC 17, PC 18 y PC 19

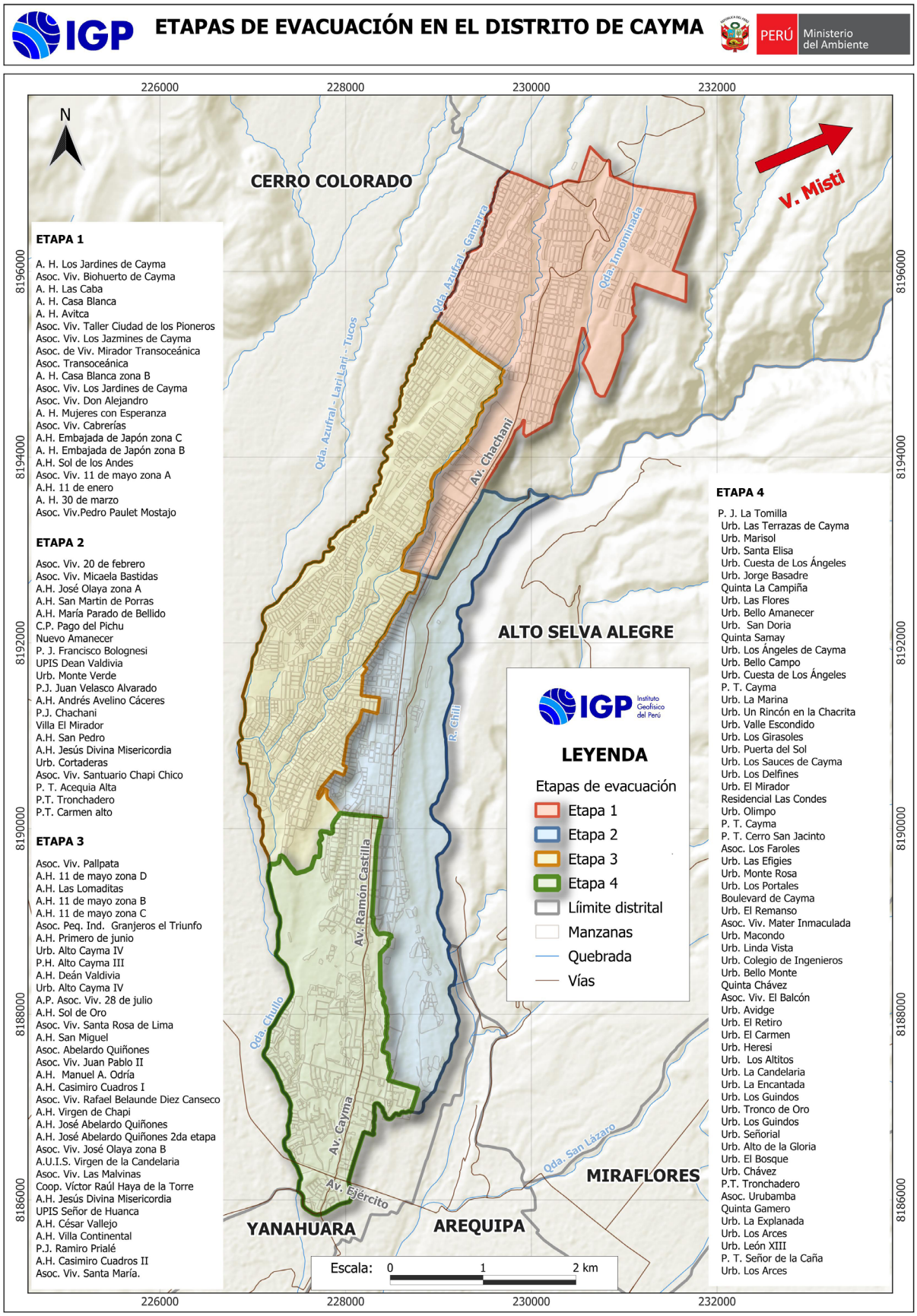


Figura 34. Mapa de etapas de evacuación para el distrito de Cayma.

El tiempo requerido para ejecutar cada etapa dependerá de diversos factores, entre ellos la disponibilidad y capacidad de las unidades de transporte, las condiciones de transitabilidad de las vías y la evolución de la actividad volcánica.

- **Primera etapa de evacuación:** Toma como referencia el punto de concentración PC 2A, ubicado en el A. H. Los Pioneros. Desde este punto, la distancia aproximada al cráter del volcán Misti es de 12 km. Esta distancia constituye un referente técnico para la planificación y ejecución de las acciones de evacuación, y permite orientar el desplazamiento de la población hacia zonas de menor exposición al peligro volcánico. Esta etapa comprende los puntos de concentración PC 2A, PC 1A, PC 2 y PC 5, los cuales conforman el tramo inicial de evacuación hacia áreas seguras.

- **Segunda etapa de evacuación:** Toma como referencia el punto de inicio ubicado en el extremo superior del tramo, correspondiente al sector más cercano al volcán Misti. Desde este punto hasta el cráter del volcán, la distancia aproximada es de 13.5 km. Esta etapa comprende los puntos de concentración PC 9, PC 10, PC 13 y PC 16, los cuales forman parte del recorrido intermedio de evacuación hacia zonas seguras.

- **Tercera etapa de evacuación:** Toma como referencia el punto de inicio ubicado en el extremo superior del tramo correspondiente a esta etapa, a una distancia aproximada de 15 km del cráter del volcán Misti. Comprende los puntos de concentración PC 1, PC 3, PC 4, PC 6, PC 7, PC 8, PC 11 y PC 12, que forman parte del recorrido hacia zonas de menor exposición al peligro volcánico y permiten dar continuidad al desplazamiento organizado de la población hacia los albergues temporales establecidos.

- **Cuarta etapa de evacuación:** Toma como referencia el punto de inicio ubicado en el extremo superior del tramo correspondiente a esta etapa, a una distancia aproximada de 17 km del cráter del volcán Misti. Comprende los puntos de concentración PC 14, PC 15, PC 17, PC 18 y PC 19, que conforman el tramo final de evacuación dentro del distrito de Cayma. Desde estos puntos se continúa el traslado organizado de la población hacia zonas seguras y albergues temporales ubicados fuera del ámbito de mayor exposición a los peligros volcánicos.

En el distrito de Cayma se ha identificado que los núcleos urbanos ubicados en las zonas más altas presentan una topografía accidentada y condiciones de accesibilidad limitada. En determinados casos, el acceso se realiza mediante una única vía vehicular o por calles de reducido ancho, lo que podría restringir el ingreso simultáneo de unidades de transporte masivo y de vehículos de emergencia durante una evacuación. Estas condiciones deberán ser consideradas por las autoridades competentes para fortalecer la infraestructura vial y la planificación operativa de la respuesta.

8.5 Albergues temporales

Los albergues temporales constituyen un componente fundamental dentro de la planificación de la respuesta ante una emergencia volcánica, ya que permiten atender temporalmente a la población evacuada mientras se restablecen las condiciones para su retorno o se implementan otras alternativas de alojamiento.

En el marco de la planificación para la atención de la población afectada ante una eventual erupción del volcán Misti, el presente estudio propone un modelo mixto de alojamiento temporal, conformado por albergues familiares y albergues en infraestructura preexistente. En ese contexto, se proponen tres zonas de albergue temporal, cuya implementación deberá ser coordinada entre las instituciones responsables de la gestión del riesgo de desastres, considerando la disponibilidad de infraestructura, recursos logísticos y personal para su funcionamiento.

La selección de los albergues en infraestructura preexistente se realizó considerando criterios técnicos, como su ubicación en zonas seguras y alejadas de los peligros volcánicos, accesibilidad mediante principales vías, disponibilidad de espacios amplios y adaptables, proximidad a servicios básicos (agua, salud, energía y seguridad), así como condiciones que faciliten su administración y operación por parte de las autoridades y los equipos de primera respuesta.

A continuación, se presentan las tres propuestas de zonas de albergue temporal:

- ## Albergue temporal: estadio César Vallejo

El estadio César Vallejo se ubica en el sector César Vallejo, en la parte alta del distrito de Mollendo, provincia de Islay, a una distancia aproximada de 102 km del volcán Misti. El tiempo estimado de traslado desde el distrito de Cayma a dicho albergue es de aproximadamente tres horas, considerando condiciones normales de tránsito.

El estadio forma parte de un complejo deportivo que reúne diversas infraestructuras recreativas y deportivas, entre ellas una piscina temperada y otros espacios de administración municipal. Asimismo, en sus inmediaciones se encuentra el Hospital Regional Alto Inclán, cuya proximidad representa una ventaja para la atención médica de la población durante una situación de emergencia.

El recinto presenta dimensiones aproximadas de 62 m de ancho por 101 m de largo, cuenta con acceso directo mediante vías asfaltadas y dispone de servicios básicos, condiciones que favorecen su habilitación como albergue temporal. De acuerdo con sus características físicas, el espacio permitiría la instalación de aproximadamente 240 carpas familiares, con una capacidad estimada para 1200 personas (Figuras 35 y 38).

- ## Albergue temporal: explanada Alto Inclán

Se ubica en el sector Alto Inclán, en la parte alta del distrito de Mollendo, provincia de Islay, a una distancia aproximada de 102 km del volcán Misti. El tiempo estimado de traslado desde el distrito de Cayma es de aproximadamente tres horas, considerando condiciones normales de tránsito.

La explanada Alto Inclán constituye un espacio amplio con adecuadas condiciones de accesibilidad vial y disponibilidad de servicios básicos, características que favorecen su habilitación como albergue temporal. En sus inmediaciones se ubican el Centro de Salud Alto Inclán, la Comisaría Zonal de la Policía Nacional del Perú, la Cruz Roja Peruana-Filial Provincial de Islay, la Parroquia Alto Inclán y el Instituto de Educación Superior Tecnológico INSUTEK S. A. C., infraestructuras que representan un importante soporte para la atención de la población durante una situación de emergencia.

El recinto presenta dimensiones aproximadas de 91 m de ancho por 105 m de largo. Además, cuenta con acceso directo mediante vías asfaltadas y dispone de conexiones para los servicios básicos, condiciones que permiten la instalación de aproximadamente 300 carpas familiares, con una capacidad estimada para 1500 personas (Figuras 36 y 38).



Figura 35. Vista del estadio César Vallejo, Mollendo, seleccionado como zona de albergue temporal.



Figura 36. Vista de la explanada Alto Inclán.

- ## Albergue temporal alternativo: complejo deportivo AVIS Progreso

El complejo deportivo AVIS Progreso se ubica en el sector AVIS Progreso, distrito de Mollendo, provincia de Islay, a una distancia aproximada de 102 km del volcán Misti. El tiempo estimado de traslado desde el distrito de Cayma es de aproximadamente tres horas, considerando condiciones normales de tránsito.

El complejo deportivo cuenta con un campo deportivo y un área abierta con capacidad para la instalación de carpas familiares, además de disponer de servicios básicos y adecuada accesibilidad mediante vías asfaltadas. Estas características favorecen su utilización como albergue temporal para la recepción de población evacuada y el desarrollo de actividades de apoyo durante una emergencia.

No obstante, este espacio se encuentra dentro del área de influencia de la quebrada Chungungo, por lo que podría verse afectado por flujos de escorrentía generados durante periodos de lluvias intensas. En consecuencia, su utilización como albergue temporal se considera una alternativa, recomendable únicamente durante períodos sin precipitaciones y cuando no exista evidencia de activación de dicha quebrada.

El recinto presenta dimensiones aproximadas de 25 m de ancho por 40 m de largo, lo que permitiría la instalación de aproximadamente 28 carpas familiares, con una capacidad estimada para 140 personas (Figuras 37 y 38).



Figura 37. Complejo deportivo AVIS, Mollendo (interior).

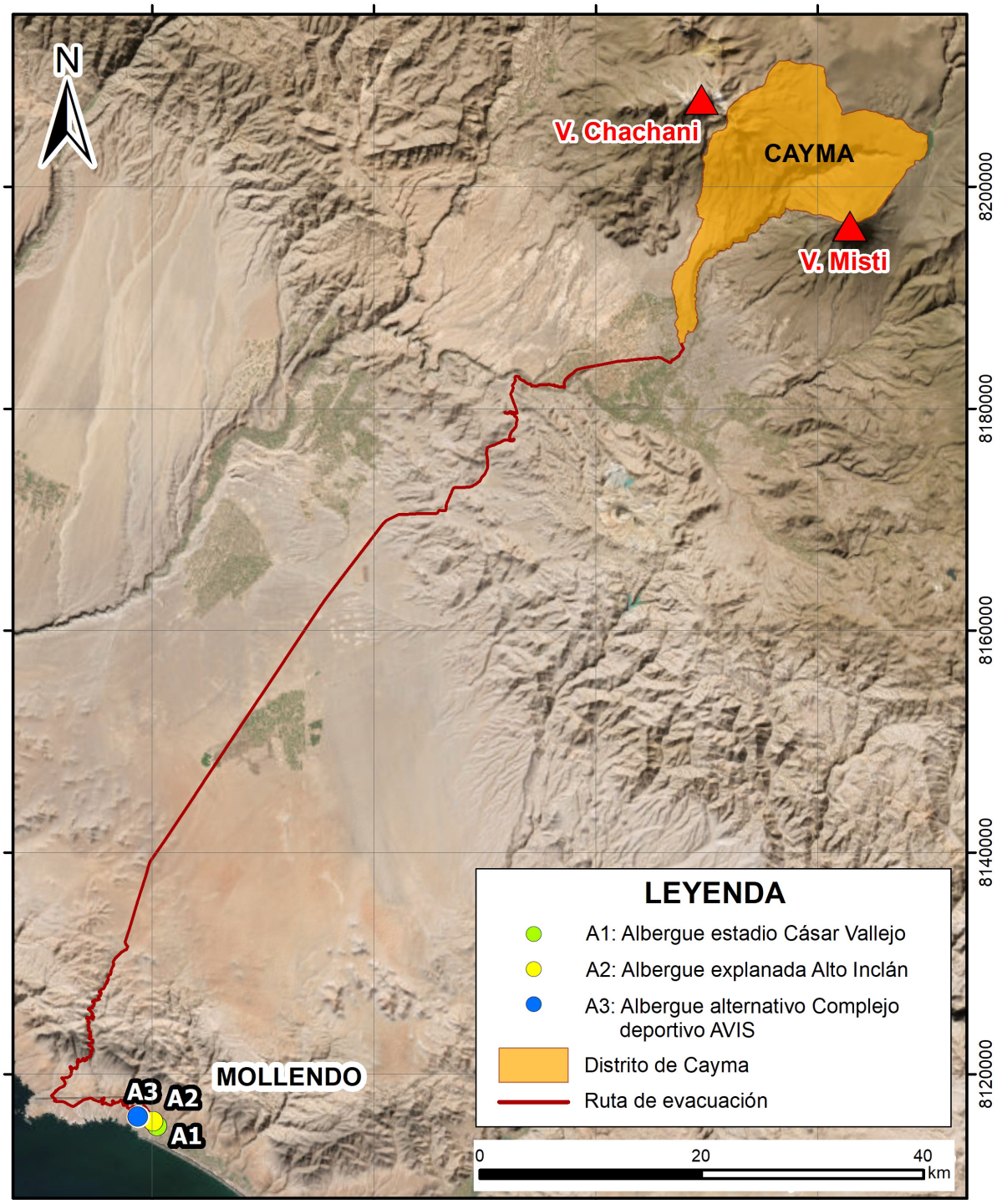


Figura 38. Mapa de ruta de evacuación hacia albergues temporales propuestos.

9. Sitios de interés vulcanológico en Cayma para la comunicación y sensibilización

En Cayma existen afloramientos y paisajes volcánicos que evidencian la actividad pasada del volcán Misti y representan espacios adecuados para fortalecer la geoeducación, la comunicación y la sensibilización sobre el peligro volcánico entre la población en general. Estos afloramientos y paisajes volcánicos constituyen sitios de interés vulcanológico con valor científico, educativo y paisajístico, que permiten comprender la historia geológica del volcán y del territorio y acercar este conocimiento a la población, para que conozca los peligros a los que está expuesta en caso de una erupción del volcán Misti.

En Cayma se han identificado dos sitios de interés vulcanológico, descritos a continuación:

1. El sitio «Mirador vulcanológico: el volcán Misti y la caída de tefras», ubicado en Alto Cayma (Figuras 39a y 40a), presenta una secuencia de depósitos volcánicos generados por el volcán Misti al menos durante los últimos 20 000 años. Estas capas de ceniza, lapilli y pómez permiten interpretar antiguas erupciones y comprender los procesos volcánicos que han modelado el territorio. Por su valor educativo, este lugar constituye una herramienta para explicar a la población la actividad del volcán Misti y la importancia de conocer sus peligros.

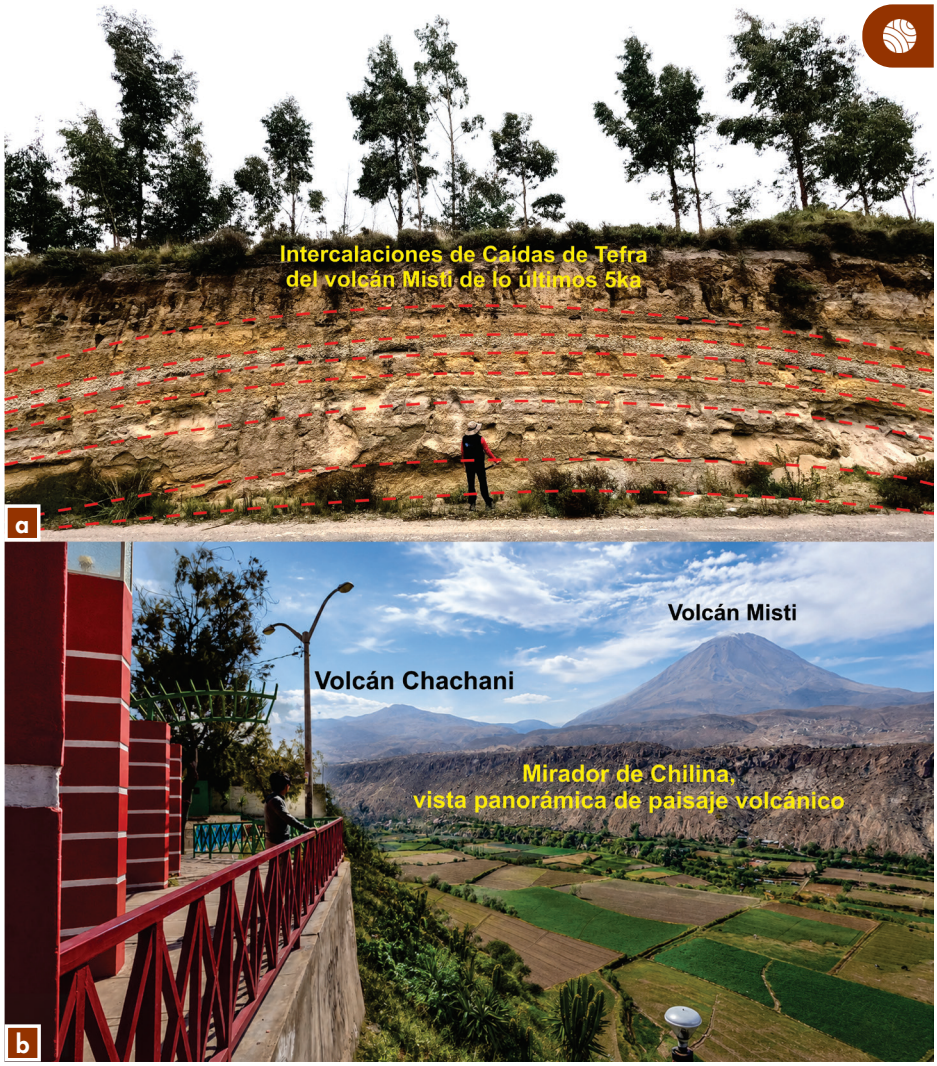


Figura 39. Vista de los sitios de interés vulcanológico: a) «Mirador vulcanológico: el volcán Misti y la caída de tefras»; b) «Mirador vulcanológico: Chilina».

2. El sitio «Mirador vulcanológico: Chilina» (Figuras 39b y 40b) destaca por su valor paisajístico y educativo, al permitir observar el valle del río Chili y los principales volcanes de Arequipa, como el Misti, el Chachani y el Pichu Pichu. Desde este punto se puede apreciar el paisaje volcánico, las ignimbritas y el sillar, integrando la divulgación científica con la sensibilización sobre los peligros volcánicos mediante recursos interpretativos y el acceso a información del IGP sobre el monitoreo de los volcanes.

En ese contexto, se propone la implementación de paneles interpretativos en ambos sitios de interés, orientados a la divulgación de información geocientífica sobre los peligros volcánicos y las acciones de monitoreo del IGP.



Figura 40. Propuesta de paneles interpretativos: a) «Mirador vulcanológico: el volcán Misti y la caída de tefras»; b) «Mirador vulcanológico: Chilina».

Conclusiones

- El Misti es un volcán activo cuya actividad eruptiva se ha caracterizado por erupciones explosivas de diferente índice de explosividad volcánica, entre las que destacan una gran erupción pliniana ocurrida hace aproximadamente 2000 años AP y una erupción vulcaniana registrada durante el siglo XV. Como resultado de estos eventos, en el distrito de Cayma afloran depósitos volcánicos, tales como flujos piroclásticos, caídas de tefra y lahares. Debido a que el Misti mantiene actividad fumarólica intermitente y presenta potencial para generar nuevas erupciones, el distrito de Cayma está expuesto a peligros volcánicos, principalmente por caída de tefra, lahares y flujos piroclásticos.

- El análisis de la información geológica y vulcanológica disponible del volcán Misti y del distrito de Cayma, así como el modelamiento numérico de los procesos volcánicos, permitieron elaborar mapas de peligro por lahares, flujos piroclásticos, avalanchas de escombros, flujos de lava y caída de tefra para el distrito de Cayma. Estos mapas permiten identificar las áreas potencialmente expuestas a los diferentes fenómenos volcánicos y constituyen una base técnico-científica para la planificación de la gestión del riesgo de desastres en el distrito.

- Los escenarios eruptivos ante un eventual proceso eruptivo del volcán Misti evidencian que el distrito de Cayma está expuesto a diferentes procesos volcánicos asociados a erupciones con distinto índice de explosividad volcánica. En un escenario de erupción vulcaniana (IEV 1–2) se generarían principalmente caídas de tefra (ceniza y lapilli), proyectiles balísticos y, de manera localizada, lahares y, eventualmente, flujos piroclásticos, con una considerable afectación del distrito de Cayma. En una erupción subpliniana a pliniana (IEV 3–5) podrían producirse de manera simultánea caídas de tefra, flujos piroclásticos, lahares y, eventualmente, el colapso de flanco con avalanchas de escombros. La caída de tefra sería el peligro de mayor alcance y podría afectar todo el distrito, mientras que los flujos piroclásticos y las avalanchas de escombros afectarían principalmente el valle del río Chili (distrito de Cayma), comprometiendo viviendas, centrales hidroeléctricas, canales de agua, el sistema de captación de agua de SEDAPAR, vías de comunicación y zonas de cultivo, además de poder ocasionar el represamiento y posterior desembalse del río Chili.

- En una erupción efusiva con emisión de flujos de lava, estos no alcanzarían el distrito de Cayma debido a las condiciones topográficas y geomorfológicas de los volcanes Chachani y Misti y del valle del río Chili.

- El modelamiento de lahares, realizado para tres escenarios de volumen —150 000 m^3 (peligro alto), 350 000 m^3 (peligro moderado) y 500 000 m^3 (peligro bajo)— y complementado con datos de eventos recientes, permitió identificar 56 núcleos urbanos en los que alrededor de 3400 viviendas podrían verse afectadas por lahares. En el análisis se contabilizaron 481 viviendas en zonas de peligro alto, 1476 en zonas de peligro moderado y 3413 en zonas de peligro bajo. Estas cifras no deben sumarse entre sí, debido a que las zonas de peligro se superponen y una misma vivienda puede estar comprendida en más de un nivel de exposición. Las viviendas potencialmente expuestas se concentran principalmente a lo largo de las quebradas Chullo, Pastoraíz, San Pedro, Azufral Gamarra y Azufral Lari Lari Tucos.

- Ante una erupción explosiva subpliniana a pliniana (IEV $\geq$ 3) del volcán Misti, se propone un plan de evacuación para la población expuesta del distrito de Cayma, organizado en cuatro etapas de evacuación, con 21 puntos de concentración y rutas de evacuación hacia zonas seguras. Asimismo, se propone la implementación de tres zonas de albergue temporal ubicadas en el distrito de Mollendo: el estadio César Vallejo, la explanada Alto Inclán y el complejo deportivo AVIS Progreso, localizados aproximadamente a 102 km del volcán Misti y con un tiempo estimado de traslado desde el distrito de Cayma de alrededor de tres horas.

- Este estudio proporciona una base técnico-científica para la gestión del riesgo de desastres por actividad volcánica en el distrito de Cayma, al identificar las zonas expuestas a los diferentes peligros asociados a una eventual erupción del volcán Misti y aportar criterios para la planificación territorial, la preparación, la respuesta y la evacuación de la población, contribuyendo a la toma de decisiones por parte de las autoridades competentes.

Recomendaciones

- Gestionar la expansión urbana evitando la ocupación de zonas expuestas a peligros volcánicos, en particular las quebradas y sus áreas de influencia, así como los sectores próximos al entorno del volcán Misti. Asimismo, se recomienda impedir el relleno de las quebradas, debido a que constituyen los cauces naturales por donde podrían descender lahares durante una eventual erupción o generarse flujos durante episodios de lluvias intensas.

- Fortalecer la infraestructura vial del distrito mediante el mejoramiento y la habilitación de nuevas vías principales, especialmente en los sectores altos de Cayma, con la finalidad de optimizar las rutas de evacuación, reducir los tiempos de desplazamiento y facilitar la respuesta de la población y de las instituciones competentes durante una emergencia volcánica.

- Desarrollar periódicamente programas de sensibilización, capacitación y simulacros sobre actividad volcánica dirigidos a la población y a las autoridades locales, con el propósito de fortalecer la cultura de prevención y mejorar la organización comunitaria ante una eventual emergencia.

- Las autoridades deben actualizar y consolidar la información geoespacial del distrito, incorporando catastros urbanos actualizados, límites administrativos oficiales, información demográfica e infraestructura crítica georreferenciada (redes de agua y desagüe, energía, establecimientos de salud, educación y equipamiento urbano). Esta información permitirá realizar evaluaciones de exposición con mayor precisión y elaborar propuestas orientadas a la reducción del riesgo y al fortalecimiento de la preparación y respuesta ante una eventual erupción del volcán Misti.

Referencias

- Aguilar, R., Ortega, M., Manrique, N., Apaza, F., Rivera, M., & Harpel, C. (2019). *Characteristics of the beginning of the 2019 eruptive crisis at Ubinas volcano (Peru)* [Poster presentation]. AGU 2019 Fall Meeting, San Francisco, CA, USA.

- Aguilar, R., Thouret, J., Samaniego, P., Wörner, G., Jicha, B., Paquette, J., Suaña, E., & Finizola, A. (2022). Growth and evolution of long-lived, large volcanic clusters in the Central Andes: The Chachani Volcano Cluster, southern Peru. *Journal of Volcanology and Geothermal Research, 426*, 107539. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2022.107539

- Alavi, H. (2020). *Evaluación de peligro por ocurrencia de lahares (flujos de lodo) en el Complejo Volcánico Chachani-Arequipa* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco]. http://hdl.handle.net/20.500.12918/5108

- Alcozer, N. (2021). *Volcanic hazard assessment through numerical simulation of eruptive scenarios at the San Pedro volcano, Northern Chile*. Tesis de Geología. Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chile.

- Bernard, J. (2016). *Modeling potential hazard zones of El Reventador volcano (Ecuador): Fountain- and cone-collapse pyroclastic flows vs. cone landslide*. Resumen extendido, Cities on Volcanoes 9, Puerto Varas, Chile.

- Bignami, C., Bosi, V., Costantini, L., Cristiani, C., Lavigne, F., & Thierry, P. (Eds.). (2012). *Handbook for Volcanic Risk Management: Prevention, Crisis Management, Resilience*. Orléans: MIAVITA Team, 198 p.

- Blong, R. J. (1984). *Volcanic Hazards: A Sourcebook on the Effects of Eruptions*. Sydney: Academic Press, 424 p.

- Blong, R. J. (2000). Volcanic hazard and risk management. En H. Sigurdsson, B. F. Houghton, S. R. McNutt, H. Rymer & J. Stix (Eds.), *Encyclopedia of Volcanoes* (pp. 1215–1228). San Diego, CA: Academic Press.

- Cacya, L., Mariño, J., Rivera, M., & Thouret, J.-C. (2007). La erupción pliniana "Autopista" del volcán Misti (21 000–11 000 años AP). *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú, 102*, 25–42. https://hdl.handle.net/20.500.12544/388

- Calderón, J. L., Avalos, J. G., Nuñez, J. S., & Girón, R. S. (2017). Avalanchas de escombros en el complejo volcánico Sillapaca: una herramienta para la gestión sostenible del territorio. *Espacio y Desarrollo, 30*, 193–208. https://doi.org/10.18800/espacioydesarrollo.201702.008

- Carazzo, G., Tait, S., & Kaminski, E. (2019). Marginally stable recent Plinian eruptions of Mt. Pelée volcano (Lesser Antilles): The P2 AD 280 eruption. *Bulletin of Volcanology, 81*(1). https://doi.org/10.1007/s00445-018-1265-6

- Charbonnier, S., & Gertisser, R. (2008). Field observations and surface characteristics of pristine block-and-ash flow deposits from the 2006 eruption of Merapi Volcano, Java, Indonesia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research, 177*(4), 971–982. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.07.008

- Charbonnier, S. J., Thouret, J.-C., Gueugneau, V., & Constantinescu, R. (2020). New insights into the 2070calyrBP pyroclastic currents at El Misti volcano (Peru) from field investigations, satellite imagery and probabilistic modeling. *Frontiers in Earth Science, 8*. https://doi.org/10.3389/feart.2020.557788

- Clavero, J. E., Sparks, R. S. J., Polanco, E., & Pringle, M. S. (2004). Evolution of Parinacota volcano, central Andes, northern Chile. *Revista Geológica de Chile, 31*(2), 317–347. http://dx.doi.org/10.4067/S0716-02082004000200009

- Cobeñas, G., Thouret, J.-C., Bonadonna, C., & Boivin, P. (2012). The c. 2030 yr BP Plinian eruption of El Misti volcano, Peru: eruption dynamics and hazard implications. *Journal of Volcanology and Geothermal Research, 241–242*, 105–120.

- Cuno, J. (2018). *Estudio de la erupción del volcán Misti ocurrido hace 33.7 mil años AP, que emplazó el depósito "Sacarosa" en la ciudad de Arequipa* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, Perú. https://repositorio.unsa.edu.pe/bitstreams/1c4aaf8d-4b0c-475b-bfe9-f9b2893ece58/download

- Day, S., Llanes, P., Silver, E., Hoffmann, G., Ward, S., & Driscoll, N. (2015). Submarine landslide deposits of the historical lateral collapse of Ritter Island, Papua New Guinea. *Marine and Petroleum Geology, 67*, 419–438. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2015.05.017

- De Vries, B. V. W., Self, S., Francis, P. W., & Keszthelyi, L. (2001). A gravitational spreading origin for the Socompa debris avalanche. *Journal of Volcanology and Geothermal Research, 105*(3), 225–247. https://doi.org/10.1016/S0377-0273(00)00252-3

- Delaite, G., Thouret, J. C., Sheridan, M., Labazuy, P., Stinton, A., Souriot, T., & Van Westen, C. (2005). Assessment of volcanic hazards of El Misti and in the city of Arequipa, Peru, based on GIS and simulations, with emphasis on lahars. *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementband, 140*, 209–231.

- Druitt, T. H. (1998). Pyroclastic density currents. En J. S. Gilbert & R. S. J. Sparks (Eds.), *The Physics of Explosive Volcanic Eruptions* (Geological Society Special Publication 145, pp. 145–182).

- Escobar, G. M. (2021). *Estudio de la erupción pliniana del volcán Misti del Pleistoceno Superior que emplazó los depósitos del "Sandwich" en la ciudad de Arequipa* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú. https://hdl.handle.net/20.500.12672/17771

- Ferrés, D., & Escobar, R. (2018). *Informe Técnico: Volcán de Fuego*. Cooperación Española, 169 p.

- Gómez, J. C., Macías, J. L., Arce, J. L., Sánchez, J. M., & Siebe, C. (2012). Caracterización geológica de los depósitos de avalancha de escombros en Chuquibamba y Cotahuasi, región Arequipa. En *XVI Congreso Peruano de Geología* (pp. 1024–1026). Lima: Sociedad Geológica del Perú.

- Hall, M. L., Steele, A. L., Mothes, P. A., & Ruiz, M. C. (2013). Pyroclastic density currents (PDC) of the 16–17 August 2006 eruptions of Tungurahua volcano, Ecuador: Geophysical registry and characteristics. *Journal of Volcanology and Geothermal Research, 265*, 78–93. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2013.08.011

- Harpel, C. J., Aguilar, R., Rivera, M., Tepley, F., Takach, M., Manrique, N., Cuno, J., Cueva, K., Escobar, G. M., Allen, I., Pawlak-Kjolhaug, K., Sankovitch, L., Topham, J. & Lewis, C. (2021). *Tephrostratigraphy of Misti volcano, Arequipa, Peru from the late Pleistocene to the mid-15th century*. Paper presented at the Fall Meeting American Geophysical Union, New Orleans.

- Harpel, C. J., Cuno, J. J., Takach, M. K., Rivera, M., Aguilar, R., Tepley, F. J., & Garcia, F. (2023). The late Pleistocene Sacarosa tephra-fall deposit, Misti Volcano, Arequipa, Peru: Its magma, eruption, and implications for past and future eruptive activity. *Bulletin of Volcanology, 85*, 1–24.

- Harpel, C., De Silva, S. L., & 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 Paper, 484, 72 p.

- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2017). *Perú: Estimaciones y Proyecciones de Población por Departamento, Provincia y Distrito, 2000–2015*. Censo Dpto. 04 – Departamento de Arequipa. https://www.inei.gob.pe

- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2020). *Planos estratificados por ingreso a nivel de manzanas de las grandes ciudades 2020*.

- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2026). *Censos Nacionales 2025: XIII de Población, VIII de Vivienda y IV de Comunidades Indígenas*. Resultados de población total. https://censos2025.inei.gob.pe/resultados/poblacion-total/dashboard

- Jorquera, C. (2018). *Simulación numérica de corrientes de densidad piroclástica del volcán San Pedro*. Tesis de grado. Universidad de Concepción, Chile.

- Kelfoun, K., Samaniego, P., Palacios, P., & Barba, D. (2009). Testing the suitability of frictional behaviour for pyroclastic flow simulation by comparison with a well-constrained eruption at Tungurahua volcano (Ecuador). *Bulletin of Volcanology, 71*, 1057–1075. https://doi.org/10.1007/s00445-009-0286-6

- Kelfoun, K., Santoso, A. B., Latchimy, T., Bontemps, M., Nurdien, I., Beauducel, F., Fahmi, A., Putra, R., Dahamna, N., Laurin, A., Rizal, M. H., Sukmana, J. T., & Gueugneau, V. (2021). Growth and collapse of the 2018–2019 lava dome of Merapi volcano. *Bulletin of Volcanology, 83*(2). https://doi.org/10.1007/s00445-020-01428-x

- Legros, F. (2001). Tephra stratigraphy of Misti volcano, Peru. *Journal of South American Earth Sciences, 14*(1), 15–29. https://doi.org/10.1016/s0895-9811(00)00062-6

- Manrique, N., Aguilar, R., Rivera, M., & Van Wyk, B. (2024). *Geología y evaluación de peligros del Complejo Volcánico Chachani (Arequipa)*. Lima: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. Boletín Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 95, 123 p.

- Mariño, J., & Thouret, J.-C. (2003). *Geología, historia eruptiva y evaluación de peligros del volcán Ticsani (sur del Perú)*. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. http://hdl.handle.net/20.500.12816/1261

- Mariño, J., Rivera, M., Thouret, J.-C., & Macedo, L. (2016). *Geología y mapa de peligros del volcán Misti*. Lima: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. Boletín Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 60.

- Martin del Pozzo, A., Alatorre, M., Arana, L., Bonasia, R., Capra, L., Cassata, W., Córdoba, G., Cortés, J., Delgado, H., Ferrés, M., Fonseca, R., García, J., Gisbert, G., Guerrero, D., Jaimes, M., Macías, J., Nieto, J., Nieto, A., Paredes, P., … Téllez, E. (2015). *Estudios geológicos y actualización del mapa de peligros del volcán Popocatépetl*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica.

- MIDAGRI (2022). Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, Decreto Supremo n.° 005-2022-MIDAGRI. Decreto Supremo que aprueba el Reglamento de Clasificación de Tierras por su Capacidad de Uso Mayor. Diario Oficial El Peruano. https://dar.org.pe/wp-content/uploads/2022/04/2060758-1-1.pdf

- Moore, J. G., & Nelson, W. G. (1969). Nuées Ardentes of the 1968 eruption of Mayon Volcano, Philippines. *Bulletin of Volcanology, 33*, 600–620.

- Paquereau, P., Thouret, J.-C., Wörner, G., & Fornari, M. (2006). Neogene and Quaternary ignimbrites in the area of Arequipa, southern Peru: Stratigraphical and petrological correlations. *Journal of Volcanology and Geothermal Research, 154*, 251–275.

- Rivera, M., Del Carpio Calienes, J. A., Tavera, H., Cruz Igme, J. E., Vargas Alva, K. A., Torres Aguilar, J. L., & Concha Calle, J. A. (2021, febrero). *Análisis y evaluación de escenarios críticos por descenso de lahares en volcanes peruanos*. Instituto Geofísico del Perú. https://repositorio.igp.gob.pe/items/51fef4ee-09eb-4eea-8686-9e6e4418e445

- Rivera, M., Cuno, J., Valdivia, D., Lazarte, I., & Del Carpio, J. (2024). *Mapa de peligros del volcán Misti*. Arequipa: Instituto Geofísico del Perú (IGP). Informe técnico.

- Rivera, M., Thouret, J.-C., Samaniego, P., & Le Pennec, J.-L. (2014). The 2006–2009 activity of the Ubinas volcano (Peru): Petrology of the 2006 eruptive products and insights into genesis of andesite magmas, magma recharge and plumbing system. *Journal of Volcanology and Geothermal Research, 270*, 122–141. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2013.11.010

- Rivera, M., Valdivia, D., Cuno, J., Arias, C., Cruz, J., Cuadros, B., & Cabrera, M. (2026). *Evaluación geodinámica de los daños ocasionados por el descenso de lahares en la ciudad de Arequipa durante febrero de 2026 (Región Arequipa)*. Instituto Geofísico del Perú. https://hdl.handle.net/20.500.12816/5819

- Romero, J. E., Morgavi, D., Arzilli, F., Daga, R., Caselli, A., Reckziegel, F., Viramonte, J., Díaz-Alvarado, J., Polacci, M., Burton, M., & Perugini, D. (2016). Eruption dynamics of the 22–23 April 2015 Calbuco Volcano (southern Chile): Analyses of tephra fall deposits. *Journal of Volcanology and Geothermal Research, 317*, 15–29.

- Roverato, M., & Capra, L. (2013). Características microtexturales como indicadores del transporte y emplazamiento de dos depósitos de avalancha de escombros del volcán de Colima (México). *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 30*(3), 512–525.

- Samaniego, P., Valderrama, P., Mariño, J., de Wyk de Vries, B., Roche, O., Manrique, N., Chedeville, C., Fidel, L., & Malnati, J. (2015). The historical (218 ± 14 a BP) explosive eruption of Tutupaca volcano (southern Peru). *Bulletin of Volcanology, 77*, 51. https://doi.org/10.1007/s00445-015-0937-8

- Saucedo, R., Macías, J., Bursik, M., Mora, J., Gavilanes, J., & Cortés, A. (2002). Emplacement of pyroclastic flows during the 1998–1999 eruption of Volcán de Colima, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research, 117*(1–2), 129–153. https://doi.org/10.1016/S0377-0273(02)00241-X

- Siebert, L. (1992). Threats from debris avalanches. *Nature, 356*(6371), 658–659. https://doi.org/10.1038/356658a0

- Siebert, L., & Reid, M. E. (2023). Lateral edifice collapse and volcanic debris avalanches: A post-1980 Mount St. Helens perspective. *Bulletin of Volcanology, 85*(11), 61. https://doi.org/10.1007/s00445-023-01662-z

- Sigurdsson, H., Houghton, B., McNutt, S., Rymer, H., & Stix, J. (1999). *The Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press.

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

- Thouret, J.-C., Finizola, A., Fornari, M., Legeley-Padovani, A., Suni, J., & Frechen, M. (2001). Geology of El Misti volcano near the city of Arequipa, Peru. *Geological Society of America Bulletin, 113*(12), 1593–1610.

- Tilling, R. I. (Ed.). (1989). *Apuntes para un curso breve sobre los peligros volcánicos*. Santa Fé, Nuevo México, 2–3 de julio de 1989. Organización Mundial de Observatorios Vulcanológicos, 125 p.

- Tilling, R. I., & Beate, B. (1993). *Apuntes para un curso breve sobre los peligros volcánicos*. World Organization of Volcano Observatories.

- Tilling, R. I., Topinka, L. J., & Swanson, D. A. (1990). *Eruptions of Mount St. Helens: Past, Present, and Future*. U.S. Geological Survey. https://doi.org/10.3133/7000008

- Ui, T., & Glicken, H. (2000). Debris avalanches. En H. Sigurdsson, B. Houghton, H. Rymer, J. Stix, & S. McNutt (Eds.), *Encyclopedia of Volcanoes* (pp. 617–626). Academic Press.

- Vallance, J. W., & Iverson, R. M. (2015). *Lahars and Their Deposits*. Elsevier eBooks, 649–664. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-385938-9.00037-7

- Vallance, J. W., Siebert, L., Rose, W. I., Girón, J. R., & Banks, N. G. (2000). Edifice collapse and related hazards in Guatemala. *Journal of Volcanology and Geothermal Research, 66*(1–4), 337–355. https://doi.org/10.1016/0377-0273(94)00076-S

- 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 (región Arequipa)*. Instituto Geofísico del Perú.

- Walker, G. P. L. (1973). Lengths of lava flows. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 274*, 107–118.

Información clave para ti

Puedes consultar, descargar y compartir desde el Repositorio Geofísico Nacional (REGEN) los diferentes **reportes**, **boletines** e **informes** que genera el IGP.

RECUERDA: La Gestión del Riesgo de Desastres (GRD) se fundamenta en la investigación científica. El IGP es una entidad líder en la generación de conocimiento científico en el país.

REGEN



Sede central del Instituto Geofísico del Perú (IGP)


IGP
Instituto
Geofísico
del Perú