



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



IGP

Instituto
Geofísico
del Perú

EVALUACIÓN DE LA EXPOSICIÓN DEL DISTRITO DE PAUCARPATA (AREQUIPA) FRENTE A LOS PELIGROS VOLCÁNICOS DEL MISTI Y SU CONTRIBUCIÓN EN UN PLAN DE GESTIÓN REACTIVA

Informe Técnico n.º 028-2025/IGP CIENCIAS DE LA TIERRA SÓLIDA



Lima-Perú
Noviembre, 2025

CRÉDITOS

Miguel Ángel Espichán Mariñas
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 Paucarpata (Arequipa) frente a los peligros volcánicos del Misti y su contribución en un plan de gestión reactiva
Informe técnico

John Cruz
Lady Quispe
Barbara Cuadros
David Valdivia
Katherine Vargas
Marco Rivera
Hernando Tavera
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: +5113172300

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



REGEN

Lima, noviembre de 2025

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 PAUCARPATA (AREQUIPA) FRENTE A LOS PELIGROS VOLCÁNICOS DEL MISTI Y SU CONTRIBUCIÓN EN UN PLAN DE GESTIÓN REACTIVA



Lima, Perú
Noviembre de 2025

RESUMEN

Este estudio evalúa la exposición del distrito de Paucarpata (Arequipa) frente a los procesos eruptivos del volcán Misti, con el fin de aportar información técnica científica para la implementación de un plan de gestión reactiva. Se elaboraron mapas de peligros volcánicos que delimitan tres zonas de peligro: alta, moderada y baja. Estas zonas podrían verse afectadas por futuras erupciones del volcán Misti, de tipo vulcaniana, subpliniana o pliniana.

Los peligros volcánicos reconocidos, que podrían afectar el distrito de Paucarpata, son lahares, flujos piroclásticos, avalanchas de escombros y caída de tefras. Respecto al peligro por lahares (flujos de lodo), se identificó que el descenso de estos flujos a través de las quebradas Huarangal, Paucarpata y Pozo Negro podría afectar aproximadamente 902 viviendas localizadas en zonas de peligro alto, 1721 viviendas en zonas de peligro moderado y 3903 viviendas en zonas de peligro bajo. En relación con los flujos piroclásticos, alrededor de 117 viviendas se ubican en zonas de peligro bajo y 21 viviendas en zonas de peligro moderado. Frente a la ocurrencia de avalanchas de escombros se identificaron 4562 viviendas, ubicadas en zonas de peligro bajo por avalanchas de escombros. Finalmente, la caída de tefras (ceniza, lapilli de pómez, etc.) podría cubrir la totalidad del distrito de Paucarpata.

En caso de que el Misti presente un escenario de erupción subpliniana o pliniana, con índice de Explosividad Volcánica (IEV) mayor a 2 y con afectación significativa al distrito de Paucarpata, se propone un orden de evacuación compuesto por cuatro etapas, organizadas según la proximidad al volcán Misti. En la Etapa 1 evacuarían los pobladores que habitan en las zonas más cercanas al volcán Misti, mientras que en la Etapa 4 evacuarían pobladores que habitan en los sectores más distales. Asimismo, se han definido 16 puntos de concentración de la población, así como rutas de evacuación asociadas a dichos puntos. También se propone la habilitación de cuatro albergues temporales, ubicados en los distritos de La Joya, Majes-Pedregal y Mollendo. Estos lugares cuentan con condiciones favorables para la recepción temporal de la población evacuada.

CONTENIDO

5	Resumen
8	Introducción
10	Distrito de Paucarpata
10	Ubicación
10	Clima
11	Hidrología
12	Población
12	Vivienda
13	Contexto geológico del distrito de Paucarpata
13	Geomorfología
14	Geología
17	Peligros volcánicos del Misti
17	Flujos de lahares
18	Flujos piroclásticos
18	Avalanchas de escombros
19	Flujos de lava
19	Caída de tefras
20	Escenarios eruptivos futuros
20	Erupción vulcaniana con IEV 1–2
20	Erupción subpliniana a pliniana con IEV 3–5
20	Colapso de flanco y emplazamiento de avalanchas de escombros
21	Erupción efusiva con flujos de lava
21	Erupción con crecimiento y colapso de domos

22	Modelamiento numérico de procesos volcánicos
22	Lahares
23	Flujos piroclásticos
24	Avalancha de escombros
26	Flujos de lava
26	Caída de cenizas
28	Resultados: mapas de peligro y nivel de exposición
28	Mapa de peligros por lahares
35	Mapa de peligros por flujos piroclásticos
37	Mapa de peligros por avalancha de escombros
39	Mapa de peligros por flujos de lava
39	Mapa de peligros por caída de tefra
43	Aportes a un plan de gestión reactiva
43	Proceso de evacuación por peligros volcánicos del Misti
43	Puntos de concentración
44	Vías de evacuación
47	Etapas de evacuación
50	Albergues temporales
53	Conclusiones
54	Recomendaciones
55	Referencias
58	Anexos

Foto IGP



Vista del volcán Misti y el área urbana del distrito de Paucarpata.

1. Introducción●

El volcán Misti forma parte del conjunto de 16 volcanes activos y potencialmente activos ubicados a lo largo de la cordillera de los Andes del sur del Perú. Su cumbre se encuentra a 17 km del centro de Arequipa, ciudad que supera el millón de habitantes (INEI, 2018) y que, por su proximidad, enfrenta una de las mayores amenazas volcánicas del país (Thouret et al., 2001; Harpel et al., 2011). El Misti, en su historia eruptiva, generó hace aproximadamente 2000 años AP una gran erupción explosiva de tipo pliniana que tuvo un IEV 5 (Thouret et al., 2001; Harpel et al., 2011). Posteriormente, entre los años 1440 y 1470, produjo una erupción explosiva moderada de tipo vulcaniana (IEV 2) (Thouret et al., 2001). En la actualidad, el Misti mantiene una actividad fumarólica intermitente.

En los distritos de Arequipa, como Alto Selva Alegre, Mariano Melgar, Miraflores, Chiguata y Paucarpata, se observa una expansión urbana hacia las laderas del volcán Misti, así como hacia las quebradas que descienden del volcán, como San Lázaro, Pastores, Huarangal, Agua Salada y El Chical. Esta ocupación del territorio incrementa la exposición de la población al peligro por actividad volcánica.

El Instituto Geofísico del Perú (IGP) cumple un rol fundamental en el marco del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SINAGERD), como entidad técnico-científica especializada en el estudio de los peligros de origen geofísico. Su labor transversal a los procesos prospectivos, correctivos y reactivos de la Gestión del Riesgo de Desastres (GRD) genera conocimiento e información científica que sustenta las acciones de prevención, preparación y respuesta. De esta manera, el IGP contribuye a la protección de vidas, la reducción del riesgo de desastres en el país y el fortalecimiento de la toma de decisiones frente a emergencias y desastres.

El presente estudio tiene como objetivo mostrar el grado de exposición del distrito de Paucarpata frente a los peligros del volcán Misti en caso de una eventual erupción. Para ello, se realizaron observaciones de campo, análisis de depósitos volcánicos, así como la recopilación de información sobre viviendas, infraestructura y

servicios, integrando cartografía geoespacial de instituciones públicas. De manera complementaria, se realizaron modelamientos numéricos con *softwares* especializados para la elaboración de mapas de peligro, a partir de los cuales se identificó a la población expuesta en zonas de peligro alto, moderado y bajo. Asimismo, ante un escenario adverso de actividad volcánica, como una erupción de tipo subpliniana a pliniana, se propone la evacuación de pobladores del distrito, para lo cual se contemplan puntos de concentración, rutas de evacuación, etapas de evacuación y zonas de albergue temporal.

Este trabajo se desarrolló en coordinación con la Municipalidad Distrital de Paucarpata y con la participación de instituciones como el Instituto Nacional de Defensa Civil (INDEC), 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 Peruano (EP), Marina de Guerra del Perú (MGP), Fuerza Aérea del Perú (FAP), Policía Nacional del Perú (PNP), Cruz Roja, Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción de Desastres (CENEPRED), Asociación Mundial de Psicología en emergencias (AMPE), Gerencia Regional de Educación (GRE), Corporación Peruana de Aeropuerto y Aviación Comercial S.A. (CORPAC), Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), Instituto Municipal de Planeamiento de Arequipa (IMPLA), Municipalidad Distrital de Chiguata (MDCH), 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, inspecciones de campo y la validación conjunta de la información fortalecieron la articulación interinstitucional y generaron insumos para la formulación de futuros planes de gestión reactiva.

Los resultados de este estudio constituyen la línea base para la implementación del Plan de Gestión Reactiva del distrito de Paucarpata, al integrar información científico-técnica actualizada y proponer medidas orientadas a fortalecer la preparación y respuesta frente a una erupción del volcán Misti.

2. Distrito de Paucarpata

2.1 Ubicación

El distrito de Paucarpata se encuentra ubicado a 16 km al sureste del cráter del volcán Misti, y a 6 km de la plaza de Armas de Arequipa. Abarca una superficie aproximada de 41.34 km² y se encuentra a 2487 m s. n. m. (Figuras 1 y 2). Por el norte limita con el distrito de Mariano Melgar; por el este, con Chiguata; por el oeste, con José Luis Bustamante y Rivero; y, por el sur, con Sabandía. Cabe señalar que el límite con Chiguata responde a criterios administrativos definidos de manera conjunta entre ambos distritos.



Figura 1. Vista desde el sector sur del distrito de Paucarpata.

En el sector suroeste de Paucarpata se conservan cultivos asociados al sistema de andenería tradicional de Arequipa, lo que guarda relación con el nombre del distrito, cuyo significado es “Andén Florido” (Figura 2). La relativa cercanía de Paucarpata al volcán Misti convierte al distrito en una zona de atención prioritaria dentro de los planes de monitoreo y gestión de riesgos volcánicos, especialmente ante eventos eruptivos de magnitud moderada a alta.

2.1 Clima

El clima del distrito de Paucarpata es de tipo semiárido templado, caracterizado por condiciones secas y cielo despejado durante la mayor parte del año. Por las noches, se produce un descenso de la temperatura, especialmente en las zonas más elevadas. En general, las temperaturas son similares a las de la ciudad de Arequipa, con valores mínimos en invierno cercanos a 6.9 °C y máximas que alcanzan alrededor de 23.2 °C.

Las precipitaciones pluviales ocurren mayormente durante los meses de diciembre, enero, febrero y marzo, con intensidades variables. La baja humedad ambiental, ocasionada por la escasa vegetación, incrementa el calor y la sensación de asoleamiento. Además, los vientos soplan en dirección noreste durante el día, a una velocidad promedio de 13 km/h, invirtiéndose durante la noche. En la Figura 3, se puede distinguir la precipitación acumulada en las últimas décadas, correspondiente a las estaciones meteorológicas de la Pampilla y Chiguata de Arequipa.

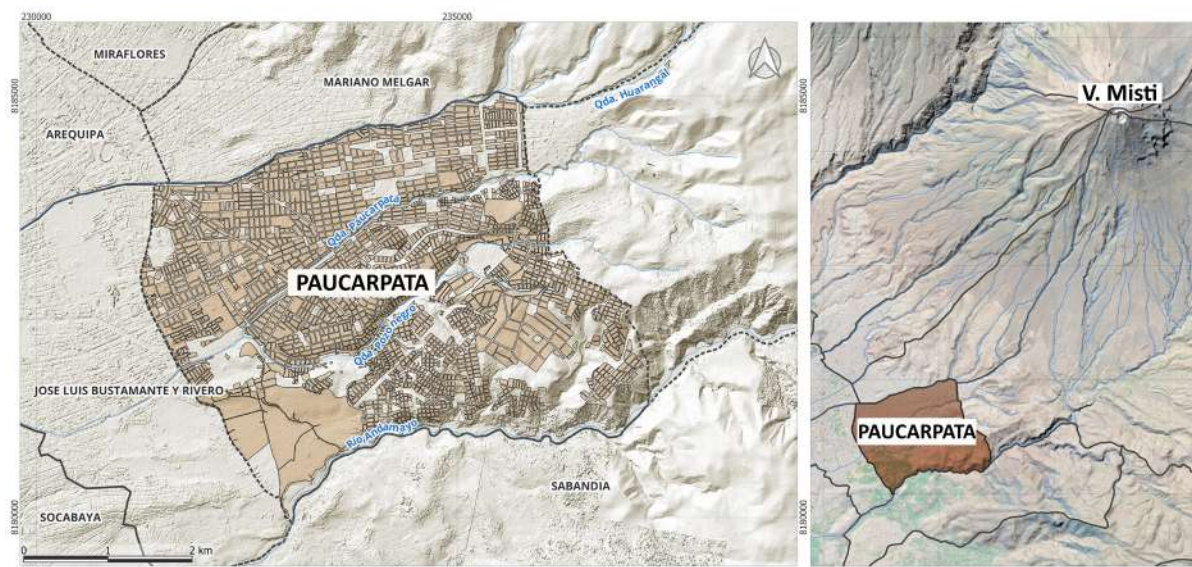


Figura 2. Mapa de ubicación del distrito de Paucarpata y las principales quebradas.

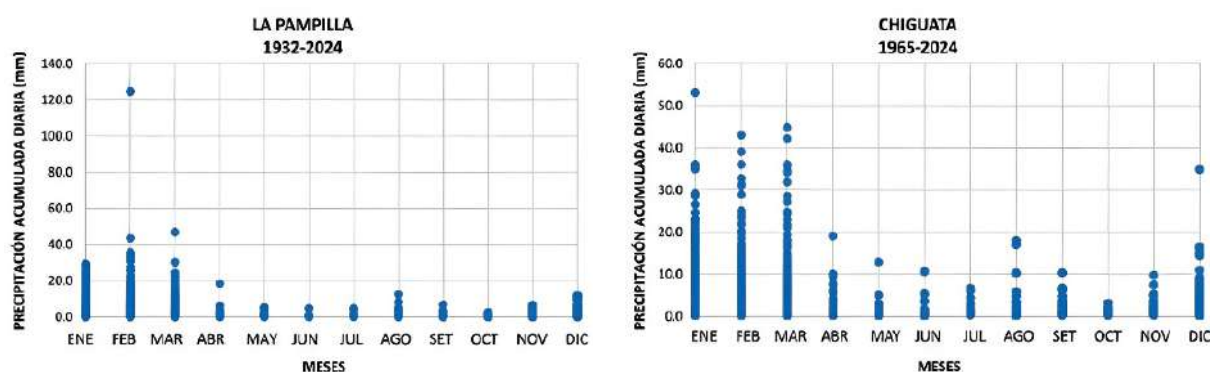


Figura 3. Registros de precipitaciones acumuladas correspondientes a las estaciones meteorológicas La Pampilla y Chiguata de Arequipa. Fuente: SENAMHI.

2.3 Hidrología

Al sur del distrito de Paucarpata se encuentra el río Andamayo, un curso de agua de escaso caudal durante la mayor parte del año. Asimismo, se encuentran tres quebradas principales: Huarangal, Pozo Negro y Paucarpata, las cuales forman parte de la cuenca hidrográfica del río Chili, a la cual aportan como afluentes.

• Río Andamayo

Constituye el límite natural entre los distritos de Paucarpata y Sabandía. Su cuenca se origina en las proximidades de Salinas Huito y fluye en dirección suroeste hasta desembocar en el río Chili. Durante la mayor parte del año registra caudales inferiores a 3 m³/s; sin embargo, en temporada de lluvias puede alcanzar valores de hasta 79 m³/s (Cornejo, 2020). En el sector de Paucarpata presenta una pendiente aproximada de 1.7°, considerada como suave.

• Quebrada Huarangal

También conocida como Torrentera II, la quebrada Huarangal constituye el límite natural entre los distritos de Paucarpata y Mariano Melgar, y desemboca finalmente en el río Chili. Su cauce permanece seco la mayor parte del año y se activa durante episodios de lluvias intensas, generando lahares o flujos de lodo. En el sector de Paucarpata, la quebrada Huarangal presenta una pendiente aproximada de 2.7°, considerada como suave. En su curso superior dentro del distrito, la quebrada alcanza un ancho de aproximadamente 100 m, mientras que en la

parte baja se reduce hasta los 8 m. La quebrada se ve afectada por la acumulación constante de residuos sólidos y escombros dejados por los pobladores, lo que ocasiona un estrechamiento de su cauce.

• Quebrada Paucarpata

También conocida como Torrentera III, esta atraviesa el distrito de Paucarpata en dirección noreste-suroeste. Presenta una pendiente aproximada de 2.4°, clasificada como suave. Su cauce permanece seco durante la mayor parte del año, activándose solo durante lluvias intensas, por donde suelen descender lahares. En su curso superior dentro del distrito, la quebrada alcanza un ancho de aproximadamente 167 m, mientras que en la parte baja se reduce hasta 10 m.

• Quebrada Pozo Negro

También conocida como Torrentera IV, se extiende de manera paralela a la quebrada Paucarpata hasta la asociación de vivienda 200 millas, donde confluye con dicha quebrada. Presenta una pendiente aproximada de 3.2°, catalogada como suave. En su tramo superior dentro del distrito, la quebrada alcanza un ancho cercano a 69 m, reduciéndose a aproximadamente a 4 m en su curso inferior. La mayor parte del año, su cauce permanece seco y solo se activa durante periodos de lluvias intensas, durante los cuales descenden lahares. En los últimos años, el descenso de estos flujos ha ocasionado impactos significativos en viviendas y obras de infraestructura del distrito.

2.4 Población

El distrito de Paucarpata cuenta con una población de 131 346 habitantes, de los cuales 63 265 son hombres y 68 081 son mujeres (INEI, 2018). Dentro de los grupos considerados como población vulnerable, se identifican los siguientes sectores:

- **Niños y adolescentes (0 a 17 años):** Representan el 27.4 % del total de habitantes, con 36 020 personas en este rango de edad.
- **Adultos mayores (60 años a más):** Conforman aproximadamente el 10.5 % de la población, con 13 789 personas en dicho rango de edad.
- **Personas con discapacidad:** Se reportaron 2553 personas con alguna discapacidad, lo que señala la importancia de implementar infraestructuras accesibles e inclusivas.

2.5 Vivienda

Según los resultados del último censo nacional de 2017 (INEI, 2018), en el distrito de Paucarpata existe un total de 29 805 viviendas. El material predominante de las paredes es el ladrillo o bloque de cemento, estimado en el 92 % de las viviendas. En cuanto a los techos, el concreto armado es el material más utilizado, con una cobertura de cerca del 82 %. Sin embargo, el 18 % de las viviendas cuenta con techos contruidos con materiales livianos o de baja resistencia, como madera, tejas, calamina, etc. Adicionalmente, cerca del 8 % de las viviendas presentan paredes contruidas con materiales como el adobe, piedra con barro, madera, etc. En la Tabla 1 se muestra el tipo de viviendas que tiene el distrito de Paucarpata, según el material de sus paredes y techos.

Tabla 1. Tipo de material de las viviendas del distrito de Paucarpata. Fuente: INEI (2018).

Material predominante en paredes	Total	Material predominante en techos	Total
Ladrillo o bloque de cemento	27 494	Concreto armado	24 458
Piedra o sillar con cal o cemento	1 162	Madera	113
Adobe	788	Tejas	49
Tapia	1	Planchas de calamina, fibra de cemento o similares	5016
Quincha (caña con barro)	1	Caña o estera	129
Piedra con barro	46	Triplay	35
Madera	204	Paja	5
Triplay	109	Otros	0

3. Contexto geológico del distrito de Paucarpata

3.1 Geomorfología

A continuación, se presentan los principales elementos geomorfológicos (Figura 4) identificados en el distrito de Paucarpata:

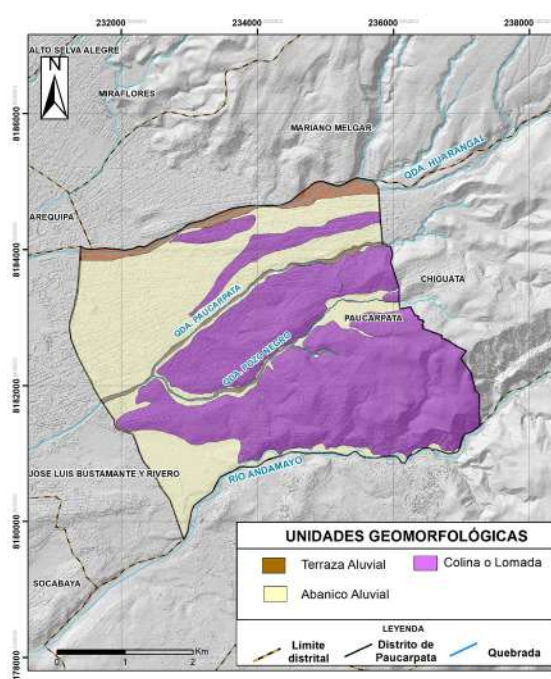


Figura 4. Mapa geomorfológico del área del distrito de Paucarpata.

- **Abanico aluvial**

Este tipo de morfología se distingue en el sector norte y oeste del distrito de Paucarpata. Corresponde a un área amplia con una pendiente suave (5° – 10°), constituida de depósitos aluviales intercalados con depósitos de lahares y depósitos volcánicos. Sobre estos depósitos se encuentran asentados numerosos asentamientos humanos y urbanizaciones, como Pueblo Miguel Grau; Pueblo Miguel Grau II, Zona A y B; Pueblo Miguel Grau III; Pueblo Miguel Grau IV, Zona B y C; V; Pueblo Cesar Vallejo, A. H. 15 de Agosto; A. H. Manuel Prado; A. H. Jesús María; asociación

de viviendas colonial; A. H. Villa del Mar; urbanización Leoncio Prado y A. H. Pedro P. Díaz.

- **Terraza aluvial**

Las terrazas aluviales corresponden a plataformas delgadas ubicadas en ambas márgenes de las quebradas que se prolongan del volcán Misti. Estas terrazas están constituidas de una intercalación de depósitos de lahares y depósitos volcánicos (flujos piroclásticos, caídas de tefras, etc.), que tienen hasta 8 m de espesor, principalmente en el sector norte de Paucarpata, en ambas márgenes de la quebrada Huarangal. En algunos sectores, se observa sobre dichas terrazas la presencia de asentamientos humanos, así como residuos sólidos y material de escombros (Figura 5).

- **Colina**

Corresponden a superficies topográficas elevadas y onduladas, conformadas principalmente por depósitos volcánicos, tales como avalanchas de escombros, flujos piroclásticos y otros. Presentan pendientes elevadas que varían entre 25° y 45° . Los depósitos de avalancha de escombros observados en Paucarpata (Figura 5) provienen del volcán Pichu Pichu, sobre los cuales se han asentado diversos poblados.

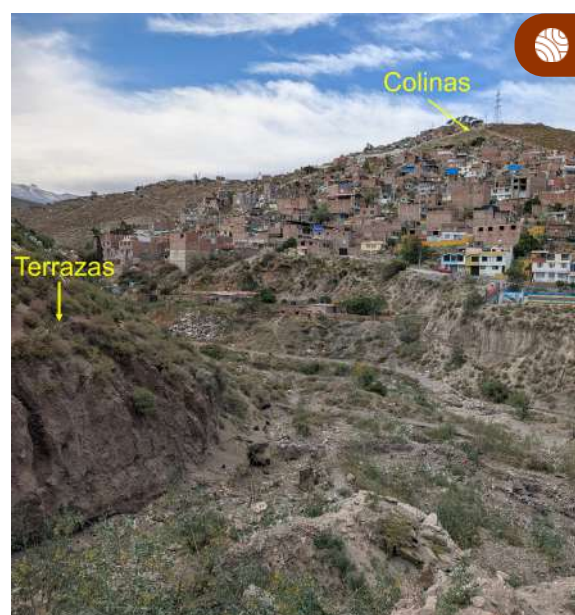


Figura 5. Vista del A. H. Los Portales asentado sobre una colina que presenta elevada pendiente. También se observa una terraza aluvial y el cauce seco de la quebrada Paucarpata.

3.2 Geología

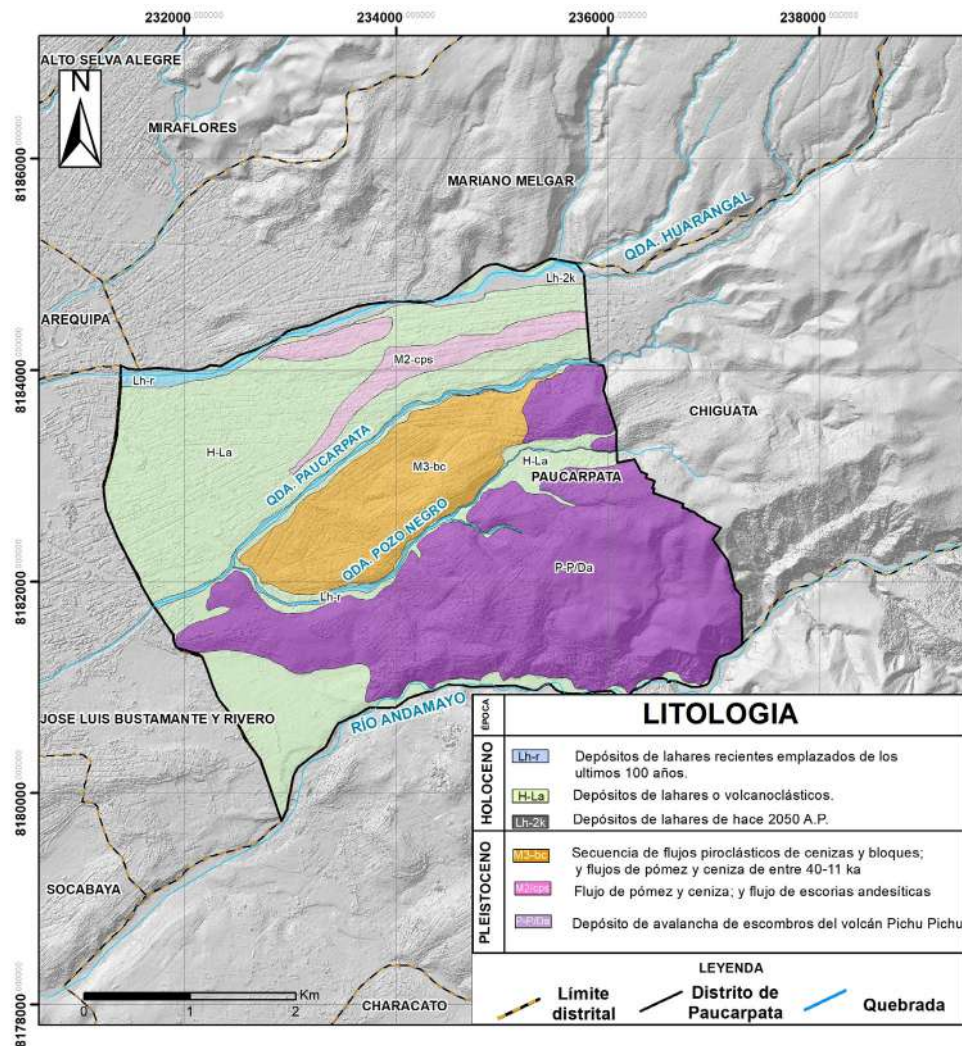


Figura 6. Mapa geológico de la zona de estudio.

En el área de estudio afloran depósitos de flujos piroclásticos, avalanchas de escombros y depósitos de lahares del Holoceno y recientes (Figura 6). A continuación, se describen las unidades observadas en el distrito de Paucarpata:

- **Depósito de avalanchas de escombros**

Este depósito es visible en los sectores sur y sureste del distrito de Paucarpata, y se disponen en forma de montículos o colinas. Dicho depósito corresponde a la avalancha de escombros del volcán Pichu Pichu. Tiene hasta 120 m de altura y está conformado por bloques lávicos fragmentados, de tamaños decimétricos a métricos, englobados dentro en una matriz

areno-limosa. En la actualidad, estas colinas se encuentran ocupadas por diversos asentamientos humanos, entre ellos: Señor de los Milagros, El Nazareno, Los Portales, El Cebollar, Rosaspata y el pueblo tradicional de Paucarpata (Figura 7).



Figura 7. Depósitos de avalanchas de escombros en el asentamiento humano El Nazareno.

- Depósitos de flujo piroclástico de pómez y ceniza, bloques y ceniza

En el sector central del distrito de Paucarpata, en inmediaciones de los asentamientos humanos Ciudad Blanca, Pueblo Campo Marte, Pueblo Israel, Pueblo Contisuyo y José María Arguedas se distinguen depósitos de flujos piroclásticos de pómez y ceniza, y flujos de bloques y cenizas. Los flujos de pómez y ceniza son de color gris y poco endurecidos, conformados principalmente por pómez y fragmentos líticos centimétricos englobados dentro de una matriz de ceniza, los cuales alcanzan en algunos sectores hasta 21 m de espesor (Figura 8). En tanto, los flujos de bloques y ceniza son de color gris y endurecidos, y tienen entre 3 m y 15 m de espesor. Están constituidos de bloques densos y subangulosos incluidos dentro de una matriz de ceniza (Figura 9).



Figura 8. Depósitos de flujo piroclástico de pómez y ceniza en inmediaciones del A. H. Contisuyo.



Figura 9. Depósitos de flujo piroclástico de bloques y ceniza entre los A. H. Alto Jesús y las Lomas de Hoyón.

- Depósitos de lahares de hace 2000 años

Estos depósitos son visibles en las quebradas Huarangal, Paucarpata, Pozo Negro y Socabaya. Dichos depósitos fueron generados por la erupción pliniana del volcán Misti ocurrida hace aproximadamente 2000 años AP. Estos depósitos están constituidos por bloques subredondeados a subangulosos, de menos de 10 cm, englobados dentro de una matriz de limo y arena (Figuras 10 y 11). Se observan capas de 2 m a 3 m de espesor en inmediaciones del sector de Pozo Negro.



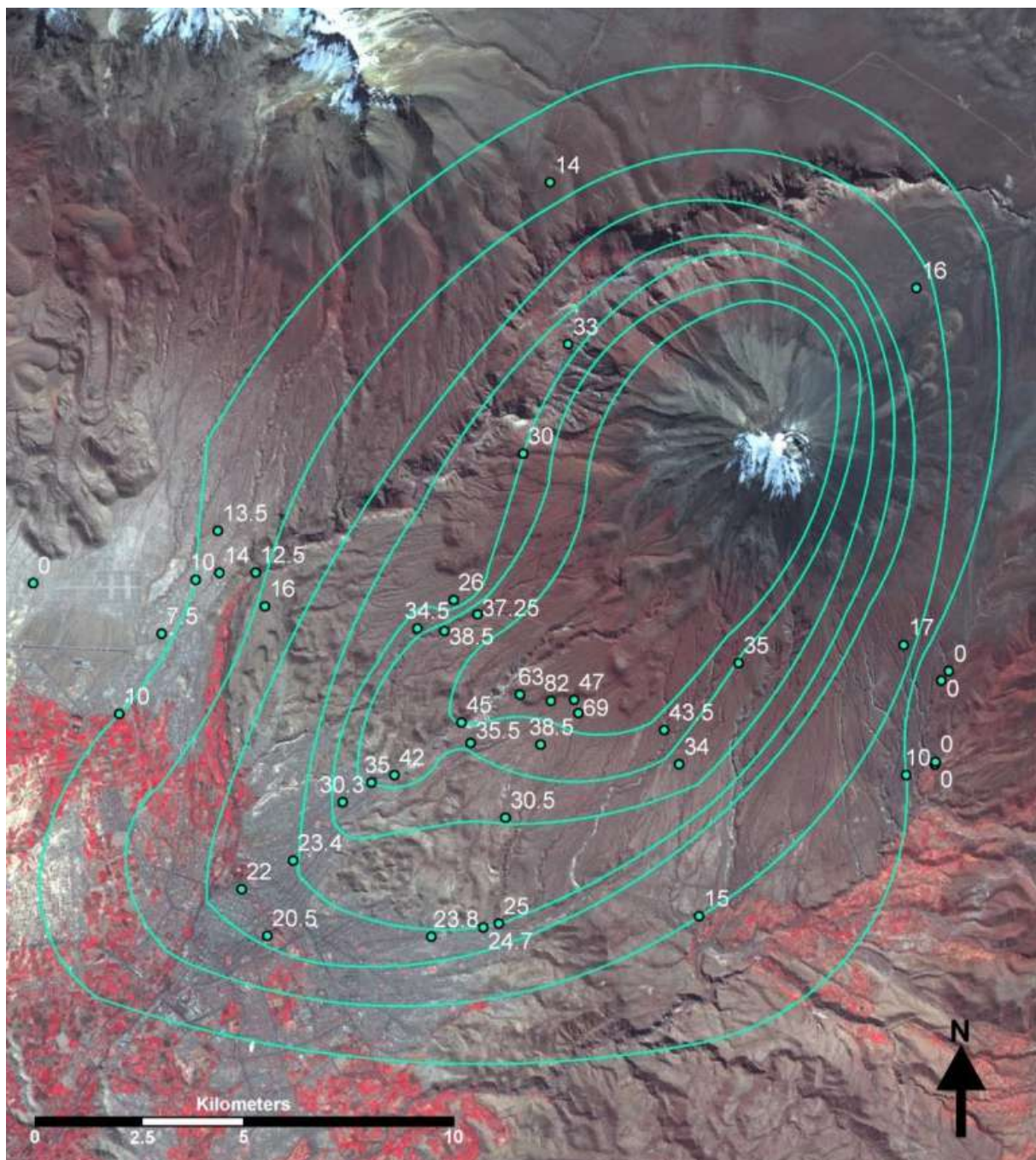
Figura 10. Depósitos de lahar de hace 2000 años en la quebrada Huarangal, en el sector de Pueblo Miguel Grau III.



Figura 11. Depósitos de lahares de la erupción de hace 2000 años AP del volcán Misti visibles en la quebrada Huarangal, sector de A. H. Villa Pacifico.

- Depósito de caída de tefra de hace 2000 años del Misti

Dicho depósito está constituido por lapilli de pómez que tiene hasta 45 cm de espesor a 8 km al suroeste del cráter del Misti (Figura 12).



4. Peligros volcánicos del Misti

El volcán Misti tiene el potencial de desarrollar erupciones de tipo vulcaniana o pliniana, las cuales pueden generar distintos peligros volcánicos capaces de impactar de manera considerable al distrito de Paucarpata.

4.1 Flujos de lahares

Los lahares son flujos (20–60 km/h) que contienen materiales volcánicos de diversos tamaños que son transportados por agua, y que se desplazan por valles y quebradas que se prolongan de los volcanes. Estos pueden originarse tanto durante una erupción como en periodos de inactividad volcánica (Tilling & Beate, 1993). La extensión del

área afectada por un lahar depende de factores como el volumen de agua disponible, la cantidad de material suelto en el entorno, así como la pendiente y la configuración del terreno.

Los lahares son altamente destructivos, arrasan con todo a su paso, y pueden alcanzar distancias superiores a los 200 km, provocando incluso inundaciones en zonas aledañas a los cauces de los ríos (Tilling & Beate, 1993). Según Thouret et al. (2001), poco después de la erupción de hace 2000 años AP, el volcán Misti generó lahares que han sido identificados principalmente al sur y suroeste del edificio volcánico. Se han observado depósitos de lahares que presentan 3 m de espesor en las quebradas que descienden del volcán Misti, como San Lázaro y Huarangal (Manrique et al., 2018). Por otro lado, también se han identificado secuencias de depósitos de lahares recientes en el sector Pozo Negro, correspondiente a la quebrada del mismo nombre en el distrito de Paucarpata, como se muestra en la Figura 13.



Figura 13. Secuencia de depósitos de lahar en la quebrada Pozo Negro, en el sector de Pozo Negro.

4.2 Flujos piroclásticos

Los flujos piroclásticos son masas extremadamente calientes (entre 300 °C y 800 °C) compuestas por una mezcla de gases volcánicos, ceniza y fragmentos de roca. Se desplazan rápidamente por los flancos del volcán, a velocidades que oscilan entre 100 m/s y 300 m/s, siguiendo la topografía del terreno (Hoblitt et al., 1995). Estos flujos son altamente destructivos, capaces de calcinar y arrasar con todo a su paso (Tilling & Beate, 1993).

El volcán Misti ha registrado varias erupciones plinianas, como la erupción de hace 2000 años AP que tuvo un Índice de Explosividad Volcánica (IEV) 5 (Harpel et al., 2011; Charbonnier et al., 2021). Este tipo de erupciones han generado depósitos piroclásticos de gran volumen, compuestos principalmente por pómez y ceniza. Dichos depósitos son visibles en las quebradas Huarangal y El Chical, así como en la zona de Miguel Grau del distrito de Paucarpata (Figura 14). A una distancia de 17 km al sur y suroeste del cráter, estos depósitos tienen entre 1 m y 3 m de espesor. Otro depósito importante, rico en pómez y con una antigüedad de aproximadamente 40 000 años, se encuentra en la margen derecha del río Chili, cerca del Santuario de Chapi, a 14 km al oeste del cráter (Mariño et al., 2016).

En caso de una eventual erupción explosiva del volcán Misti, con un IEV mayor o igual a 2, se podrían emitir flujos piroclásticos que descenderían por las quebradas San Lázaro y Huarangal, afectando a los distritos de Alto Selva Alegre, Miraflores, Mariano Melgar y Paucarpata.

4.3 Avalanchas de escombros

Las avalanchas de escombros son fenómenos poco frecuentes, pero sumamente destructivos. Se originan por el colapso parcial del edificio volcánico y pueden recorrer decenas de kilómetros a gran velocidad (Glicken, 1996). Estas avalanchas sepultan y destruyen todo a su paso, y además pueden represar cuerpos de agua, generando posteriormente lahares o inundaciones al liberarse repentinamente (Tilling & Beate, 1993).

En el caso del volcán Misti, se han identificado depósitos de avalanchas de escombros al sur, oeste y suroeste del edificio volcánico, entre 8 km y 11 km del cráter, próximos al distrito de Paucarpata. Estos depósitos presentan un espesor promedio de 60 m y cubren una superficie aproximada de 40 km² (Mariño et al., 2016). En el distrito de Paucarpata se observaron depósitos de avalancha de escombros asociados al volcán Pichu Pichu.

En caso de una erupción explosiva del volcán Misti con un IEV superior a 4 o de una erupción con crecimiento de domo, podría producirse el colapso de uno de sus flancos. Este evento generaría depósitos de avalanchas que descenderían por las quebradas San Lázaro, Huarangal y por el río Andamayo, afectando zonas urbanas de los distritos de Alto Selva Alegre, Miraflores, Mariano Melgar y Paucarpata.



Figura 14. Depósitos de flujo piroclástico de pómez y ceniza en el sector de Pueblo Miguel Grau II Zona A.

4.4 Flujos de lava

Los flujos de lava corresponden a masas de roca fundida que emergen desde el cráter o a través de fracturas existentes en los flancos de un volcán. Generalmente, se desplazan por el cauce de quebradas y valles, y se extienden varios kilómetros de distancia, aunque por lo común no superan los 8 km desde su punto de emisión (Francis, 1993). Si bien poseen la capacidad de arrasarse y calcinar las superficies que atraviesan, su desplazamiento lento reduce el nivel de amenaza directa para la vida humana (Tilling & Beate, 1993).

En el caso del volcán Misti, los flujos de lava son principalmente de composición andesítica a dacítica, caracterizados por su alta viscosidad. Dichos flujos alcanzaron entre 10 km y 12 km en dirección suroeste, aunque en promedio recorrieron entre 5 km y 8 km alrededor del volcán (Mariño et al., 2016). Las lavas del Misti no han alcanzado el distrito de Paucarpata.

En caso de una eventual erupción efusiva del volcán Misti se podrían generar flujos de lava que descenderían por las partes altas de la quebrada Huarangal, afectando distritos como Mariano Melgar y Chiguata, con pocas probabilidades de alcanzar el distrito de Paucarpata.

4.5 Caída de tefras

Las tefras son fragmentos de roca volcánica expulsados durante una erupción explosiva, cuya dispersión está controlada principalmente por la energía eruptiva y las condiciones del viento (Tilling, 1989). El tamaño de las tefras es muy variable, desde cenizas de menos de 2 mm hasta bloques que pueden alcanzar varios metros de diámetro (Tilling & Beate, 1993). Estos materiales generan impactos diversos, tales como problemas de salud en la población, contaminación de fuentes de agua, daños en la agricultura, colapso de techos por acumulación y alteraciones en el tránsito aéreo (Tilling & Beate, 1993).

En el caso del volcán Misti, se han documentado múltiples depósitos de caída de tefras asociados a erupciones explosivas de volumen variado que ocurrieron en el pasado (Thouret et al., 2022). Se han encontrado depósitos en la quebrada Huarangal que datan alrededor de 13 650 años AP y 20 960 años AP (Thouret et al., 2001). Asimismo, en sectores próximos al distrito de Paucarpata, principalmente en el sector noreste (Figura 15), se han identificado depósitos de lapilli de pómez asociados a la erupción pliniana de hace 2000 años AP.



Figura 15. Depósito de caída de lapilli de pómez y líticos de la erupción pliniana del Misti de hace 2000 años AP, en las cercanías del distrito de Paucarpata.

5. Escenarios eruptivos futuros●

A lo largo de su evolución, el volcán Misti ha experimentado diversas erupciones explosivas. En caso de una futura reactivación, podría desarrollar erupciones o escenarios eruptivos diversos, entre los cuales destacan los siguientes:

5.1 Erupción vulcaniana con IEV 1–2

El volcán Misti podría registrar una erupción de tipo vulcaniana, caracterizada por explosiones moderadas que generan la emisión de ceniza, proyectiles balísticos, bloques, bombas y, eventualmente, lapilli de pómez (Sigurdsson et al., 2000). Se tiene registro de una erupción de tipo vulcaniana ocurrida en el periodo 1440–1470 (Thouret et al., 2001), la cual depositó una capa de ceniza gris oscura de 1 cm de espesor a 20 km al oeste, norte y sur del cráter. En este contexto, en caso de una eventual erupción vulcaniana del Misti, la ceniza emitida podría alcanzar con facilidad el distrito de Paucarpata.

Las erupciones vulcanianas también pueden generar flujos piroclásticos, como ocurrió durante la erupción vulcaniana del volcán Tungurahua (Ecuador) en 2004, donde flujos piroclásticos alcanzaron hasta 4 km de distancia (Hall et al., 2013). En el caso del volcán Misti no se han identificado depósitos de flujos piroclásticos asociados a este tipo de erupción. Dado la distancia que existe entre el cráter del Misti al distrito de Paucarpata, es poco probable que un flujo piroclástico originado por una erupción vulcaniana del Misti alcance dicho distrito.

En una erupción vulcaniana también se pueden generar lahares (flujos de lodo). En quebradas que se prolongan del volcán Misti, como San Lázaro, Pastores y Huarangal (Paucarpata), se han identificado depósitos de lahares, algunos probablemente asociados a erupciones vulcanianas. Según relaciones estratigráficas, algunas ocurrieron hace menos de 2000 años, pues yacen encima del depósito de lahar de la erupción de hace 2000 años AP. Asimismo, es importante precisar que la ocurrencia de lahares también está asociada a lluvias intensas; depósitos de este tipo también se observan en la quebrada Pozo Negro de Paucarpata (Figura 13).

Se estima que el volcán Misti genera erupciones vulcanianas (IEV 1–2) cada 500 a 1500 años (Thouret et al., 2001), por lo que el potencial de ocurrencia de una erupción vulcaniana es relativamente alto.

5.2 Erupción subpliniana a pliniana con IEV 3–5

En un escenario de reactivación del volcán Misti, este podría desarrollar erupciones subplinianas o plinianas, como la ocurrida hace aproximadamente 2000 años AP (Harpel et al., 2011; Charbonnier et al., 2021). Este tipo de erupciones generan caídas de tefras, flujos piroclásticos, lahares y, eventualmente, colapso de flanco con el desarrollo de avalanchas de escombros. Las tefras (cenizas, lapilli, etc.) emitidas tendrían un alcance de varios cientos de kilómetros alrededor del volcán. En consecuencia, este tipo de productos eruptivos alcanzarían con facilidad el distrito de Paucarpata, con un impacto directo sobre la población, la infraestructura y las actividades socioeconómicas.

Este tipo de erupciones también pueden generar flujos piroclásticos que pueden superar fácilmente los 10 km de distancia respecto al cráter. La erupción pliniana del Misti de hace 2000 (IEV 5) generó flujos piroclásticos que alcanzaron hasta 13 km de distancia del cráter, en direcciones sur y suroeste (Cobeñas et al., 2012). En este contexto, un escenario de erupción de este tipo es probable que tenga cierto alcance en la zona urbana de Paucarpata.

En relación con los lahares generados durante erupciones subplinianas o plinianas, dado al gran volumen que estos tendrían, les permitiría alcanzar distancias superiores a 9 km del volcán (Delaite et al., 2005). Lahares de estas características podrían canalizarse por quebradas como Huarangal, que atraviesan el sector norte del distrito de Paucarpata y otros.

5.3 Colapso de flanco y emplazamiento de avalanchas de escombros

En el volcán Misti se han identificado al menos dos depósitos de avalancha de escombros asociados

al colapso de flanco del volcán, específicamente entre 13 km y 15 km al sur y suroeste del Misti (Rivera et al., 2024). El flanco noroeste presenta una pendiente pronunciada y está atravesado por dos fallas normales orientadas en dirección NO-SE, lo que lo convierte en una zona estructuralmente inestable. Este sector ya ha colapsado en el pasado, y podría volver a hacerlo durante una erupción o un sismo de gran magnitud.

Dada la morfología y presencia de fallas y fracturas en el volcán Misti, la ocurrencia de avalanchas de escombros no puede ser descartada. En caso de que se produzca el colapso del flanco noroeste, existe la posibilidad de represamiento del río Chili. Si el colapso fuera del flanco sur, depósitos de avalanchas de escombros podrían impactar áreas situadas al sur, sureste y suroeste del volcán, donde se ubica el distrito de Paucarpata. La distancia que podrían alcanzar dependerá del volumen del material involucrado.

5.4 Erupción efusiva con flujos de lava

En una erupción efusiva del volcán Misti, se produciría la emisión de flujos de lava que podrían alcanzar entre 10 km y 12 km de distancia del cráter. Sin embargo, su probabilidad de ocurrencia es baja y, en caso de producirse, no representarían una amenaza directa para la zona urbana del distrito de Paucarpata, ya que difícilmente llegarían hasta esa área.

5.5. Erupción con crecimiento y colapso de domos

En el pasado, el volcán Misti ha generado el crecimiento y colapso de domos de lava que ha producido flujos piroclásticos de bloques y cenizas. Depósitos de este tipo son observadas en determinadas quebradas que se prolongan de los flancos sur, sureste y suroeste del Misti, como la quebrada Huarangal (Rivera et al., 2024). La probabilidad de ocurrencia del crecimiento y colapso de domos es moderada, ya que este tipo de proceso ha ocurrido en el pasado. En caso de presentarse nuevamente, la morfología del cráter favorecería que los flujos piroclásticos se canalicen y desplacen principalmente a lo largo de las quebradas que drenan por los flancos sur y sureste del volcán, con un alcance de entre 10 km a 12 km de distancia (Rivera et al., 2024).

6. Modelamiento numérico de procesos volcánicos

Con el objetivo de identificar las áreas que podrían ser afectadas por productos volcánicos durante una eventual erupción del volcán Misti, así como para fines de efectuar mapas de peligro volcánico, se ha realizado el modelamiento numérico empleando distintos *softwares* y códigos especializados.

6.1 Lahares

Para simular el descenso de lahares y elaborar un mapa de peligros, se utilizó el código VolcFlow, desarrollado en la plataforma Matlab. Este *software* permite modelar trayectorias de flujos desde una fuente inicial, con el fin de determinar zonas de inundación y áreas potencialmente afectadas (Kelfoun et al., 2009; Kelfoun & Vargas, 2015).

El modelo se basa en las ecuaciones de conservación de masa y momento, promediadas bajo el supuesto de un flujo en agua poco profunda. Además, permite aplicar diferentes leyes reológicas y condiciones de fuente. Las ecuaciones se resuelven mediante un esquema numérico euleriano con diferencias finitas.

Los parámetros de entrada considerados en la simulación incluyen:

- Volumen del flujo o descarga
- Duración del evento
- Densidad del flujo
- Cohesión del material
- Ángulos de fricción basal e interna
- Viscosidad

Se realizaron modelamientos con tres distintos volúmenes de flujo en las quebradas que se prolongan del volcán Misti hacia el distrito de Paucarpata y quebradas tributarias (Figura 16). Los parámetros de entrada para cada escenario se detallan en la Tabla 2. Para los escenarios 1 y 2 se utilizaron volúmenes de $1.5 \times 10^5 \text{ m}^3$ y $5 \times 10^5 \text{ m}^3$, respectivamente (Tabla 2). Ambos corresponden a flujos hiperconcentrados (HCF, por sus siglas en inglés) generados por lluvias intensas que transportan el material suelto previamente depositado (Thouret et al., 2022). Para el escenario 3 se consideró un volumen de $1 \times 10^6 \text{ m}^3$, asociado a lahares ocurridos durante y después de erupciones plinianas, como la erupción pliniana del Misti ocurrida hace 2000 AP que generó lahares visibles en varias quebradas que atraviesan la ciudad de Arequipa (Thouret et al., 2013).

Los resultados del modelamiento indican que los lahares descienden principalmente por los ríos Chili y Andamayo, así como por quebradas como Pastores, San Lázaro, Venezuela, Huarangueros, Huarangal y Agua Dulce (Figura 16). Estos flujos pueden alcanzar más de 20 km de distancia desde su origen y finalmente confluir con el río Chili. Solo en la quebrada Huarangal, el descenso de lahares podría afectar zonas urbanas como el pueblo joven Miguel Grau, los asentamientos humanos El Paraíso y Francisco Mostajo, así como Villa El Sol, Alameda Chorrillos, entre otros sectores.

Tabla 2. Principales parámetros ingresados en el *script* del código VolcFlow para la simulación de los flujos de lahares.

Escenario	Volumen	Tiempo	Densidad	Cohesión	Fricción basal	Fricción interna	Viscosidad
	V $\times 10^5 \text{ m}^3$	Min	ρ kg/m^3	τ_0 Pa	°	°	μ Pas
1	1.5	60	1300	1	10	20	0
2	5	60	1600	20	10	20	1
3	10	60	1800	50	10	20	1

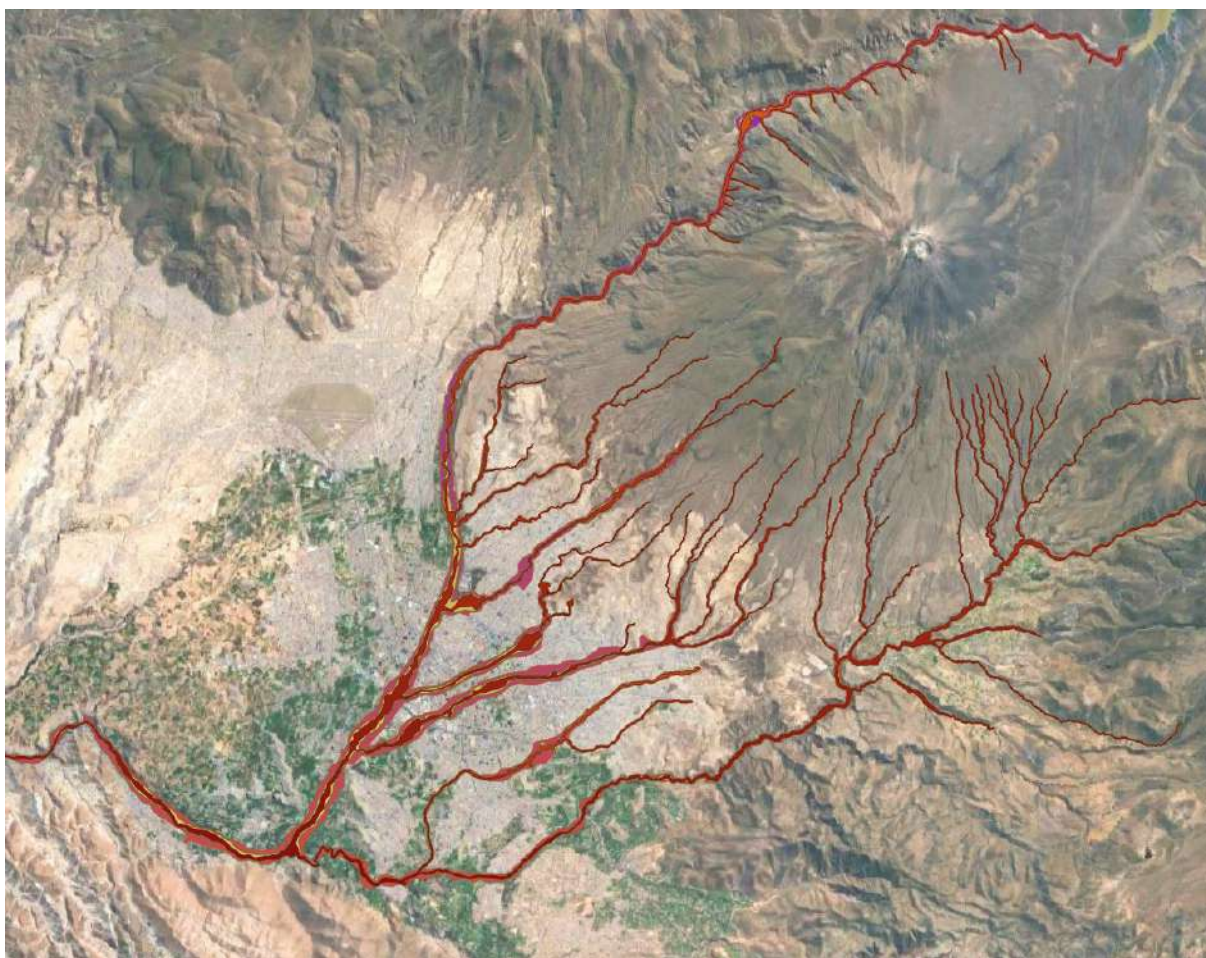


Figura 16. Resultado del modelamiento numérico de flujos por lahares del Misti.

6.2. Flujos piroclásticos

Las simulaciones numéricas de flujos piroclásticos se realizaron utilizando el *software* VolcFlow (Kelfoun et al., 2009; Kelfoun & Vargas, 2015). Este programa permite modelar flujos con propiedades reológicas plásticas, como el comportamiento tipo Bingham, con o sin tensión dependiente de la velocidad. Además, utiliza topografías simplificadas, lo cual resulta adecuado para representar flujos piroclásticos densos que se desplazan en forma de pulsos, reproduciendo velocidades y espesores de depósitos de manera realista (Kelfoun, 2011).

La fuente del flujo piroclástico utilizada en la simulación se ubicó en el sector suroeste del volcán Misti, con el fin de evaluar su posible descenso por dicho flanco, al pie del cual se encuentran los distritos de Mariano Melgar, Chiguata y Paucarpata. Para este modelamiento se realizaron al menos nueve iteraciones, analizando las áreas potenciales de alcance. Los volúmenes considerados están asociados a

procesos eruptivos con Índice de Explosividad Volcánica (IEV) entre 2 y 6, similares a los registrados en volcanes como Chaitén de Chile (Major et al., 2013), Saint Helens de Estados Unidos (Lipman & Mullineaux, 1981), Pinatubo de Filipinas (Newhall & Punongbayan, 1996) y Misti (Harpel et al., 2011) (Tabla 3).

Tabla 3. Principales parámetros ingresados en el *script* del código VolcFlow para la simulación de los flujos piroclásticos.

Escenario	Volumen	Densidad
	V $\times 10^6 \text{ m}^3$	ρ kg/m^3
1	1	1600
2	10	1600
3	20	1600

Entre los parámetros generales considerados para el modelamiento se encuentran:

- Tiempo de alimentación del flujo: 4000 segundos.
- Aceleración gravitacional: 9.81 m/s^2 .
- Cohesión 5000 Pa.
- Coeficiente de turbulencia: 0.01 (flujo) y 0.3 (oleada).
- Viscosidad: 0.1 (flujo) y 0.001 (oleada) Pa·s.
- Paso de tiempo: 0.10 s.

Los resultados del modelamiento numérico muestran que los flujos piroclásticos se desplazan hacia los sectores oeste, suroeste y sur del volcán Misti (Figura 17). En un primer momento se desplazan sobre la superficie del terreno, para luego canalizarse en las quebradas Huarangal y San Lázaro, alcanzando distancias superiores a 13 km de la cima.

Además, los resultados indican que los flujos

piroclásticos tienen alcance sobre distritos como Alto Selva Alegre, Miraflores, Mariano Melgar, Chiguata y Paucarpata. En particular, el descenso de flujos por la quebrada Huarangal impactaría zonas urbanas como el pueblo joven Santa Fe de Miguel Grau y el A. H. 29 de Agosto.

6.3 Avalancha de escombros

El modelamiento numérico de avalanchas de escombros se llevó a cabo utilizando el *software* VolcFlow. Este programa permite simular flujos gravitacionales, como avalanchas de escombros, flujos piroclásticos y lahares, sobre modelos digitales de elevación (DEM, por sus siglas en inglés) (Kelfoun & Druitt, 2005).

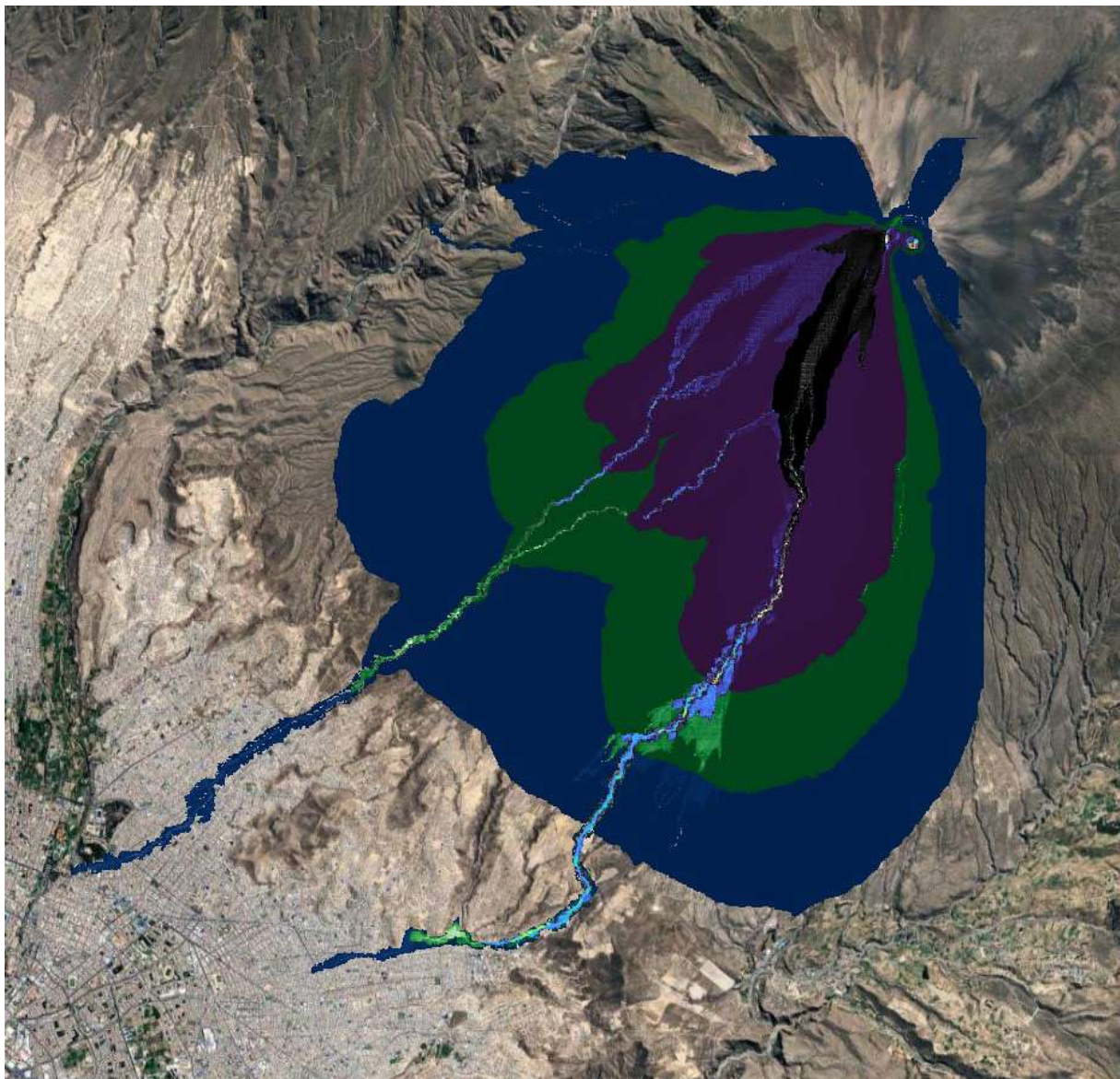


Figura 17. Modelamiento de flujos piroclásticos para los sectores sur y suroeste del volcán Misti.

Entre los parámetros de entrada se incluyen la ubicación y las dimensiones de la zona de colapso, que puede ser representada mediante geometrías idealizadas como un cilindro o un paraboloide. En este estudio, se simuló un colapso en forma de paraboloide del sector suroeste del Misti, con dimensiones y volúmenes variables según distintos escenarios considerados (Vargas et al., 2021). Los volúmenes considerados están asociados a procesos eruptivos y colapsos presentados por los volcanes Tutupaca en Perú (Samaniego et al., 2015), Nevado de Toluca en México (Capra et al., 2004), Saint Helens en Estados Unidos (Lipman & Mullineaux, 1981), entre otros (Figura 18).

Los parámetros utilizados en la simulación se presentan en Tabla 4.

Los resultados de los modelamientos numéricos muestran que las avalanchas de escombros se desplazarían de manera irregular hacia los sectores sur y suroeste del volcán Misti, canalizándose por la quebrada San Lázaro (distritos de Alto Selva Alegre y Miraflores) y el río Andamayo, con un alcance de hasta 15 km desde el cráter. Asimismo, se observa un desplazamiento masivo hacia el sector norte del distrito de Paucarpata, alcanzando zonas urbanas como el A. H. Santa Fe y el pueblo joven Miguel Grau (Zonas A, D y C), entre otras.

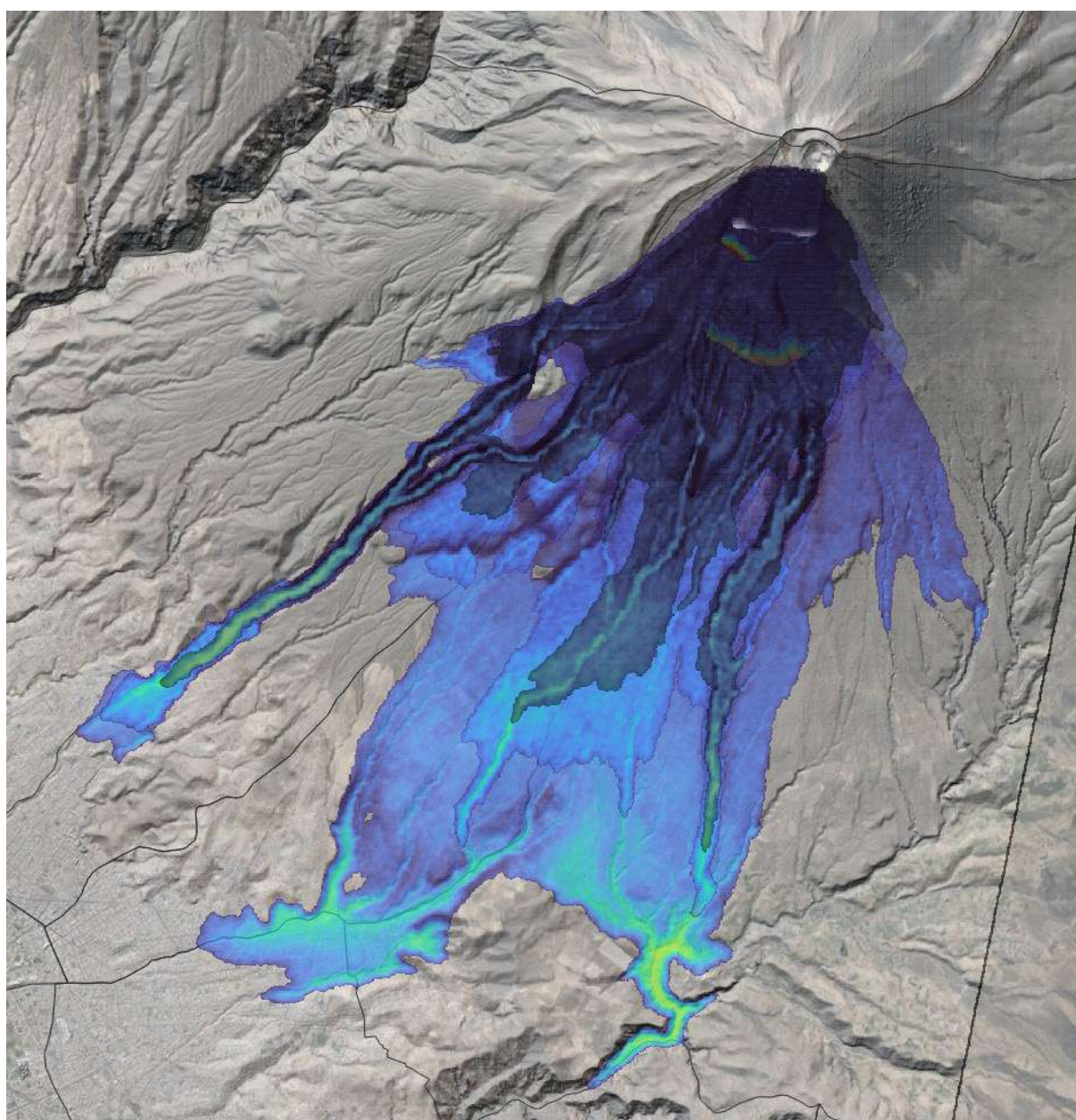


Figura 18. Modelamiento de avalancha de escombros de los sectores sur y suroeste del volcán Misti.

Tabla 4. Principales parámetros para la simulación de avalanchas de escombros.

Escenario	Volumen	Tiempo	Densidad	Cohesión	Viscosidad
	V km ³	s	kg/m ³	Pa	km
1	0.35	400	2000	2000	1000
2	1.5	400	2000	2000	1000
3	2.4	400	2000	2000	1000

6.4 Flujos de lava

El modelamiento numérico de flujos de lava fue tomado de Vargas et al. (2021), quien utilizó también el *software* VolcFlow (Kelfoun & Druitt, 2005). Este programa permite modelar el comportamiento de flujos volcánicos considerando parámetros físicos y reológicos específicos. Los parámetros de ingreso fueron los siguientes:

- Viscosidad: 10⁵ Pa·s, de acuerdo con Tepley et al. (2007, 2008).
- Densidad: 2600 kg/m³, valor característico de lavas andesíticas como las del volcán Mont Hood en EE. UU. (Murase & McBirney, 1973).
- Cohesión: 3500 Pa, similar a la empleada para simular flujos del volcán Merapi en Indonesia (Gertisser et al., 2012).

Los parámetros relacionados con el volumen se establecieron tomando como referencia los depósitos generados por la erupción efusiva ocurrida hace aproximadamente 112 000 años AP (Thouret et al., 2001), en la cual se generó la emisión de flujos de lava visibles al pie del flanco oeste del Misti. Los parámetros del modelamiento de lavas se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Principales parámetros ingresados para la simulación de flujos de lava (Vargas et al., 2021).

Escenario	Volumen	Densidad	Viscosidad	Cohesión
	V x10 ⁷ m ³	ρ kg/m ³	x10 ⁵ Pa	Pa
1	5.7	2600	1	3500
2	17	2600	1	3500
3	37	2600	1	3500

Los resultados muestran que las lavas descienden principalmente hacia los sectores norte, sur y este del Misti, con alcances de hasta 11 km desde el cráter del volcán. Debido a la alta viscosidad del magma, los flujos de lava no suelen recorrer grandes distancias, lo que reduce su peligrosidad en comparación con otros fenómenos volcánicos. En este sentido, su alcance no llega al distrito de Paucarpata, pero sí podría afectar las zonas altas de los distritos de Mariano Melgar, Chiguata y Miraflores.

6.5 Caída de cenizas

La simulación numérica por caída de ceniza se llevó a cabo utilizando el *software* Ash3D, el cual emplea un modelo atmosférico euleriano para representar el transporte, dispersión y deposición de tefra. Este modelo divide la atmósfera en una malla tridimensional de celdas y calcula el flujo de masa a través de sus bordes, simulando cómo la tefra es inyectada desde la columna eruptiva y transportada por los vientos (Mastin et al., 2009). Los principales parámetros de entrada para Ash3D son los siguientes:

- Hora de inicio de la erupción (formato UTC: aaaa-mm-dd h.hh).
- Duración (en horas).
- Altura de la columna eruptiva (en km sobre el nivel del mar).
- Volumen eyectado (en km³ DRE).

En la simulación de depositación de cenizas del volcán Misti para el escenario de erupciones vulcanianas (IEV 1–2), se considera un volumen DRE de ceniza de 0.0002 km³, con una duración de una hora y una altura de columna eruptiva de 10 km sobre el nivel del mar (Tabla 6). Este volumen es similar al emitido en erupciones explosivas de tipo vulcaniano, como las registradas en el volcán

Tungurahua (Ecuador) el 14 de julio de 2006 (Bustillos & Samaniego, 2011) y en el volcán Ubinas durante los últimos 500 años (Thouret et al., 2005; Samaniego et al., 2020).

Los resultados de la simulación para este escenario muestran que la caída de cenizas podría alcanzar hasta 183 km de distancia en dirección este del volcán Misti, cubriendo por completo el distrito de Paucarpata, el cual se encuentra a escasos 16 km al sureste del cráter del volcán Misti.

Para una erupción de tipo pliniana, se considera un volumen de DRE de pómez de 0.058 km³, equivalente al volumen emitido durante la erupción del Misti ocurrida hace aproximadamente 2000 años AP (Harpel et al., 2011). En este caso, la simulación está basada en una columna eruptiva de 30 km de altura sobre el nivel del mar y una duración de cuatro horas de la erupción (Tabla 6). Los resultados de la simulación para este escenario indican que la ceniza puede desplazarse hasta una distancia de 1230 km, con direcciones predominantes hacia el este y oeste del volcán Misti. Esta dispersión cubre por completo el distrito de Paucarpata, el sur del Perú y se extiende hasta los territorios de Chile, Bolivia y Argentina.

Tabla 6. Principales parámetros ingresados al software Ash3D para la simulación caídas de ceniza.

Escenario	Volumen	Altura de pluma
	V km³	km
Vulcaniano	0.0002	10
Pliniano	0.058	30

7. Resultados: mapas de peligro y nivel de exposición

A continuación, se presentan los mapas de peligro por lahares, flujos piroclásticos, avalanchas de escombros, flujos de lava y caída de tefras del Misti para el distrito de Paucarpata. Dichos mapas han sido obtenidos con base en la simulación numérica, análisis de imágenes satelitales y datos de campo. Estos mapas muestran tres niveles de peligro: peligro alto, moderado y bajo. Sobre estos mapas se han representado las viviendas, manzanas, núcleos urbanos e infraestructuras expuestos frente a los peligros volcánicos antes mencionados.

7.1 Mapa de peligros por lahares

El mapa de peligros muestra tres zonas de peligro definidas en función de distintos volúmenes de

flujo simulados, las mismas que se describen a continuación:

- Zona de peligro alto

Representada en color rojo, corresponde al área ubicada en ambas márgenes de las quebradas que atraviesan el distrito de Paucarpata. Esta zona podría verse afectada por lahares con volúmenes cercanos a $1.5 \times 10^5 \text{ m}^3$, como se muestra en la Figura 19. Los flujos podrían extenderse más allá del distrito de Paucarpata. La probabilidad de ocurrencia de lahares con dicho volumen es alta, especialmente durante temporadas de lluvias intensas o en caso de una erupción de tipo vulcaniana (IEV 1-2).

- Zona de peligro moderado

Colinda inmediatamente con la zona de alto peligro. Está representada en color naranja y abarca áreas también ubicadas sobre quebradas del distrito, susceptibles a ser afectadas por lahares de hasta $5 \times 10^5 \text{ m}^3$. Aunque su probabilidad de ocurrencia es moderada, lahares con dicho

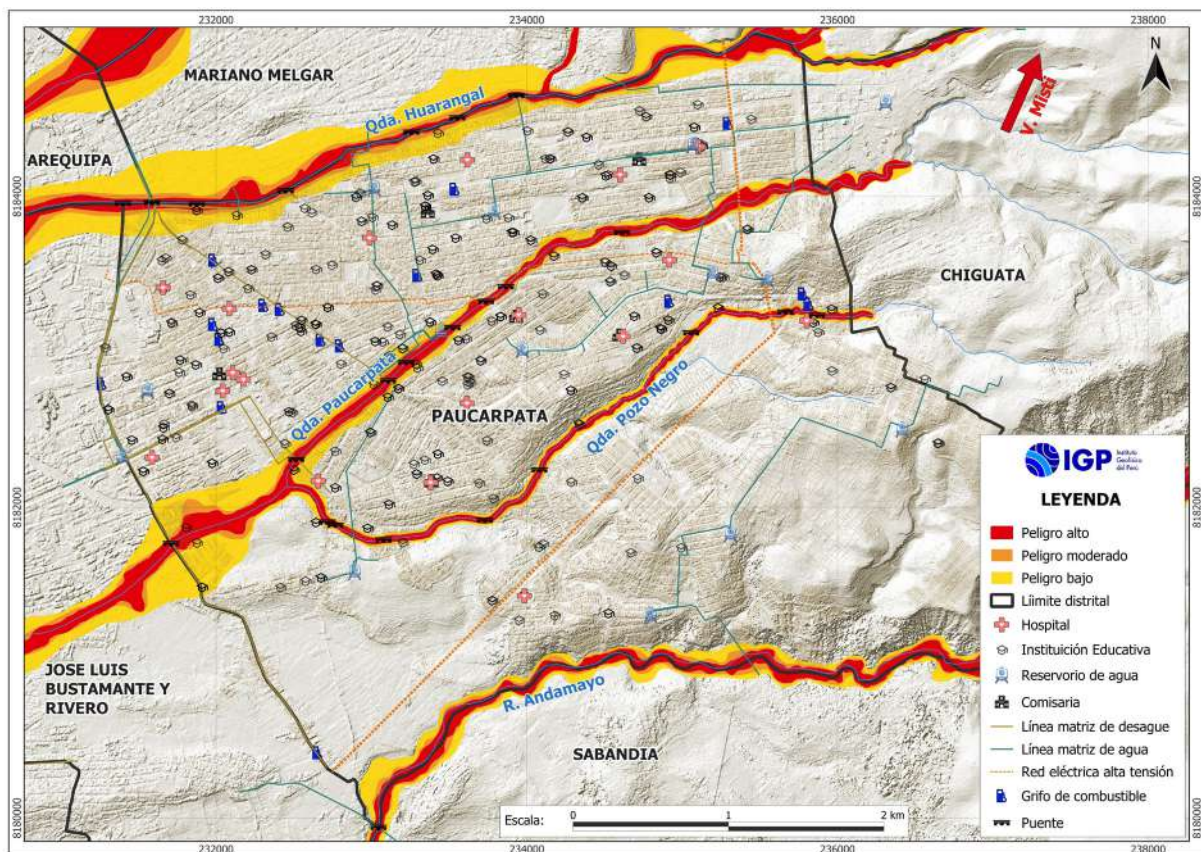


Figura 19. Mapa de peligro por descenso de lahares del distrito de Paucarpata.

volumen tendrían un mayor alcance, afectando no solo el distrito de Paucarpata, sino también el distrito de José Luis Bustamante y Rivero, y otros. Este escenario es compatible con erupciones pasadas del Misti de IEV 1–2, como la registrada en el siglo XV (Thouret et al., 2001).

- **Zona de peligro bajo**

Representada en color amarillo, corresponde a una zona que podría ser potencialmente afectada por lahares de gran volumen, del orden de $10 \times 10^5 \text{ m}^3$. La probabilidad de ocurrencia es baja, aunque estos volúmenes podrían generarse en caso de una erupción de tipo pliniana ($\text{IEV} \geq 3$). En este escenario, los lahares podrían alcanzar y canalizarse a lo largo del río Chili, con una extensión superior a 25 km del volcán Misti.

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

A partir de datos de campo, análisis de imágenes satelitales y los resultados de la simulación del descenso de lahares en el distrito de Paucarpata, así como de la información del último censo del INEI (2018), se han identificado núcleos urbanos, viviendas e infraestructuras que se encuentran expuestos al peligro por lahares.

Las áreas expuestas al peligro por lahares fueron categorizadas en tres niveles de exposición: alto (rojo), moderado (anaranjado) y bajo (amarillo), representados en la Figura 20. En dichas zonas se identificaron 77 núcleos urbanos que comprenden 3903 viviendas, distribuidas según los niveles de exposición descritos (Tabla 7).

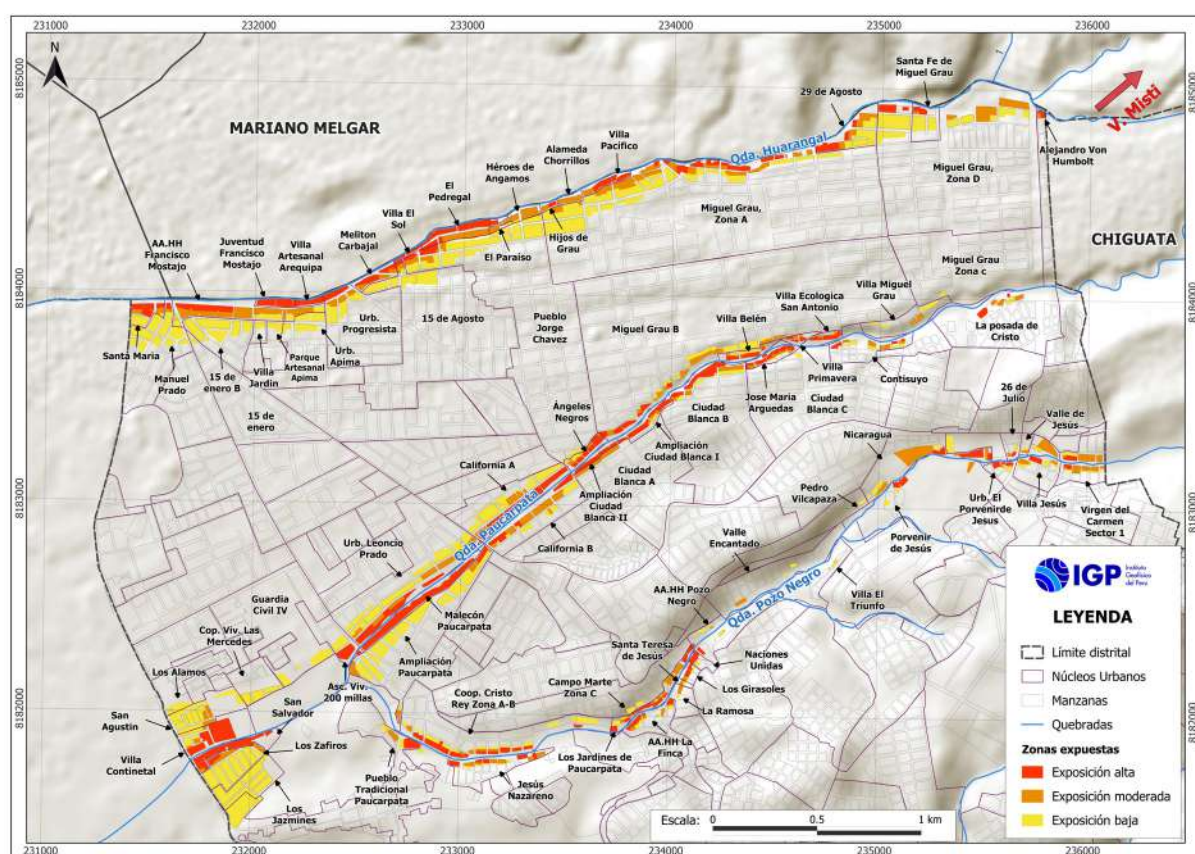


Figura 20. Mapa de peligro por descenso de lahares del distrito de Paucarpata.

Tabla 7. Exposición de núcleos urbanos y viviendas ante el peligro por descenso de lahares en el distrito de Paucarpata.

Exposición de núcleos urbanos, habitantes y viviendas ante el peligro por descenso de lahares en el distrito de Paucarpata								
n.º	Núcleo Urbano	Quebrada	Viviendas	Peligro alto	Viviendas	Peligro moderado	Viviendas	Peligro Bajo
1	Alejandro Von Humbolt	Huarangal	7	X	8	X		
2	Santa Fe de Miguel Grau	Huarangal	2	X	3	X	15	X
3	Miguel Grau Zona D	Huarangal	8	X	21	X	64	X
4	29 de Agosto	Huarangal	16	X	27	X	56	X
5	Miguel Grau Zona A	Huarangal	46	X	150	X	457	X
6	Alameda Chorrillos	Huarangal			13	X	13	X
7	Villa Pacifico	Huarangal	19	X	30	X		
8	Hijos de Grau	Huarangal	3	X	7	X		
9	Héroes de Angamos	Huarangal			30	X	34	X
10	El Paraíso	Huarangal			8	X	17	X
11	El Pedregal	Huarangal	13	X	43	X	43	X
12	Villa El Sol	Huarangal	15	X	15	X	15	X
13	Pueblo Jorge Chavez	Huarangal	13	X	31	X	203	X
14	15 de Agosto	Huarangal	6	X	11	X	58	X
15	Melitón Carbajal	Huarangal	21	X	36	X	40	X
16	Urb. Progresista	Huarangal	12	X	32	X	82	X
17	Villa Artesanal Arequipa	Huarangal	21	X	21	X	21	X
18	Villa Jardin	Huarangal					6	X
19	Urb. Apima	Huarangal					16	X
20	Parque Artesanal Apima	Huarangal		X			7	X
21	Juventud Francisco Mostajo	Huarangal	27	X	27	X	27	X
22	A. H Francisco Mostajo	Huarangal	29	X	112	X	162	X
23	Manuel Prado	Huarangal	4	X	7	X	123	X
24	Santa María	Huarangal	9	X	19	X	25	X
25	15 de Enero	Huarangal					9	X
26	15 de Enero B	Huarangal					90	X
27	La Posada de Cristo	Paucarpata	1	X	8	X	13	X
28	Villa Miguel Grau	Paucarpata			5	X	21	X
29	Miguel Grau Zona C	Paucarpata					9	X
30	Contisuyo	Paucarpata	12	X	27	X	48	X
31	Villa Ecológica San Antonio	Paucarpata	13	X	17	X	17	X
32	Villa Primavera	Paucarpata	8	X	12	X	12	X
33	José María Arguedas	Paucarpata	23	X	37	X	43	X

34	Villa Belén	Paucarpata	14	X	21	X	33	X
35	Ciudad Blanca B	Paucarpata	26	X	42	X	68	X
36	Ciudad Blanca C	Paucarpata					4	X
37	Miguel Grau B	Paucarpata	19	X	60	X	116	X
38	Ampliación Ciudad Blanca I	Paucarpata	33	X	58	X	65	X
39	Ampliación Ciudad Blanca II	Paucarpata	25	X				
40	Ciudad Blanca A	Paucarpata			19	X		
41	Pueblo Jorge Chávez	Paucarpata					11	X
42	Ángeles Negros	Paucarpata	31	X	44	X	54	X
43	California B	Paucarpata	12	X	54	X	90	X
44	California A	Paucarpata	41	X	56	X	113	X
45	Urb. Leoncio Prado	Paucarpata	41	X	96	X	214	X
46	Malecón Paucarpata	Paucarpata	71	X	71	X	71	X
47	Ampliación Paucarpata	Paucarpata	10	X	20	X	177	X
48	Asoc. Viv. 200 Millas	Paucarpata	8	X	8	X	18	X
49	Guardia Civil IV	Paucarpata-Pozo Negro					14	X
50	Las Mercedes	Paucarpata-Pozo Negro					34	X
51	San Agustín	Paucarpata-Pozo Negro			22	X	80	X
52	Villa Continental	Paucarpata-Pozo Negro	12	X	20	X	50	X
53	San Salvador	Paucarpata-Pozo Negro	72	X	76	X	76	X
54	Los Zafiros	Paucarpata-Pozo Negro	8	X	30	X	161	X
55	Los Jazmines	Paucarpata-Pozo Negro					151	X
56	Los Álamos	Paucarpata-Pozo Negro					14	X
57	Virgen del Carmen Sector 1	Pozo Negro	12	X	29	X	49	X
58	Valle de Jesús	Pozo Negro			4	X	8	X
59	Villa Jesús	Pozo Negro	7	X	17	X	45	X
60	26 de Julio	Pozo Negro	5	X	7	X	15	X
61	Porvenir de Jesús	Pozo Negro	5	X	7	X	14	X
62	Nicaragua	Pozo Negro	13	X	13	X	26	X
63	Patrimonio Cultural	Pozo Negro	3	X	4	X	7	X
64	Pedro Vilcapaza	Pozo Negro					6	X
65	Valle Encantado	Pozo Negro					11	X
66	Villa El Triunfo	Pozo Negro					7	X
67	A. H. Pozo Negro	Pozo Negro	3	X	4	X	17	X
68	Naciones Unidas	Pozo Negro	7	X	7	X	13	X
69	Los Girasoles	Pozo Negro	7	X	9	X	19	X

- Zonas urbanas próximas a la quebrada Huarangal

En ambos márgenes de la quebrada Huarangal, dentro de la jurisdicción del distrito de Paucarpata, se identificaron 26 núcleos urbanos que, en conjunto, albergan 271 viviendas ubicadas en zonas de alto peligro, 651 viviendas en zonas de peligro moderado y 1583 viviendas en zonas de peligro bajo (Figura 21).



Figura 21. Fotografías de las zonas urbanas expuestas al peligro por descenso de lahares en la quebrada Huarangal. A) Núcleo urbano Miguel Grau, Zona A. B) Núcleo urbano 29 de Agosto.

- Zonas urbanas próximas a la quebrada Paucarpata (III torrentera)

En ambos márgenes de la quebrada Paucarpata, dentro de la jurisdicción del distrito de Paucarpata, se identificaron 22 núcleos urbanos que, en conjunto, albergan 388 viviendas ubicadas en zonas de alto peligro, 655 viviendas en zonas de

peligro moderado y 1197 viviendas en zonas de bajo peligro (Figura 22).

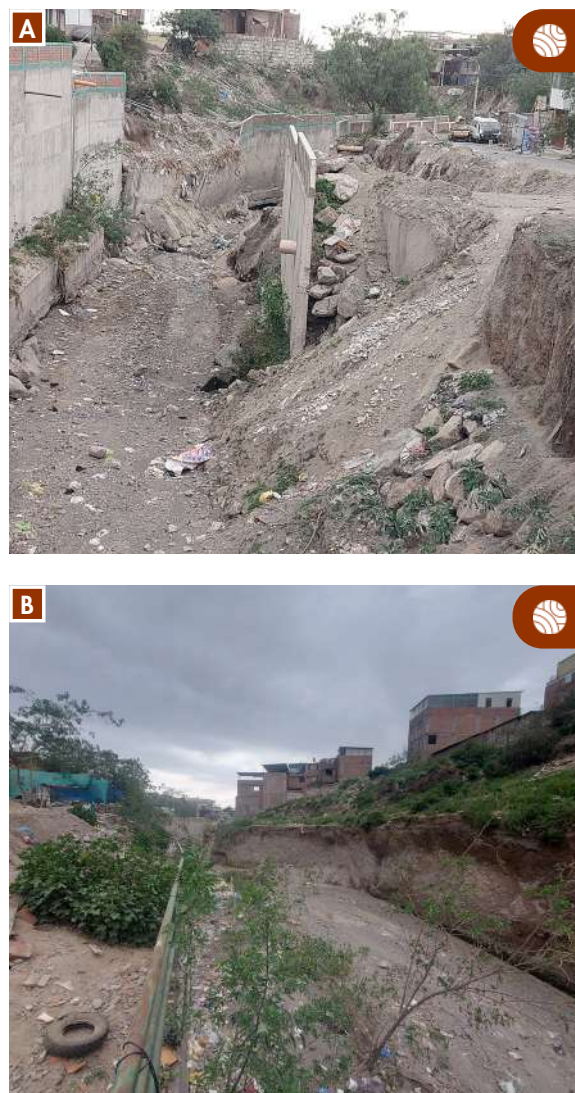


Figura 22. Fotografías de las zonas urbanas expuestas al peligro por descenso de lahares en la quebrada Paucarpata. A) Núcleo urbano Villa Belén, Zona A. B) Núcleo urbano José María Arguedas.

- Zonas urbanas próximas a la confluencia de las quebradas Paucarpata-Pozo Negro

En las inmediaciones de la confluencia de las quebradas Paucarpata y Pozo Negro, dentro de la jurisdicción del distrito de Paucarpata, se identificaron ocho núcleos urbanos que, en conjunto, albergan 92 viviendas ubicadas en zonas de alto peligro, 148 viviendas en zonas de peligro moderado y 580 viviendas en zonas de bajo peligro (Figura 23).



Figura 23. Fotografía de la zona urbana expuesta al peligro por descenso de lahares en las quebradas Paucarpata-Pozo Negro, correspondiente al núcleo urbano Pueblo Tradicional de Paucarpata.

- Zonas urbanas próximas a la quebrada Pozo Negro (IV torrentera)

En ambos márgenes de la quebrada Pozo Negro, dentro de la jurisdicción del distrito de Paucarpata, se identificaron 21 núcleos urbanos que, en conjunto, albergan 151 viviendas ubicadas en zonas de alto peligro, 267 viviendas en zonas de peligro moderado y 543 viviendas en zonas de bajo peligro (Figura 24).



Figura 24. Fotografía de la zona urbana expuesta al peligro por descenso de lahares en la quebrada Pozo Negro. A) Núcleo urbano Nicaragua. B) Núcleo urbano Cooperativa Cristo Rey.

7.1.2 Infraestructura expuesta al peligro por descenso de lahares

En el distrito de Paucarpata se identificaron diversas obras e infraestructuras expuestas al peligro por descenso de lahares. Entre ellas, se encuentran 5 vías, 30 puentes (vehiculares y peatonales), 3 tuberías de agua y desagüe, 1 badén, 27 instituciones educativas y 2 centros de salud (Tabla 8).

Tabla 8. Obras de infraestructura expuestas al peligro por descenso de lahares en el distrito de Paucarpata.

Lugar	Características
Vía vehicular y peatonal	Se han identificado cinco vías próximas a las quebradas Huarangal, Paucarpata, Pozo Negro y tributarias a Pozo Negro.
Puente vehicular c/s paso peatonal integrado	Se han identificado 30 puentes que atraviesan las quebradas Huarangal, Paucarpata, Pozo Negro y tributarias a Pozo Negro.
Tubería de agua y desagüe	Se han identificado tres tuberías de agua o desagüe entre las quebradas Huarangal, Paucarpata y Pozo Negro.
Badén	Se ha identificado un badén de concreto en la quebrada Huarangal.
Centro educativo	Se han identificado 27 instituciones educativas expuestas al peligro por lahares: Tribuno Francisco Mostajo, La Inmaculada, Madre Santa María, Jardín Santa María, Los Capullitos, Pozo Negro, Los Arbolitos, Valle Encantado, Virgen del Carmen, Juegos y Sonrisas, Caminitos, María de Jesús, San Martín de Porres, Santa Ana, Divina Providencia de Jesús, Jولة Divino Niño, Estrellitas de Colores, Villa Jesús, Monseñor José L. Del Carpio, Latinoamericano, Amigos de Cristo, Reina del Mundo, John F. Kennedy, Corazones Puros, Los Angelitos, Mi Pequeño Universo y Jacob.
Centro de salud	Se han identificado dos centros de salud expuestos al peligro por lahares: Ampliación Paucarpata y P. S. Villa Jesús.

Según la evaluación realizada, todas las obras de infraestructura están ubicadas en zona de alto peligro. En el caso de las instituciones educativas, 12 se ubican en zonas de peligro alto, 18 en peligro moderado y 27 en peligro bajo (Anexo 1). Asimismo, los 2 centros de salud se ubican en zona de bajo peligro.

En la quebrada Huarangal se han identificado diversos puentes y badenes expuestos al peligro por descenso y desborde de lahares. La ocupación urbana cercana a la quebrada, especialmente en tramos donde el cauce ha sido artificialmente reducido, representa un factor crítico de vulnerabilidad frente al descenso de lahares. Un claro ejemplo de esta situación se observa en el puente mostrado en la Figura 25, donde el cauce ha sido canalizado mediante estructuras de concreto y ha reducido su sección a 7 m de ancho. Esta configuración limita significativamente la capacidad de evacuación del flujo, aumentando el riesgo de obstrucciones, desbordes e inundaciones que podrían afectar gravemente a las viviendas y a la infraestructura urbana ubicada en las inmediaciones.



Figura 25. Puente peatonal de sección reducida ubicado entre el límite de Mariano Melgar y Paucarpata.

A lo largo de la quebrada Pozo Negro, se ha identificado una reducción progresiva de su cauce natural. Aguas arriba de dicha quebrada, el cauce presenta un ancho aproximado de 15 m; sin embargo, este se va estrechando considerablemente a medida que desciende. Como se muestra en la Figura 26, esta condición se evidencia en la existencia de un puente peatonal con un ancho de 4.5 m y una altura libre de 2 m, el cual podría ser superado por un flujo generado en temporada de lluvias o en caso de una erupción volcánica, lo cual incrementa el riesgo de inundación aguas abajo.



Figura 26. Puente peatonal de sección reducida ubicado entre el límite del núcleo urbano Jesús de Nazareno y Cooperativa Cristo Rey.

Un escenario similar se ha identificado en otro puente de concreto ubicado a lo largo de la quebrada Pozo Negro, el cual además soporta una tubería de agua para riego. Este puente (Figura 27) presenta un ancho de apenas 4 m, lo que evidencia la continua reducción del cauce aguas abajo. Esta situación no solo limita la capacidad hidráulica del cauce, sino que también incrementa significativamente el riesgo por desborde o inundación de las viviendas asentadas en sus márgenes.



Figura 27. Puente peatonal y vehicular de sección reducida ubicado entre el límite del núcleo urbano Pueblo Tradicional de Paucarpata y Cooperativa Cristo Rey.

7.2 Mapa de peligros por flujos piroclásticos

El volcán Misti tiene el potencial de generar erupciones explosivas de tipo vulcaniano (IEV 2) con emisión de flujos piroclásticos de alcance limitado. Asimismo, puede generar erupciones explosivas de alto Índice de Explosividad Volcánica (IEV 3–5) de tipo subpliniana o plinianas, con flujos piroclásticos que pueden recorrer distancias de más de 12 km respecto al cráter del Misti, tal como ocurrió en la erupción pliniana de hace 2000 años AP. Basado en simulaciones numéricas, estudios geológicos de erupciones pasadas y análisis de imágenes satelitales, se elaboró un mapa de peligros por descenso de flujos piroclásticos para el distrito de Paucarpata (Figura 28).

Dicho mapa muestra tres zonas de peligro:

- **Zona de peligro alto**

Corresponde a la zona de color rojo que se

prolonga hasta 7 km de la cima del volcán Misti. En dicha área no se distingue población ni viviendas que podrían ser afectadas por el descenso de flujos piroclásticos.

- **Zona de peligro moderado**

Corresponde a la zona de color naranja (Figura 28), la cual se prolonga hasta 14 km de la cima del volcán Misti. Esta zona comprende al curso superior de la quebrada Huarangal (sector norte del distrito de Paucarpata).

- **Zona de peligro bajo**

Corresponde a la zona de color amarillo que se prolonga hasta 17 km de la cima del volcán Misti. Dicha área ocupa aproximadamente 3.4 km² que corresponden al curso superior de la quebrada Huarangal, donde se ubican zonas urbanas del distrito de Paucarpata. El área sería afectada por flujos piroclásticos generados en erupciones de alto IEV > 3.

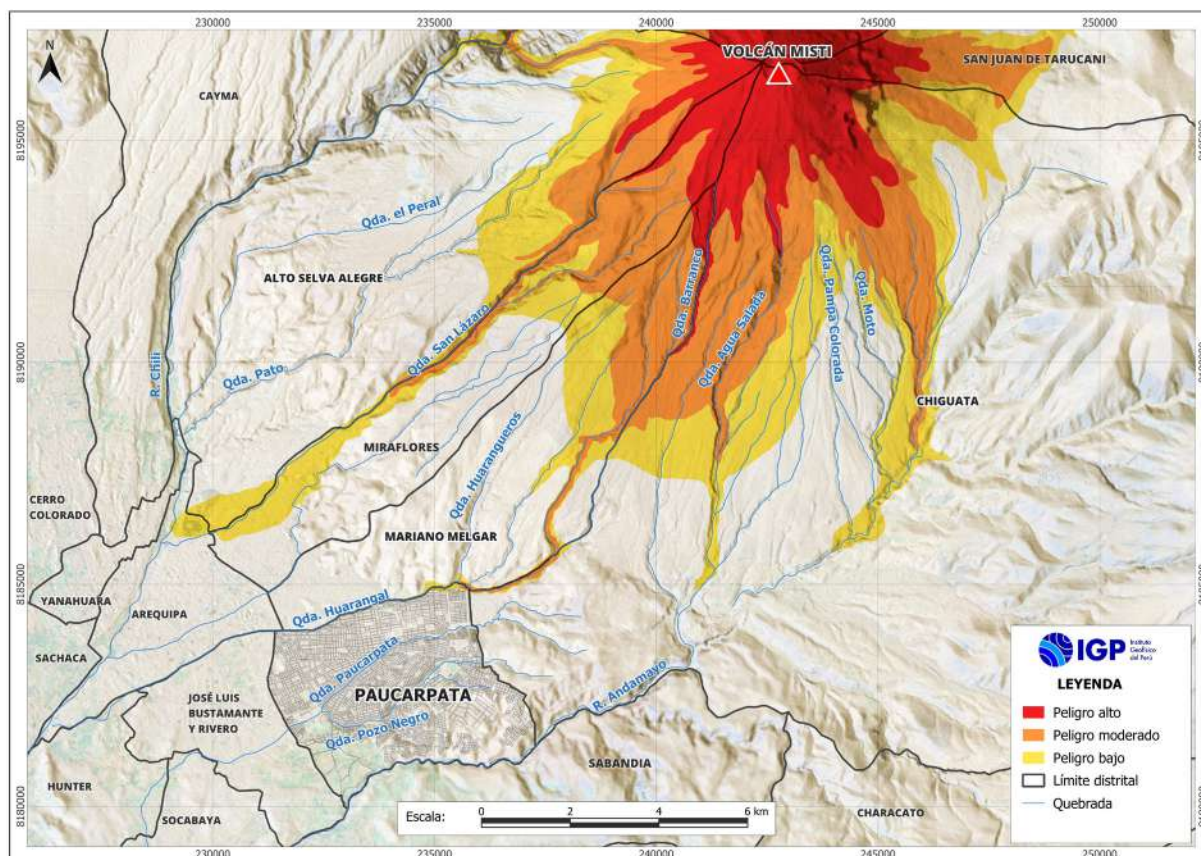


Figura 28. Mapa de peligro por descenso de flujos piroclásticos en el distrito de Paucarpata.

7.2.1 Exposición de núcleos urbanos y viviendas al peligro por descenso de flujos piroclásticos

En el mapa de peligro por flujos piroclásticos del Misti, elaborado en el marco de este estudio, se sobrepuso el catastro urbano del distrito de Paucarpata, identificando áreas urbanas expuestas al descenso de flujos piroclásticos (Figura 29). Como resultado, se identificaron

cinco núcleos urbanos ubicadas en zonas de peligro moderado a bajo (Tabla 9).

En el distrito de Paucarpata se identificaron diversos núcleos urbanos expuestos al peligro por el descenso de flujos piroclásticos del Misti. A lo largo de la quebrada Huarangal, se identificaron cinco núcleos urbanos. Respecto al nivel de exposición, se determinó que 21 viviendas se encuentran en zonas de moderado peligro y 117 viviendas se encuentran en zonas de bajo peligro.

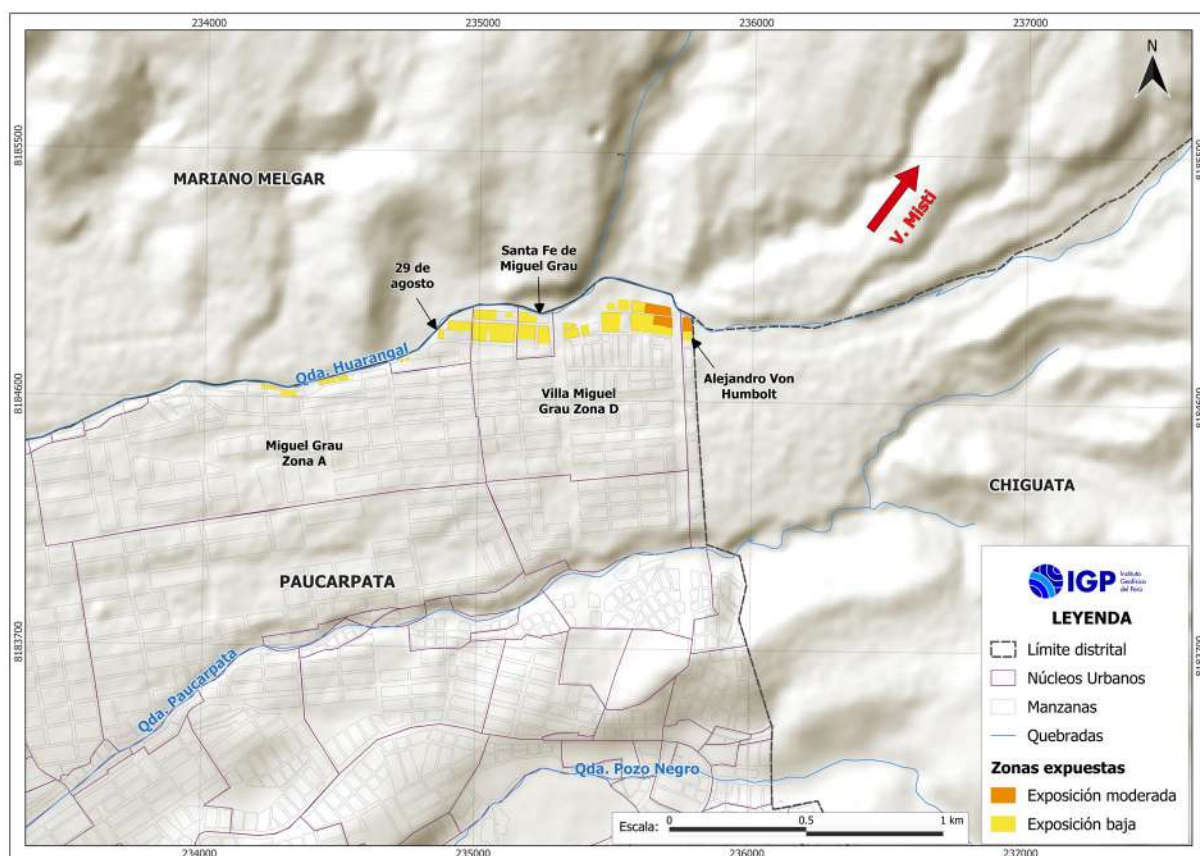


Figura 29. Mapa de zonas expuestas ante peligro por descenso de flujos piroclásticos en el distrito de Paucarpata.

Tabla 9. Exposición de núcleos urbanos y viviendas ante el peligro por flujos piroclásticos en el distrito de Paucarpata.

n.º	Núcleo Urbano	Quebrada	Viviendas	Peligro alto	Viviendas	Peligro Medio	Viviendas	Peligro Bajo
1	Alejandro Von Humbolt	Huarangal			15	X	20	X
2	Miguel Grau Zona D	Huarangal			6	X	49	X
3	Santa Fe de Miguel Grau	Huarangal					16	X
4	29 de Agosto	Huarangal					10	X
5	Miguel Grau Zona A	Huarangal					22	X

7.3 Mapa de peligros por avalancha de escombros

En el contexto de una posible erupción explosiva de gran magnitud del volcán Misti ($IEV > 3$), existe la posibilidad que se produzca el colapso o derrumbe de un sector del flanco sur o suroeste del volcán. Este fenómeno podría generar avalanchas de escombros que alcanzarían distancias superiores a 5 km desde la cima, lo cual representaría un riesgo significativo para las áreas circundantes.

Basándose en datos de campo y simulaciones numéricas, se ha elaborado un mapa de peligros por avalancha de escombros (Figura 30), en el cual se identifican tres zonas de peligro que han sido determinadas por diferentes volúmenes de material movilizado:

- Zona de peligro alto

Corresponde a la zona de color rojo, la cual se prolonga hasta una distancia de hasta 13 km desde la cima del volcán. Las simulaciones

realizadas muestran que en esta zona las avalanchas alcanzarían velocidades de hasta 80 m/s durante el primer minuto, disminuyendo progresivamente hasta una velocidad promedio de 0.5 m/s al final de su recorrido.

- Zona de peligro moderado

Indicada en color naranja, esta zona se prolonga entre 6 km y 14 km desde el cráter. Las simulaciones realizadas muestran que las avalanchas en esta zona podrían alcanzar velocidades máximas de 76 m/s en el primer minuto, reduciéndose a una velocidad promedio de 1 m/s al concluir su trayecto.

- Zona de peligro bajo

Representada en color amarillo, esta zona se prolonga entre 7 km y 15 km desde la cima del volcán. Las simulaciones realizadas muestran que las avalanchas en esta zona alcanzarían velocidades máximas de hasta 80 m/s en el primer minuto, disminuyendo a una velocidad promedio de 1.5 m/s al final de su recorrido.

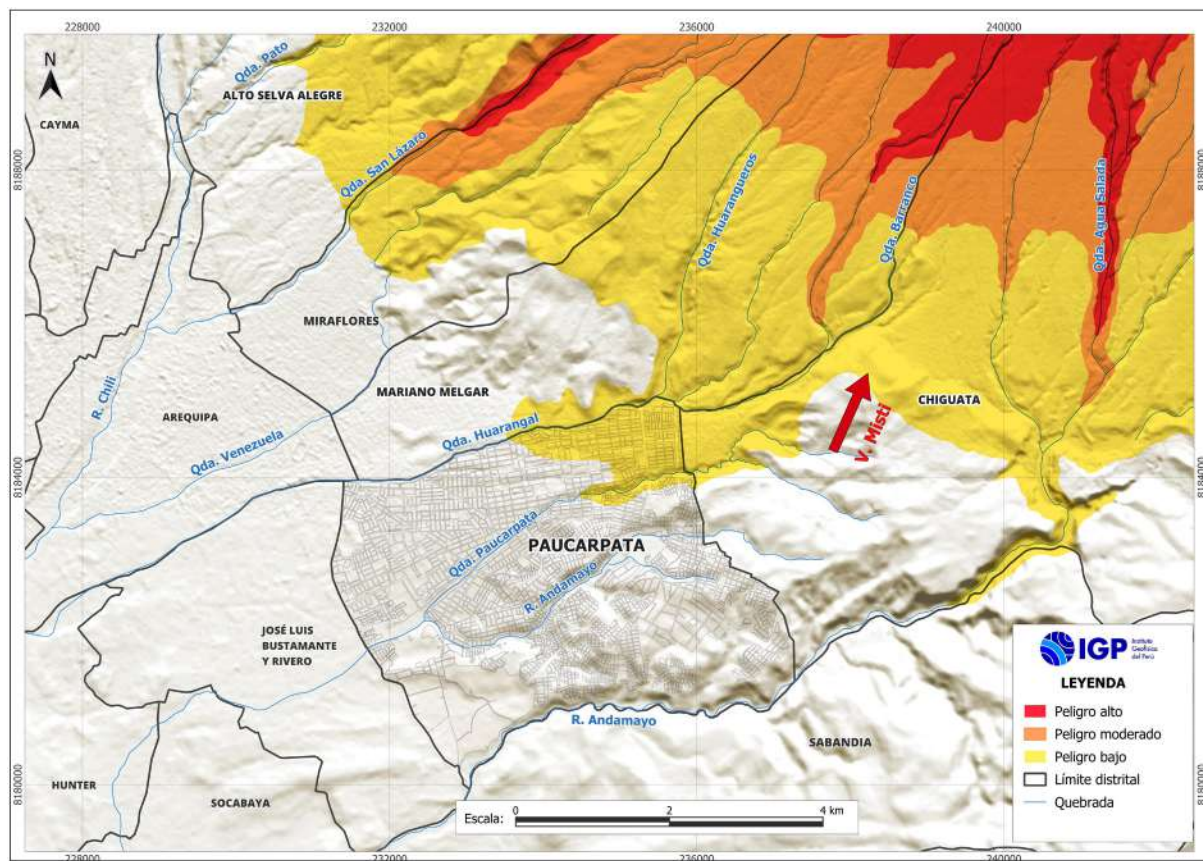


Figura 30. Mapa de peligro por avalancha de escombros para el distrito de Paucarpata.

7.3.1 Exposición de núcleos urbanos y viviendas al peligro por avalanchas de escombros

- Zonas urbanas expuestas al peligro por avalancha de escombros

En el mapa de peligro por avalancha de escombros del volcán Misti se sobrepuso el catastro urbano del distrito de Paucarpata, identificándose áreas urbanas expuestas a dicho peligro (Figura 31). Como resultado, se identificaron 18 núcleos urbanos expuestos a un peligro bajo (Tabla 10).

Se identificaron 18 núcleos urbanos que, en conjunto, albergan 4562 viviendas ubicadas en zonas de bajo peligro.

Tabla 10. Exposición de núcleos urbanos y viviendas ante el peligro por avalancha de escombros en el distrito de Paucarpata.

n.º	Núcleos Urbanos	Viviendas	Peligro alto	Viviendas	Peligro Moderado	Viviendas	Peligro Bajo
1	Miguel Grau D					1200	X
2	Santa Fe de Miguel Grau					33	X
3	29 de Agosto					56	X
4	Alejandro Von Humbolt					116	X
5	Miguel Grau Zona A					1295	X
6	Villa Pacifico					29	X
7	Miguel Grau Zona C					529	X
8	Nueva Carabaya					54	X
9	La Posada de Cristo					476	X
10	Mariscal Nieto					59	X
11	Villa Miguel Grau					64	X
12	Miguel Grau Zona B					400	X
13	Contisuyo					111	X
14	Villa Ecológica San Antonio					24	X
15	Villa Primavera					13	X
16	José María Arguedas					25	X
17	Ciudad Blanca D					12	X
18	Ciudad Blanca C					66	X

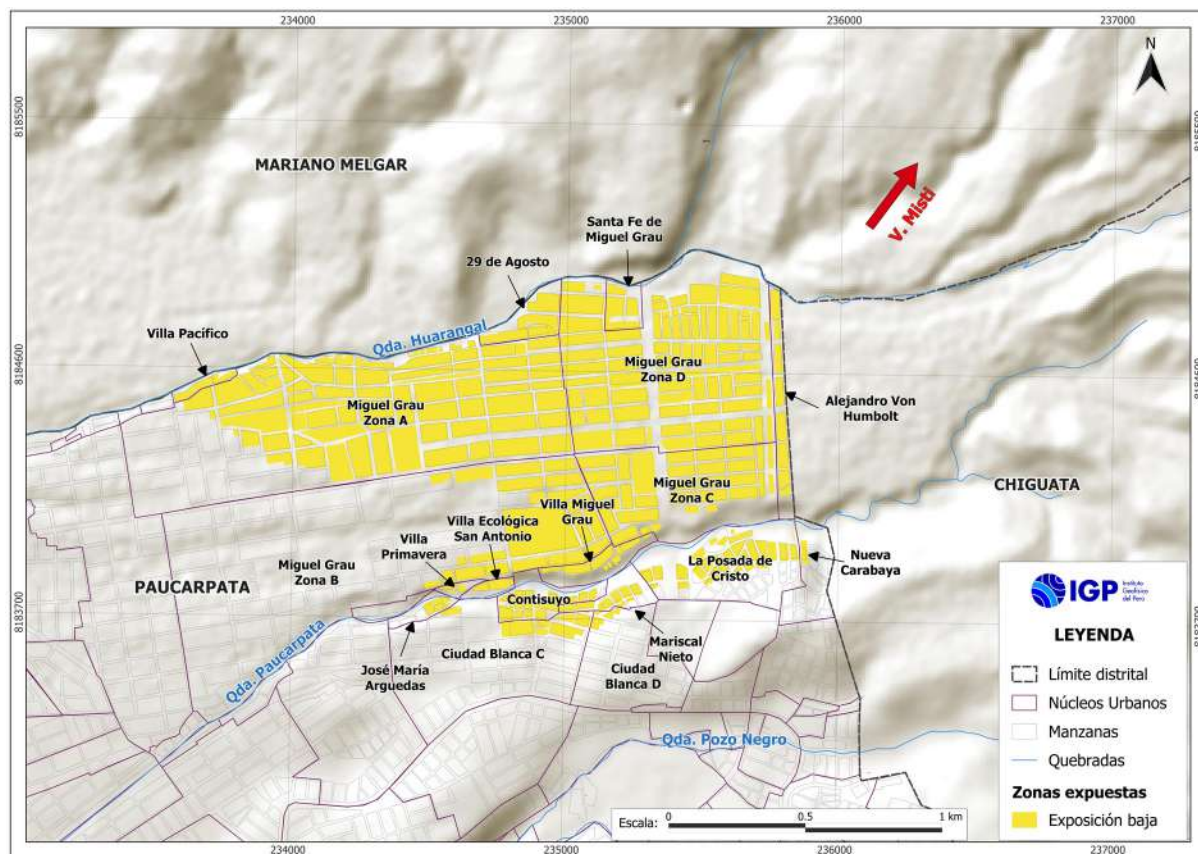


Figura 31. Mapa de zonas expuestas al peligro por avalancha de escombros en el distrito de Paucarpata.

7.3.2 Exposición de infraestructura expuesta al peligro por avalanchas de escombros

Se identificaron diversas obras de infraestructuras expuestas al peligro por el descenso de avalancha de escombros. Entre ellas, se encuentran 1 reservorio de agua, 1 comisaría, 34 instituciones educativas y 3 centros de salud (Tabla 11). Del total evaluado, todas las infraestructuras están ubicadas en zona de peligro bajo.

Tabla 11. Características de infraestructura expuesta.

Lugar	Características
Reservorio de agua	Se ha identificado un reservorio en el núcleo urbano Miguel Grau.
Comisaría	Se ha identificado una comisaría: CPNP Miguel Grau.
Instituciones Educativas	Se han identificado 34 instituciones educativas expuestas: American School, Ángeles de Dios, Benjamín, Capullitos, College Talentos, Copitos de Nieve, Corazón del Divino Niño, De la Mano con María, Dios es Amor, Estrellitas, Gabriela Mistral, Gran Maestro, Juan Pablo II, Juan XXIII, La Posada de Cristo, Los Angelitos, María Inmaculada, María Montessori, Miguel Grau, Miguel Grau A, Montserrat, Niño Divino, Niño Jesús, Niño Pastor, Niñitos De María, Nuestra Señora de Lourdes, Nuestra Sra. del Perpetuo Socorro, Pequeño Arquitecto, Pequeños Corazones, Promedio 21, Sor Ana, Sor Anita De Los Ángeles, Tesoritos de Jesús, Víctor Raúl Haya de la Torre.
Centros de Salud	Se han identificado 3 centros de salud expuestos: Puesto de Salud Miguel Grau, módulo C-D, Centro de Salud Miguel Grau B y el Centro de Salud San Juan de Ciudad Blanca.

7.4 Mapa de peligros por flujos de lava

Basado en datos de campo y simulaciones numéricas realizadas en este estudio, se ha elaborado un mapa de peligros por flujos de lava (Figura 32), en el cual se identifican tres zonas de peligro asociadas a diferentes volúmenes de lava. Los resultados indican que el distrito de Paucarpata no se vería afectado por este tipo de peligro, a diferencia de otros distritos más próximos al volcán Misti. Por lo tanto, no se identifican zonas expuestas a flujos de lava del volcán Misti en el distrito de Paucarpata.

7.5 Mapa de peligros por caída de tefra

Se ha elaborado un mapa de peligro por caída de tefra del volcán Misti considerando dos escenarios eruptivos: uno de tipo vulcaniano (IEV 1–2) y otro de tipo subpliniano a pliniano (IEV 3–5).

7.5.1 Erupción vulcaniana (IEV 1–2)

Este mapa muestra tres zonas de peligro (Figura 33):

- **Zona de peligro alto**

Corresponde al área proximal, la cual se prolonga hasta una distancia de 10 km alrededor del volcán Misti, donde la caída de tefra podría formar capas de hasta 5 cm de espesor. Estos valores son coherentes con los depósitos observados de la erupción del Misti ocurrida entre los años 1440 y 1470 (IEV 2) (Thouret et al., 2001). La dispersión de ceniza podría alcanzar el distrito de Paucarpata.

- **Zona de peligro moderado**

Corresponde a la zona ubicada de manera colindante con la zona de peligro alto. Se prolonga entre 10 km y 30 km desde el cráter, donde se podrían acumular capas de ceniza de algunos milímetros a centímetros de espesor. Este patrón es similar al registrado durante la erupción del volcán Ubinas entre 2006 y 2009 (IEV 2), que dejó depósitos de ceniza de aproximadamente 1 mm a 30 km del cráter (Rivera et al., 2014).

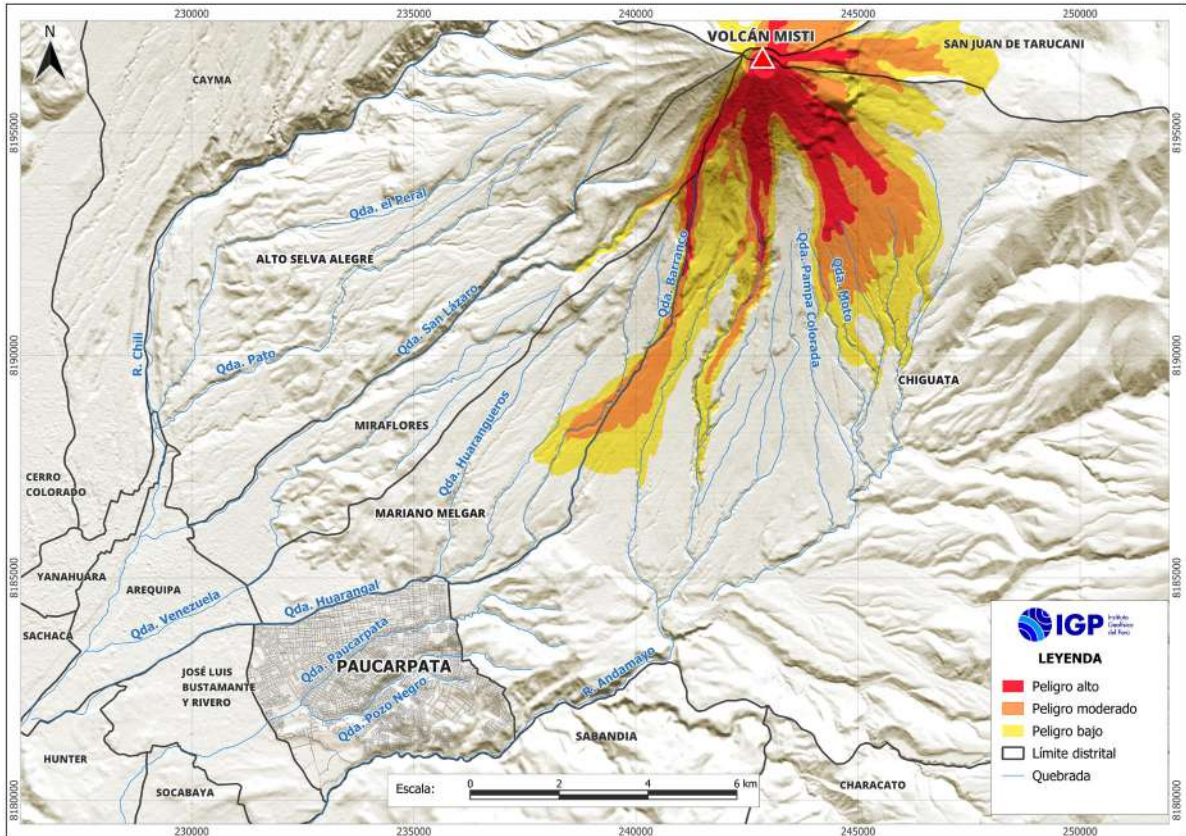


Figura 32. Mapa de peligros por flujos de lava para el distrito de Paucarpata. Los flujos de lava no alcanzan las zonas urbanas del distrito.

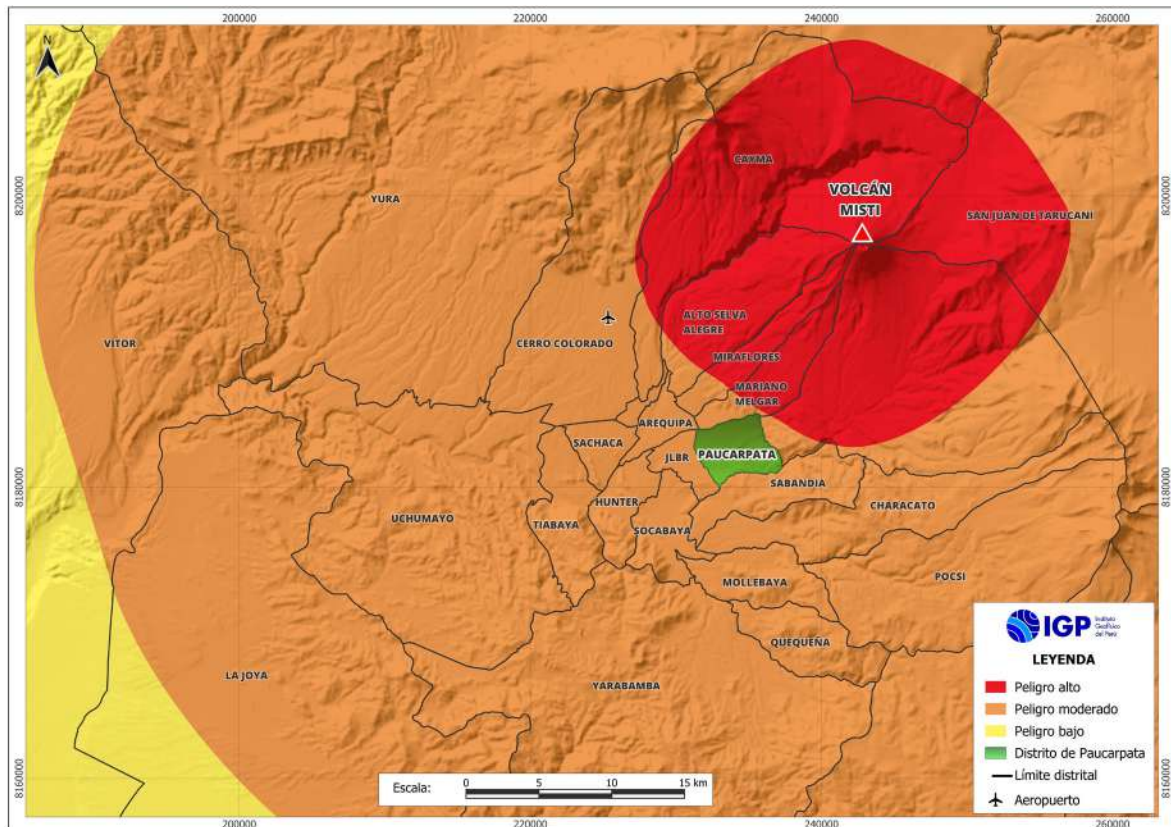


Figura 33. Mapa de peligro por caída de tefra para un escenario de erupción vulcaniana (IEV 1-2), modificado de Rivera et al. (2024).

- **Zona de peligro bajo**

Corresponde a la zona ubicada inmediatamente después de la zona de moderado peligro. Esta zona se prolonga entre 30 km y 60 km desde el volcán, donde la caída de tefra podría formar capas de menos de 1 mm de espesor. Durante la erupción del volcán Ubinas en 2019, 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 Erupción subpliniana a pliniana (IEV 3–5)

El mapa de peligros por erupción subpliniana a pliniana muestra tres zonas de peligro: alto, moderado y bajo. La zona de peligro alto (rojo) alcanza hasta una distancia superior a los 100 km desde el cráter del Misti, donde pueden caer tefras que formarían capas con espesores mayores de 40 cm. Estos resultados son coherentes con los depósitos de ceniza correspondientes a la erupción

subpliniana del volcán Yucamane (Tacna) que tuvo un IEV 3, ocurrida hace 3085 años AP. Después de esta erupción se observó la presencia de depósitos de lapilli de pómez de similar espesor en áreas aledañas a dicho volcán (Rivera et al., 2020). Es preciso señalar que estos depósitos alcanzan en su integridad al distrito de Paucarpata.

En caso de una erupción pliniana, la zona del distrito de Paucarpata puede ser cubierta por una capa de pómez de más de 30 cm de espesor (Figura 34). Basado en los espesores del depósito de lapilli de pómez dejados por la erupción Pliniana de hace 2000 años

- **Zona de peligro alto**

Corresponde al área proximal, la cual se prolonga hasta una distancia de más de 700 km alrededor del volcán Misti, donde la caída de tefra podría formar capas de más de 1 cm de espesor. Las zonas próximas al Misti pueden ser afectadas por caída de lapilli de pómez y ceniza que formarían una capa de 1 mm a 0.5 m de espesor, en un radio de 10 km

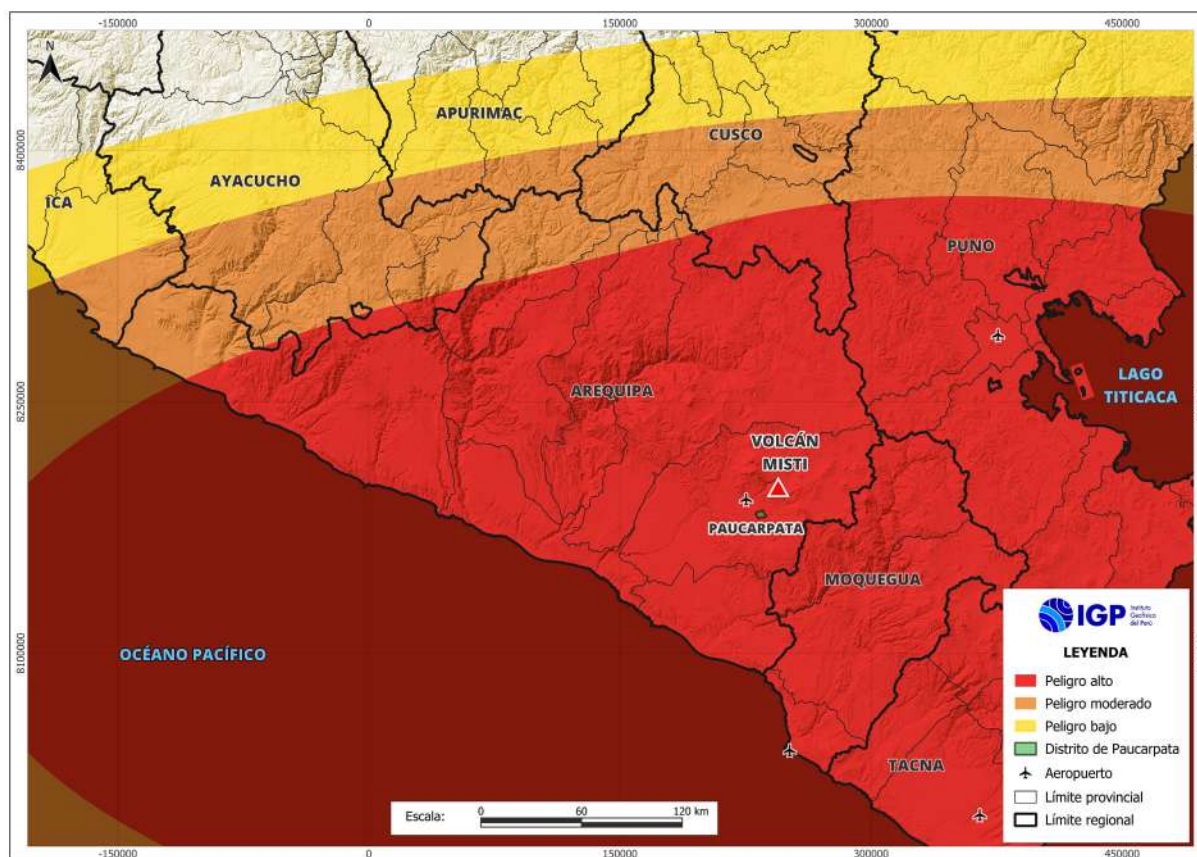


Figura 34. Mapa de peligro por caída de tefra para un escenario de erupción pliniana (IEV 5), modificado de Rivera et al. (2024).

a 12 km alrededor del volcán. El depósito de caída de lapilli de pómez “Autopista”, que corresponde a una erupción Pliniana con IEV 4 del Misti, tiene 40 cm de espesor a una distancia de 20 km al oeste del cráter (Cacya et al., 2007).

- **Zona de peligro moderado**

Corresponde a la zona ubicada de manera colindante con la zona de peligro alto. Se prolonga hasta una distancia de 990 km hacia el oeste, donde se depositaría ceniza de más de 1 mm de espesor. El depósito de lapilli de pómez del Misti denominado “Sacarosa”, correspondiente a una erupción pliniana de Misti (IEV 5) ocurrida hace aproximadamente 38 500 años AP, tiene espesores de 40 cm a 20 km al suroeste del Misti (Harpel et al., 2023).

- **Zona de peligro bajo**

Corresponde a la zona ubicada inmediatamente después de la zona de moderado peligro. Esta zona, de configuración elíptica, se prolonga a más de 1200 km desde el volcán, donde la caída de tefra podría formar capas de más de 0.1 mm de espesor. El volcán Calbuco de Chile en 2015 presentó una erupción subpliniana (IEV 4), en la cual las cenizas alcanzaron 1 mm de espesor a 510 km al noroeste de su cráter en 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 vulcaniana con un Índice de Explosividad Volcánica (IEV) entre 1 y 2, gran parte del distrito de Paucarpata se vería afectado ante la caída de ceniza. En dicho distrito están expuestos a la caída de ceniza (peligro moderado y bajo) aproximadamente 131 346 habitantes. Este peligro afectaría casi todas las viviendas, centros educativos, establecimientos de salud, vías de comunicación, puentes peatonales y vehiculares, reservorios, grifos y comisarías. La afectación no se limitaría únicamente al distrito de Paucarpata, sino que abarcaría también a los demás distritos próximos al volcán Misti. En estas condiciones, la población estaría expuesta a impactos en su salud, principalmente afecciones

respiratorias por la inhalación de ceniza, contaminación de fuentes de agua y daños en cultivos agrícolas, entre otros efectos adversos.

En un escenario de erupción subpliniana a pliniana (IEV 3–5), se prevé la deposición de pómez o fragmentos de roca con tamaños de entre 2 mm y 64 mm que afectarían a todo el distrito de Paucarpata y a distritos colindantes. El material volcánico acumulado en la zona de Paucarpata tendría entre 20 cm y 60 cm de espesor, lo cual generarían consecuencias graves para la salud de los pobladores, alta contaminación de recursos hídricos, interrupción de la actividad agrícola, afectación de viviendas e infraestructura, y obstrucción del tránsito vehicular y peatonal. Bajo estas condiciones, Paucarpata y las zonas aledañas al volcán Misti deben considerar la implementación de medidas preventivas dado que este escenario representa un alto nivel de exposición para el desarrollo urbano y social de la población.

8. Aportes a un plan de gestión reactiva•

Si bien los planes de acción frente a un eventual proceso eruptivo del volcán Misti que afecte a los distritos de Arequipa, entre ellos Paucarpata, aún presentan un nivel limitado de preparación, este estudio aporta significativamente a su fortalecimiento mediante la incorporación de medidas técnico-científicas específicas para prevenir o mitigar daños o impactos. Entre ellas destacan la representación de las zonas de peligro volcánico en Paucarpata, el diseño de etapas de evacuación, la identificación de puntos de concentración, la delimitación de rutas de evacuación y la propuesta de zonas de albergue temporal en caso de que ocurra una evacuación de la población. Estas acciones contribuyen a complementar y robustecer los futuros planes de gestión reactiva, reduciendo la incertidumbre sobre la capacidad de respuesta de la población ante un evento volcánico excepcional del Misti.

8.1 Proceso de evacuación por peligros volcánicos del Misti

La evacuación de un distrito de Arequipa ante un proceso volcánico constituye un reto logístico complejo, condicionado por múltiples variables relacionadas con la intensidad y el tipo de peligro.

En el caso del distrito de Paucarpata, una eventual evacuación de la población podría originarse por el aumento progresivo de la actividad del volcán Misti, manifestado a través de sismicidad recurrente, deformación del cono volcánico, explosiones energéticas, incremento de anomalías térmicas, entre otros parámetros geofísicos catalogados dentro de un contexto de $IEV \geq 3$. Ante este escenario, el Instituto Geofísico del Perú (IGP) emitirá informes técnicos oportunos con proyecciones y recomendaciones sobre el alcance de la actividad volcánica y los peligros asociados.

En caso de una erupción vulcaniana, la totalidad del distrito de Paucarpata está expuesta a la caída de cenizas, mientras que un sector al descenso de lahares. Asimismo, en caso de una erupción subpliniana a pliniana, la población está expuesta a la caída de tefras, lahares y, eventualmente, al descenso de flujos piroclásticos. La evacuación se daría en caso de un escenario

de erupción explosiva importante, por ejemplo, en un escenario de tipo subpliniana o pliniana.

Con base en los mapas de peligro del Misti y al plano catastral, se propone un plan de evacuación del distrito de Paucarpata que organiza a la población en núcleos urbanos distribuidos en diferentes sectores. Cada grupo deberá desplazarse hacia puntos de concentración seguros, desde donde serán trasladados mediante unidades de transporte hacia zonas de albergue establecidas fuera de la ciudad de Arequipa. Las rutas de evacuación fueron definidas a partir de inspecciones de campo en la red vial del distrito y en coordinación con las autoridades locales.

El modelo planteado en la Tabla 12 es flexible y puede aplicarse según las condiciones reales que se presenten en el momento de la emergencia.

8.2 Puntos de concentración (PC)

Los puntos de concentración son espacios abiertos, previamente identificados y clasificados como seguros, destinados a albergar temporalmente a las personas durante una evacuación ante un incremento de la actividad volcánica del Misti, antes de su traslado hacia una zona de albergue.

La selección de puntos de concentración es una medida clave en la planificación para la evacuación segura de la población. Los criterios para su elección fueron los siguientes:

- Ubicación fuera de zonas expuestas al peligro inmediato.
- Los accesos vehiculares y peatonales deben de encontrarse en buenas condiciones y cercanas a las vías de evacuación establecidas, permitiendo la factibilidad logística.
- Contar con capacidad y espacio suficientes, preferentemente en espacios abiertos y amplios (como estadios, plazas o campos deportivos).
- Ser espacios abiertos, evitando coberturas
- El área debe presentar pendientes moderadas, evitando topografías agrestes, de modo que se reduzca el riesgo de accidentes.
- Cumplir condiciones de seguridad estructural y carecer de elementos expuestos a colapso (muros débiles, cables eléctricos, árboles grandes, etc.).

- La visibilidad y señalización deben contar con letreros visibles y permanentes ubicados en puntos de referencia conocidos por la comunidad, así como con sistemas de alerta sonora (bocinas).

Luego de un análisis realizado con integrantes de la Subgerencia de Defensa Civil y Gestión de Riesgos de Desastres de la Municipalidad de Paucarpata, se proponen 16 puntos de concentración en el distrito distribuidos estratégicamente en el área urbana, considerando la probable dirección de los peligros que se originarían en las zonas altas del sector noreste. Bajo estos criterios, se efectuó la reagrupación y unificación de determinados núcleos urbanos, a fin de asignar puntos de concentración más adecuados para cada sector poblacional. El propósito fundamental de esta organización es reducir los niveles de riesgo y garantizar un proceso de evacuación rápido, seguro y eficiente.

La ubicación y características de estos puntos se detallan en la Tabla 13 y se representan gráficamente en la Figura 35 del presente informe.

Según el INEI (2020), más del 60 % de la población del distrito de Paucarpata se encuentra

en estratos socioeconómicos medio y alto, lo que implica niveles de ingreso per cápita que favorecerían una mayor capacidad de respuesta ante una situación de emergencia. En este sentido, es probable que dicha población pueda ejecutar un proceso de autoevacuación con menores dificultades sin la dependencia directa de la asistencia estatal.

8.3 Vías de evacuación

Las rutas o vías de evacuación son aquellos caminos previamente identificados como seguros ante actividad volcánica, cuya función es facilitar el traslado en el menor tiempo posible a los habitantes desde los 16 puntos de concentración hacia zonas de albergue o refugios. Estas rutas parten desde los puntos de concentración, considerados como los puntos de origen, y han sido seleccionadas tomando en cuenta la topografía y pendiente del terreno, vías principales y amplias para el paso de vehículos de transporte de pasajeros con calles que permiten un desplazamiento ágil, ordenado y eficiente (Figura 36).

Tabla 12. Tipo de actividad volcánica, exposición al peligro volcánico y recomendaciones de evacuación.

Índice de Explosividad Volcánica (IEV)	Peligro	Zona de peligro	Evacuación	Exposición	Descripción
1-2 Vulcaniana	Lahares	Alto	NO	SÍ	Viviendas e infraestructuras próximas a quebradas de Paucarpata presentan exposición. No requiere evacuación, pero sí medidas preventivas.
		Moderado	NO	SÍ	Viviendas e infraestructuras próximas a quebradas de Paucarpata presentan exposición. No requiere evacuación, pero sí medidas preventivas.
	Caída de ceniza	Moderado	NO	SÍ	La caída de ceniza tiene alcance a todo el distrito de Paucarpata y distritos vecinos.
		Bajo	NO	SÍ	La caída de ceniza tiene alcance a todo el distrito de Paucarpata y distritos vecinos.
≥3 Sub pliniana a pliniana	Lahares	Bajo	SÍ	SÍ	Viviendas expuestas en zonas próximas a las quebradas de Paucarpata. Sí requiere evacuación y la adopción de acciones de prevención.
	Flujos piroclásticos	Moderado	SÍ	SÍ	Exposición de viviendas. Sí requiere evacuación y la adopción de acciones de prevención.
		Bajo	SÍ	SÍ	Exposición de viviendas. Sí requiere evacuación y la adopción de acciones de prevención.
	Caída de ceniza	Alto	SÍ	SÍ	Todo el distrito de Paucarpata se encuentra expuesto a caídas de tefra que podrían formar capas de más de 1 cm de espesor.
		Moderado	SÍ	SÍ	Todo el distrito de Paucarpata se encuentra expuesto a caídas de ceniza que podrían alcanzar espesores de hasta 40 cm.
		Bajo	SÍ	SÍ	Todo el distrito de Paucarpata se encuentra expuesto a caídas de ceniza que alcanzarían espesores de más 40 cm.
	Avalancha de escombros	Bajo	SÍ	SÍ	Viviendas expuestas en el sector norte de Paucarpata. Sí requiere evacuación.

La identificación de las vías de evacuación se realizó mediante inspecciones de campo, en las cuales se reconocieron distintos tipos de vías según su estado: asfaltadas, afirmadas y de trocha. Es preciso mencionar que las rutas de evacuación

propuestas convergen en la Av. Hartley, al ser la vía más eficiente en alcanzar una zona de albergue; sin embargo, también se proponen vías alternas como la Av. Prolongación Mariscal Castilla y la Av. Simón Bolívar (Tabla 13).

Tabla 13. Puntos de concentración ante una erupción subpliniana a pliniana con IEV 3–4 del Misti, correspondiente al distrito de Paucarpata.

Puntos de concentración (pc)	Sectores de concentración (sc) conformados por núcleos urbanos	n.º de manzanas
PC 1: Estadio Almirante Miguel Grau	SC 1: Miguel Grau Zona C, Miguel Grau Zona D, Santa Fe de Miguel Grau.	96
PC 2: Estadio Miguel Grau	Miguel Grau Zona B, Villa Belén, Villa Primavera, Villa Ecológica San Antonio, Villa Miguel Grau.	74
PC 3: Parque 08 de octubre	SC 3: 29 de Agosto, Hijos de Grau, Alameda Chorrillos, Villa Pacífico, Miguel Grau Zona A.	72
PC 4: Estadio Pedro P. Díaz	SC 4: El Paraíso, Héroes de Angamos, El Pedregal, Villa El Sol, P. J. Jorge Chávez, A. H. Melitón Carbajal, 15 de Agosto, urbanización Progresista, Juventud Francisco Mostajo, Villa Artesanal Arequipa, A. H. Francisco Mostajo, 15 de enero B, Parque Artesanal APIMA 2.a etapa, urbanización APIMA.	167
PC 5: Parque Fortunato Carrasco	SC 5: Santa María, Manuel Prado A., Amipe, Villa María del Triunfo, Coop. 19 Porongoche, COVISEAL, Guardia Civil I, II, III y IV, San Agustín, La Colonial I, II y III, Urb. Villa Hermosa, Jesús María, Las Cucardas, Los Álamos, Villa Continental, Las Marías, Las Mercedes I y II, Las Terrazas, 200 millas.	142
PC 6: Plaza de Paucarpata	SC 6: El Punque, Jesús Nazareno, El Nazareno II, Mirador San Lucas, A. H. Los Zafiros, Pueblo Tradicional Paucarpata, Área Protegida.	81
PC 7: Estadio Máximo Carrasco Meza	SC 7: Campo Marte Zona A, Campo Marte Zona B, Campo Marte Zona C, Coop. Cristo Rey Zona A y B, Nuevo Perú, Morro de Arica, La Calerita, Los Pinos, Ampliación Paucarpata, Malecón Paucarpata.	142
PC 8: Complejo recreacional del niño	SC 8: Ampliación Ciudad Blanca, José María Arguedas, California B, Ciudad Blanca A, Ciudad Blanca B, Ciudad Blanca C, Luz y Alegría.	163
PC 9: Estadio Israel	SC 9: California B, Luz y Alegría, Ciudad Blanca, Ampliación Ciudad Blanca A, Ampliación Ciudad Blanca II, José María Arguedas, Ciudad Nueva, Ciudad Blanca C, Ciudad Israel A y B.	85
PC 10: Cancha Los Milagros	SC 10: Contisuyo, A. H. Mariscal Nieto, A. H. Carabaya, Nueva Carabaya, La Posada de Cristo, Cerrito Verde, Señor de los Milagros, El Girasol Andino, Quinta San José, Villa Machu Picchu, Villa Quinta.	126
PC 11: El cebollar	SC 11: La Isla, El Cebollar, El Cebollar Zona A y B, Virgen de Chapi A, B, C y D, Los Rosales de Paucarpata, Santa Rosa de Chiguata.	145
PC 12: Estadio Cahuaya Rosaspata	SC 12: El Progreso, Rancho Grande, Taller El Nazareno, Cerrito de Huacsapata, Cahuaya Rosaspata, Los Ángeles de Paucarpata, Señor de la Amargura, Cerrito de Huacsapata Zona B, Patrimonio Cultural INC, Villa El Triunfo.	206
PC 13: Estadio Nueva Alborada	SC 13: Los Girasoles, A. H. La Finca, A. H. Pozo Negro, Los Jardines de Paucarpata, Ampliación Tres Marías, Santa María I, Santa María II, Santa María IV, Cerro Buena Vista II, Cerro Buena Vista III, Las Tres Marías, Virgen de las Asunta, A. H. Taller Buenavista, Santo Domingo, La Quebrada, Nueva Alborada, Alto Paucarpata, Mirador La Chacrita.	321
PC 14: Parque César Vallejo I	SC 14: 15 de enero A, Cayro, Urb. Transportistas, Establo, Los Pinos, Cesar Vallejo, Manco Cápac, Fundo Kennedy, Villa Porongoche, Viña del Mar, Ulrich Neisser, Leoncio Prado, California, California A.	106
PC 15: Campo deportivo Alto Jesús	SC 15: Alto Jesús, Ampliación Alto Jesús, Lomas de Hoyón, Valle Encantado, Valle Virgen de Copacabana.	59
PC 16: Balneario de Jesús	SC 16: Villa Pichu Pichu, Girasol Andino, Villa Belén, Quinta San José, Valle de Jesús, Villa Jesús, Virgen del Carmen Sector I, Porvenir de Jesús, Virgen de Copacabana, Balneario Jesús, El Mirador de Jesús, San Antonio Abad.	95

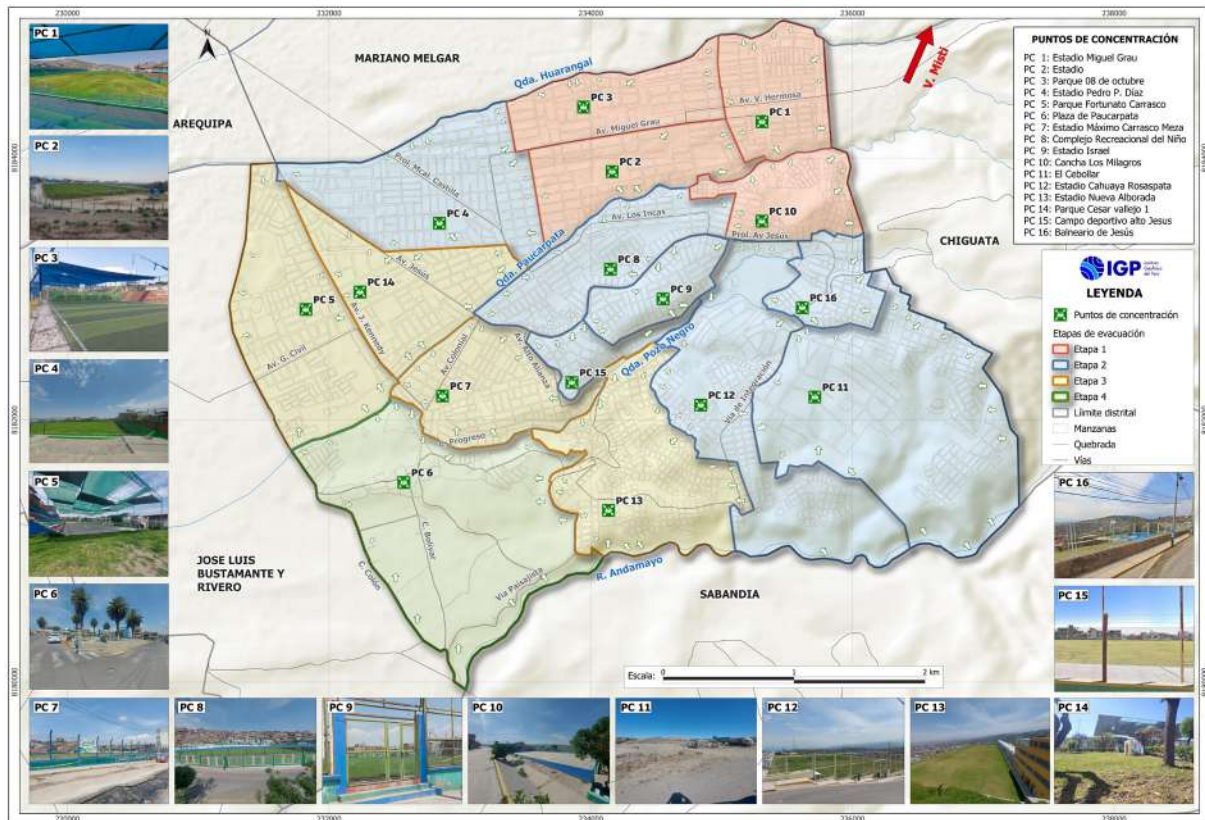


Figura 35. Ubicación de los puntos de concentración.

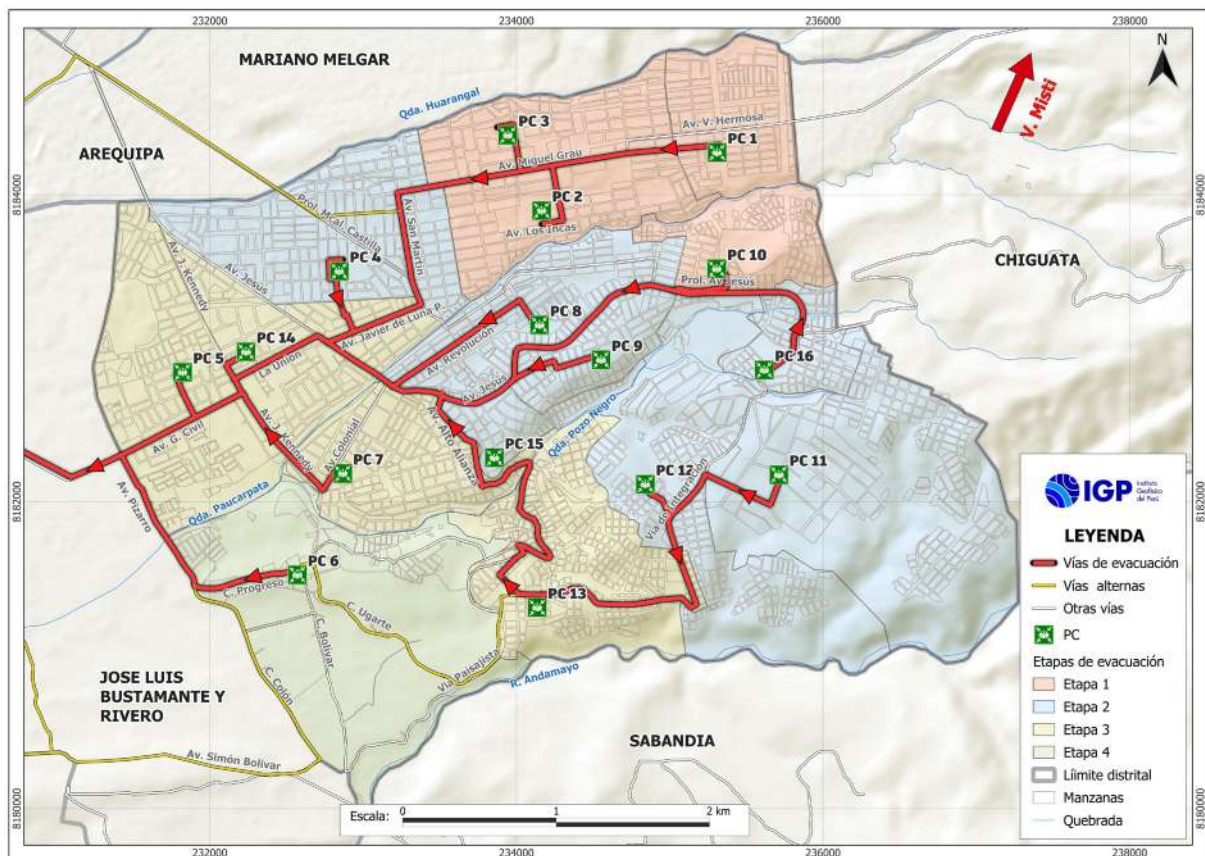


Figura 36. Rutas de evacuación ante una erupción subpliniana a pliniana con IEV 3-5 del Misti para el distrito de Paucarpata.

Tabla 14. Rutas de evacuación ante una erupción subpliniana a pliniana con IEV 3-5.

PC	Recorrido	km	Tiempo de recorrido (min)
1	Av. Miguel Grau → San Martín → Prolongación Av. Mariscal Castilla → Francisco Javier de Luna y Pizarro → Prolongación Av. Jesús → Av. Unión → Av. John F. Kennedy → Av. Guardia Civil.	7	30
2	Calle Mariscal D. Nieto → Av. Miguel Grau → San Martín → Prolongación Av. Mariscal Castilla → Francisco Javier de Luna y Pizarro → Prolongación Av. Jesús → Av. Unión → Av. John F. Kennedy → Av. Guardia Civil.	3.5	13
3	Calle 8 de octubre → Av. Miguel Grau → San Martín → Prolongación Av. Mariscal Castilla → Francisco Javier de Luna y Pizarro → Prolongación Av. Jesús → Av. Unión → Av. John F. Kennedy → Av. Guardia Civil.	3.7	14
4	Calle Emancipación → Mariátegui → Gonzáles Prada → Francisco Javier de Luna y Pizarro → Prolongación Av. Jesús → Av. Unión → Av. John F. Kennedy → Av. Guardia Civil.	2.8	9
5	Calle José Olaya → Av. Guardia Civil.	2.4	7
6	Calle Progreso → Calle Colón → Av. Pizarro → Av. Guardia Civil.	2.5	8
7	Av. Colonial → Av. John F. Kennedy → Av. Guardia Civil.	2.5	8
8	Av. Proletario → Revolución → Prolongación Av. Jesús → Av. Unión → Av. John F. Kennedy → Av. Guardia Civil.	4.6	16
9	Génesis → Damasco → Los Ángeles → Av. Jesús → Av. Unión → Av. John F. Kennedy → Av. Guardia Civil.	4.5	15
10	Calle Los Álamos → Prolongación Av. Jesús → Av. Unión → Av. John F. Kennedy → Av. Guardia Civil.	7	25
11	Vía de Integración → Pista La Alborada → Progreso → Alto de la Luna → Prolongación Av. Jesús → Av. Unión → Av. John F. Kennedy → Av. Guardia Civil.	5	25
12	Vía de Integración → Pista La Alborada → Progreso → Alto de la Luna → Prolongación Av. Jesús → Av. Unión → Av. John F. Kennedy → Av. Guardia Civil.	4.7	17
13	Vía de Integración → Pista La Alborada → Progreso → Alto de la Luna → Prolongación Av. Jesús → Av. Unión → Av. John F. Kennedy → Av. Guardia Civil.	2.6	9
14	Las Dalias → Av. Unión → Av. John F. Kennedy → Av. Guardia Civil.	1.2	5
15	Pista La Alborada → Progreso → Alto de la Luna → Prolongación Av. Jesús → Av. Unión → Av. John F. Kennedy → Av. Guardia Civil.	3.3	11
16	Vía Integración → Prolongación Av. Jesús → Av. Unión → Av. John F. Kennedy → Av. Guardia Civil.	5.8	26

8.4 Etapas de evacuación

Ya sea parcial o total, la evacuación de las áreas expuestas se ejecuta únicamente tras la emisión de la orden correspondiente por parte de las autoridades. En ese momento entran en vigor los planes de gestión reactiva previamente elaborados. En este estudio se plantean etapas de evacuación frente a una posible erupción de tipo subpliniana a pliniana ($IEV \geq 3$).

Las etapas de evacuación en el distrito de Paucarpata se han estructurado en función de núcleos urbanos agrupados según su densidad poblacional, priorizando la proximidad al volcán Misti (aproximadamente 13 km). Asimismo, se ha

considerado la configuración geomorfológica del distrito respetando los límites de urbanizaciones, asociaciones y asentamientos humanos, con el objetivo de garantizar un desplazamiento ordenado y seguro de la población en caso de emergencia (Figura 37).

Cabe señalar que la accesibilidad limitada en determinados sectores incrementa el nivel de exposición ante una posible emergencia. En diversos casos, se ha identificado la existencia de un único acceso vehicular, de dimensiones reducidas y con condiciones topográficas desfavorables, lo cual se podría mejorar o adecuar por parte de las autoridades competentes. Asimismo, el tiempo de evacuación dependerá principalmente del número de unidades de

transporte disponibles y de su capacidad para trasladar pasajeros.

En este sentido, se propone una evacuación por etapas, iniciando con la Etapa 1 y culminando con la Etapa 4 (Tabla 15), conforme al orden que se detalla a continuación:

• Etapa 1

Esta etapa comprende un total de 48 núcleos urbanos distribuidos en los puntos de concentración 4, 8, 9, 11, 12, 15 y 16, los cuales se encuentran ubicados a una distancia aproximada de 16.3 km del volcán Misti. En conjunto, estas áreas concentran una población estimada de 49 845 habitantes.

• Etapa 2

Esta etapa comprende un total de 48 núcleos urbanos distribuidos en los puntos de concentración

4, 8, 9, 11, 12, 15 y 16, los cuales se encuentran ubicados a una distancia aproximada de 16.3 km del volcán Misti. En conjunto, estas áreas concentran una población estimada de 49 845 habitantes.

• Etapa 3

Esta etapa comprende un total de 59 núcleos urbanos distribuidos en los puntos de concentración 5, 7, 13 y 14, los cuales se encuentran ubicados a una distancia aproximada de 17.10 km del volcán Misti. En conjunto, estas áreas concentran una población estimada de 49 055 habitantes.

• Etapa 4

Esta etapa comprende un total de siete núcleos urbanos distribuidos en los puntos de concentración 6, los cuales se encuentran ubicados a una distancia aproximada de 18 km del volcán Misti. En conjunto, estas áreas concentran una población estimada de 4515 habitantes.

Tabla 15. Núcleos urbanos y etapas de evacuación.

Etapas de Evacuación	Núcleos Urbanos	Puntos de Concentración
ETAPA 1	Miguel Grau Zona C, Miguel Grau Zona D, Santa Fe de Miguel Grau, Miguel Grau Zona B, Villa Belén, Villa Primavera, Villa Ecológica San Antonio, Villa Miguel Grau, 29 de Agosto, Hijos de Grau, Alameda Chorrillos, Villa Pacífico, Miguel Grau Zona A, Contisuyo, A. H. Mariscal Nieto, A. H. Carabaya, Nueva Carabaya, La Posada de Cristo, Cerrito Verde, Señor de los Milagros, El Girasol Andino, Quinta San José, Villa Machu Picchu, Villa Quinta.	PC 1, PC 2, PC 3, PC 10
ETAPA 2	El Paraíso, Héroes de Angamos, El Pedregal, Villa El Sol, Pueblo Jorge Chávez, A. H. Melitón Carbajal, 15 de Agosto, Urbanización Progresista, Juventud Francisco Mostajo, Villa Artesanal Arequipa, A. H. Francisco Mostajo, 15 de Enero B, Parque Artesanal APIMA 2.a etapa, Urbanización APIMA, Ampliación Ciudad Blanca, José María Arguedas, California B, Ampliación Ciudad Blanca, Ciudad Blanca A, Ciudad Blanca B, Ciudad Blanca C, Luz y Alegría, Ciudad Israel A, Ciudad Israel B, Pedro Vilcapaza, Virgen de Copacabana, Virgen del Carmen sector 1, Virgen de Chapi Zona C, Virgen de Chapi Zona B, Virgen de Chapi Zona D, Virgen de Chapi Zona A, Los Rosales de Paucarpata, Santa Rosa, La Isla, El Cebollar, El Progreso, Rancho Grande, Taller El Nazareno, Cerrito de Huacsapata, Cahuya Rosaspata, Los Ángeles de Paucarpata, Señor de la Amargura, Cerrito de Huacsapata Zona B, Patrimonio Cultural INC, Villa El Triunfo, Ampliación Alto Jesús, A. H. Alto Jesús, Lomas de Hoyo, Valle Encantado.	PC 4, PC 8, PC 9, PC 11, PC 12, PC 15, PC 16
ETAPA 3	Manuel Prado, Manuel Prado B, Coop. Cristo Rey Zonas A y B, 15 de Enero, Santa María, Villa Porongoché, California A, Jesús María, Villa María del Triunfo, Cairo, Cesar Vallejo, Los Pinos, Viña del Mar, Ulrich Neisser, Leoncio Prado, 200 Millas, Villa Continental, Las Terrazas, Los Álamos, C. C. Mall Aventura Plaza, A. H. Clisa, Coop. 19 Porongoché, Coop. COVISEAL, Guardia Civil, Fundo Kennedy, La Mercedes, La Colonial, Guardia Civil I, Asoc. las Marías, Guardia Civil, Campo Marte Zona A, Campo Marte Zona B, Campo Marte Zona C, Coop. Cristo Rey Zonas A y B, Nuevo Perú, Morro de Arica, La Calerita, Los Pinos, Ampliación Paucarpata, Malecón Paucarpata, Los Girasoles, A. H. La Finca, A. H. Pozo Negro, Los Jardines de Paucarpata, Ampliación Tres Marías, Santa María II, Santa María I, Santa María IV, Cerro Buena Vista II, Cerro Buena Vista III, Las Tres Marías, Virgen de las Asunta, A. H. Taller Buenavista, Santo Domingo, La Quebrada, Nueva Alborada, Alto Paucarpata, Mirador La Chacrita.	PC 5, PC 7, PC 13, PC 14
ETAPA 4	El Punque, Jesús Nazareno, El Nazareno II, Mirador San Lucas, A. H. Los Zafiros, Pueblo Tradicional Paucarpata, Área Protegida	PC 6

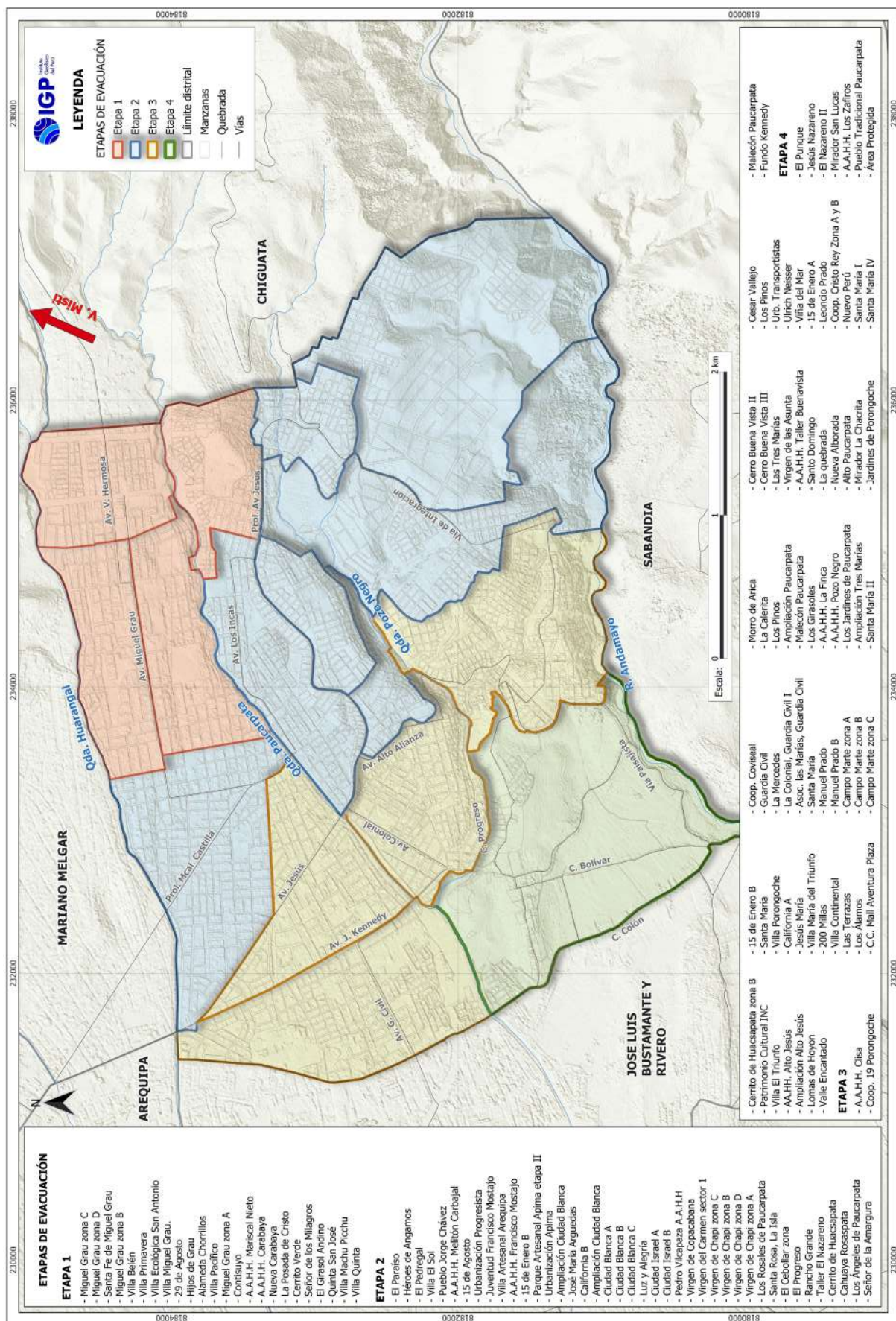


Figura 37. Mapa de etapas de evacuación para el distrito de Paucarpata.

8.5 Albergues temporales

Los albergues temporales constituyen espacios destinados a brindar protección, techo, alimentación, abrigo y seguridad a la población afectada (Resolución Ministerial n.º 064-2020-MIMP). Su carácter es transitorio y se mantienen activos mientras dure la emergencia. El propósito de los albergues temporales es salvaguardar la integridad de las personas en situación de desplazamiento.

Estos albergues permiten atender las necesidades inmediatas de la población afectada, asegurando condiciones mínimas de dignidad, seguridad, salud y organización, hasta que se restablezcan las condiciones que permitan el retorno o la reubicación definitiva.

Este estudio propone cuatro zonas de albergue temporal en caso de una erupción importante del Misti, lo cual debe ser coordinado entre las autoridades. Los albergues considerados tienen infraestructura preexistente y serían de uso comunitario considerando los siguientes criterios: ubicación segura y alejada de la fuente de peligros volcánicos, accesibilidad directa a vías principales y rutas de evacuación, disponibilidad

de espacios amplios y adaptables, proximidad a servicios básicos (agua, salud y seguridad), así como facilidad de gestión y control por parte de las autoridades locales y equipos de primera respuesta (Figura 38).

A continuación, se presentan las cuatro propuestas:

- **Albergue temporal CEMAE**

El Centro de Mantenimiento Aeronáutico del Ejército (CEMAE) se ubica en el distrito de La Joya, a una distancia aproximada de 144 km del cráter del volcán Misti (Figura 39). Cuenta con un área total de 500 000 m² delimitada por un cerco perimétrico de concreto, y dispone de instalaciones eléctricas, sanitarias, mecánicas, contraincendios y de comunicaciones adecuadamente implementadas.

El tiempo estimado de traslado, en condiciones normales, es de entre 1 hora y 55 minutos y 2 horas. La amplitud del recinto permite la instalación de aproximadamente 100 carpas familiares, con un promedio de 5 personas por carpa, lo que equivale a una capacidad de albergue para 500 personas.

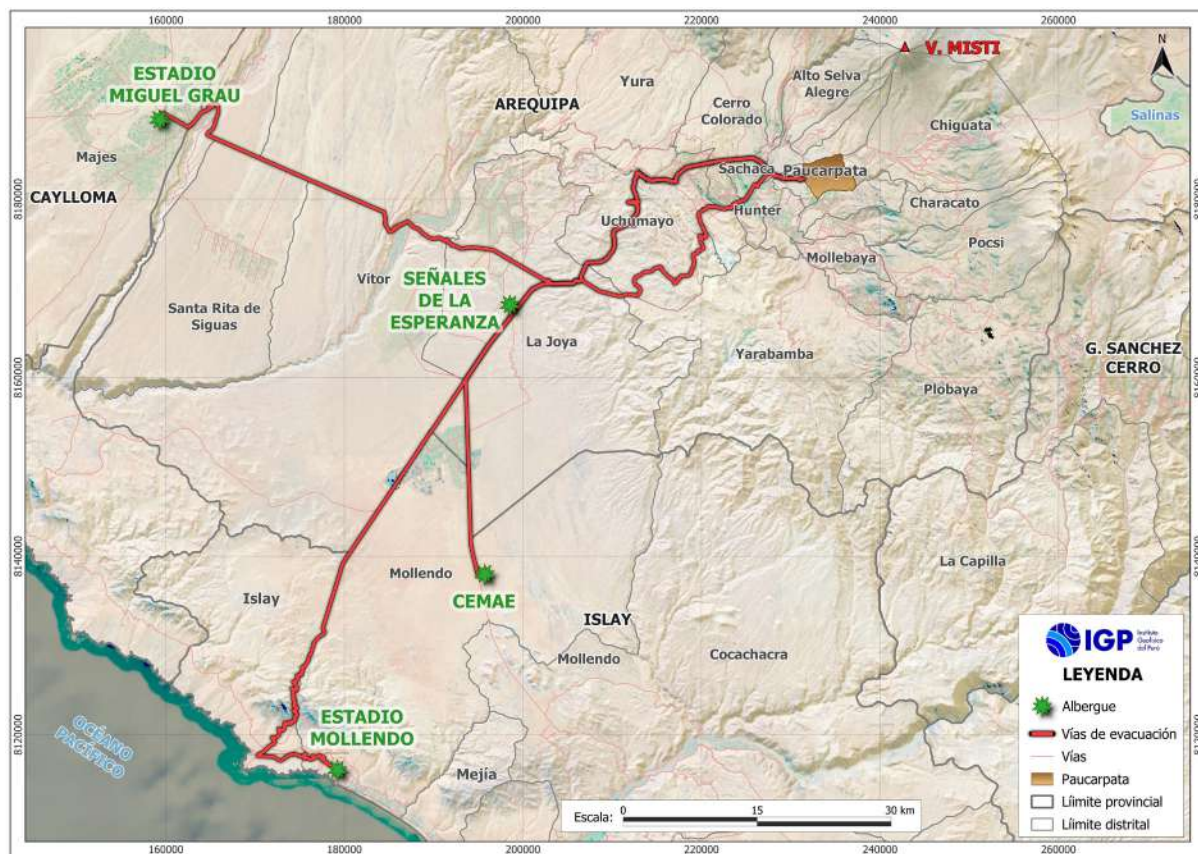


Figura 38. Vías de evacuación hacia los albergues propuestos.



Figura 39. Centro de Mantenimiento Aeronáutico del Ejército. Fuente: Defensa.com

- **Albergue temporal estadio Municipal de Mollendo**

Se ubica en la ciudad de Mollendo (Figura 40), provincia de Islay, a una distancia aproximada de 186 km del cráter del volcán Misti. El tiempo estimado para el traslado desde el punto de concentración en el distrito de Paucarpata es de 2 horas y 20 minutos, dependiendo del flujo

vehicular y las condiciones climáticas.

Dispone de un espacio amplio, céntrico y con adecuada accesibilidad vial, lo que lo convierte en un punto estratégico para la instalación de carpas familiares y zonas comunes. La capacidad del área permite la instalación de aproximadamente 170 carpas familiares, con un promedio de 5 personas por carpa, lo que representa una cobertura estimada de 850 personas.



Figura 40. Estadio Municipal de Mollendo. Fuente: Google Earth.

- **Albergue temporal estadio Almirante Miguel Grau de El Pedregal**

El “Estadio Almirante Miguel Grau” se ubica en el distrito de Majes, provincia de Caylloma, a una distancia aproximada de 163 km del cráter del volcán Misti. Presenta un tiempo estimado de traslado de entre 2 horas y 55 minutos y 3 horas, dependiendo del flujo vehicular y las condiciones climáticas (Figura 41).

El área corresponde a un campo deportivo amplio, con buen nivel de conectividad hacia centros de salud y servicios básicos, lo que facilita la organización de carpas familiares y zonas comunes.

La capacidad del espacio permite la instalación de aproximadamente 170 carpas familiares, con un promedio de 5 personas por carpa, lo que representa una cobertura estimada de 850 personas.



Figura 41. Estadio Almirante Miguel Grau, El Pedregal. Fuente: cityperu.com

- **Albergue temporal Señales de la Esperanza, La Joya**

Este tipo de albergue es de tipo campamento planificado. Se ubica en la Asociación Señales de la Esperanza, en el distrito de La joya, provincia de Arequipa, a una distancia aproximada de 109 km del cráter del volcán Misti. El tiempo estimado de traslado es entre 1 hora y 30 minutos y 2 horas, dependiendo del flujo vehicular y las condiciones climáticas (Figura 42).

El área corresponde a un terreno libre dentro de la asociación, con buen nivel de accesibilidad vehicular y servicios básicos, lo que facilita la organización de carpas familiares y zonas comunes.

La capacidad del espacio permite la instalación de aproximadamente 700 carpas familiares, con un promedio de 5 personas por carpa, lo que representa una cobertura estimada de 3500 personas.



Figura 42. Zona de albergue asociación Señales de la Esperanza. Fuente: Google Earth.

Conclusiones

- Con base en el modelamiento numérico de los peligros que puede presentar el volcán Misti, así como en el análisis de depósitos volcánicos visibles en el distrito de Paucarpata y en la consideración de los posibles escenarios eruptivos futuros, se elaboraron mapas de peligro por lahares, flujos piroclásticos, flujos de lava, avalanchas de escombros y caídas de tefra en el distrito de Paucarpata. Estos mapas muestran las áreas que podrían ser afectadas durante futuras erupciones del Misti, evidenciando que la mayoría de estos fenómenos podría alcanzar directamente dicho distrito.
- Ante la ocurrencia de un descenso de lahares a través de las quebradas Huarangal, Paucarpata, Pozo Negro y sus tributarias, se estima que estarían expuestas 902 viviendas ubicadas en zonas de alto peligro, 1721 viviendas en zonas de peligro moderado y 3903 viviendas en zonas de bajo peligro, distribuidas en un total de 77 núcleos urbanos. En caso de la posible ocurrencia de flujos piroclásticos, se encontrarían expuestas 117 viviendas ubicadas en zonas de bajo peligro y 21 viviendas en zonas de peligro moderado, distribuidas en cinco núcleos urbanos. Respecto a las avalanchas de escombros, se encontrarían expuestas 4562 viviendas, distribuidas en 18 núcleos urbanos. En cuanto a los flujos de lava, las condiciones topográficas y morfológicas del cono volcánico del Misti determinan que estos no alcancen el territorio de Paucarpata, por lo que no constituyen una amenaza directa para las áreas urbanas. Finalmente, la caída de tefra (en cualquier escenario eruptivo) representa el peligro de mayor alcance, con la posibilidad de cubrir la totalidad del distrito y afectar significativamente a la población y su infraestructura.
- Ante un escenario de gran actividad explosiva de tipo subpliniana a pliniana ($IEV \geq 3$), se propone un plan de evacuación de la población que contempla 16 sectores organizados en cuatro etapas de evacuación, así como 16 puntos de concentración destinados a servir como espacios de espera transitoria de la población. Además, se propone algunas vías de evacuación y la definición de cuatro zonas de albergue temporal: el CEMAE en La Joya (a 144 km del volcán Misti), el estadio municipal

de Mollendo (a 186 km del volcán Misti), el estadio Almirante Miguel Grau en El Pedregal (163 km del volcán Misti) y la Asociación de Vivienda Señales de la Esperanza en la Joya (109 km del volcán Misti).

Recomendaciones●

- Se sugiere fortalecer la gestión territorial en el distrito de Paucarpata mediante la articulación entre las autoridades locales, regionales y la población, con el objetivo de frenar el crecimiento urbano informal en zonas de peligro volcánico y en las quebradas que se prolongan del volcán Misti.
- A las autoridades competentes se recomienda actualizar y consolidar la información catastral, incorporando datos de infraestructura crítica georeferenciada (sistemas de agua y desagüe, redes eléctricas y equipamiento urbano), así como registros poblacionales actualizados. Esta información es fundamental para realizar evaluaciones de exposición al peligro volcánico con mayor precisión y para elaborar propuestas orientadas a la reducción del riesgo y a la mejora de la respuesta ante emergencias asociadas a una eventual erupción del volcán Misti.
- Se propone mejorar y dar mantenimiento a la infraestructura vial del distrito de Paucarpata, priorizando las rutas identificadas como vías de evacuación. Asimismo, resulta necesario evaluar la habilitación de vías alternas y corredores de tránsito seguro, ordenado y formal, con el fin de reducir la congestión vehicular y garantizar un desplazamiento oportuno y ordenado de la población ante un eventual proceso eruptivo del volcán Misti.
- Finalmente, se recomienda fortalecer el conocimiento de la población del distrito de Paucarpata respecto a los peligros volcánicos y la información técnico-científica asociada, mediante la organización de programas de difusión, talleres comunitarios, capacitaciones especializadas y simulacros de evacuación. Estas acciones deben orientarse a incrementar la capacidad de respuesta, la preparación y la resiliencia de la comunidad frente a la ocurrencia de futuros procesos eruptivos del volcán Misti.

Referencias

- Aguilar, R., Ortega, M., Manrique, N., Apaza, F., Rivera, M., & Harpel, C. (2019, December 9–13). *Characteristics of the beginning of the 2019 eruptive crisis at Ubinas volcano (Peru)* [Poster presentation]. AGU 2019 Fall Meeting, San Francisco, CA, USA.
- Bustillos, J., Samaniego, P., Troncoso, L., Ordóñez, J., & Bernard, B. (2011). *Volcán Tungurahua: Caída de ceniza. Implementación de un sistema de cenizómetros para la cuantificación del material sólido emitido*. En D. Andrade (Ed.), *Memorias de las Séptimas Jornadas en Ciencias de la Tierra* (pp. 139–142). Quito: EPN. ISBN 978-9978-383-17-9.
- 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.
- Capra, L., Macías, J. L., & Scott, K. M. (2004). Debris avalanches and debris flows transformed from collapses in Nevado de Toluca volcano, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 130(1–2), 75–98.
- Charbonnier, S. J., Thouret, J. C., Gueugneau, V., & Constantinescu, R. (2021). New insights into the 2070 cal yr BP pyroclastic currents at El Misti Volcano (Peru) from field investigations. In *Field Data, Models and Uncertainty in Hazard Assessment of Pyroclastic Density Currents and Lahars: Global Perspectives* (Article 542932144).
- Cobeñas, G., Thouret, J.-C., Bonadonna, C., & Boivin, P. (2012). The ca. 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.
- Cornejo Gutiérrez, J. A. (2020). *Calidad microbiológica del agua del río Socabaya mediante el recuento de Escherichia coli, coliformes totales y mesófilos aerobios totales en los distritos de Socabaya y Jacobo Hunter, Arequipa, 2019* [Tesis de pregrado].
- 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*, 140, 209–231.
- Fisher, R. V. (1961). Proposed classification of volcanoclastic sediments and rocks. *Geological Society of America Bulletin*, 72, 1409–1414.
- Francis, P. W. (1993). *Volcanoes: A planetary perspective*. Oxford University Press.
- Gertisser, R., Charbonnier, S. J., Keller, J., & Quidelleur, X. (2012). The geological evolution of Merapi Volcano, Central Java, Indonesia. *School of Geosciences Faculty and Staff Publications*, 603.
- Glicken, H. (1996). *Rockslide-debris avalanche of May 18, 1980, Mount St. Helens volcano* (Open-File Report 96-677). U.S. Geological Survey.
- Hall, M., Steele, A., Mothes, P., & Ruiz, M. (2013). Pyroclastic density currents of the 16–17 August 2006 eruptions of Tungurahua volcano, Ecuador: Geophysical registry and characteristics. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 265, 78–93.
- 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. J., Cuno, J. J., Cueva, K., Japura, S., Cabrera, M., Soncco, Y., & Rivera, M. (2011). *Tefroestratigrafía preliminar de erupciones explosivas del volcán Misti (Arequipa, Perú) desde la Autopista y sus implicaciones para los peligros volcánicos*. Foro Internacional: Los Volcanes y su Impacto, Arequipa, Perú.
- Hoblitt, R. P., Walder, J. S., Driedger, C. L., Scott, K. M., Pringle, P. T., & Vallance, J. W. (1995). *Volcano hazards from Mount Rainier, Washington* (Open-File Report 95-273). U.S. Geological Survey.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). (2018). *Resultados definitivos de los Censos Nacionales II de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas*.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). (2020). *Planos estratificados por ingreso a nivel de manzanas de las grandes ciudades 2020*.
- Kelfoun, K., & Vallejo Vargas, S. (2015). VolcFlow capabilities and potential development for the simulation of lava flows. *Geological Society, London, Special Publications*, 426, 1–14. <https://doi.org/10.1144/SP426.8>

- 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(9), 1057–1075. <https://doi.org/10.1007/s00445-009-0286-6>
- Kelfoun, K., & Druitt, T. H. (2005). Numerical modelling of the emplacement of the 7500 BP Socompa rock avalanche, Chile. *Journal of Geophysical Research*, 110(B12), B12202. <https://doi.org/10.1029/2005JB003758>
- Kelfoun, K. (2011). Suitability of simple rheological laws for the numerical simulation of dense pyroclastic flows and long-runout volcanic avalanches. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 116, B12202. <https://doi.org/10.1029/2010JB007622>
- Lipman, P. W., & Mullineaux, D. R. (Eds.). (1981). *The 1980 eruptions of Mount St. Helens, Washington* (Professional Paper 1250). U.S. Geological Survey.
- Major, J. J., Pierson, T. C., Hoblitt, R. P., & Moreno, H. (2013). Pyroclastic density currents associated with the 2008–2009 eruption of Chaitén Volcano (Chile): Forest disturbances, deposits, and dynamics. *Andean Geology*, 40(2). <https://doi.org/10.5027/andgeov40n2-a09>
- Manrique Llerena, N., Vela Valdez, J. C., Rivera Porras, M. A., & Miranda Cruz, R. (2018). *Evaluación de peligros volcánicos en los terrenos destinados a los programas municipales La Frontera, El Mirador de Arequipa, Villa Magisterial, La Escalerilla y San Antonio, región Arequipa*.
- Mariño, J., Rivera, M., Thouret, J. C., & Macedo, L. (2016). Geología y mapa de peligros del volcán Misti (*Boletín Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica* 60). INGEMMET.
- Mastin, L. G., Guffanti, M., Ewert, J. E., & Spiegel, J. (2009). *Preliminary spreadsheet of eruption source parameters for volcanoes of the world* (Open-File Report 2009-1133 v. 1.2). U.S. Geological Survey. <https://pubs.usgs.gov/of/2009/1133/>
- Ministerio de la Mujer y Poblaciones Vulnerables (MIMP). (2020). *Guía de gestión de albergues temporales para personas en situación de desplazamiento interno por emergencias o desastres naturales o antrópicos* (R.M. N.º 064-2020-MIMP).
- Murase, T., & McBirney, A. R. (1973). Properties of some common igneous rocks and their melts at high temperatures. *Bulletin of the Geological Society of America*, 84, 3563–3592.
- Newhall, C. G., & Punongbayan, R. S. (Eds.). (1996). *Fire and mud: Eruptions and lahars of Mount Pinatubo, Philippines*. University of Washington Press.
- Rivera, M., Cuno, J., Valdivia, D., & Del Carpio Calienes, J. A. (2024). *Informe técnico: Mapa de peligros del volcán Misti*.
- Rivera, M., Thouret, J. C., & Mariño, J. (2010). *El volcán Misti: Actividad eruptiva pasada y evaluación del peligro volcánico*. V Foro Internacional “Peligro Volcánico y Sísmico en el Sur del Perú”, Arequipa.
- Rivera, M., Thouret, J., Samaniego, P., & Le Pennec, J. (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*. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2013.11.010>
- Rivera, M., Samaniego, P., Vela, J., Le Pennec, J., Guillou, H., Paquette, J.-L., & Liorzou, C. (2020). The eruptive chronology of the Yucamane-Calientes compound volcano: A potentially active edifice of the Central Andes (southern Peru). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.106787>
- 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.
- Samaniego, P., Rivera, M., Manrique, N., Schiavi, F., Nauret, F., Liorzou, C., & Ancellin, M.-A. (2020). Linking magmatic processes and magma chemistry during the post-glacial to recent explosive eruptions of Ubinas Volcano (southern Peru). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 407, 107095. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.107095>
- Samaniego, P., Valderrama, P., Mariño, J., van Wyk de Vries, B., Roche, O., Manrique, N., et al. (2015). The historical (218 ± 14 a BP) explosive eruption of Tutupaca Volcano (southern Peru). *Bulletin of Volcanology*, 77(6), 51.

- Sigurdsson, H., Houghton, B. F., McNutt, S. R., Rymer, H., & Stix, J. (Eds.). (2000). *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press.
- Tepley, F. J., Salas, G., & de Silva, S. (2007). Recharge as an eruption trigger revealed at El Misti, southern Peru [Abstract]. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, 88(52), V41D-0813.
- Tepley, F. J. III, de Silva, S. L., & Salas, G. (2008). Unraveling complex volcanic processes using amphibole: A case study from El Misti. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(12), A941.
- Thouret, J. C., Arapa, E., Charbonnier, S., Guerrero, A., Kelfoun, K., Cordoba, G., ... & Santoni, O. (2022). Modeling tephra fall and sediment-water flows to assess their impacts on a vulnerable building stock in the city of Arequipa, Peru. *Frontiers in Earth Science*, 10, 865989.
- 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.
- Thouret, J. C., Rivera, M., Wörner, G., Gerbe, M., Finizola, A., Fornari, M., & Gonzales, K. (2005). Ubinas: The evolution of the historically most active volcano in southern Peru. *Bulletin of Volcanology*, 67, 557–589.
- Thouret, J. C., Enjolras, G., Martelli, K., Santoni, O., Luque, J. A., Nagata, M., & Macedo, L. (2013). Combining criteria for delineating lahar and flash-flood-prone hazard and risk zones for the city of Arequipa, Peru. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(2), 339–360.
- Tilling, R. I. (1989). Introduction and overview. In R. I. Tilling (Ed.), *Volcanic hazards* (pp. 1–20). <https://doi.org/10.1029/SC001p0001>
- Tilling, R., & Beate, B. (1993). *Los peligros volcánicos: Apuntes breves sobre un curso breve*. Organización Mundial de Observatorios Vulcanológicos, 2–3.
- Vargas, K., Macedo, L., Zerpa, L., & Cruz, J. (2021). *Análisis de los escenarios de peligros volcánicos con origen en el volcán Misti: Aplicación al distrito de Mariano Melgar (región Arequipa)*. Informe Técnico N.º 011-2021/IGP Ciencias de la Tierra Sólida – IGP.

Anexos

- Anexo I: Instituciones educativas y centros de salud expuestos al peligro por lahares. Se advierte que algunas instituciones se repiten en más de una categoría (alto, medio o bajo peligro) debido a su ubicación en zonas de transición o superposición de escenarios de lahares.

Nivel de peligro	Infraestructura expuesta	Detalle
Alto	Instituciones educativas	Se ha identificado 12 instituciones educativas: Tribuno Francisco Mostajo, La Inmaculada, Madre Cecchini, Jardín Santa María, Los Capullitos, Pozo Negro, Los Arbolitos, Valle Encantado, Virgen del Carmen, Juegos y Sonrisas, Caminitos y María de Jesús.
Medio	Instituciones educativas	Se ha identificado 18 instituciones educativas: Tribuno Francisco Mostajo, La Inmaculada, Madre Santa María, Jardín Santa María, Los Capullitos, Pozo Negro, Los Arbolitos, Valle Encantado, Virgen del Carmen, Juegos y Sonrisas, Caminitos, María de Jesús, San Martín de Porres, Santa Ana, Divina Providencia de Jesús, Jule Divino Niño, Estrellitas de Colores y Villa Jesús.
Bajo	Instituciones educativas	Se ha identificado 27 instituciones educativas: Tribuno Francisco Mostajo, La Inmaculada, Madre Santa María, Jardín Santa María, Los Capullitos, Pozo Negro, Los Arbolitos, Valle Encantado, Virgen del Carmen, Juegos y Sonrisas, Caminitos, María de Jesús, San Martín de Porres, Santa Ana, Divina Providencia de Jesús, Jule Divino Niño, Estrellitas de Colores, Villa Jesús, Monseñor José L. Del Carpio, Latinoamericano, Amigos de Cristo, Reina del Mundo, John F. Kennedy, Corazones Puros, Los Angelitos, Mi Pequeño Universo y Jacob.
Bajo	Centros de salud	Se ha identificado dos centros de salud: Ampliación Paucarpata P. S. y Villa Jesús.

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)

