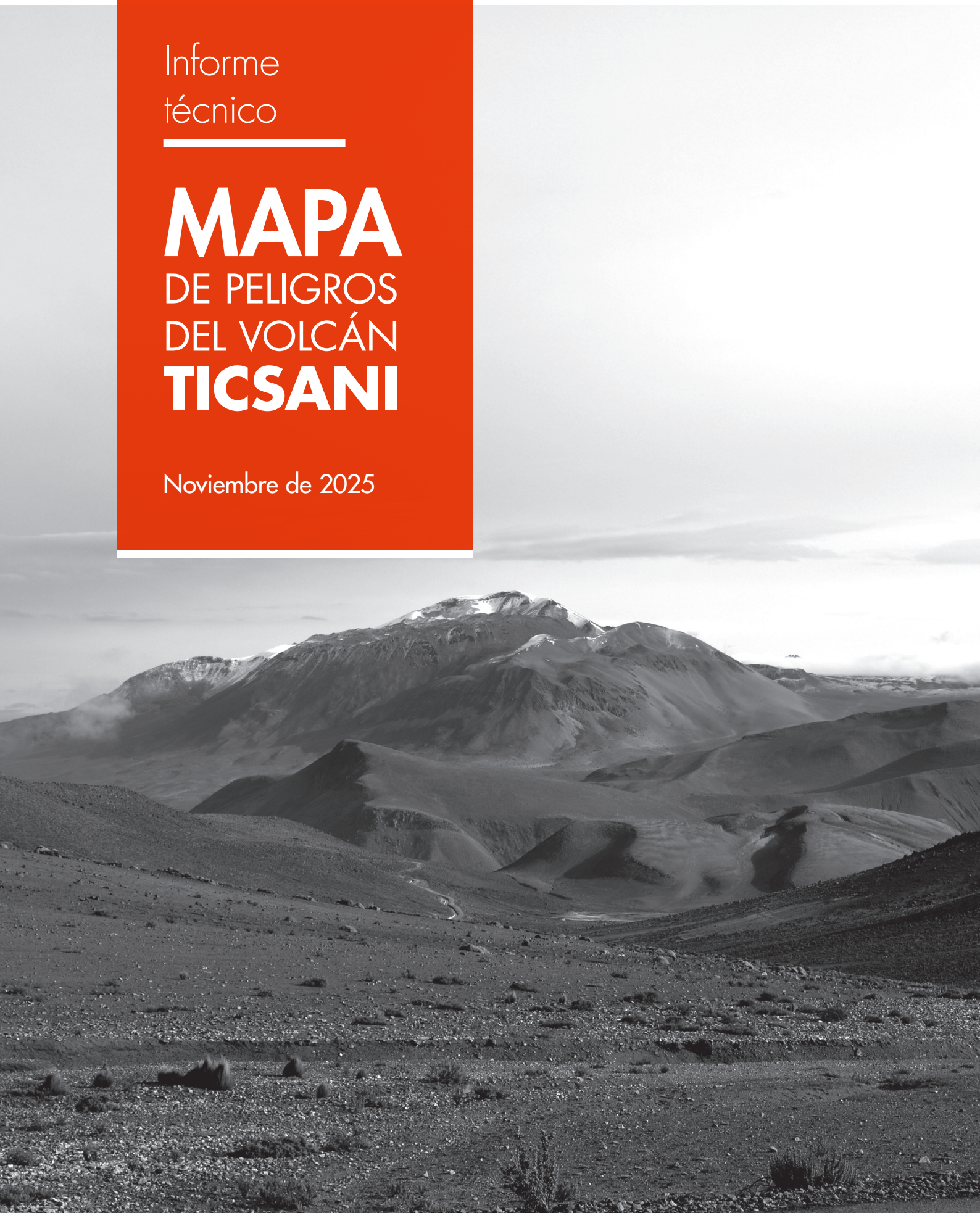


Informe
técnico

MAPA DE PELIGROS DEL VOLCÁN TICSANI

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

INFORME TÉCNICO MAPA DE PELIGROS DEL VOLCÁN TICSANI



Lima, Perú
Noviembre de 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

Mapa de peligros del volcán Ticsani
Informe técnico

Marco Rivera
David Valdivia
Juan Cuno
Lady Quispe
Autores

Marco Rivera
Jorge Concha
Edición de contenido

Jorge Concha
Diseño y diagramación

Carátula: Vista del volcán Ticsani

cenvul@igp.gob.pe
<https://www.igp.gob.pe/servicios/centro-vulcanologico-nacional/>
A. H. José María Arguedas, mz. D, lt. 8, Sachaca, Arequipa
Teléfono: +5154369212

Contacto

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

PRESENTACIÓN



Dr. Hernando Tavera
Jefe institucional
Instituto Geofísico del Perú

Todos sabemos que vivimos en un país cuyo paisaje y topografía se han moldeado a lo largo del tiempo por la ocurrencia de sismos y erupciones volcánicas. Estos procesos naturales son cíclicos y, por lo tanto, sabemos que se repetirán en el futuro con igual o incluso mayor intensidad. En este escenario, las ciencias, de la mano de nosotros los científicos, hemos aportado y seguimos contribuyendo para comprender estos procesos. En el caso de los volcanes, estos estudios nos permiten conocer sus erupciones históricas y anticipar los escenarios eruptivos que podrían desarrollarse y afectar a las localidades y ciudades que se han asentado en sus alrededores.

Para entender los actuales escenarios de riesgo de las diferentes áreas urbanas frente a posibles erupciones volcánicas, es crucial contar con información plasmada en documentos cartográficos, es decir, en mapas georreferenciados que muestren la extensión de los productos volcánicos emitidos por cada volcán. Así, podemos anticipar el alcance que han tenido y podrían tener en una nueva erupción las cenizas, los flujos piroclásticos, los proyectiles balísticos, los flujos de lava, los lahares y las avalanchas de escombros. Contar con estos mapas es sencillamente imprescindible para realizar una adecuada gestión del riesgo.

En el Instituto Geofísico del Perú (IGP), en nuestra calidad de institución oficial del Estado peruano responsable del monitoreo volcánico y la alerta de erupciones, hemos asumido el desafío científico de elaborar mapas de peligro para cada uno de los volcanes activos y potencialmente activos del país. Gracias a estos productos, los tomadores de decisiones y las instituciones que conforman el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SINAGERD) pueden evaluar la exposición de localidades y ciudades cercanas a volcanes. Más aún, estos mapas se consolidan como herramientas esenciales para el ordenamiento territorial y para planificar la expansión urbana, siempre considerando los peligros que trae consigo una erupción volcánica.

Estos mapas son el resultado de investigaciones vulcanológicas que venimos realizando desde 1988, cuando el IGP inició la vigilancia volcánica mediante la implementación de redes geofísicas de monitoreo, la formación continua de profesionales y la firma de convenios con universidades e instituciones tanto nacionales como internacionales para llevar a cabo estudios pioneros en volcanes. Más de 35 años dedicados a documentar la actividad volcánica, sus eventos precursoros, sus productos y manifestaciones, con el único propósito de contribuir con la seguridad y bienestar de la población.

Comprender los volcanes es un desafío constante, una misión permanente que el Estado peruano ha hecho suya. En virtud de esta confianza, hoy contamos con el Observatorio Vulcanológico del Sur, ubicado en el distrito de Sachaca, Arequipa, una facilidad técnico-científica del IGP que alberga al Centro Vulcanológico Nacional (CENVUL), el servicio de vigilancia volcánica desde el cual se emiten alertas, reportes y boletines sobre la evolución del comportamiento de 13 volcanes activos y potencialmente activos del país. El CENVUL, con su labor de vigilancia permanente, es aliado vital de los gobiernos regionales y locales, del Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI) y del Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED) para la gestión del riesgo volcánico en el Perú.

Quienes formamos parte del SINAGERD tenemos claro que no es posible gestionar el riesgo sin el respaldo de la ciencia. Confiamos en que esta misma perspectiva sea compartida por cada peruano y peruana. Sabemos que es un proceso, pero creemos que la generación periódica de productos científicos, como lo es en esta oportunidad este mapa de peligros del volcán Ticsani, ayudará a que cada persona comprenda mejor la amenaza que enfrenta en su entorno, y que la prevención debe estar basada en información científica oficial, confiable y oportuna. Esta es nuestra labor en el IGP, hacer «ciencia para protegernos, ciencia para avanzar».

RESUMEN

El volcán Ticsani está ubicado a 8 km al sureste de la localidad de Calacoa (Moquegua) y a 60 km al noreste de la ciudad de Moquegua. Es un volcán activo que está constituido por tres domos dacíticos y flujos de lava andesíticos emplazados dentro de una caldera en forma de herradura. A partir de estudios previos sobre la actividad pasada del Ticsani y del comportamiento de volcanes peruanos “análogos”, se han definido seis posibles escenarios en caso de una nueva erupción del volcán Ticsani. El primer escenario corresponde a una erupción de tipo vulcaniano (Índice de Explosividad volcánica, IEV 1–2); el segundo, a una erupción efusiva con emisión de flujos de lava; el tercero, al crecimiento de un domo; el cuarto, a una erupción explosiva de tipo subpliniano (IEV 3–4); el quinto, a una erupción explosiva de tipo pliniano (IEV 5); y el sexto, al colapso de domos con el emplazamiento de una avalancha de escombros.

Asimismo, con base en estudios previos y modelamiento de procesos volcánicos, se han elaborado cuatro mapas de peligros, presentados en un solo póster:

a) Mapa de peligros volcánicos múltiples para la zona proximal, que considera la ocurrencia de flujos de lava, domos de lava, flujos piroclásticos, lahares, avalanchas de escombros y caída de proyectiles balísticos.

b) Mapa de peligros por caídas de cenizas asociadas a una erupción vulcaniana (IEV 1–2), en el cual la zona de alto peligro (rojo) se halla a una distancia de 20 km al este y 18 km al oeste del volcán Ticsani. Dicha zona puede ser afectada por caída de cenizas que formarían una capa de algunos centímetros de espesor. La zona de moderado peligro (naranja) se halla entre 20 km y 105 km al este, y entre 18 km y 95 km al oeste del volcán Ticsani. Dicha zona puede ser afectada por la caída de cenizas que formarían una capa de pocos milímetros de espesor. La zona de bajo peligro (amarillo) tiene una configuración elíptica, a una distancia de 86 km a 206 km al noroeste, de 71 km a 179 km al norte y de 85 km a más de 150 km al sureste del volcán Ticsani, sobrepasando la frontera Perú-Bolivia. Dicha zona puede ser afectada por la caída de cenizas que formarían una capa fina de menos de 1 mm de espesor.

c) Mapa de peligros por caídas piroclásticas asociadas a una erupción subpliniana (IEV 3–4), en el cual la zona de alto peligro (rojo) es el área proximal y se halla a una distancia aproximada de 90 km al este, 96 km al oeste, 72 km al norte y 71 km al sur del volcán Ticsani. Esta zona puede ser afectada por la caída de cenizas y lapilli de pómez que formarían una capa de varios centímetros de espesor. La zona de moderado peligro (naranja) corresponde al área que colinda con la zona de alto peligro, la cual tiene una configuración

elíptica alrededor del volcán, a una distancia de 96 km a 240 km al oeste, de 72 km a 212 km al norte, más de 158 km al sur y más de 137 km al sureste del volcán Ticsani, sobrepasando la frontera Perú-Bolivia. Dicha zona puede ser afectada por la caída de cenizas que formarían una capa de algunos centímetros de espesor. La zona de bajo peligro (amarillo) comprende una distancia aproximada de 243 km a 495 km al noroeste, de 212 km a 506 km al norte, más de 137 km al sureste y 158 km al sur del volcán Ticsani. En esta zona se depositarían cenizas de menos de 1 mm de espesor.

d) Mapa de peligros por caídas piroclásticas asociadas a una erupción pliniana (IEV 5), en el cual la zona de alto peligro (rojo) es el área proximal y se prolonga hasta una distancia de 197 km al oeste y 244 km al este del volcán Ticsani, sobrepasando la frontera Perú-Bolivia. Esta área puede ser afectada por la caída de cenizas y lapilli de pómez que formarían una capa de algunos metros a varios centímetros de espesor. La zona de moderado peligro (naranja) comprende una distancia entre 194 km a 412 km al noroeste y a más de 244 km al este del volcán Ticsani, sobrepasando la frontera Perú-Bolivia. Dicha zona puede ser afectada por la caída de cenizas que formarían una capa de varios decímetros a milímetros de espesor. La zona de bajo peligro (amarillo) tiene una configuración elíptica, y se halla de 412 km a 835 km de distancia al noroeste y más de 808 km al sureste del volcán Ticsani, sobrepasando la frontera Perú-Bolivia. Esta zona puede ser afectada con la caída de cenizas que formarían una capa de menos de 1 mm de espesor.

e) Mapa de peligros por lahares, en el cual la zona roja es considerada de alto peligro y corresponde al área de mayor posibilidad de ser afectada por lahares poco voluminosos (150 000 m³), asociados a erupciones de baja a moderada magnitud (IEV 1–2) o lluvias intensas. La zona naranja, denominada de moderado peligro, puede ser afectada por lahares de moderado volumen (350 000 m³). La zona amarilla es considerada de bajo peligro o de menor posibilidad de ser afectada por lahares muy voluminosos (500 000 m³). Los lahares voluminosos podrían estar asociados a erupciones de gran magnitud (IEV ≥ 3) o lluvias muy intensas.

En caso de una eventual erupción del volcán Ticsani, las zonas proximales, donde se ubican poblados como Calacoa-Bellavista, San Cristóbal, Cuchumbaya, Soquezane, Quebaya y otros, así como terrenos de cultivos, pastizales y obras de infraestructura, serían las más propensas a ser afectadas por los productos volcánicos, como caída de cenizas y eventuales lahares. Igualmente, se vería afectado el ganado que habita la zona.

CONTENIDO

7	Presentación
8	Resumen
12	Introducción
13	Condiciones climatológicas
14	Aspecto socioeconómico
16	Los peligros volcánicos
16	Caída de piroclastos (tefras)
17	Flujos de lava
17	Flujos y oleadas piroclásticas
17	Lahares (flujos de lodo y escombros)
18	Avalanchas de escombros
18	Gases volcánicos
19	El volcán Ticsani
19	Historia eruptiva
21	Datos y metodología para la elaboración de mapas
21	Metodología para la elaboración de mapas
21	<i>Softwares</i> empleados
23	Escenarios eruptivos considerados
28	Resultados: mapas de peligros del volcán Ticsani
28	Mapa de peligros volcánicos múltiples para la zona proximal
30	Mapa de peligros por caídas de ceniza durante una erupción vulcaniana (IEV 2)
32	Mapa de peligros por caídas piroclásticas durante una erupción subpliniana (IEV 3–4)
34	Mapa de peligros por caídas piroclásticas durante una erupción pliniana (IEV 5)
34	Mapa de peligros por lahares
37	Conclusiones
39	Referencias

TICSANI



Elevación

5408 m s. n. m.



Región

Moquegua



Provincia

Mariscal Nieto



Última erupción

Hace 10 600 años aprox.



Población en un radio de 30 km

4446 personas



Inicio de vigilancia en tiempo real

2015



Instrumentos y técnicas de vigilancia

3 estaciones sísmicas

1 cámara científica

1 receptor GNSS

1 inclinómetro

Sistemas satelitales



1. Introducción

En el sur del Perú, a lo largo de la cordillera occidental de los Andes, existe una cadena de volcanes activos y potencialmente activos emplazados durante el Pleistoceno-Holoceno. Esta cadena volcánica forma parte de la denominada Zona Volcánica Central de los Andes (ZVC; De Silva & Francis, 1991), que debe su origen al proceso de subducción de la placa oceánica de Nazca debajo de la placa continental sudamericana. Dicha cadena de volcanes está ubicada a aproximadamente 240 km al este del borde occidental de la placa sudamericana, paralela a la fosa Perú-Chile.

Los estudios geológicos, geofísicos y vulcanológicos efectuados en el sur del Perú han permitido visualizar la intensa actividad volcánica reciente e histórica manifestada por los volcanes activos existentes dentro de la cadena volcánica: Sabancaya, Sara Sara, Ubinas, Misti, Huaynaputina, Ticsani, Yucamane, Tutupaca y Chachani. En épocas

históricas, los volcanes Sabancaya, Ubinas, Misti, Huaynaputina y Tutupaca causaron enormes estragos a varios poblados, terrenos de cultivo y obras de ingeniería localizados en sus inmediaciones. La reactivación sucesiva de los volcanes Sabancaya (1988–1998 y 2013–2025) y Ubinas (2006–2009; 2013–2017; 2019 y 2023–2024), así como el alto grado de exposición de los habitantes de la ciudad de Arequipa (1 080 635 habitantes) frente a una eventual reactivación del volcán Misti, ha llevado al Instituto Geofísico del Perú (IGP) a desarrollar un programa destinado a realizar estudios vulcanológicos tendientes a elaborar mapas de peligros de los volcanes activos del sur peruano.

El volcán Ticsani ($16^{\circ} 45' S$; $70^{\circ} 35'$, 5382 m s. n. m.) se encuentra ubicado a 60 km al noreste de la ciudad de Moquegua (Figura 1), en la provincia de Mariscal Nieto, región Moquegua. Este volcán se ha edificado al extremo occidental de una zona de altiplanicie constituida de rocas volcánicas del Mioceno-Pleistoceno (Figuras 1 y 2). El Ticsani está constituido por tres domos de lava y flujos de lava.

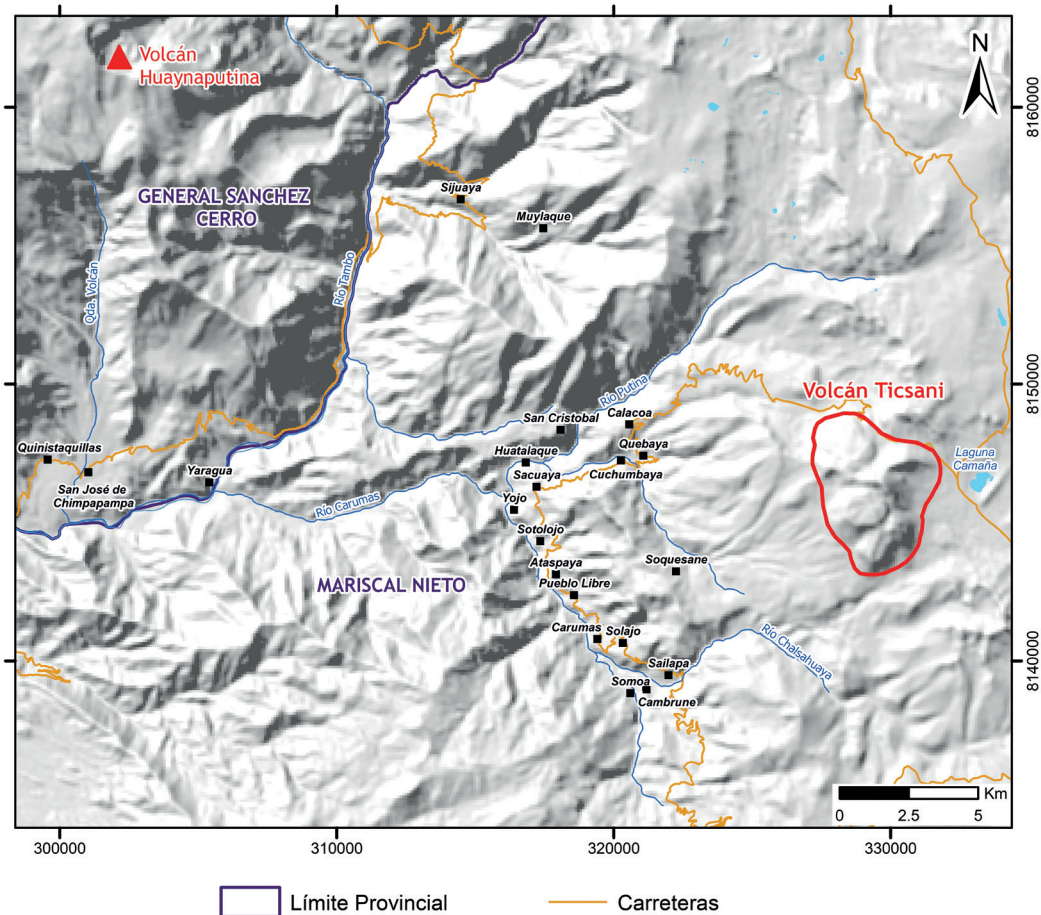


Figura 1. Mapa de ubicación del volcán Ticsani y poblados aledaños.



Figura 2. Vista del sector oeste del volcán Ticsani y poblados aledaños.

La fresca morfología de los domos y coladas de lava en bloques que existen en este volcán sugieren su emplazamiento en una etapa muy reciente, probablemente pleistocénica superior a holocénica (Mariño & Thouret, 2003). Los trabajos previos de Mariño y Thouret (2003) y otros han puesto en evidencia la ocurrencia de erupciones explosivas y efusivas del volcán Ticsani durante el Holoceno.

El volcán Ticsani puede reactivarse en el futuro y generar una erupción, cuyos productos pueden afectar áreas aledañas en donde la población se dedica principalmente a la agricultura y ganadería. Además, en áreas aledañas existen obras de infraestructura importantes (carreteras, represas, canales, etc.). El objetivo central del presente estudio es presentar los mapas de peligros del volcán Ticsani que muestran las zonas que podrían ser afectadas o impactadas por sus productos durante futuras erupciones, con el propósito de

brindar a la sociedad, instituciones del SINAGERD (INDECI, CENEPRED, etc.) y autoridades locales y regionales (Gobierno Regional de Moquegua, municipalidades provinciales y distritales, etc.) un documento oficial que permita efectuar un adecuado ordenamiento territorial, la formulación de proyectos de desarrollo, la elaboración de planes de prevención y el manejo de una eventual crisis volcánica del Ticsani.

1.1 Condiciones climatológicas

Para el análisis de la precipitación y temperatura de la zona del volcán Ticsani se tomó información de las estaciones meteorológicas del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) entre los años 1932 y 2025. Dichas estaciones están ubicadas en los sectores de Pampa Ulmazo (Titijones) y Carumas (Tabla 1).

Tabla 1. Estaciones meteorológicas ubicadas al noreste y suroeste del volcán Ticsani, operadas por el SENAMHI.

Nombre	Coordenadas		Altitud (m s. n. m.)	Periodo de Registro	Cuenca
	Latitud	Longitud			
Pampa Ulmazo (Titijones)	-16.61794	-70.52602	4609	1965–2025	Tambo
Carumas	-16.81305	-70.69444	2976	1965–2025	Tambo

1.1.1 Temperatura

La estación meteorológica de Carumas, entre los años 2017 y 2025, registró una temperatura máxima promedio de 20 °C, y una temperatura mínima promedio de 5 °C. En tanto, la temperatura máxima fue de 24 °C y la temperatura mínima de 0.2 °C.

Además, de acuerdo con los registros de la estación Pampa Ulmazo (Titijones), entre los años 2018 y 2025, la temperatura máxima promedio fue de 12 °C y la temperatura mínima promedio fue de -7 °C. Asimismo, la temperatura máxima fue de 17.8 °C y la temperatura mínima de -21.2 °C.

1.1.2 Precipitación

De acuerdo con los datos de las estaciones pluviométricas, entre los años 1965 y 2025, la estación Pampa Ulmazo (Titijones) registró mayores precipitaciones entre los meses de noviembre a marzo. En estos cuatro meses, las precipitaciones

llegaron hasta 32.7 mm (Figura 3). En tanto, entre los meses de abril a noviembre se registraron precipitaciones de hasta 18.4 mm.

De acuerdo con los registros, la estación meteorológica Carumas, entre los años 1965 y 2025, registró las mayores precipitaciones durante los meses de diciembre a marzo (Figura 4). En estos cuatro meses se registraron precipitaciones de hasta 51.4 mm. Cabe mencionar que en el mes de febrero se registraron precipitaciones inusuales que variaron entre 79.5 mm y 190.7 mm. Por otro lado, entre los meses de abril a noviembre, las precipitaciones llegaron hasta 36.4 mm.

1.2 Aspecto socioeconómico

1.2.1 Dato poblacional

El volcán Ticsani está ubicado en la provincia de Mariscal Nieto, región Moquegua. Comprende los distritos de San Cristóbal, Cuchumbaya y Carumas. En un radio de 30 km del centro volcánico, habitan más de 4444 personas, en

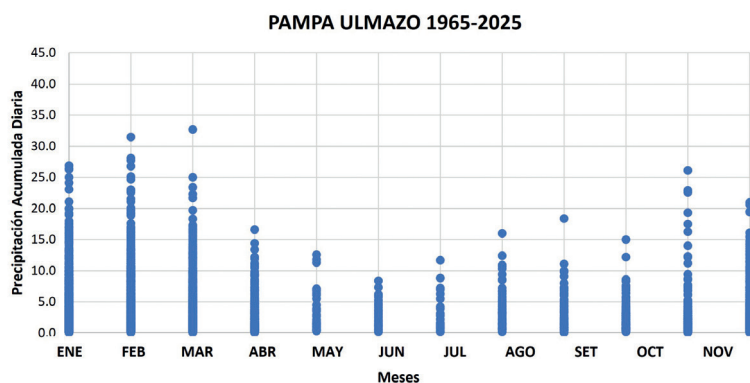


Figura 3. Precipitaciones diarias de la estación meteorológica de Pampa Ulmazo, localizada a 17 km al noreste del volcán Ticsani.

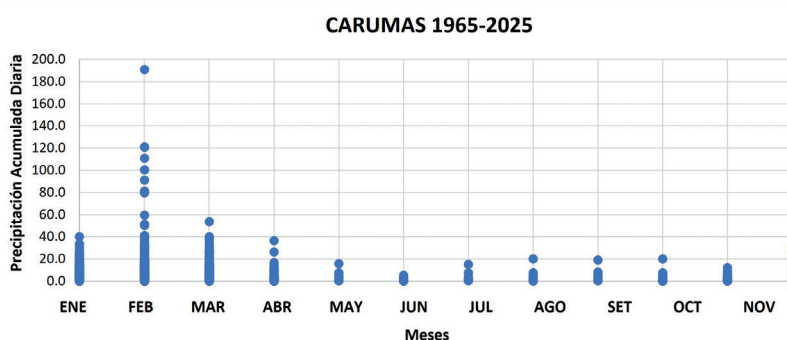


Figura 4. Precipitaciones diarias de la estación meteorológica de Carumas, localizada a 11.6 km al suroeste del volcán Ticsani.

126 centros poblados, distribuidos en 8 distritos (Tabla 2). Asimismo, existe un total de 2012 viviendas ocupadas en dicho sector, de las cuales el 68% cuenta con acceso a agua potable (INEI, 2018).

También, existe una población escolar de 690 alumnos y 55 instituciones educativas en el entorno del Ticsani (MINEDU, 2024), 9 centros de salud e importantes comunidades campesinas, como Cacahuara, Santiago de Pachas, Muylaque, Huatalaque, Somoa, Sacuaya, Sotolojo, Yojo, Quebaya, Cuchumbaya, Soquezane, Ataspaya, Cambrune, Solajo y Saylapa (Ministerio de Cultura, 2025).

Tabla 2. Población asentada en un radio de 30 km del volcán Ticsani.

Distrito	Provincia	Región	Altura (m s. n. m.)	Población en 30 km
Quinistaquillas	Gral. Sánchez Cerro	Moquegua	1789	177
Matalaque	Gral. Sánchez Cerro	Moquegua	2577	13
Chojata	Gral. Sánchez Cerro	Moquegua	3634	6
Torata	Mariscal Nieto	Moquegua	2203	43
Cuchumbaya	Mariscal Nieto	Moquegua	3156	761
San Cristóbal	Mariscal Nieto	Moquegua	3129	1736
Carumas	Mariscal Nieto	Moquegua	3054	1708
TOTAL				4444

En cuanto a la actividad económica, las poblaciones ubicadas dentro del radio de 30 km del volcán Ticsani se dedican principalmente a la agricultura, la ganadería, construcción (distritos de Torata y Carumas), minería (Torata) y comercio (Ministerio de Trabajo y Promoción del Empleo-MTPE, 2020).

Además, en áreas aledañas al volcán Ticsani existen obras civiles importantes que podrían ser afectadas en caso de una importante reactivación del Ticsani:

- La represa Pasto Grande (principal fuente de agua de la región Moquegua).
- Empresas mineras de Cuajone y Quellaveco.

- Red vial, con aproximadamente 689 km de carreteras que conectan los diversos poblados de la zona.
- Proyectos mineros en fase exploratoria, como "Calatos".
- Zona agrícola, con aproximadamente 5173 ha.

Finalmente, en un radio de 30 km alrededor del volcán Ticsani existe una importante variedad de ecosistemas (MINAM, 2016) y diversidad biológica (MINAM, 2019), presentada en la Tabla 3.

Tabla 3. Ecosistemas y especies animales presentes en el ámbito del volcán Ticsani.

Ecosistemas
• Bofedales
• Periglaciares y glaciares
• Zona agrícola (aprox. 9421 ha)
• Matorral andino
• Pajonal de puna seca
• Desierto costero
• Bosque relicto altoandino (queñoal, otros)
Especies
• <i>Rhea pennata</i>
• <i>Opuntia soehrensii</i>
• <i>Hippocamelus antisensis</i>
• <i>Falco peregrinus</i>

2. Los peligros volcánicos

Diversos estudios vulcanológicos efectuados hasta el presente han compilado los principales peligros que pueden generar los volcanes activos, como el Ticsani, en caso de presentar una erupción, los cuales corresponden a caída de cenizas y pómez, flujos de lava, flujos y oleadas piroclásticas, lahares (flujos de escombros), avalanchas de escombros y gases volcánicos (Blong, 1984; Tilling, 1989; Blong, 2000; Bignami et al., 2012), los cuales son representados en la Figura 5. A continuación, se describen estos fenómenos para el caso del volcán Ticsani.

2.1 Caída de piroclastos (tefras)

Las erupciones explosivas emiten fragmentos de roca o piroclastos hacia la atmósfera en forma de una columna eruptiva o pluma volcánica densa que, a veces, puede alcanzar varios kilómetros de altura. Posteriormente, la columna es transportada y dispersada por los vientos a distancias kilométricas. En ese sentido, los fragmentos más grandes y densos caen cerca del volcán, y se denominan bombas o bloques (>64 mm), mientras que las partículas de menor tamaño, denominadas lapilli (2–64 mm) y ceniza (<2 mm), son llevadas por el viento a grandes distancias, para luego caer y formar una capa de varios milímetros o centímetros de espesor. La distancia alcanzada por los fragmentos de

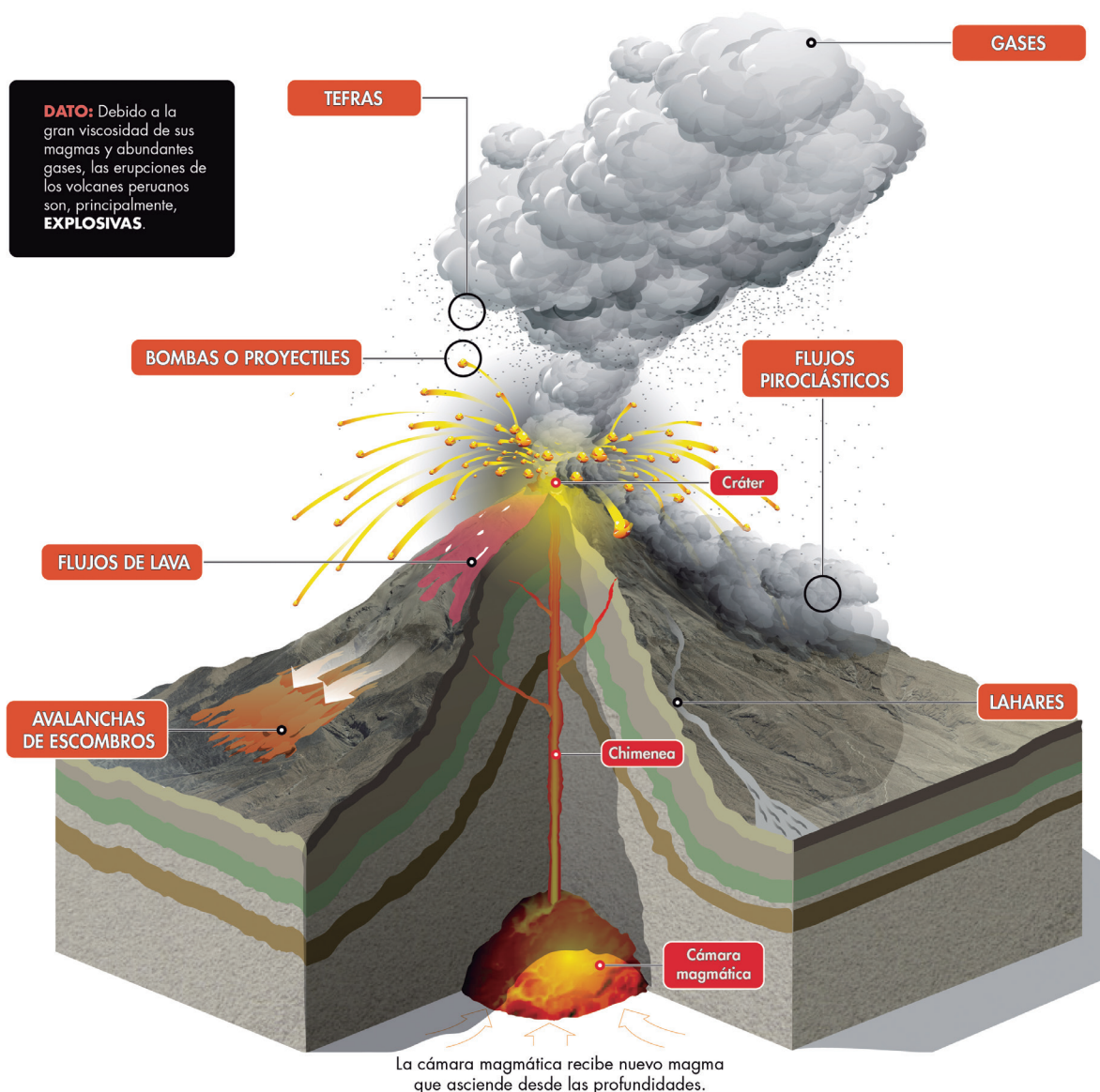


Figura 5. Tipos de peligro volcánico que puede presentar un volcán como el Ticsani.

roca dependerá de la magnitud de la erupción, densidad de los fragmentos y de la velocidad del viento al momento de la erupción. Las partículas pueden cubrir y afectar extensas áreas, desde algunas centenas a varios cientos de km² (Cas & Wright, 1987).

Estas partículas pueden causar problemas de salud en las personas, contaminar fuentes de agua, colapsar los techos por el peso acumulado, afectar cultivos, interrumpir el tráfico aéreo, entre otros efectos (Tilling, 1989).

En el sur peruano, todos los volcanes activos, como el volcán Ticsani, han presentado a lo largo de su evolución actividad explosiva, con emisión de volúmenes variables de ceniza, lapilli de pómez, escorias y flujos piroclásticos. Los productos de estas erupciones han afectado poblados, obras de infraestructura y el medio ambiente. Son ejemplos del impacto de este tipo de actividad los efectos nocivos provocados por la gran erupción del volcán Huaynaputina, ocurrida en el año de 1600 d. C., que afectó todo el sur peruano, así como los efectos ocasionados por la actividad explosiva moderada e intermitente de los volcanes Ubinas (2006–2009; 2013–2017; 2019; 2023–2024) y Sabancaya (1990–1996; 2016–2025), ligada a la emisión de ingentes cantidades de ceniza (Samaniego et al., 2016; Rivera et al., 2014; Gerbe & Thouret, 2004; Machacca et al., 2023).

2.2 Flujos de lava

Los flujos de lava son corrientes de roca fundida que son expulsadas por el cráter o fracturas en los flancos de un volcán. Pueden fluir por el fondo de los valles y quebradas, y alcanzar varios kilómetros de distancia recorriendo raramente más de 8 km desde el centro de emisión (Francis, 1993). Los volcanes del sur peruano, como el Ticsani, han emitido flujos de lavas viscosas que recorrieron algunos kilómetros de distancia desde el centro de emisión. También, algunas lavas viscosas, en su ascenso lento hacia la superficie, se enfrían en la zona del cráter y forman domos de lava.

Al descender de los volcanes, los flujos de lava calcinan, sepultan y destruyen todo a su paso; sin embargo, no representan un peligro para las personas debido a su baja velocidad de desplazamiento (Tilling, 1989).

En el sur peruano, todos los volcanes activos y potencialmente activos, como el volcán Ticsani a

lo largo de su evolución, han presentado actividad efusiva con la emisión de flujos de lava que se emplazaron en áreas proximales. En efecto, en el Ticsani, las lavas han alcanzado distancias de hasta 6.5 km de la fuente, visibles en sus extremos noroeste y oeste.

2.3 Flujos y oleadas piroclásticas

Las erupciones explosivas importantes pueden generar flujos piroclásticos, ahora denominados corrientes de densidad piroclásticas. Estos corresponden a mezclas de ceniza, fragmentos de roca y gases calientes (300 °C a 800 °C) (Nakada, 2000). Los flujos piroclásticos descienden por los flancos de un volcán a ras de la superficie y a grandes velocidades, comprendidas entre 100 m/s y 300 m/s (Hoblitt et al., 1995). Poseen, por lo general, una parte inferior densa que se encauza y desplaza por el fondo de las quebradas o valles, y otra superior, menos densa, denominada oleada piroclástica, compuesta por una nube turbulenta de gases y ceniza que fácilmente sale del valle, sobrepasando relieves importantes como lomas o cerros, y afectando áreas considerables. Estos flujos y oleadas destruyen y calcinan todo lo que encuentran a su paso (Tilling, 1989).

Los estudios vulcanológicos realizados durante los últimos 30 años muestran que la gran mayoría de los volcanes activos del sur peruano, como Misti, Ubinas, Yucamane, Tutupaca, Ticsani y Sara Sara (Thouret et al., 2001; Thouret et al., 2005; Mariño & Thouret, 2003; Samaniego et al., 2015; Rivera et al., 2020a; Rivera et al., 2020b), presentaron durante su evolución erupciones explosivas con emisiones de flujos piroclásticos de volúmenes variables, los cuales yacen en sus alrededores.

2.4 Lahares (flujos de lodo y escombros)

Los lahares o flujos de lodo y escombros son mezclas de partículas volcánicas de tamaños diversos movilizadas por el agua, que fluyen rápidamente (20–60 km/h) por valles y quebradas originadas en los volcanes. Se generan en periodos de erupción o de tranquilidad volcánica, principalmente ligados a lluvias intensas (Tilling, 1989), aunque también pueden provenir de la fusión de hielo o nieve, ríos, o lagunas cratéricas.

Los lahares, eventualmente, pueden salir de estos

cauces en los abanicos de inundación, como ocurrió con los lahares que destruyeron la ciudad de Armero en Colombia, luego de la erupción del volcán Nevado del Ruiz en 1985 y la fusión de una parte del casquete glaciar de dicho volcán (Naranjo et al., 1986) que dio lugar a la generación de lahares. El área inundada o afectada por el desborde de los lahares depende del volumen de agua y de materiales sueltos disponibles, así como de la pendiente y topografía de los valles o quebradas. Normalmente, destruyen todo a su paso y pueden alcanzar grandes distancias (>100 km), e incluso generar inundaciones cerca al cauce de ríos y quebradas (Tilling, 1989).

La mayoría de los volcanes activos en los Andes peruanos presentan este tipo de peligro, sobre todo en periodos de lluvia (diciembre a marzo), durante los cuales ocurren precipitaciones intensas en sus laderas o cumbres. El volumen y distancia que recorre un lahar está en función del volumen de agua, el volumen del material suelto, la temperatura del material emitido, la presencia de hielo o nieve en la cima de un volcán y la pendiente. En el Ticsani, las quebradas donde se encuentran depósitos de lahares recientes están ubicadas en su extremo occidental.

2.5 Avalanchas de escombros

Las avalanchas de escombros son derrumbes o colapsos de un sector de un volcán. Se originan debido a factores de inestabilidad, tales como la elevada pendiente del volcán, la presencia de fracturas o fallas tectónicas, los movimientos sísmicos fuertes y explosiones volcánicas. Las avalanchas de escombros ocurren con poca frecuencia y, comúnmente, pueden alcanzar decenas de kilómetros de distancia. Se desplazan a gran velocidad; por ejemplo, en el caso del Monte St. Helens (EE. UU.), cuyo lahar estuvo asociado a una erupción lateral dirigida, se estimaron velocidades del orden de 240 km/h (Glicken, 1996).

Las avalanchas de escombros tienen mayor movilidad, sobre todo si son voluminosas (a mayor volumen mayor velocidad y distancia recorrida). Esto se debe a diferentes factores, desde la reología del flujo, la pendiente del terreno, la formación de una capa de alto cizallamiento en la base, o la presencia de fluidos hidrotermales o magmáticos (Ui et al., 2000).

Las avalanchas de escombros entierran y destruyen todo lo que encuentran a su paso. Adicionalmente,

pueden generar lahares y crecientes a partir del desagüe de agua represada por la avalancha (Tilling, 1989).

En el sur del Perú, varios volcanes activos y potencialmente activos, como el Misti, Ticsani, Tutupaca, Ubinas y Sara Sara, han presentado derrumbes de flanco que han generado depósitos de avalanchas de escombros que están distribuidos en áreas aledañas (Thouret et al., 2001; Mariño & Thouret, 2003; Thouret et al., 2005; Samaniego et al., 2015; Rivera et al., 2020a).

2.6 Gases volcánicos

Durante las erupciones volcánicas se produce una importante liberación de gases, principalmente vapor de agua, pero también dióxido de carbono, dióxido de azufre, ácido clorhídrico, monóxido de carbono, ácido fluorhídrico, azufre, nitrógeno, cloro, flúor, etc. (Hoblitt et al., 1995).

Los gases volcánicos se diluyen y dispersan rápidamente; sin embargo, pueden alcanzar concentraciones altas en las zonas bajas o depresiones muy cercanas al volcán donde pueden generar intoxicación y muerte de personas y animales. Los gases también pueden condensarse y adherirse a partículas de ceniza, así como reaccionar con las gotas de agua y provocar lluvias ácidas que generan corrosión, daños en los cultivos, además de contaminación de aguas y suelos. Frecuentemente, los efectos nocivos están restringidos a un radio menor de 10 km del volcán (Tilling, 1989).

3. El volcán Ticsani

3.1 Historia eruptiva

El volcán Ticsani está conformado de tres domos de lava dacíticos y flujos de lava andesíticos (Figura 6), estos últimos visibles en sus extremos noroeste y oeste, sobre un substrato compuesto por una secuencia de lavas andesíticas a dacíticas del Mioceno. Además, en áreas adyacentes se distinguen sedimentos clásticos continentales del Paleógeno, así como depósitos de ignimbritas riolíticas y lavas que datan del Mioceno (Quispesivana & Zapata, 2000).

Según estudios vulcanológicos efectuados por Mariño y Thouret (2003), y con base en datos de campo, este volcán está constituido de dos edificios volcánicos: "Ticsani Antiguo" y "Ticsani Moderno".

3.1.1 Ticsani antiguo

Corresponde a un estratovolcán de base conformado por una sucesión de flujos de lava y rocas volcanoclásticas (Figura 6). Este edificio

volcánico experimentó un colapso de su sector oeste que generó un voluminoso depósito de avalancha de escombros, el cual dejó una gran depresión en forma de herradura en los sectores oriental y noreste del volcán (Figura 7). El depósito de avalancha de escombros generado, según Mariño y Thouret (2003), tuvo un volumen estimado de aproximadamente 12 km³, considerado el más grande del Pleistoceno en el sur de Perú. Los materiales resultantes del colapso se desplazaron hacia el oeste (Figura 8), recorriendo hasta 44 km de distancia, antes de transformarse en lahares que se desplazaron más de 150 km a lo largo del río Tambo, hasta alcanzar el océano Pacífico.

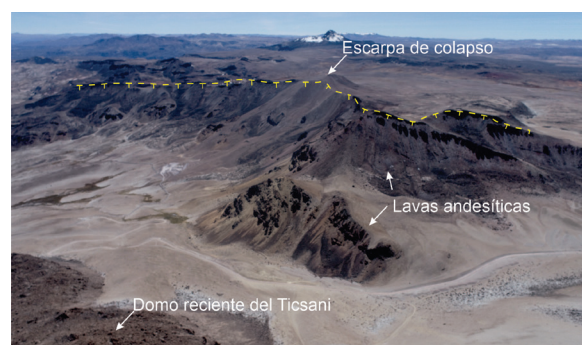


Figura 7. Vista del escarpe de colapso del "Ticsani Antiguo", ubicado en su extremo noreste.



Figura 6. Vista del sector occidental del volcán Ticsani, donde se distinguen secuencias volcánicas del "Ticsani antiguo" y "Ticsani moderno".



Figura 8. Vista del depósito de avalancha de escombros del "Ticsani Antiguo", ubicado a lo largo del valle de los ríos Putina y Carumas.

3.1.2 Ticsani moderno

Se caracteriza por presentar cuatro tipos principales de depósitos volcánicos:

- Flujos de lava en bloque de composición dacítica que yacen en el sector noroeste del volcán.
- Domos de lava alineados en dirección N325°. La disposición de estos domos refleja la influencia de lineamientos tectónicos que controlaron el emplazamiento del magma.
- Depósitos de flujos piroclásticos de bloques y ceniza, asociados al colapso de domos, canalizados en las depresiones topográficas circundantes ubicadas principalmente en los sectores suroeste, oeste y el noroeste del Ticsani.
- Depósitos de caída piroclástica que incluyen tanto depósitos de caída de lapilli de pómez y caída de ceniza. El depósito de caída de lapilli de pómez más antiguo fue datado por Mariño y Thouret (2003) en aproximadamente 10 600 +/- 80 años antes del presente (AP). Este depósito mide 1.9 m a 13 km al sureste del volcán Ticsani (Figura 9).

En el Ticsani también se distingue un sistema de fallas de dirección N-S, visibles en el sector noreste del edificio volcánico. Asimismo,

se identifican fallas con orientación NO-SE en el sector occidental, que afectan rocas sedimentarias y volcánicas del Mesozoico al Oligoceno. El emplazamiento del volcán coincide con la intersección de fallas NO-SE, N-S y E-O, lo que sugiere un control estructural significativo en la localización y la evolución del edificio volcánico (Lavallée et al., 2009).



Figura 9. Vista del depósito de caída de tefra que aflora en la Pampa Humajalzo, a 13 km al sureste del Ticsani, ligado a una erupción pliniana ocurrida hace 10 600 +/- 80 años AP, según Mariño y Thouret (2003).

4. Datos y metodología para la elaboración de mapas

4.1 Metodología para la elaboración de mapas

La metodología empleada para la elaboración de los mapas involucró los siguientes procesos:

- Recopilación de material bibliográfico orientado a determinar características de las erupciones históricas y la geología del volcán Ticsani.
- Procesamiento de imágenes de satélite Landsat del volcán Ticsani y sus alrededores.
- Elaboración de un Modelo Digital de Elevación (DEM, por sus siglas en inglés) a través de imágenes satelitales de alta resolución.
- Trabajos de campo para el reconocimiento de secuencias volcánicas emitidas en el pasado por el volcán Ticsani.
- Modelamiento de procesos volcánicos con el *software* Ash3D (Mastin et al., 2009), VolcFlow (Kelfoun & Druitt, 2005) y LaharZ (Schilling, 1998).
- Elaboración de gráficos y tablas diversas.
- Elaboración de los mapas de peligros volcánicos del Ticsani.

4.2 Softwares empleados

4.2.1 Modelo Ash3d

El Ash3D (Mastin et al., 2009) es un *software* que se basa en los principios eulerianos tridimensionales, desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés), cuyos fundamentos son descritos por Schwaiger et al. (2012). Es una herramienta utilizada para calcular la cantidad de ceniza depositada y su concentración en el aire; además, puede

usarse para recrear eventos pasados y realizar escenarios futuros de dispersión de ceniza en caso de erupciones volcánicas. Ash3d modela el transporte de ceniza volcánica dividiendo la atmósfera en una cuadrícula tridimensional y calculando el flujo de masa a través de las paredes celulares (Mastin et al., 2009).

Las condiciones iniciales de este *software* se basan en que una erupción explosiva inyecta tefra a través de una columna de células sobre el volcán y distribuye la masa verticalmente usando el sistema Suzuki (Suzuki, 1983; Carey, 1996). Posteriormente, se resuelve la ecuación de advección, difusión y sedimentación para simular el transporte y depósito de partículas de ceniza eyectadas a la atmósfera (Schwaiger et al., 2012). La advección del viento se calcula usando datos preexistentes que varían con el tiempo y métodos que usan volúmenes finitos de material. La velocidad de caída, distribución y duración del transporte están influenciadas por el tamaño de grano designado por el programa. La distribución vertical de la masa y elevación son calculadas usando la ecuación de Suzuki (1983).

El usuario ingresa variables a través de una plataforma virtual, como el nombre del volcán, la fecha, hora y duración de la erupción, la altura de la pluma, volumen (km^3) emitido como roca densa equivalente del magma (DRE) y la duración de la simulación. Los archivos resultantes que entrega el modelo son concentración (mg/m^3) y altura de la nube de cenizas (km), espesor de los depósitos (mm y pulgadas), tiempo de arribo de la nube y el depósito luego de la erupción (h), así como los aeropuertos afectados. Los parámetros eruptivos utilizados en el modelo Ash3D corresponden a los tres escenarios de erupciones vulcanianas, subplinianas y plinianas.

• Parámetros utilizados en la simulación Ash3D

Para la simulación de depositación de cenizas del volcán Ticsani en caso de un escenario de erupciones explosivas de tipo vulcaniano (IEV 1–2), se consideró un volumen DRE de ceniza de 0.002 km^3 (Tabla 4), volumen frecuente en erupciones explosivas de tipo vulcaniano como la presentada por el volcán Tungurahua (Ecuador) el 14 de julio de 2006 (Bustillos & Samaniego, 2011), y por el volcán Ubinas durante los últimos 500 años (Thouret et al., 2005; Samaniego et al., 2020). También se consideró una altura de la pluma volcánica de 6.5 km.

Tabla 4. Parámetros eruptivos utilizados para la simulación de dispersión de ceniza con el código Ash3D, para un escenario eruptivo de tipo vulcaniano de IEV 1–2.

Escenario eruptivo	IEV 1–2
Duración de la simulación	24 horas
Duración de la erupción	3 horas
Altura sobre el nivel del cráter	6.5 km
Altura sobre el nivel del mar	12 km
Volumen DRE (km ³)	0.002

Por otro lado, en la simulación para la depositación de cenizas del volcán Ticsani para un escenario de erupción de tipo subpliniano (IEV 3–4), se consideró un volumen DRE de ceniza de 0.3 km³. Este y otros parámetros utilizados para la simulación de un escenario eruptivo de IEV 3–4 son presentados en la Tabla 5.

Tabla 5. Parámetros eruptivos utilizados para la simulación con el código Ash3D, para el escenario eruptivo de tipo subpliniano de IEV 3–4.

Escenario eruptivo	IEV 3–4
Duración de la simulación	24 horas
Duración de la erupción	7 horas
Altura sobre el nivel del cráter	14.6 km
Altura sobre el nivel del mar	20 km
Volumen DRE (km ³)	0.3

Asimismo, en la simulación para la depositación de cenizas del volcán Ticsani para un escenario de erupción de tipo pliniano (IEV 5), se consideró un volumen DRE de ceniza de 0.3 km³. Este y otros parámetros utilizados para la simulación de un escenario eruptivo de IEV 5 son presentados en la Tabla 6.

Tabla 6. Parámetros eruptivos utilizados para la simulación con el código Ash3D, para el escenario eruptivo de tipo pliniano de IEV 5

Escenario eruptivo	IEV 5
Duración de la simulación	24 horas
Duración de la erupción	10 horas
Altura sobre el nivel del cráter	19.6 km
Altura sobre el nivel del mar	25 km
Volumen DRE (km ³)	1.3

Una vez definidos los escenarios eruptivos se procedió a realizar 1080 simulaciones para cada escenario, con los datos de viento registrados entre los años 2010 al 2024. En todos los casos se consideró la dirección del viento predominante (SE y SO del volcán Ticsani). Los datos de vientos fueron tomados del Centro Nacional de Predicción Ambiental de los EE. UU.

4.2.2 Modelo LaharZ

LaharZ es un programa que permite delimitar las zonas de inundación por lahares (flujos de lodo y escombros) que se originan en los drenajes que nacen en los flancos de un volcán (Iverson et al., 1998; Schilling, 1998). El programa se basa en una correlación empírica entre el volumen de un evento lahárico y el área planimétrica en sección transversal inundada por dicho lahar (Figura 10). Con base en la recopilación de datos de campo de 27 eventos laháricos bien estudiados alrededor del mundo, Iverson et al. (1998) dedujeron dos ecuaciones que relacionan los volúmenes con las áreas mencionadas anteriormente.

$$A = 0.05V^{2/3}$$

$$B = 200V^{2/3}$$

En donde A es el área transversal máxima inundada por el lahar, B es el área planimétrica total inundada y V es el volumen del lahar (Figura 10). El programa LAHARZ fue diseñado para

ejecutarse dentro de un sistema de información geográfica (ArcGIS) que emplea las ecuaciones anteriores, un modelo digital de elevación (DEM) y los volúmenes de los lahares, previamente definidos por el usuario para delimitar zonas potenciales de inundación, de manera automatizada y rápida. El DEM empleado ha sido elaborado con base en imágenes satelitales.

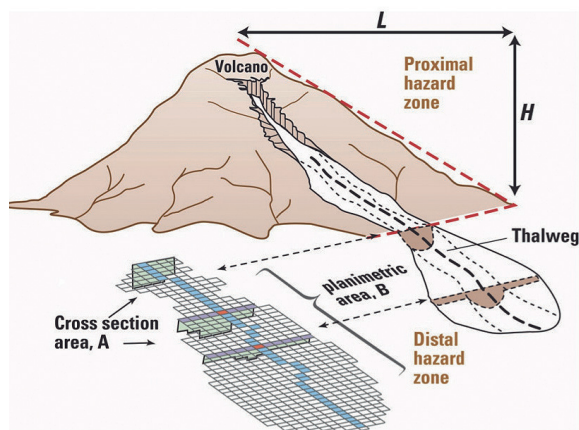


Figura 10. Relaciones entre la distancia (L) y la altura (H) por donde recorrerían los lahares, así como las áreas en sección transversal (A) y planimétrica (B) inundadas por un lahar (Schilling, 1998).

Además, para delimitar las zonas de alcance de los flujos piroclásticos y avalanchas de escombros se empleó la metodología denominada "cono de energía" (Malin & Sheridan, 1982), que ha sido muy utilizada para definir las zonas de peligro proximales y mediales alrededor de un volcán. Este método postula que el alcance horizontal (L) de un flujo piroclástico o avalancha de escombros es función de la diferencia de alturas (H) entre el punto de generación del flujo o la cima de un volcán y el punto de alcance del depósito (Figura 10). La relación H/L es un indicador de la movilidad del flujo. Así, para una relación H/L cercana a 0.1, los flujos poseen gran movilidad y, por tanto, alcanzan mayor distancia, mientras que para una relación H/L cercana a 0.3 poseen poca movilidad. Los alcances de los flujos piroclásticos y avalanchas de escombros fueron delimitados con el programa LAHARZ_py.

4.2.3 Programa VolcFlow

VolcFlow es un código euleriano de diferencias finitas escrito en el programa MATLAB. Este código determinista se basa en la conservación

de ecuaciones de masa y momento para simular fluidos newtonianos o de Bingham bajo ciertos criterios reológicos (Kelfoun & Druitt, 2005). Utiliza parámetros de flujo reológico, como viscosidad, densidad, cohesión, ángulos de fricción interna y basal. El código VolcFlow resuelve ecuaciones en un sistema de coordenadas local relacionado con la topografía del terreno, con x y y paralelas a la superficie topográfica y h (profundidad) perpendicular a estas. El código VolcFlow se ha utilizado ampliamente para simular diferentes flujos gravitacionales, como lahares y avalanchas de escombros, especialmente en volcanes (Kelfoun & Druitt, 2005; Cárdenas et al., 2013; Gueugneau, 2014; Vásconez et al., 2019). Detalles sobre el código VolcFlow y sus aplicaciones para simulaciones de lahares se pueden encontrar en Cárdenas et al. (2013) y Vásconez et al. (2019).

4.3 Escenarios eruptivos considerados

Para establecer los tipos de escenarios eruptivos futuros que puede presentar el volcán Ticsani, se han considerado los estudios geológicos de campo y estudios previos realizados sobre el volcán, efectuados por Mariño y Thouret (2003), así como datos de campo sobre el estado y la morfología que presenta en la actualidad el volcán Ticsani y otros aspectos que se describen a continuación:

- Los dinamismos eruptivos futuros, es decir, los tipos de erupciones que podría generar el volcán Ticsani.
- La magnitud de las erupciones pasadas, establecida en función del trabajo de campo y datos bibliográficos donde se determinó la distribución de los productos volcánicos.
- El comportamiento de otros volcanes peruanos considerados como «análogos» al Ticsani, tales como el Ubinas, Sabancaya, Tutupaca y otros.

Se definieron seis escenarios eruptivos ante una posible erupción del volcán Ticsani, los cuales se detallan a continuación.

4.3.1 Erupción de tipo vulcaniano (IEV 1–2)

Las erupciones vulcanianas son erupciones explosivas violentas que emiten ceniza, bloques, bombas, escorias y eventualmente pómez a la atmósfera. Las explosiones se dan en intervalos de minutos a horas e incluso días. Como resultado de estas explosiones se generan columnas eruptivas de menos de 20 km de altura (Sigurdsson et al., 2000).

Algunos de los volcanes activos ubicados en el sur peruano, como Sabancaya y Ubinas, han presentado en las últimas décadas actividad explosiva de tipo vulcaniano. En el caso del volcán Sabancaya (Arequipa), durante su actividad eruptiva 1988–1998 generó columnas de cenizas que fueron dispersadas por los vientos entre 20 km y 30 km de distancia al este del volcán (Guillande et al., 1992; Thouret et al., 1994). Posteriormente, en su proceso eruptivo 2016–2025, la dispersión de ceniza fue predominante en direcciones este, sureste y noreste del volcán (Figura 11).

Por otra parte, el volcán Ubinas, durante la erupción del 19 de julio de 2019, de IEV 2, generó una columna de cenizas y gases de más de 5500 m de altura sobre la cima del volcán. Posteriormente, las cenizas emitidas fueron dispersadas por los vientos hacia zonas distales del volcán, en direcciones sur y sureste (Figura 11), afectando principalmente poblados cercanos del valle de Ubinas y algunas localidades de las regiones de Moquegua, Tacna, Puno, así como algunas ciudades de Bolivia, como La Paz. Durante la erupción de 2019 se identificaron depósitos de

caída de cenizas de 1 mm de espesor a 20 km de distancia al sureste del volcán Ubinas (Aguilar et al., 2019).

Los trabajos previos de Mariño y Thouret (2003), así como datos de campo, han puesto en evidencia la ocurrencia de erupciones explosivas leves a moderadas (vulcanianas) del volcán Ticsani ocurridas durante el Holoceno.

Por otro lado, durante y después de las erupciones vulcanianas es frecuente la formación de lahares, sobre todo en periodos de lluvia (diciembre a marzo). Esto sucedió en erupciones presentadas recientemente por el volcán Ubinas (2006–2009; 2013–2017; 2019; 2023–2024), especialmente en periodos de lluvia cuando se generaron lahares que descendieron por las quebradas y ríos que drenan de sus flancos sur y sureste del volcán, afectando terrenos de cultivos, vías de acceso, canales de agua, etc. También durante el último proceso eruptivo del volcán Sabancaya (2016–2025), frecuentemente en periodos de lluvia, se generaron lahares en quebradas aledañas al volcán Sabancaya, Ampato y Hualca Hualca. Algunos lahares alcanzaron el río Colca, situado a más de 15 km al norte del cráter del Sabancaya.

En caso de una erupción explosiva del volcán Ticsani, los lahares generados en periodos de lluvias pueden descender por las quebradas que drenan por el sector occidental del volcán, diagnóstico que se sustenta en la existencia de variados depósitos de lahares visibles en dicho sector. Los lahares causarían graves daños en terrenos de cultivo, carreteras, puentes, etc.

Durante erupciones vulcanianas (IEV 2) también

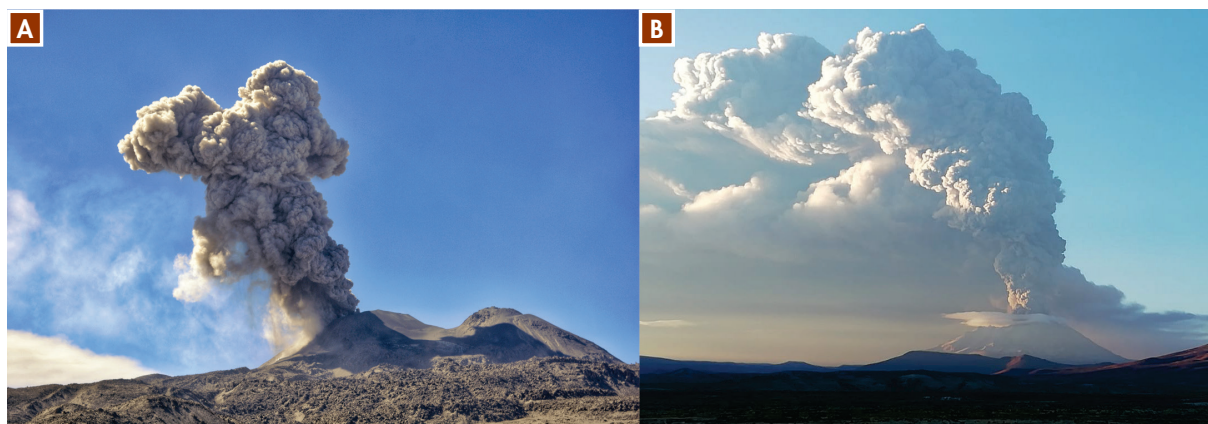


Figura 11. Vista de volcanes que presentaron erupciones vulcanianas de Índice de Explosividad Volcánica (IEV) 1–2: A) Actividad explosiva de julio de 2024 del volcán Sabancaya. B) Erupción del 19 de julio de 2019 del volcán Ubinas.

podrían generarse flujos piroclásticos de poco volumen y limitado alcance (Sigurdsson et al., 2000). Por ejemplo, en la erupción vulcaniana de IEV 2 del volcán Reventador (Ecuador) en 1976, o del volcán Tungurahua (Ecuador) en 2006 y 2010, se generaron flujos piroclásticos que viajaron a más de 4 km de distancia del cráter del volcán (Aguilera et al., 1988; Hall et al., 2013).

4.3.2 Erupción de tipo efusiva con emisión de lavas

El volcán Ticsani, durante el Pleistoceno superior e inicios del Holoceno, ha generado erupciones efusivas con emisión de flujos de lava de composición dacítica (Mariño & Thouret, 2003). Los flujos de lava emitidos son visibles en el extremo noreste, a 6.5 km de distancia del Ticsani. En el futuro, la posibilidad de ocurrencia de una erupción efusiva con emisión de flujos de lava es posible. Las lavas emitidas posiblemente descenderían por los sectores norte, noroeste y oeste del volcán, causando graves daños en carreteras y terrenos de cultivos.

4.3.3 Erupción con crecimiento de domo

En el Ticsani es probable la formación de un domo de lava. Dicho domo se puede formar cuando la lava, por extrusión dentro del conducto volcánico, es demasiado viscosa para fluir a más de uno o varios cientos de metros de distancia (Francis, 1993). Durante el crecimiento del domo, los extremos de dicho domo vienen a ser inestables y pueden caer o colapsar dando lugar a la formación de flujos piroclásticos.

El escenario que describe una futura erupción con el crecimiento y colapso de un domo de lava se basa en la existencia de tres domos de lava en el volcán Ticsani, ligados a la actividad eruptiva ocurrida durante el Holoceno. Eventualmente, el colapso o derrumbe progresivo de dicho domo de lava puede dar lugar a la formación de flujos piroclásticos de bloques y cenizas que pueden recorrer distancias de más de 6 km de la cima del volcán. En el Ticsani se han identificado depósitos de flujos piroclásticos al pie del sector occidental, asociados a eventos pasados. En tal sentido, en una eventual erupción existe una posibilidad de generar dichos eventos y depósitos.

4.3.4 Erupción de tipo subpliniano (IEV 3–4)

Durante las erupciones explosivas de tipo subpliniano de IEV 3, las columnas de ceniza y gases alcanzan entre 3 km y 20 km de altura sobre el cráter y generan depósitos de caída de ceniza y flujos piroclásticos (Sigurdsson et al., 2000). La ceniza puede ser dispersada a varias decenas de kilómetros de distancia, e incluso sobrepasar fácilmente los 100 km.

Existen algunos ejemplos de erupciones subplinianas de IEV 3 ocurridas en el continente sudamericano. Por ejemplo, el volcán Nevado del Ruiz (Colombia) generó en 1985 una erupción subpliniana con IEV 3, la cual dejó un depósito de ceniza en áreas aledañas. Las isópacas de 1 cm de espesor se midieron a 35 km de distancia del volcán (Naranjo et al., 1986).

El 16 de agosto de 2006, el volcán Tungurahua (Ecuador) produjo una erupción explosiva subpliniana de IEV 3 (Figura 12) que generó una columna de lapilli de pómez, ceniza y gases de 16 km de altura, la cual fue dispersada principalmente en dirección oeste, a más de 100 km de distancia hacia el océano Pacífico. En aquel entonces, el volcán eyectó entre $47\text{--}67 \times 10^6 \text{ m}^3$ de tefra (Eychenne et al., 2012). Además, generó flujos y oleadas piroclásticas, y un flujo de lava. La ceniza depositada alcanzó 10 cm de espesor a 10 km del volcán, y 1 cm de espesor a 20 km.

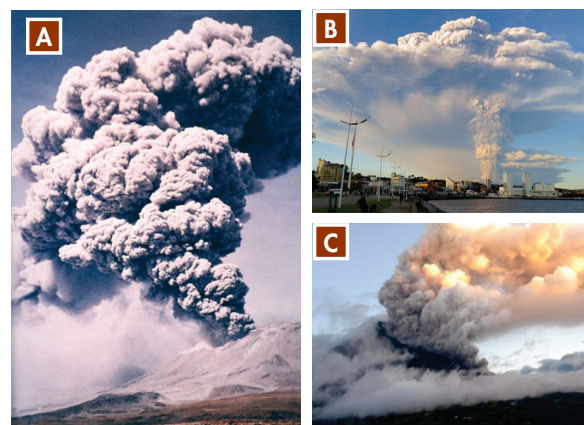


Figura 12. Vista de volcanes que presentaron erupciones explosivas subplinianas de Índice de Explosividad Volcánica (IEV) 3 y 4. a) Volcán Lascar: erupción del 19 de abril de 1993 (tomado de Ckelar Volcanes). b) Volcán Calbuco: erupción del 23 de abril de 2015 (fotografía: Barria C.). c) Volcán Tungurahua: erupción del 16 de agosto de 2006 (fotografía: Bustillos, J.).

La mayoría de los volcanes del sur del Perú han presentado este tipo de actividad. Por ejemplo, en inmediaciones del volcán Yucamane se ha encontrado un depósito de caída de lapilli de pómez asociado a una erupción subpliniana de IEV 3, ocurrida hace aproximadamente 3085 años AP (Rivera et al., 2020b). Durante dicha erupción se depositó una capa de caída de lapilli de pómez de 50 cm de espesor a 2 km al pie de los flancos sureste y este del volcán.

En el volcán Ticsani aún no se han reportado depósitos asociados a erupciones subplinianas con IEV 3, por lo que la posibilidad de ocurrencia de este tipo de erupciones es moderada a baja.

Durante una erupción subpliniana también pueden producirse flujos piroclásticos. Varios ejemplos sustentan esta afirmación; por ejemplo, en la erupción del año 1667 d. C. del volcán Ubinas, que tuvo un IEV 3 (Thouret et al., 2005), se generaron flujos piroclásticos cuyos depósitos se encuentran a 3 km al oeste del cráter. Sin embargo, dependiendo del volumen de magma y la pendiente del terreno, estos flujos pueden alcanzar mayores distancias. Durante la erupción subpliniana (IEV 3) presentada por el volcán Yucamane hace aproximadamente 3085 años AP, se emitieron flujos piroclásticos de pómez y ceniza que se emplazaron hasta 6 km al noreste de su cráter, donde tiene 7 m de espesor (Rivera et al., 2020b).

Por otra parte, durante erupciones subplinianas de IEV 4, las columnas de tefras (ceniza, lapilli de pómez, etc.) y gases pueden sobrepasar los 20 km de altura sobre el cráter y producir depósitos de caída de tefra y flujos piroclásticos (Sigurdsson et al., 2000). Existen algunos ejemplos de erupciones subplinianas recientes de IEV 4 ocurridas en el continente sudamericano. Por ejemplo, al sur de Chile, el volcán Calbuco, durante los días 22 y 23 de abril de 2015, registró una erupción explosiva de tipo subpliniano (IEV 4), con un volumen de piroclastos de 0.38 km³. La erupción generó una pluma de 15 km a 17 km de altura (Segura, 2016) y flujos piroclásticos con un volumen aproximado de 0.03 km³, que se desplazaron hasta 6 km hacia el noreste del volcán (Castruccio et al., 2016; Romero et al., 2016).

El volcán Lascar (Chile), durante los días 19 y 20 de abril de 1993 (Figura 12), generó una erupción subpliniana (IEV 4) que produjo una columna eruptiva de lapilli de pómez, ceniza y gases de 25 km de altura, emitiendo un volumen total de 10⁸ m³ de magma (Pavez et al., 2006). Los flujos

piroclásticos generados durante dicha erupción se emplazaron hasta 8.5 km de distancia al noroeste y 4 km al sureste de la cima (Spark et al., 1997). La pluma eruptiva fue arrastrada cientos de kilómetros hacia el sureste, llegando incluso hasta las costas atlánticas de Argentina y Brasil. Los máximos espesores medidos se encuentran en la ladera este del volcán Lascar, a 5 km del cráter, donde miden hasta 80 cm de espesor, con lapilli de pómez de hasta 0.4 m de diámetro. Los espesores medidos disminuyen rápidamente a medida que se alejan del cráter, alcanzando entre 3 cm y 5 cm de espesor en la laguna Aguas Calientes, a 25 km al sureste del cráter; 1 cm a 3 cm en el Alto del Lari, a 45 km del volcán; y 1 cm en Paso de Sico, a 70 km al sureste del volcán Lascar (Viramonte et al., 1995).

También podemos mencionar la erupción del volcán Reventador (Ecuador), del 3 noviembre de 2002, la cual tuvo un IEV 4. Dicha erupción generó una columna eruptiva de 17 km de altura. En esa ocasión, la ceniza llegó hasta Quito, ubicada a más de 80 km al oeste del volcán, dejando un depósito milimétrico y forzando el cierre del antiguo aeropuerto Mariscal Sucre por 10 días. Los flujos piroclásticos bajaron por las quebradas del volcán hasta el río Quijos y destruyeron partes del oleoducto en construcción. El volumen del depósito de caída piroclástica fue de 0.3 km³, y el de los depósitos de corrientes de densidad piroclástica de 0.04 km³ (Le Pennec et al., 2003; Hall et al., 2004).

En el pasado, en la región Moquegua, los volcanes Ubinas y Ticsani también han presentado erupciones subplinianas. La erupción subpliniana del volcán Ticsani de IEV 4 emplazó depósitos de caída de tefras a más de 50 km del cráter (Mariño & Thouret, 2003).

Las erupciones subplinianas (IEV 3–4) también pueden generar lahares, especialmente si los flujos piroclásticos se emplazan sobre casquetes glaciares y originan la fusión de hielo y nieve (Major & Newhall, 1989), como ocurrió durante la erupción del volcán Nevado del Ruiz en 1985, que tuvo un IEV 3 (Pierson et al., 1990). También se pueden originar lahares durante fuertes precipitaciones.

En caso de una eventual erupción subpliniana del volcán Ticsani también pueden generarse lahares que descenderían por las quebradas que drenan principalmente por su sector occidental, en dirección a los ríos Putina y Carumas. Los lahares causarían graves daños en terrenos de cultivo, carreteras y puentes.

4.3.5 Erupción de tipo pliniano (IEV 5)

Las erupciones plinianas son las erupciones explosivas más violentas, debido a que el magma, en la mayoría de los casos, es silíceo, viscoso y posee un alto contenido de gases. En dichas erupciones, las columnas eruptivas pueden alcanzar alturas mayores a los 20 km y los materiales emitidos pueden afectar más de 800 km² (Cas & Wright, 1987). Durante estas erupciones se generan depósitos voluminosos de caída de lapilli de pómez y ceniza; asimismo, se pueden generar flujos piroclásticos de pómez y ceniza, además de oleadas piroclásticas. También es frecuente encontrar lahares asociados a este tipo de erupciones, los mismos que recorren decenas a cientos de kilómetros de distancia.

En el sur del Perú, los volcanes Misti, Ubinas, Ticsani, Yucamane, Ampato, Sara Sara y Chachani han presentado este tipo de erupciones (Thouret et al., 2001; Thouret et al., 2005; Mariño & Thouret, 2003; Samaniego et al., 2016; Rivera et al., 2020a; Aguilar et al., 2022). La erupción de hace 2000 años AP del volcán Misti fue de tipo pliniano (IEV 5) y generó depósitos de caída de lapilli de pómez que afloran en toda el área de Arequipa (Harpel et al., 2011). A más de 12 km del cráter del volcán Misti, dicho depósito tiene entre 10 cm a 20 cm de espesor. Asimismo, la erupción generó flujos piroclásticos de pómez y ceniza que poseen espesores mayores a 3 m a más de 11 km del cráter. La erupción generó lahares que alcanzaron más de 20 km de distancia (Thouret et al., 2001). En el volcán Ubinas, la última erupción pliniana ocurrió hace 980 años AP, y emplazó depósitos de caída de lapilli de pómez de hasta 25 cm de espesor a más de 40 km del cráter (Thouret et al., 2005).

El volcán Ticsani, hace 10 600 +/- 80 años AP, presentó una erupción pliniana cuyo eje de dispersión de la ceniza estuvo orientado hacia el sureste (Mariño & Thouret, 2003). El depósito de lapilli de pómez mide 4 m en el sector sur del volcán, y tiene 2.8 m de espesor a 13 km al sur. Una eventual erupción del volcán Ticsani puede ser también de tipo pliniano, por lo que se considera este tipo de escenario.

Las erupciones plinianas también pueden generar lahares, especialmente si los flujos piroclásticos se emplazan sobre casquetes glaciares y originan la fusión de hielo y nieve (Major & Newhall, 1989). También se pueden originar lahares posteriores

al emplazamiento de los depósitos piroclásticos, durante las temporadas de fuertes precipitaciones que se dan entre los meses de diciembre y marzo en la región sur del Perú. Durante una erupción pliniana (IEV 5), el alcance de los lahares sería de varias decenas a centenas de kilómetros de distancia del volcán. Por ejemplo, el lahar de la erupción pliniana del volcán Misti, de hace 2000 años AP, tiene casi 1 m de espesor a 16 km al suroeste de la cima del volcán Misti (Harpel et al., 2011).

4.3.6 Colapso de flanco y emplazamiento de avalancha de escombros

En las inmediaciones de varios volcanes activos y potencialmente activos del sur del Perú, como Ticsani, Misti, Tutupaca, Ubinas y Sara Sara (Mariño & Thouret, 2003; Thouret et al., 2001; Thouret et al., 2005; Samaniego et al., 2015; Samaniego et al., 2020; Rivera et al., 2020a), se han identificado depósitos de avalancha de escombros. Uno de los depósitos más importantes, por el gran volumen y el área cubierta, es el depósito de avalancha de escombros del volcán Ticsani, el cual fue generado por un colapso de dicho volcán durante el Pleistoceno. La avalancha cubrió aproximadamente 70 km² y alcanzó cerca de 40 km de distancia, luego de lo cual se transformó en lahar y se canalizó por el río Tambo hasta llegar al océano Pacífico, situado a más de 150 km de distancia del volcán (Mariño & Thouret, 2003).

El volcán Ticsani está constituido por tres domos de lava, de 1.5 km a 2 km de diámetro, edificados al interior de una caldera de avalancha, formada luego del colapso del volcán. En caso de ocurrencia de una eventual erupción efusiva del Ticsani, los domos difícilmente se derrumbarían, por lo cual la posibilidad de generar avalanchas en dicho escenario es baja. Sin embargo, si ocurriera una erupción lateral dirigida, podría producirse el colapso de los domos y originarse avalanchas de escombros, tal como ocurrió en el volcán Tutupaca durante la erupción del año 1802 (Samaniego et al., 2015).

5. Resultados: mapas de peligros del volcán Ticsani

Se han elaborado cinco mapas de peligros que consideran una potencial erupción del volcán Ticsani. Estos corresponden al (1) mapa de peligros múltiples para la zona proximal; (2) mapa de peligros por caída de ceniza para un escenario de erupciones leves a moderadas, de tipo vulcaniano (IEV 1–2); (3) mapa de peligros por caída de tefras para un escenario de erupción explosiva subpliniana; (4) mapa de peligros por caída de tefras para un escenario de erupciones explosivas, de tipo pliniano (IEV 5); y (5) mapa de peligros por lahares.

Cuatro de estos mapas (mapa de peligros múltiples para la zona proximal; mapa de peligros por caída de ceniza para una erupción vulcaniana; mapa de peligro por caída de tefras para una erupción pliniana, y mapa de peligros por lahares), a diferente escala, han sido integrados para una mejor visualización en un solo formato (ver mapa de peligro).

5.1 Mapa de peligros volcánicos múltiples para la zona proximal

La zonificación de peligros del mapa proximal se realizó para peligros múltiples, es decir, para el emplazamiento de flujos piroclásticos, flujos de lava, domos de lava, avalanchas de escombros, lahares y eyección de proyectiles balísticos. Las áreas potencialmente afectadas por estos eventos fueron integradas para generar el mapa principal de peligros múltiples (Figura 13). Asimismo, las zonas de alto, moderado y bajo peligro fueron determinadas con base en escenarios eruptivos establecidos en función del Índice de Explosividad Volcánica (IEV).

5.1.1 Zona de alto peligro (rojo)

Comprende un área proximal, ligeramente alargada de noroeste a sureste, que involucra los tres domos de lava, flujos de lava y diversas quebradas que drenan del volcán Ticsani, las cuales pueden ser severamente afectadas por la ocurrencia de flujos piroclásticos, flujos de

lava, crecimiento de domo de lava, proyectiles balísticos, avalanchas de escombros y lahares (flujos de lodo). Cualquier tipo de erupción puede afectar dicha área, inclusive las de bajo IEV (1–2), como las ocurridas durante el Holoceno y Pleistoceno superior.

En el volcán Ticsani, la probabilidad de ocurrencia de erupciones vulcanianas es alta, debido a que este tipo de erupciones ocurrió durante el Holoceno.

Los límites de la zona de alto peligro se encuentran entre 2 km y 11 km de distancia de los domos de lava recientes del volcán Ticsani (Figura 13). Las mayores distancias (8 km–11 km de los domos) se encuentran en los sectores oeste, noroeste y sureste, mientras que las menores distancias (2 km–4 km de los domos) están al este del volcán Ticsani.

Los límites de la zona de alto peligro coinciden con el alcance de un gran número de flujos de lavas del volcán Ticsani, que se encuentran entre los 2 km y 4 km de distancia desde su punto de emisión. Por otro lado, los proyectiles balísticos generados durante erupciones vulcanianas recientes (IEV 1–2) han alcanzado distancias limitadas a las zonas muy proximales al cráter, típicamente menores a 3 km, en varios volcanes del sur del Perú (Rivera et al., 2014; Thouret et al., 1994). En una eventual erupción podría producirse el crecimiento de un domo de lava, tal como ocurrió durante el Holoceno, que ocuparía una parte de la zona roja. Del mismo modo, un eventual colapso o derrumbe de los domos de lava podría generar avalanchas de escombros que afectarían dicha zona.

En resumen, la zona de alto peligro (rojo) puede ser afectada por flujos piroclásticos, generados durante erupciones explosivas pequeñas a moderadas con IEV 1–2, así como por flujos de lava, domos de lava, proyectiles balísticos y avalanchas de escombros.

5.1.2 Zona de moderado peligro (naranja)

Corresponde inmediatamente a la zona colindante con la zona de alto peligro. Esta zona comprende algunas colinas y laderas visibles en áreas aledañas al volcán Ticsani, así como el valle del río Putina. Esta zona se extiende entre 6.5 km y 11.5 km de distancia en dirección este-oeste de los domos del volcán Ticsani. Asimismo, se extiende hasta 2 km y 3 km de distancia al este, y 4.5 km a 5.5 km al sur del volcán (Figura 13). Esta zona

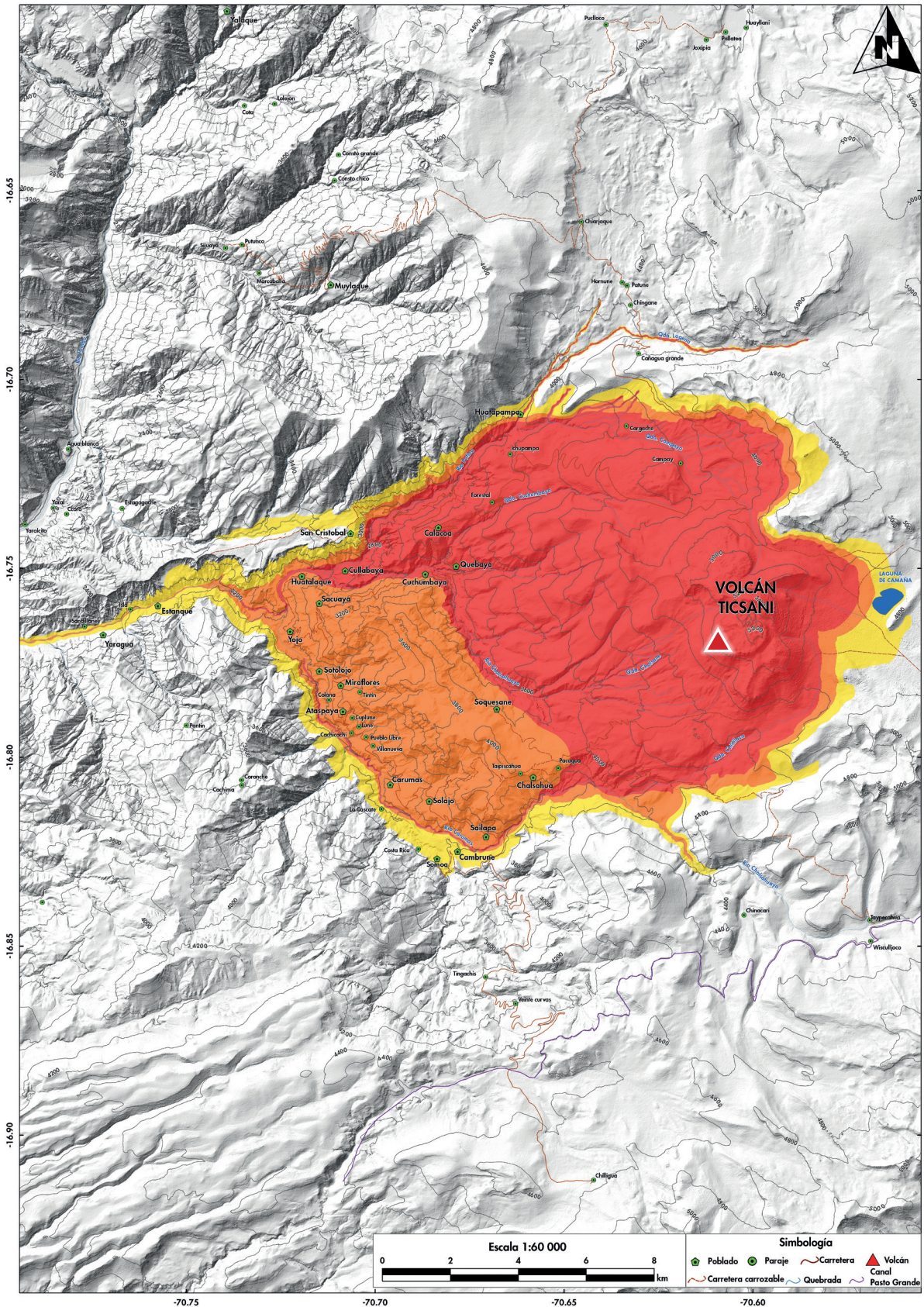


Figura 13. Mapa de peligros múltiples para la zona proximal, en el cual se muestran las zonas de peligro por el emplazamiento de flujos pirolásticos, flujos de lava, avalanchas de escombros, lahares y eyección de proyectiles balísticos.

puede ser cubierta por flujos piroclásticos, oleadas piroclásticas, lahares, proyectiles balísticos y avalanchas de escombros en caso de que la erupción explosiva sea alta (IEV 3–4).

Se consideró este escenario, ya que este tipo de erupciones subplinianas han sido frecuentes en algunos volcanes del sur del Perú, como en el volcán Tutupaca (Tacna), que en el año de 1802 presentó una erupción subpliniana (IEV 3) que generó flujos piroclásticos que viajaron hasta 10 km desde el volcán (Samaniego et al., 2015). Además, en las últimas décadas, han ocurrido en el continente sudamericano erupciones subplinianas de IEV 4, como la que ha presentado el volcán Lascar (Chile) en abril de 1993, en la que se generaron flujos piroclásticos que viajaron hasta 8.5 km de distancia al noroeste y 4 km al sureste de la cima del volcán (Spark et al., 1997).

Por otro lado, el alcance máximo de proyectiles balísticos se encuentra dentro de un radio menor a 4 km del centro de emisión, según datos tomados de Blong (1984). Esta distancia se encuentra dentro de los límites de la zona de moderado peligro (sector oriental). Durante una erupción efusiva del volcán Ticsani pueden ser emitidos flujos de lava que pueden viajar hacia el sector oriental, en la zona de moderado peligro. De igual modo, un eventual colapso o derrumbe de los domos de lava puede generar avalanchas de escombros que afectarían dicha zona. Asimismo, durante lluvias intensas pueden generarse lahares que afectarían la zona.

En resumen, la zona de moderado peligro (naranja) puede ser afectada por flujos piroclásticos generados durante erupciones explosivas subplinianas de IEV 3–4, así como por proyectiles balísticos, avalanchas de escombros y lahares.

5.1.3 Zona de bajo peligro (amarillo)

Corresponde inmediatamente a la zona colindante con la zona de moderado peligro. Esta zona comprende algunas colinas y laderas visibles en áreas alejadas del volcán Ticsani, así como el valle del río Putina-Carumas. Esta zona se extiende entre 11.5 km–13 km de distancia en dirección oeste de los domos del volcán Ticsani. Asimismo, se extiende de 3 km a 4 km de distancia al este, y de 5.5 km a 6.5 km al sur de dicho volcán (Figura 13). Esta zona puede ser cubierta por flujos piroclásticos, oleadas piroclásticas, lahares y avalanchas de escombros, en caso de que se produzca una

erupción explosiva de tipo pliniano (IEV 5).

Los alcances antes descritos coinciden con los del flujo piroclástico de pómez y ceniza de la erupción del volcán Misti de hace 2000 años AP, que tuvo un IEV 5 y que alcanzó alrededor de 12 km de distancia desde la cima del volcán (Cobeñas et al., 2012). Asimismo, un eventual colapso o derrumbe importante del volcán Ticsani podría generar avalanchas de escombros que afectarían dicha zona. Del mismo modo, durante lluvias intensas podrían generarse lahares que también la afectarían.

En resumen, la zona de bajo peligro (amarillo) puede ser afectada por flujos piroclásticos, generados durante erupciones plinianas (IEV 5). Asimismo, puede ser afectada por avalanchas de escombros y lahares voluminosos. La probabilidad de ocurrencia de erupciones plinianas en el volcán Ticsani es muy baja.

5.2 Mapa de peligros por caídas de cenizas durante una erupción vulcaniana (IEV 1–2)

El mapa de peligros por caída de cenizas para un escenario de erupción vulcaniana del volcán Ticsani se ha dividido en tres zonas: zona de alto peligro en rojo, zona de moderado peligro en naranja y zona de bajo peligro en amarillo (Figura 14).

5.2.1 Zona de alto peligro (rojo)

La zona de alto peligro es el área proximal, la cual tiene una configuración elíptica que se prolonga 20 km de distancia al este y 18 km al oeste del volcán Ticsani (Figura 14). Durante erupciones vulcanianas, con IEV 2, esta zona puede ser afectada por caída de cenizas que formarían una capa de algunos centímetros de espesor. La delimitación de esta zona se basa en la dispersión de cenizas de erupciones vulcanianas de los volcanes Sabancaya, Ubina y Misti.

5.2.2 Zona de moderado peligro (naranja)

Los límites de la zona de moderado peligro se hallan aproximadamente entre 20 km y

105 km al este, y entre 18 km a 95 km al oeste del volcán Ticsani (Figura 14). Durante erupciones vulcanianas, con IEV 1–2, esta zona puede ser afectada por caída de cenizas que formarían una capa de varios milímetros de espesor. Esta hipótesis se basa en la dispersión de cenizas de la erupción vulcaniana del volcán Sabancaya del periodo 1988–1998 (IEV 2), durante la cual se midió 1 mm de espesor de ceniza a 30 km al este del cráter del Sabancaya (Thouret et al., 1994). Asimismo, se basa en la dispersión de cenizas de la erupción actual del volcán Sabancaya (2016–2025) que presenta depósitos de ceniza de 1 mm de espesor a 20 km al este del cráter del volcán.

5.2.3 Zona de bajo peligro (amarillo)

Esta zona tiene una configuración elíptica, con una distancia de 86 km a 206 km al noroeste, de 71 km a 179 km al norte y de 85 km a más de 150 km al sureste del volcán Ticsani, sobrepasando la frontera Perú-Bolivia (Figura 14). Durante erupciones vulcanianas, con IEV 1–2, esta área puede ser afectada por caída de cenizas de menos de 1 mm de espesor. Este escenario se basa en la erupción actual del volcán Sabancaya (2016–2025), en la que se midió una capa de ceniza de menos de 1 mm de espesor a más de 30 km al este del volcán.

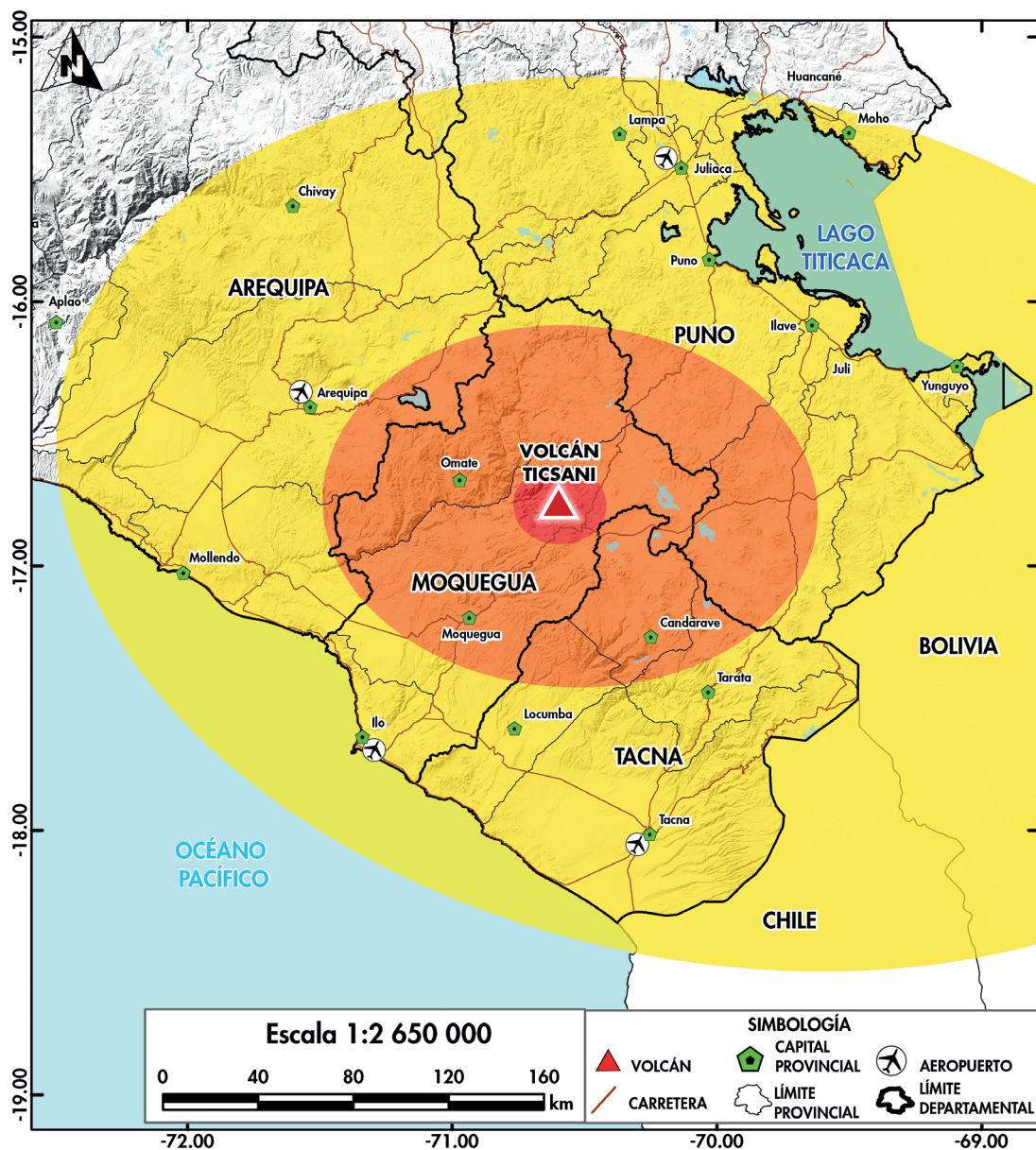


Figura 14. Mapa de peligro por caída de cenizas del volcán Ticsani para un escenario eruptivo de tipo vulcaniano, con IEV 1–2 (simulación USGS, 2025).

5.3 Mapa de peligros por caídas piroclásticas durante una erupción subpliniana (IEV 3–4)

No se han evidenciado depósitos asociados a erupciones subplinianas en inmediaciones del volcán Ticsani, pero sí depósitos asociados a erupciones plinianas y vulcanianas. En tal sentido, la posibilidad de ocurrencia de erupciones subplinianas en el Ticsani es baja, aunque por analogía con otros volcanes similares, la posibilidad de ocurrencia en el futuro no puede ser excluida.

El mapa de peligros por caídas piroclásticas para un escenario de erupción subpliniana del volcán Ticsani se ha dividido en tres zonas: zona de alto peligro en rojo, zona de moderado peligro en naranja y zona de bajo peligro en amarillo (Figura 15).

5.3.1 Zona de alto peligro (rojo)

Se halla a una distancia aproximada de 90 km al este, 96 km al oeste, 72 km al norte y 71 km al sur del volcán Ticsani (Figura 15). Durante erupciones subplinianas, con IEV 3, esta área puede ser afectada por caída de cenizas y lapilli de pómez que formarían una capa de varios centímetros de espesor.

Los espesores obtenidos son coherentes con los depósitos encontrados durante la erupción del volcán Tungurahua (Ecuador) de agosto de 2006, de IEV 3, en la cual se reportaron espesores de caída de ceniza de entre 4 cm y 5 cm a 10 km de distancia del cráter (Eychenne et al., 2012).

Durante erupciones subplinianas, con IEV 4, esta área puede ser afectada por caídas de lapilli y bloques de pómez de varios decímetros a algunos metros de espesor. Dicha hipótesis se basa en la dispersión de caídas piroclásticas de erupciones plinianas (IEV 4) de los volcanes Misti y Ticsani. La erupción del volcán Ticsani de hace 11 000 años AP (IEV 4) emplazó caídas de ceniza de alrededor de 3 m de espesor a 10 km del cráter (Mariño & Thouret, 2003).

5.3.2 Zona de moderado peligro (naranja)

La zona de moderado peligro corresponde

inmediatamente a la zona colindante con la zona de alto peligro. Esta zona tiene una configuración elíptica alrededor del cráter, con una distancia de 96 km a 240 km al oeste, 72 km a 212 km al norte, más de 158 km al sur y más de 137 km al sureste del volcán Ticsani, sobrepasando la frontera Perú-Bolivia (Figura 15). Durante erupciones subplinianas, con IEV 3, esta zona de moderado peligro puede ser afectada por caída de cenizas que formarían una capa de algunos centímetros a varios milímetros de espesor. Este escenario se basa en algunos ejemplos, como en el caso de la erupción de noviembre de 1985 del volcán Nevado del Ruiz, durante la cual la ceniza alcanzó cerca de 2 cm de espesor a 30 km de distancia del volcán.

Durante erupciones subplinianas, con IEV 4, esta área puede ser afectada por caídas de ceniza, lapilli y bloques de pómez que formarían una capa de varios decímetros de espesor (Figura 15). Este hecho se basa en la dispersión de caídas piroclásticas de erupciones subplinianas (IEV 4) de los volcanes Misti y Ticsani. La erupción del volcán Ticsani, de hace 11 000 años AP (IEV 4), emplazó caídas de ceniza de alrededor de 50 cm de espesor a 30 km del cráter (Mariño & Thouret, 2003). Además, durante la erupción subpliniana (IEV 4) del volcán Calbuco en Chile, en 2015, las cenizas emitidas formaron una capa de 1.5 cm de espesor a 220 km al noroeste del cráter, en la localidad de Collón Cura, Argentina (Romero et al., 2016).

5.3.3 Zona de bajo peligro (amarillo)

La zona de bajo peligro corresponde inmediatamente a la zona colindante con la zona de moderado peligro. Esta zona tiene una configuración elíptica alrededor del cráter, con una distancia aproximada de 243 km a 495 km al noroeste, de 212 km a 506 km al norte, más de 137 km al sureste y más de 158 km al sur del volcán Ticsani (Figura 15). En esta zona, durante una erupción subpliniana de IEV 3, se depositaría una capa de ceniza de menos de 1 mm de espesor. Los vientos van a influenciar en la distribución de la caída de ceniza. Este escenario se basa en las erupciones de los volcanes Nevado del Ruiz de noviembre de 1985, el cual emplazó caídas de ceniza de entre 2 mm y 3 mm de espesor a 50 km de distancia. Por su parte, luego de la erupción del volcán Tungurahua de agosto de 2006 (IEV 3, Eychenne et al., 2012), se reportaron espesores de ceniza de 0.7 cm a 0.8 cm a 20 km del volcán.

Durante erupciones subplinianas de IEV 4, esta área puede ser afectada por caídas de ceniza de varios milímetros a algunos centímetros de espesor. Esta hipótesis se basa en la erupción explosiva (IEV 4) del volcán Lascar (Chile), de abril de 1993, durante la cual la pluma eruptiva fue arrastrada cientos de kilómetros hacia el sureste, llegando incluso hasta las costas atlánticas de Argentina y Brasil. Los máximos espesores medidos se encuentran en la ladera este del volcán Lascar, a 5 km del cráter, donde miden hasta 80 cm de espesor, con lapilli de pómez de

hasta 0.4 m de diámetro. Los espesores medidos disminuyen rápidamente a medida que se alejan del cráter, alcanzando entre 3 cm y 5 cm de espesor a 25 km al sureste del cráter, 1 cm a 3 cm de espesor a 45 km del volcán, 1 cm a 70 km al sureste del volcán Lascar (Viramonte et al., 1995). Durante la erupción subpliniana (IEV 4) del volcán Calbuco en Chile, en 2015, las cenizas emitidas dejaron una capa de ceniza de menos de 1 mm de espesor a 510 km al noroeste del cráter, en la localidad de Neuquen, Argentina (Romero et al., 2016).

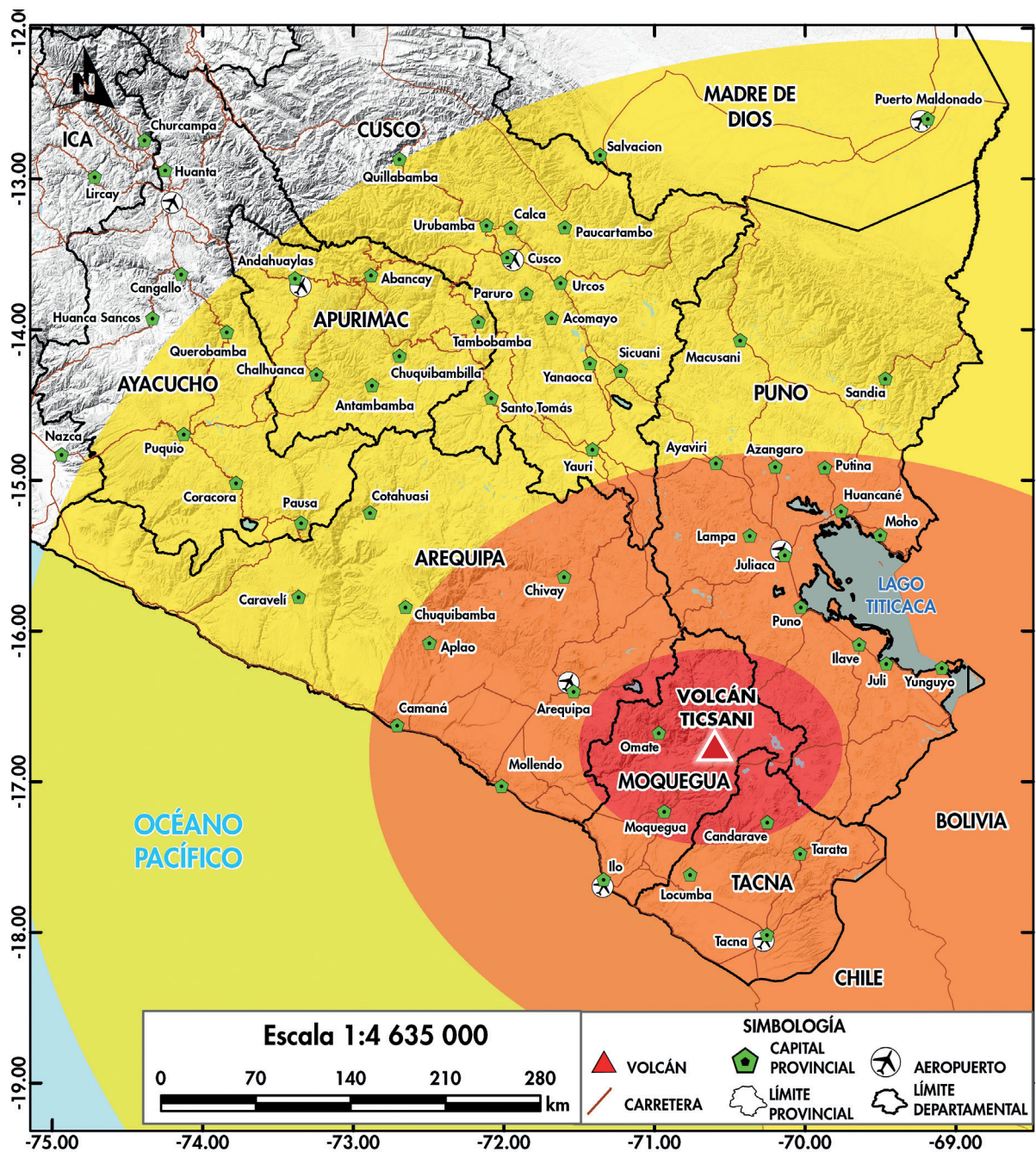


Figura 15. Mapa de peligro por caída de tefras del volcán Ticsani para un escenario eruptivo tipo subpliniano, con IEV 3-4 (simulación USGS, 2025).

5.4. Mapa de peligros por caídas piroclásticas durante una erupción pliniana (IEV 5)

Al norte, noreste y sur del volcán Ticsani se distinguen depósitos de caídas de lapilli de pómez con espesores entre 6 m y 8 m, lo cual muestra que dicho volcán en el pasado ha generado erupciones plinianas.

El mapa de peligros por caídas piroclásticas del volcán Ticsani para un escenario de erupción pliniana se ha dividido en tres zonas: zona de alto peligro en rojo, zona de moderado peligro en naranja y zona de bajo peligro en amarillo (Figura 16).

5.4.1 Zona de alto peligro (rojo)

La zona de alto peligro tiene forma elíptica y corresponde al área proximal. Se prolonga hasta una distancia de 197 km al oeste y 244 km al este del volcán Ticsani, sobrepasando la frontera Perú-Bolivia (Figura 16). Durante erupciones plinianas, con IEV 5, esta área puede ser afectada severamente por la caída de lapilli de pómez que formaría una capa de algunos metros a centímetros de espesor. Este escenario puede ser similar a la depositación de lapilli de pómez presentada por el volcán Sara Sara en el Pleistoceno superior, y por el volcán Misti hace 2000 años AP. En efecto, en la última erupción pliniana de IEV 5 del volcán Misti, ocurrida hace 2000 años, depositó una capa de lapilli de pómez de 5 cm de espesor a 28 km al suroeste de la cima del Misti (Cobeñas et al., 2012).

5.4.2 Zona de moderado peligro (naranja)

Los límites de la zona de moderado peligro colindan con la zona de alto peligro. Comprende una distancia de 194 km a 412 km al noroeste y más de 244 km al sureste del volcán Ticsani, sobrepasando la frontera Perú-Bolivia (Figura 16). Durante erupciones plinianas, con IEV 5, esta área puede ser afectada por caídas de más de 10 cm de espesor, pero no mayores a lo estimado en el escenario de alto peligro.

5.4.3 Zona de bajo peligro (amarillo)

La zona de bajo peligro tiene una configuración elíptica, y se halla desde los 412 km a 835 km de distancia al noroeste y más de 808 km al sureste desde del volcán Ticsani, sobrepasando la frontera Perú-Bolivia (Figura 16). Por el norte, dicha zona se extiende entre 254 km a 470 km de distancia del volcán Ticsani. Durante erupciones plinianas, con IEV 5, esta área puede ser afectada por caídas de lapilli de algunos centímetros a varios milímetros de espesor.

Dicha estimación es similar a la zona afectada durante la erupción pliniana (IEV 5) del volcán Mount Saint Helens (Washington, EE. UU.) en 1980, que generó una columna eruptiva de lapilli de pómez de aproximadamente 19 km de altura. Posteriormente, el lapilli de pómez y la ceniza viajaron hacia el este del volcán, influenciados por los vientos a través de los Estados Unidos, y causaron oscuridad total en Spokane, Washington, a 400 km del volcán. Se reportó 1.3 cm de espesor de ceniza a 480 km del volcán (Harris, 1988).

5.5 Mapa de peligros por lahares

Se han realizado pocas estimaciones de volúmenes de lahares que descienden de los volcanes activos del sur del Perú. Los cálculos de volúmenes para lahares del volcán Misti (Delaite et al., 2005; Thouret et al., 2022) muestran que volúmenes máximos de lahares del orden de 1.5 a 4 millones de m³ estarían asociados a erupciones explosivas moderadas (IEV 1–2), mientras que lahares con volúmenes máximos del orden de 9 a 10 millones de m³ son menos frecuentes y ocurren cada 1000 a 5000 años. Estos últimos estarían asociados a erupciones explosivas importantes (IEV ≥ 3; Delaite et al., 2005; Vargas-Franco et al., 2010).

Thouret et al. (2022), para la construcción de escenarios de peligros por descenso de lahares del volcán Misti (Arequipa), asociados a lluvias intensas, considera tres volúmenes de lahar de 150 000 m³, 350 000 m³ y 500 000 m³. Tomando en consideración dichos datos y las condiciones meteorológicas que imperan en inmediaciones del volcán Ticsani, los volúmenes de los eventos laháricos escogidos fueron de 150 000 m³ para lahares de poco volumen, y que se estiman son

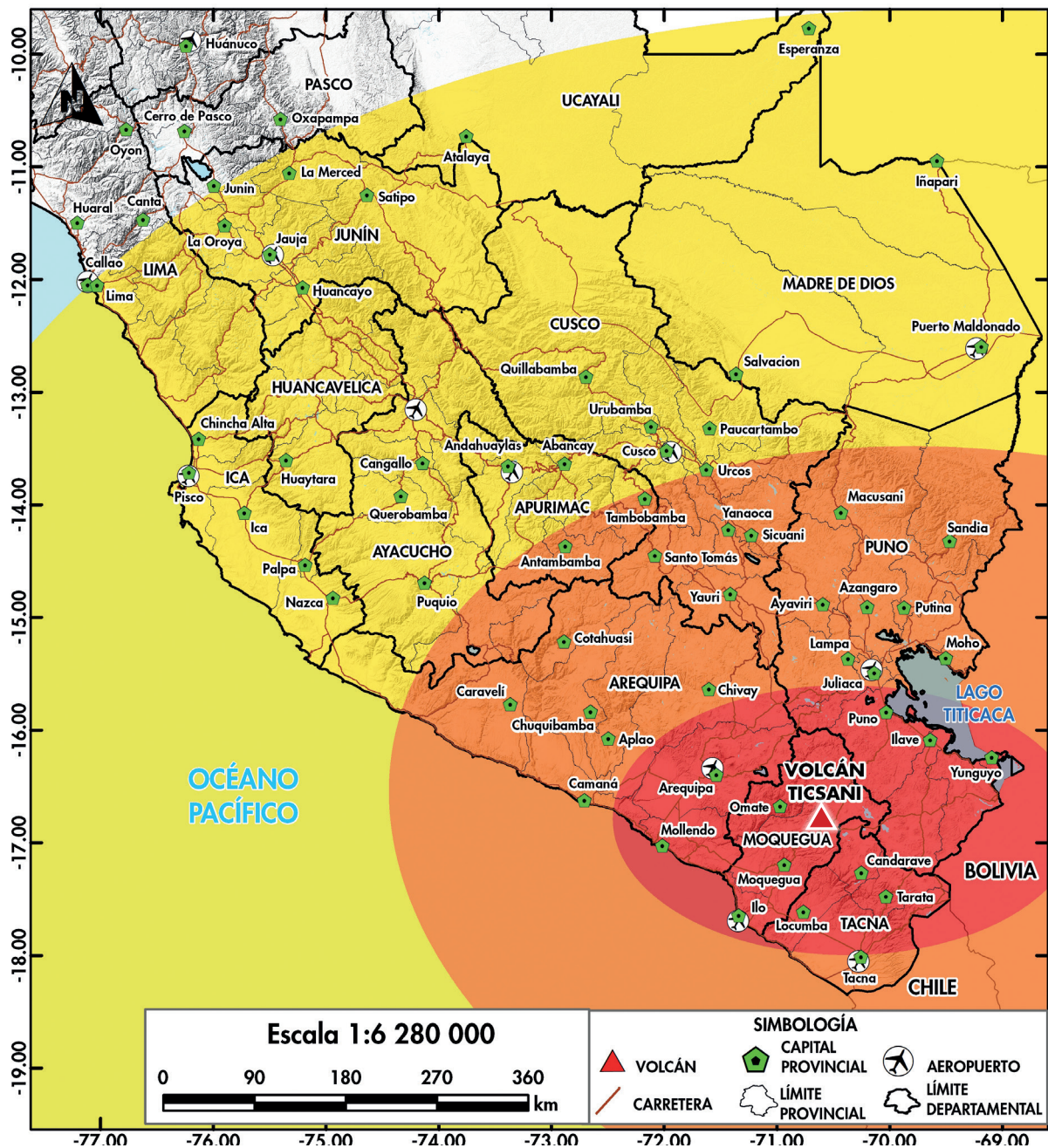


Figura 16. Mapa de peligro por caída de tefras del volcán Ticsani para un escenario eruptivo tipo pliniano de IEV 5 (simulación USGS, 2025).

más frecuentes, y volúmenes de 350 000 m³ y 500 000 m³ para lahares de importante volumen, pero menos frecuentes, asociados a erupciones explosivas importantes o lluvias muy intensas.

En el mapa de peligros por lahares (Figura 17), la zona roja es considerada como zona de alto peligro, y corresponde a la zona de mayor posibilidad de ser afectada por lahares poco voluminosos (150 000 m³), asociados a erupciones

de baja a moderada magnitud (IEV 1–2) o lluvias intensas. La zona naranja, denominada de moderado peligro, puede ser afectada por lahares de moderado volumen. Finalmente, la zona amarilla es considerada de bajo peligro o de menor posibilidad de ser afectada por lahares muy voluminosos. Los lahares voluminosos (350 000 m³ y 500 000 m³) podrían estar asociados a erupciones explosivas de gran magnitud (IEV ≥ 3) o lluvias intensas.

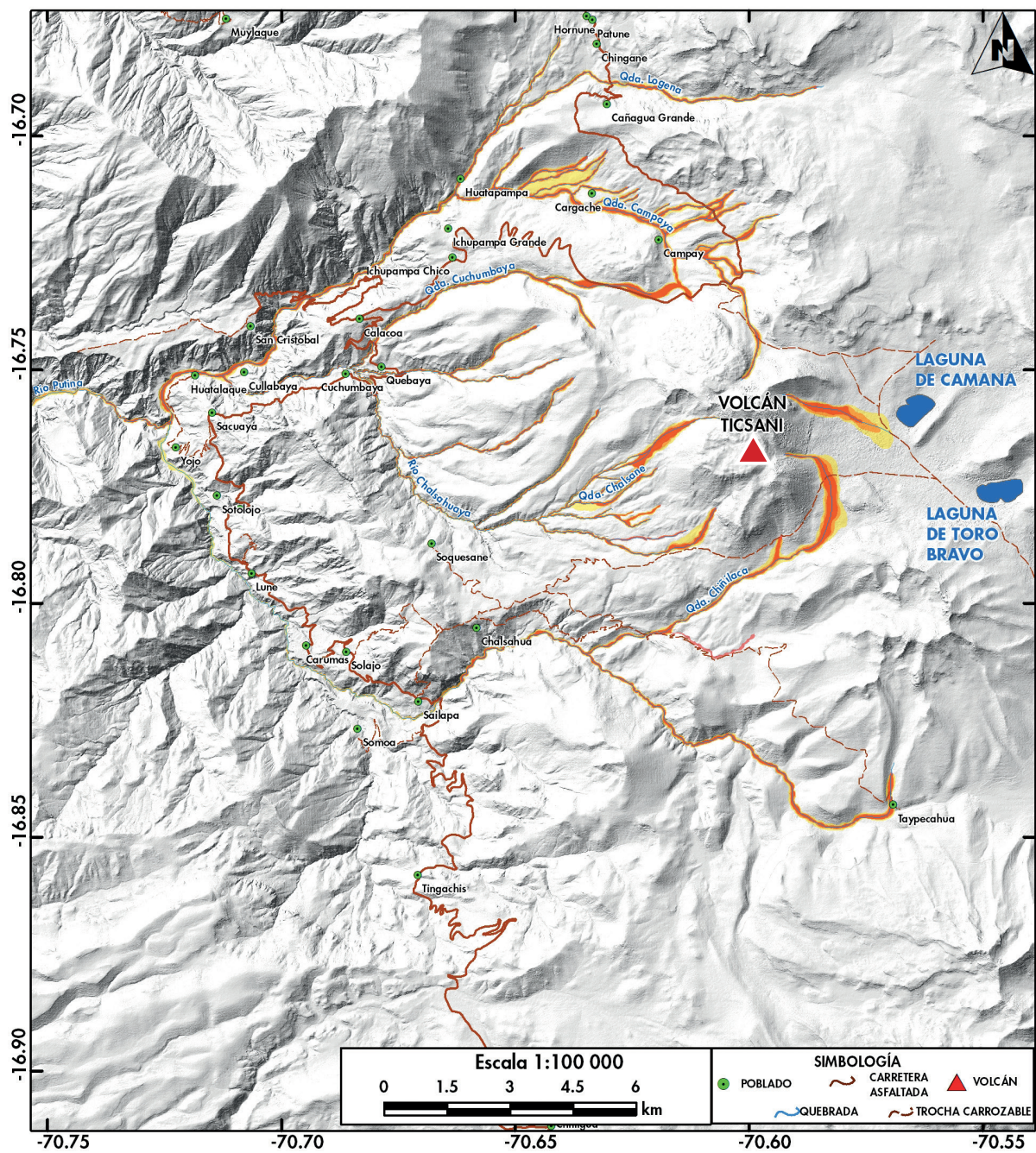


Figura 17. Mapa de peligro de lahares del volcán Ticsani que considera tres escenarios de peligro: alto (rojo), moderado (naranja) y bajo (amarillo).

Conclusiones ▣

- El volcán Ticsani corresponde a un complejo de domos y flujos de lava ubicado en la zona altoandina de la región Moquegua, provincia de Mariscal Nieto. Ha presentado erupciones efusivas, erupciones con crecimiento y destrucción de domos, así como erupciones explosivas de tipo vulcaniano y pliniano, ocurridas durante el Pleistoceno superior y el Holoceno.
- En el volcán Ticsani se han identificado seis posibles escenarios eruptivos en caso de una reactivación o erupción. Los escenarios corresponden a una erupción vulcaniana (IEV 1–2), erupción subpliniana (IEV 3–4), erupción pliniana (IEV 5), crecimiento y destrucción de domo, erupciones efusivas con emisión de flujos de lava, y el colapso de los domos preexistentes con el emplazamiento de avalancha de escombros.
- Sobre la base de los estudios efectuados se presentan cuatro mapas de peligro volcánico incluidos dentro de un solo póster. Estos mapas corresponden al de peligros volcánicos múltiples para la zona proximal por emplazamiento de flujos de lava, flujos piroclásticos, proyectiles balísticos, avalanchas de escombros y lahares. Este mapa muestra una zona de alto peligro (rojo), ligeramente alargada de noroeste a sureste, en la cual las mayores distancias (8–11 km de los domos) se encuentran en los sectores oeste, noroeste y sureste, mientras que las menores distancias (2–4 km de los domos) están al este del volcán Ticsani. La zona de moderado peligro (naranja) se extiende entre 6.5 km y 11.5 km de distancia en dirección este-oeste de los domos del volcán Ticsani. Asimismo, se extiende de 2 km y 3 km de distancia al este, y de 4.5 km a 5.5 km al sur de dicho volcán. La zona de bajo peligro (amarillo) se extiende entre 11.5 km–13 km de distancia en dirección oeste de los domos del volcán Ticsani. De igual modo, se extiende de 3 km a 4 km de distancia al este, y de 5.5 km a 6.5 km al sur de dicho volcán.
- En el mapa de peligros por caídas de cenizas para el escenario de erupciones vulcanianas (IEV 1–2), la zona de alto peligro (rojo) se prolonga a una distancia de 20 km al este y 18 km al oeste del volcán Ticsani. Dicha zona puede ser afectada por la caída de cenizas que formarían una capa de algunos centímetros de espesor. La zona de moderado peligro (naranja) se halla entre 20 km y 105 km al este, y entre 18 km a 95 km al oeste del volcán Ticsani. Esta zona puede ser afectada por la caída de cenizas que formarían una capa de pocos milímetros de espesor. La zona de bajo peligro (amarillo) tiene una configuración elíptica, con una distancia de 86 km a 206 km al noroeste, de 71 km a 179 km al norte y de 85 km a más de 150 km al sureste del volcán Ticsani, sobrepasando la frontera Perú-Bolivia. Esta zona puede ser afectada por la caída de cenizas que formarían una capa de menos de 1 mm de espesor.
- En el mapa de peligros por caídas piroclásticas para un escenario de erupción subpliniana (IEV 3–4), la zona de bajo peligro (rojo) es el área proximal y se halla a una distancia aproximada de 90 km al este, 96 km al oeste, 72 km al norte y 71 km al sur del volcán Ticsani. Durante una erupción subpliniana, esta área puede ser afectada por la caída de cenizas y lapilli de pómez que formarían una capa de varios centímetros de espesor. La zona de moderado peligro (naranja) corresponde al área que colinda con la zona de alto peligro. Esta zona tiene una configuración elíptica alrededor del cráter, con una distancia de 96 km a 240 km al oeste, de 72 km a 212 km al norte, más de 158 km al sur y más de 137 km al sureste del volcán Ticsani, sobrepasando la frontera Perú-Bolivia. Esta zona puede ser afectada por la caída de cenizas que formarían una capa de pocos centímetros de espesor. La zona de bajo peligro (amarillo) comprende una distancia aproximada de 243 km a 495 km al noroeste, de 212 km a 506 km al norte y de más de 137 km al sureste y 158 km al sur del volcán Ticsani. En esta zona se depositaría una capa de ceniza de varios milímetros a menos de 0.1 mm de espesor.
- En el mapa de peligros por caídas piroclásticas para el escenario de una erupción pliniana (IEV 5), la zona de alto peligro (amarillo) es el área proximal y se prolonga hasta una distancia de 244 km al este, sobrepasando frontera Perú-Bolivia, y hasta una distancia de 197 km al oeste del volcán Ticsani. Durante erupciones plinianas, esta área puede ser afectada por la caída de cenizas y lapilli de pómez que formarían una capa de algunos metros a varios centímetros de espesor. La zona de moderado peligro (naranja) colinda inmediatamente con la zona de alto peligro. Esta zona tiene una configuración elíptica alrededor del cráter, con una distancia entre

194 km a 412 km al noroeste y más de 244 km al este del volcán Ticsani, sobrepasando la frontera Perú-Bolivia. Esta zona puede ser afectada por la caída de cenizas que formarían una capa de algunos centímetros de espesor. La zona de bajo peligro (amarillo) tiene una configuración elíptica y se halla de 412 km a 835 km de distancia al noroeste y más de 808 km al sureste del volcán Ticsani, sobrepasando la frontera Perú-Bolivia. En esta zona se depositaría cenizas de menos de 1 mm de espesor.

- En el mapa de peligros por lahares, la zona roja, considerada de alto peligro, puede ser afectada por lahares de hasta 150 000 m³; la zona naranja, de moderado peligro, puede ser afectada por lahares de 350 000 m³; mientras que la zona amarilla, de bajo peligro, puede ser afectada por lahares de 500 000 m³.

Referencias

- Aguilar, R., Thouret, J.-C., Samaniego, P., Wörner, G., Jicha, B., Paquette, J.-L., Suaña, E., & Finizola, A. (2022). Growth and evolution of long-lived, large volcanic clusters in the Central Andes: The Chachani Volcano Cluster, southern Peru. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 426, 107539.
- 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 Fall Meeting, San Francisco, CA, United States.
- Aguilera, E., Almeida, E., & Balseca, W. (1988). El Reventador: An active volcano in the sub-Andean zone of Ecuador. *Rendiconti della Società Italiana di Mineralogia e Petrologia*, 43, 853–875.
- Bignami, C., Bosi, V., Costantini, L., Cristiani, C., Lavigne, F., & Thierry, P. (2012). *Handbook for volcanic risk management: Prevention, crisis management, resilience*. MIAVITA Team.
- Blong, R. (1984). *Volcanic hazards: A sourcebook on the effects of eruptions*. Academic Press Australia.
- Blong, R. (2000). Volcanic hazard and risk management. In H. Sigurdsson, B. Houghton, S. R. McNutt, H. Rymer, & J. Stix (Eds.), *Encyclopedia of volcanoes* (pp. 1215–1228). Academic Press.
- Bustillos, J., & Samaniego, P. (2011). *Volcán Tungurahua: Tamaño de las erupciones explosivas*. 7mas Jornadas de Ciencias de la Tierra, Escuela Politécnica Nacional.
- Cárdenas, E. A., Porras, P., & Morales, L. Y. (2013). Using VolcFlow software to simulate pyroclastic flows from the Cerro Machín volcano, Tolima, Colombia. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 23(2), 157–172.
- Carey, S. (1996). Modeling of tephra fallout from atmospheric eruptions. In L. Scarpa & R. Tilling (Eds.), *Monitoring and mitigation of volcanic hazards* (pp. 429–463). Springer Verlag.
- Cas, R., & Wright, J. (1987). *Volcanic successions, modern and ancient*. Allen & Unwin.
- Cobeñas, G., Thouret, J.-C., Bonadona, C., & Boivin, P. (2012). The c.2030 yr BP Plinian eruption of El Misti volcano, Peru: Eruption dynamics and hazard implications. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 241–242, 105–120.
- De Silva, S., & Francis, P. (1991). *Volcanoes of the Central Andes*. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1017/S0016756800008372>
- Delaite, G., Thouret, J.-C., Sheridan, M., Labazury, 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 N.F.*, 209–231.
- Eychenne, J., Le Pennec, J.-L., Troncoso, L., Gouhier, M., & Nedelc, J.-M. (2012). Causes and consequences of bimodal grain-size distribution of tephra fall deposited during the August 2006 Tungurahua eruption (Ecuador). *Bulletin of Volcanology*, 187–205.
- Francis, P. (1993). *Volcanoes: A planetary perspective*. Oxford University Press.
- Gerbe, M., & Thouret, J.-C. (2004). Role of magma mixing in the petrogenesis of tephra erupted during the 1990–98 explosive activity of Nevado Sabancaya, southern Peru. *Bulletin of Volcanology*, 66(6), 541–561.
- Glicken, H. (1996). *Rockslide–debris avalanche of May 18, 1980, Mount St. Helens volcano* (Open-File Report 96-677). U.S. Geological Survey.
- Gueugneau, V. (2014). *Évaluation du logiciel VolcFlow pour la simulation numérique de lahars et application aux risques associés* [Tesis de maestría, Université Blaise Pascal Clermont II].
- Guillaude, R., Thouret, J.-C., Huamán, D., Gourgaud, A., & Le Guern, F. (1992). L'activité éruptive actuelle du volcan Nevado Sabancaya (Sud du Pérou) et l'évaluation des menaces et des risques. *Géologie, cartographie et imagerie satellitaire*.
- Hall, M., Steele, A., Mothes, P., & Ruiz, M. (2013). Pyroclastic density currents (PDC) of the 16–17 August 2006 eruptions of Tungurahua volcano, Ecuador: Geophysical registry and characteristics. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 78–93.
- Harpel, C., De Silva, S., & Salas, G. (2011). The 2 ka eruption of Misti Volcano, southern Peru—the most recent Plinian eruption of Arequipa's iconic volcano. *Geological Society of America Special Papers*, 484, 1–72.

- Harris, S. L. (1988). *Fire mountains of the West: The Cascade and Mono Lake volcanoes*. Mountain Press Publishing Company.
- Hoblitt, R., Walder, J., Driedger, C., Scott, K., Pringle, P., & Vallance, J. (1995). *Volcano hazards from Mount Rainier* (Open-File Report 95-273). U.S. Geological Survey.
- INEI. (2018). *Censos Nacionales XII de Población y VII de Vivienda, 22 de octubre del 2017: Resultados definitivos*. Instituto Nacional de Estadística e Informática.
- Iverson, R., Schilling, S., & Vallance, J. (1998). Objective delineation of lahar-inundation hazard zones. *Geological Society of America Bulletin*, 100, 972–984.
- Kelfoun, K., & Druitt, T. (2005). Numerical modeling of the emplacement of Socompa rock avalanche, Chile. *Journal of Geophysical Research*, 110(B12), B12202.
- Lavallée, Y., De Silva, S., Salas, G., & Byrnes, J. (2009). Structural control on volcanism at the Ubinas, Huaynaputina, and Ticsani volcanic group (UHTVG), southern Peru. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 186, 253–264.
- Machacca, R., Lesage, P., Tavera, H., Pesicek, J., Caudron, C., Torres, J., Puma, N., Vargas, K., Lazarte, I., Rivera, M., & Burgisser, A. (2023). The 2013–2020 seismic activity at Sabancaya Volcano (Peru): Long-lasting unrest and eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 435, 107767.
- Major, J., & Newhall, C. (1989). Snow and ice perturbation during historical volcanic eruptions and the formation of lahars and floods. *Bulletin of Volcanology*, 52(1), 1–27.
- Malin, M., & Sheridan, M. (1982). Computer-assisted mapping of pyroclastic surges. *Science*, 217(4560), 637–640.
- Mariño, J., & Thouret, J.-C. (2003). Geología, historia eruptiva y evaluación de peligros del volcán Ticsani (sur del Perú). *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, 1–27. <http://hdl.handle.net/20.500.12816/1261>
- Mastin, L., Guffanti, M., Servranckx, R., Webley, P., Barsotti, S., & Dean, K. (2009). A multidisciplinary effort to assign realistic source parameters to models of volcanic ash-cloud transport and dispersion during eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 186, 10–21.
- Ministerio del Ambiente. (2016). *Definiciones conceptuales de los ecosistemas en el Perú*. https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/sinia/archivos/public/docs/definiciones_ecosistemas_peru.pdf
- Ministerio del Ambiente. (2019). *Sexto informe nacional sobre diversidad biológica: La biodiversidad en cifras*. <https://www.gob.pe/institucion/minam/informes-publicaciones/281709-sexto-informe-nacional-sobre-diversidad-biologica>
- Ministerio de Cultura. (2025). *Base de datos de pueblos indígenas u originarios*. <https://bdpi.cultura.gob.pe/buscador-de-localidades-de-pueblos-indigenas>
- Ministerio de Educación. (2024). *Estadística de la calidad educativa*. <https://escale.minedu.gob.pe/padron-de-iiie>
- Ministerio de Trabajo y Promoción del Empleo (MTPE). (2020). *Resultados de la Encuesta Nacional de Hogares sobre Condiciones de Vida y Pobreza (ENAHQ) 2004–2020*. <https://www.gob.pe/institucion/mtpe/informes-publicaciones/3135305-informacion-estadistica-del-mercado-de-trabajo-de-regiones-mayo-2022>
- Nakada, S. (2000). Hazards from pyroclastic flows and surges. In H. Sigurdsson, B. F. Houghton, S. R. McNutt, H. Rymer, & J. Stix (Eds.), *Encyclopedia of volcanoes* (pp. 945–955). Academic Press.
- Naranjo, J., Sigurdsson, H., Carey, S., & Fritz, W. (1986). Eruption of the Nevado del Ruiz volcano, Colombia, on 13 November 1985: Tephra fall and lahars. *Science*, 233, 961–963.
- Pavez, A., Remy, D., Bonvalot, S., Diament, M., Gabalda, G., Froger, J.-L., Julien, P., Legrand, D., & Moisset, D. (2006). Insight into ground deformations at Láscar volcano (Chile) from SAR interferometry, photogrammetry and GPS data: Implications on volcano dynamics and future space monitoring. *Remote Sensing of Environment*, 100, 307–320.
- Pierson, T., Janda, R., Thouret, J.-C., & Borrero, C. (1990). Perturbation and melting of snow and ice by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, and consequent mobilization, flow and deposition of lahars. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 41(1–4), 17–66.

- Quispesivana, Q., & Zapata, A. (2000). *Memoria descriptiva del cuadrángulo de Omate (34-U)*. INGEMMET. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/2045>
- Rivera, M., Cueva, K., Le Pennec, J., Vela, J., Samaniego, P., Manrique, N., & Soncco, Y. (2020a). Geología y evaluación de los peligros del volcán Sara Sara (Ayacucho). *Boletín Serie C: Geología e Ingeniería Geológica N° 78*. INGEMMET.
- Rivera, M., Mariño, J., Samaniego, P., Delgado, R., & Manrique, N. (2016). Geología y evaluación de peligros del complejo volcánico Ampato–Sabancaya (Arequipa). *Boletín Serie C. INGEMMET*.
- Rivera, M., Thouret, J.-C., Samaniego, P., & Le Pennec, J.-L. (2014). The 2006–2009 activity of Ubinas volcano (Peru): Petrology of the 2006 eruptive products and insights into genesis of andesite magmas, magma recharge and plumbing system. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 270, 122–141.
- Rivera, M., Samaniego, P., Vela, J., Le Pennec, J., Guillou, H., Paquette, J., & Liorzou, C. (2020b). The eruptive chronology of the Yucamane–Calientes compound volcano: A potentially active edifice of the Central Andes (Southern Peru). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 393, 1–20.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.107095>
- Samaniego, P., Rivera, M., Mariño, J., Guillou, H., Liorzou, C., Zerathe, S., & Scao, V. (2016). The eruptive chronology of the Ampato–Sabancaya volcanic complex (Southern Peru). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 323, 110–128.
- Samaniego, P., Valderrama, P., Mariño, J., van Wyk de Vries, B., Roche, O., Manrique, N., Chédeville, C., Liorzou, C., Fidel, L., & Malnati, J. (2015). The historical (218 ± 14 a BP) explosive eruption of Tutupaca volcano (Southern Peru). *Bulletin of Volcanology*, 77, 51.
- Schilling, S. (1998). LAHARZ: GIS programs for automated mapping of lahar-inundation hazard zones (Open-File Report 98-638). U.S. Geological Survey.
- Schwaiger, H., Denlinger, R., & Mastin, L. (2012). Ash3d: A finite-volume, conservative numerical model for ash transport and tephra deposition. *Journal of Geophysical Research*, 117, 20. <https://doi.org/10.1029/2011JB008968>
- Segura, A. (2016). *Erupción subpliniana de abril de 2015 del volcán Calbuco, Andes del Sur: Génesis, dinámica y parámetros físicos de la columna eruptiva y depósitos piroclásticos de caída asociados* [Tesis de licenciatura, Universidad de Chile]. <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/142799>
- Sigurdsson, H., Houghton, B., McNutt, S., Rymer, H., & Stix, J. (2000). *Encyclopedia of volcanoes*. Academic Press.
- Spark, R. S. J., Gardeweg, M. S., Calder, E., & Matthews, S. J. (1997). Erosion by pyroclastic flows on Lascar volcano, Chile. *Bulletin of Volcanology*, 58(7), 557–565.
- Suzuki, T. (1983). A theoretical model for dispersion of tephra. In D. Shimozuru & I. Yokoyama (Eds.), *Arc volcanism: Physics and tectonics* (pp. 93–113). Terra Scientific Publishing Company (TERRAPUB).
- Thouret, J., Finizola, A., Fornari, M., Legeley-Padovani, A., Suni, J., & Frechen, M. (2001). Geology of El Misti volcano near the city of Arequipa, Peru. *Bulletin of the Geological Society of America*, 1593–1610.
- Thouret, J., Guillande, R., Huaman, D., Gourgaud, A., Salas, G., & Chorowicz, J. (1994). L'activité actuelle du Nevado Sabancaya (Sud Pérou): reconnaissance géologique et satellitaire, évaluation et cartographie des menaces volcaniques. *Bulletin de la Société géologique de France*, 165(1), 49–63.
- Thouret, J., Rivera, M., Wörner, G., Gerbe, M., Finizola, A., Fornari, M., & Gonzales, K. (2005). Ubinas: The evolution of the historically most active volcano in southern Perú. *Bulletin of Volcanology*, 67, 557–589.
- Thouret, J.-C., Arapa, E., Charbonnier, S., Guerrero, A., Kelfoun, K., Córdoba, 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. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.865989>
- Tilling, R. (1989). Volcanic hazards and their mitigation: Progress and problems. *Reviews of Geophysics*, 27(2), 237–269.

- Ui, T., Takarada, S., & Yoshimoto, M. (2000). Debris avalanches. In H. Sigurdsson, B. Houghton, S. McNutt, H. Rymer, & J. Stix (Eds.), *Encyclopedia of volcanoes* (pp. 617–626). Academic Press.
- Vargas-Franco, R., Thouret, J.-C., Delaite, G., van Westen, C., Sheridan, M. F., Siebe, C., Groppelli, G., & Viereck-Goette, L. (2010). Mapping and assessing volcanic hazards and risk in the city of Arequipa, Peru, based on GIS techniques. In G. Groppelli & L. Viereck-Goette (Eds.), *Stratigraphy and geology of volcanic areas* (Geological Society of America Special Publication SPE464, pp. 265–280).
- Vásconez, F., Vásconez, R., & Mothes, P. (2019). Flujos de lodo del volcán Carihuairazo provocados por el terremoto de Ambato, Ecuador, en 1698 y su reconstrucción numérica con perspectivas a futuro. *Revista Geofísica*, 69, 11–29. <https://doi.org/10.35424/rgf.v0i69.823>
- Viramonte, J., Becchio, R., Bolli, M. I., Petrinovic, I., Seggiaro, R., & Tejada, A. (1995). *Informe sobre la erupción del volcán Lascar de abril de 1993*. Instituto Geonorte, UNSa., 13 pp.

Información clave para ti

Puedes consultar el mapa de peligros del volcán Ticsani, las **alertas**, **reportes** y **boletines** vulcanológicos generados por el IGP a través de nuestros diferentes canales de comunicación.

RECUERDA: la primera acción de prevención es mantenerse al tanto de la actividad volcánica con la información oficial que genera el IGP.



APP **#IGP**

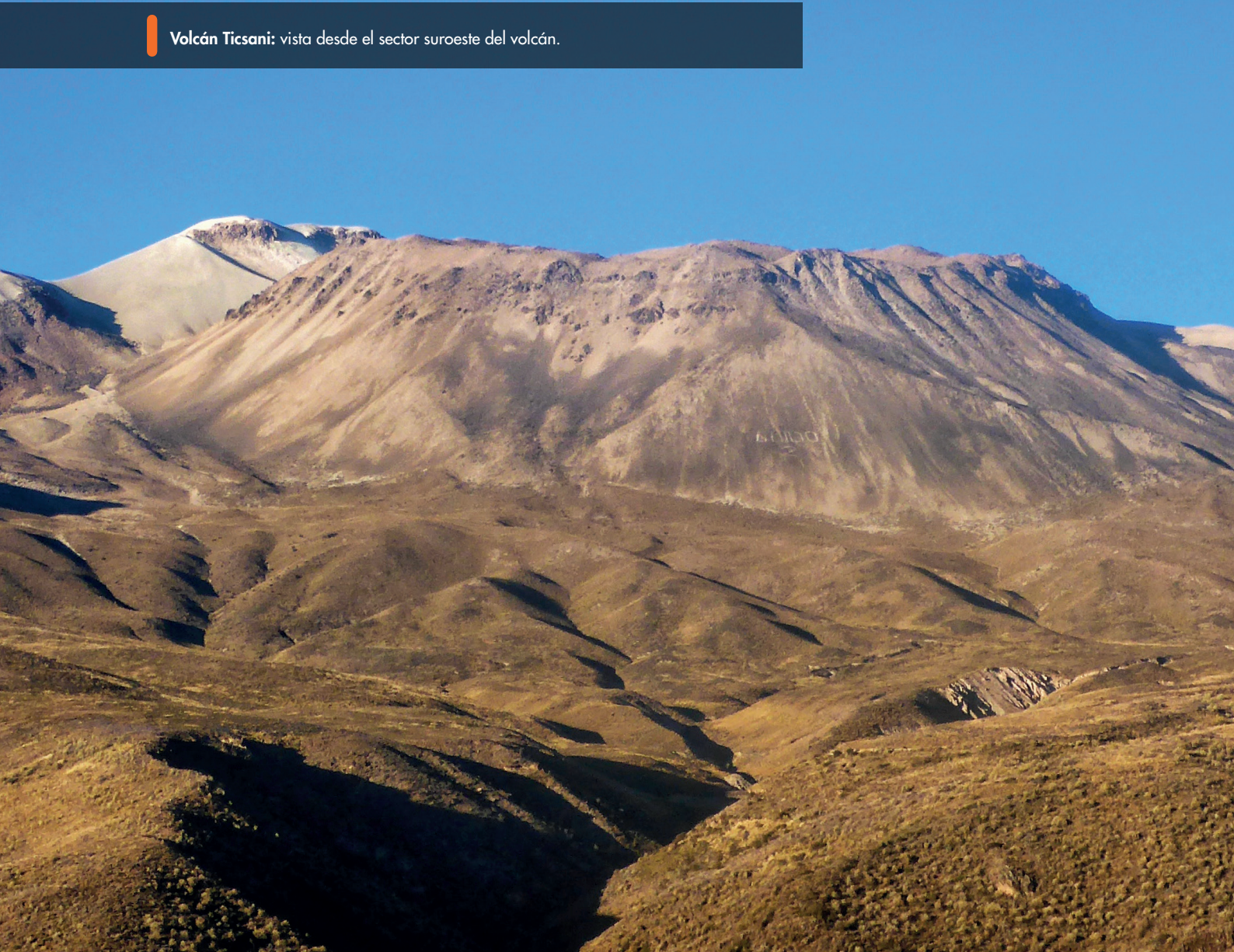


Web **IGP**



REGEN

Volcán Ticsani: vista desde el sector suroeste del volcán.





@igp.peru



@igp_peru



@igp.peru



@igp_videos



@institutogeofisicodelperu



@igp.peru