

Informe
técnico

MAPA

DE PELIGROS DEL VOLCÁN UBINAS

Arequipa, 2024



CRÉDITOS

Juan Carlos Castro Vargas
Ministro del Ambiente

Hernando Tavera
Presidente ejecutivo del IGP

Edmundo Norabuena
Director científico del IGP

Marco Rivera
Director del Observatorio Vulcanológico del Sur

Antonella Condorena
Jefa de la Unidad Funcional de Comunicaciones

Marco Rivera
David Valdivia
Juan Cuno
José Del Carpio
Lady Quispe
Autores

Jorge Concha
Diseño y diagramación

Marco Rivera
Jorge Concha
Edición de contenido

cenvul@igp.gob.pe
<https://www.igp.gob.pe/servicios/centro-vulcanologico-nacional/>

Carátula: vista del volcán Ubinas desde su sector oeste

A. H. José María Arguedas, mz. D, lt. 8, Sachaca, Arequipa

Teléfono: +5154369212

Arequipa, noviembre de 2024

CONTENIDO

6	Presentación
7	Resumen
8	Introducción
9	Condiciones climatológicas
11	Aspecto socioeconómico
13	Los peligros volcánicos
13	Caída de piroclastos (tefras)
14	Flujos de lava
14	Flujos y oleadas piroclásticas
14	Lahares (flujos de lodo y escombros)
14	Avalanchas de escombros
15	Gases volcánicos
16	El volcán Ubinas
16	Historia eruptiva
17	Características de la actividad volcánica histórica del Ubinas
19	Actividad volcánica reciente
21	Datos y metodología para la elaboración de mapas
21	Metodología para la elaboración de mapas
21	Softwares empleados
22	Parámetros de entrada para posibles escenarios eruptivos
27	Resultados: mapas de peligros del volcán Ubinas
27	Mapa de peligros volcánicos múltiples para la zona proximal
27	Mapa de peligros por caídas piroclásticas para una erupción vulcaniana (IEV1-2)
30	Mapa de peligros por caídas piroclásticas durante una erupción subpliniana o pliniana (IEV 4-5)
31	Mapa de peligros por lahares
33	Conclusiones
35	Referencias

UBINAS



Elevación

5672 m s. n. m.



Región

Moquegua



Provincia

General Sánchez Cerro



Última erupción

2023-2024 (continúa)



Población en un radio de 30 km

5354 personas



Inicio de vigilancia en tiempo real

2006



Instrumentos y técnicas de vigilancia

7 estaciones sísmicas

3 cámaras científicas

2 estaciones GNSS

3 inclinómetros

1 estación multigas

Sistemas satelitales

PRESENTACIÓN



Dr. Hernando Tavera
Presidente ejecutivo
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 Ubinas, 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 Ubinas se ubica en la región Moquegua, a aproximadamente 70 km al este de la ciudad de Arequipa. Este volcán es considerado como el más activo del Perú por haber presentado al menos 28 procesos eruptivos desde el año 1550 hasta la actualidad. Con base en estudios vulcanológicos previos y datos de campo se proponen cinco escenarios eruptivos en caso de erupción de este volcán. A continuación, se menciona cada uno de ellos ordenados de acuerdo con su probabilidad de ocurrencia: 1) escenario de erupción de tipo vulcaniana (Índice de Explosividad Volcánica [IEV] 1-2; 2) escenario de erupción explosiva de tipo subpliniana o pliniana (IEV 4-5); 3) escenario de colapso de un sector del volcán que puede generar avalanchas de escombros; 4) escenario de emisión de flujos de lava; y 5) escenario de erupción con crecimiento y colapso de un domo de lava.

Con base en datos de campo y en el modelamiento de procesos volcánicos se han elaborado cuatro mapas de peligros que se presentan en un solo póster: a) mapa de peligros volcánicos múltiples para la zona proximal, el cual considera la ocurrencia de flujos de lava, flujos piroclásticos, lahares, caída de proyectiles balísticos y avalancha de escombros. b) Mapa de peligros por caídas de cenizas para un escenario de tipo vulcaniano (IEV 1-2), en el cual la zona de alto peligro (rojo) se halla a una distancia de 15 km al este-sureste y 8 km al oeste del cráter del volcán Ubinas. Durante erupciones vulcanianas esta zona puede ser afectada por caídas de cenizas de varios milímetros a centímetros de espesor. La zona de moderado peligro (naranja) se halla aproximadamente entre 15 km y 56 km al este, y entre 8 km y 42 km al oeste del cráter del volcán Ubinas. Esta zona puede ser afectada por caídas de cenizas de algunos milímetros de espesor. La zona de bajo peligro (amarillo) tiene una configuración elíptica, cuyos límites se sitúan a una distancia de más de

240 km al este, 125 km al oeste y 100 km al sur del volcán Ubinas. Esta zona puede ser afectada por caídas de cenizas de menos de 1 mm de espesor. c) Mapa de peligros por caídas piroclásticas para un escenario de tipo subpliniano-pliniano (IEV 4-5), en el cual la zona de alto peligro (rojo) tiene una configuración elíptica alrededor del cráter, con una distancia de más de 600 km al este, 320 km al oeste y 280 km al sur. Dicha zona puede ser afectada por caídas de cenizas y lapilli de pómez que formarían una capa de ceniza de más de 1 cm de espesor. De manera local, en caso de una erupción altamente explosiva, se generaría la caída de lapilli de pómez de más de 0.5 m de espesor que cubriría zonas adyacentes del Ubinas, hasta un radio de 15 km alrededor del volcán. La zona de moderado peligro (naranja) tiene una configuración elíptica alrededor del cráter, con una distancia de más de 640 km a 740 km al este, 320 km a 550 km al oeste y 280 km a 380 km al sur. Esta zona puede ser afectada por caídas de cenizas de más de 1 mm de espesor. La zona de bajo peligro (amarillo) tiene una configuración elíptica alrededor del cráter, con una distancia de más de 740 km al este, más de 550 km al oeste y más de 380 km al sur. En esta zona se depositarían cenizas de menos de 0.1 mm de espesor. d) Mapa de peligros por lahares, en el cual la zona roja es considerada de alto peligro y corresponde a la zona de mayor probabilidad de ser afectada por lahares poco voluminosos asociados a erupciones de baja a moderada magnitud (IEV 1-2) o a lluvias intensas. La zona naranja, denominada de moderado peligro, puede ser afectada por lahares de moderado volumen, mientras que la zona amarilla es considerada de bajo peligro o de menor probabilidad de ser afectada por lahares muy voluminosos. Los lahares voluminosos (2 millones de m³) podrían estar asociados a erupciones de gran magnitud (IEV $\geq$ 3), cuya probabilidad de ocurrencia es baja.

1. Introducción

En el sur del Perú, Bolivia y norte de Chile, la subducción de la placa oceánica Nazca debajo de la placa continental sudamericana genera la existencia de una cadena volcánica pliocuaternaria denominada Zona Volcánica Central de los Andes (CVZ, 14°30'-27° S), donde se localizan diez volcanes activos: Sara, Coropuna, Sabancaya, Misti, Ubinas, Huaynaputina, Ticsani, Tutupaca, Yucamane y Purupuruni (Figura 1) y, aproximadamente, cuarenta pequeños conos monogénicos de escorias (zonas de Orcopampa-Andahua y Huambo). La dirección de convergencia de la placa de Nazca debajo del continente sudamericano es N78°E, y tiene una velocidad media de 5-7 cm/año (Norabuena et al., 1999).

La historia eruptiva de estos volcanes activos del sur peruano se ha desarrollado desde hace menos de 1 millón de años (volcanes Misti, Ubinas, Ticsani, Tutupaca, Yucamane, Sara, Chachani), mientras que volcanes recientes como el Sabancaya desde el Holoceno. Durante su evolución, estos volcanes presentaron diferentes tipos de dinanismos eruptivos. Al menos, en los últimos

100 000 años AP, se han presentado erupciones explosivas de tipo pliniana, subpliniana y vulcaniana que emplazaron diversos tipos de depósitos de caída y flujos piroclásticos. Algunos de estos volcanes han presentado el crecimiento de domos con su subsecuente destrucción, lo que dio lugar a la generación de depósitos de flujos de bloques y cenizas (volcanes Misti, Ticsani, Yucamane, Tutupaca, Ubinas, Purupuruni). También, algunos volcanes, durante su historia eruptiva, han experimentado derrumbes o colapsos de flancos que emplazaron importantes depósitos de avalanchas de escombros en sus inmediaciones (volcanes Ticsani, Misti, Ubinas, Tutupaca, Yucamane, etc.). Esos dinanismos eruptivos han sido puestos en evidencia por diversos estudios vulcanológicos y estratigráficos efectuados durante las últimas décadas (Thouret et al., 2001, 2002, 2005; Rivera et al., 1998; 2011, 2020; Adams et al., 2001; Gerbe y Thouret, 2005; Samaniego et al., 2015, 2016, 2020).

Los productos emitidos por los volcanes activos durante los últimos 500 años causaron estragos en varios poblados, terrenos de cultivo y obras de infraestructura (carreteras, canales de agua, reservorios, etc.) localizadas en sus inmediaciones. En la época histórica, los efectos más trágicos sucedidos en el sur peruano fueron generados por la erupción explosiva del volcán Huaynaputina

en el año 1600 d. C., durante la cual murieron más de 1500 personas y fueron sepultados más de diez poblados menores localizados en sus inmediaciones (Thouret et al., 2002).

Con relación al Ubinas, este volcán se ubica a aproximadamente 70 km al este de la ciudad de Arequipa (Figura 2), en la cordillera occidental de los Andes del sur del Perú. El Ubinas es el volcán más activo del Perú, ya que ha presentado, por lo menos, 28 procesos eruptivos en los últimos 500 años. En las últimas décadas, el Ubinas viene registrando recurrente actividad explosiva: 2006-2009; 2013-2017; 2019; 2023-actualidad, lo que ha permitido conocer el comportamiento eruptivo del volcán, los materiales emitidos y la distancia alcanzada por los productos volcánicos, así como los efectos y daños que experimenta la población y el medio ambiente.

El presente estudio tiene como objetivo presentar los mapas de peligro del volcán Ubinas, los cuales muestran tres zonas de peligro que podrían ser afectadas en caso de una futura

erupción del volcán. Este mapa servirá como base para elaborar planes de contingencia pertinentes ante una eventual crisis volcánica; además, se constituirá como una herramienta para la planificación territorial, la proyección y el desarrollo de obras de infraestructura (carreteras, puentes, etc.) en áreas aledañas al volcán.

En síntesis, estos mapas tienen dos propósitos primarios: (1) mostrar las zonas de peligros expuestas ante una eventual erupción volcánica del Ubinas, y (2) mostrar qué áreas están fuera de peligro que pueden servir como refugios en caso de una inminente erupción.

1.1 Condiciones climatológicas

Se consideró el análisis de la precipitación y temperatura del área de estudio con datos estadísticos de dos estaciones meteorológicas, ubicadas en la localidad de Ubinas (zona de

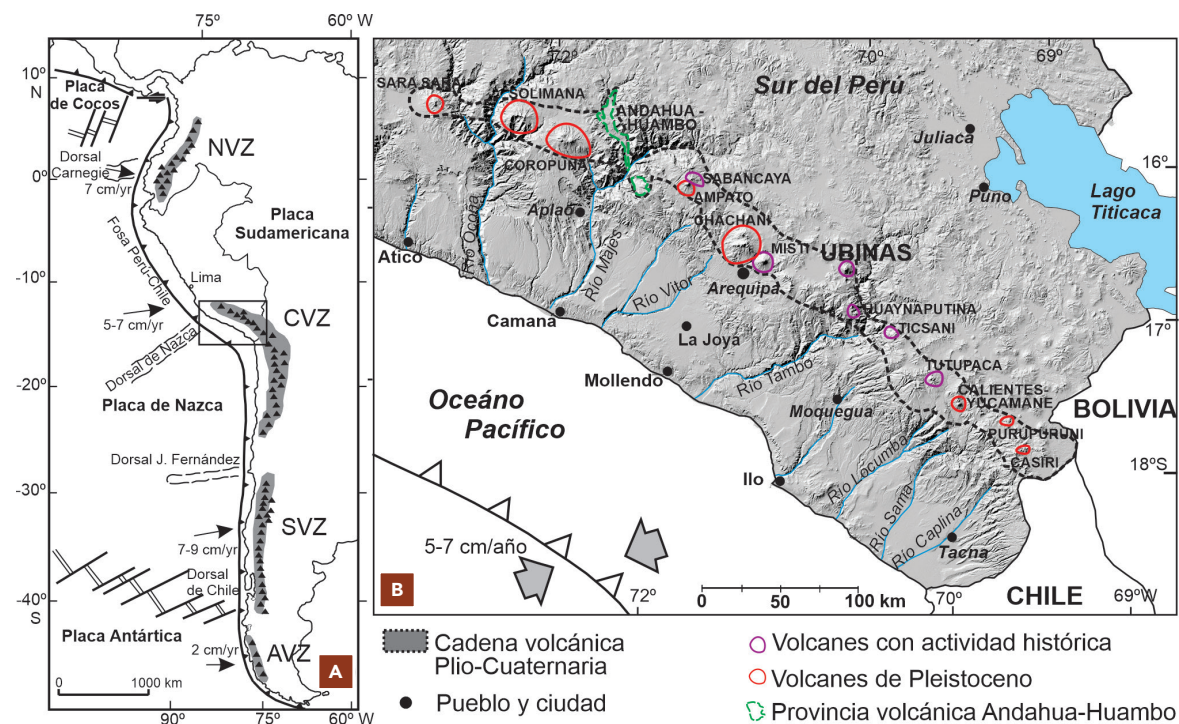


Figura 1. a) Mapa de ubicación de las zonas volcánicas de Sudamérica: norte (ZVN), central (ZVC), sur (ZVS) y austral (ZVA). b) Mapa de ubicación de la cadena volcánica cuaternaria del sur peruano y el volcán Ubinas.

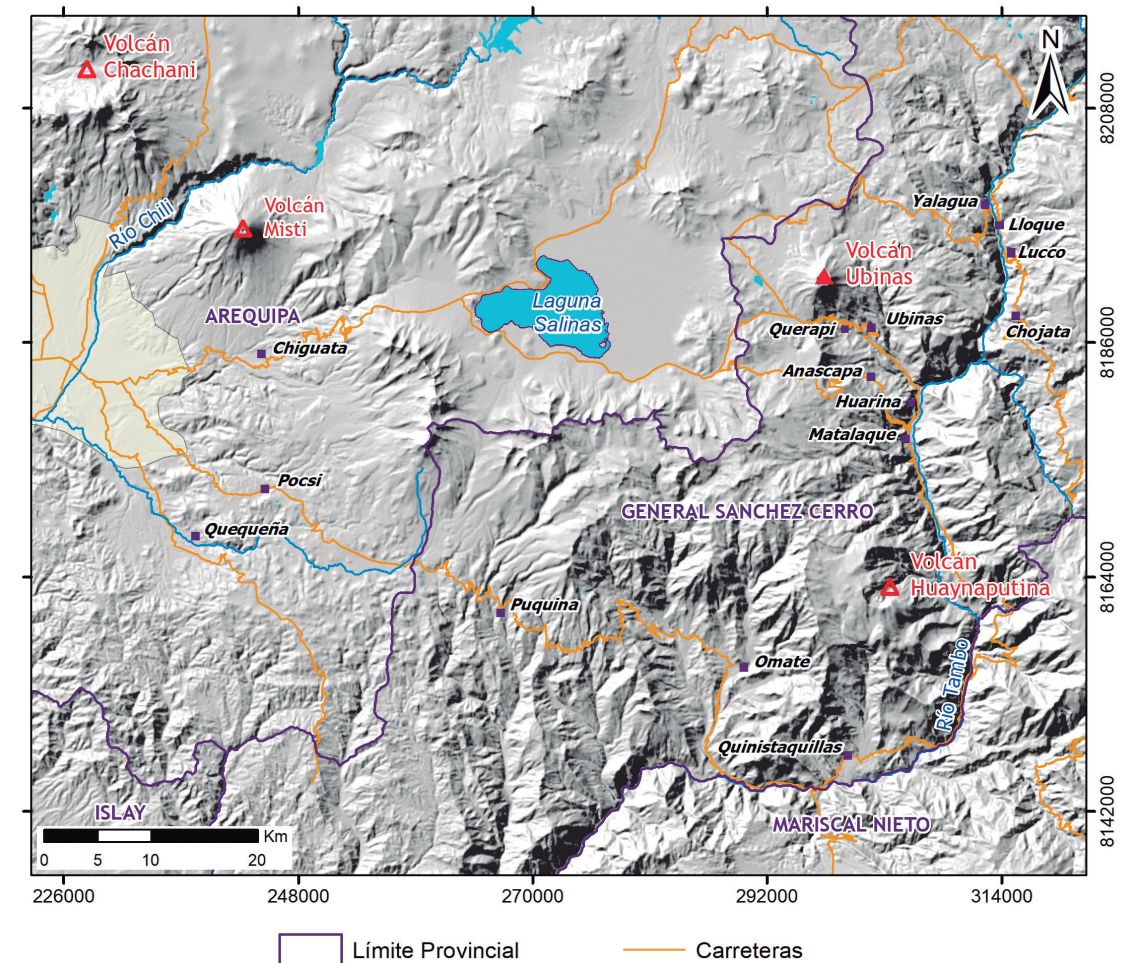


Figura 2. Mapa de ubicación del volcán Ubinas y poblados aledaños a dicho volcán.

Tabla 1. Estaciones climatológicas localizadas en la cuenca alta del valle del río Tambo y Quilca operadas por el SENAMHI.

Estación meteorológica	Coordenadas		Altitud (m s. n. m.)	Periodo de Registro	Cuenca
	Latitud	Longitud			
Ubinas	16°23'19.59"	70°51'14.61"	3381	1932-2015 2017-2024	Tambo
Las Salinas	16°19'14.30"	71°9'7.62"	4349	1965-2024	Quilca-Vítor-Chili

cabecera de valle) y al oeste del volcán Ubinas (zona de altiplanicie), las cuales pertenecen al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI).

1.1.1 Temperatura

Entre los años 1970 y 2024, la estación meteorológica de Ubinas registró una temperatura máxima promedio de 18.5 °C y una temperatura mínima promedio de 3.8 °C. Además, registró una temperatura máxima de 29.2 °C y una temperatura mínima de −4.6 °C.

1.1.2 Precipitación

Se consideraron datos de dos estaciones meteorológicas: Ubinas y Las Salinas. La estación de Ubinas, entre los años 1964-2024, registró las mayores precipitaciones entre diciembre y marzo. En este periodo, las precipitaciones diarias llegaron hasta 42.8 mm. Además, entre mayo y octubre, las precipitaciones tuvieron valores de hasta 28.60 mm; sin embargo, en septiembre de

2024 se presentó una lluvia inusual de 39.60 mm (Figura 3).

En cuanto a las precipitaciones mensuales, la estación Ubinas, entre diciembre y marzo del periodo 2010-2024, registró precipitaciones mensuales de hasta 194.5 mm (Tabla 2).

Tabla 2. Precipitaciones mensuales registradas durante los meses de diciembre a marzo de 2010 a 2024, por la estación meteorológica de Ubinas (Fuente: SENAMHI).

Año	Precipitación mensual (mm)			
	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo
2010	22.4	37	51.3	23.9
2011	80.6	126.2	196.4	11.5
2012	129.83	70.6	194.5	56.7
2013	24.7	146.7	93	59.6
2014	1.7	97.9	10.5	21.3
2015	-	84.3	147.3	113.3
2017	0.0	191.8	172.4	89.1
2018	0.0	105.4	174	-
2019	1	128.2	180.6	49.9
2020	121	287	0	64.2
2021	19.8	177	17.4	46.8
2022	65.4	98.6	77.8	76.6
2023	21.4	71.2	90.4	257.4
2024	-	62.6	181.2	128.2

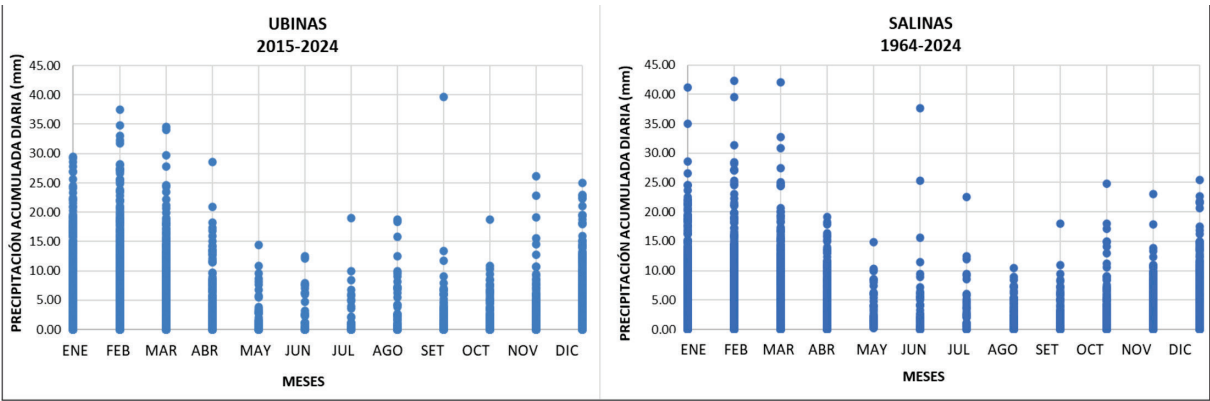


Figura 3. Datos de precipitación diaria acumulada registrados por las estaciones meteorológicas Ubinas y Las Salinas entre los años 1965 y 2024 (Fuente: SENAMHI).

La estación Las Salinas, entre 2010 y 2024, registró los mayores valores de precipitación en los meses de enero y marzo, los cuales alcanzaron hasta 42.3 mm, mientras que en los meses de abril y noviembre las precipitaciones llegaron hasta 25.3 mm. En el mes de junio de 2013 se registró una precipitación inusual de 37.60 mm (Figura 3). Asimismo, en enero de 2017, la estación Las Salinas registró una precipitación mensual máxima de 199.3 mm (Tabla 3).

Tabla 3. Precipitaciones mensuales registradas durante los meses de diciembre a marzo de 2010 a 2024 por la estación meteorológica Las Salinas (Fuente: SENAMHI).

Año	Precipitación mensual (mm)			
	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo
2010	83.0	35.4	86.9	33.2
2011	94.5	0.0	124.9	39.8
2012	85.3	129.2	147.0	74.1
2013	42.4	123.3	96.3	67.7
2014	2.8	130.0	11.4	51.1
2015	0.8	108.0	119.0	94.8
2016	26.6	18.9	142.5	15.4
2017	98.2	199.3	52.6	126.5
2018	8.8	104.5	60.4	101.6
2019	13.9	0.0	0.0	0.0
2020	102.3	148.5	185.0	49.8
2021	38.5	68.0	75.4	77.5
2022	95.4	90.6	80.2	99.7
2023	45.8	85.3	81.4	87.1
2024	-	102.2	146.4	105.8

1.2 Aspecto socioeconómico

Este es un resumen de los aspectos socioeconómicos del área de influencia del volcán Ubinas. Los poblados aledaños al volcán (menos de 20 km del cráter), en orden de proximidad, son Ubinas, 6.5 km al sureste; Tonohaya, 7.2 km al sureste; San Miguel, 10 km al sureste; Huatahua, 11.8 km al sureste; Escacha, 8.5 km al sureste; Anascapa, 10 km al sur; Sacohaya, 5 km al sur; Querapi, 4 km al sur; Huarina, 14 km al sureste; Matalaque 17 km al sureste, y Logén, 17 km al suroeste.

Los datos de población y vivienda del área de influencia del volcán Ubinas han sido tomados del censo sobre población y vivienda, a nivel de distrito y provincia, efectuado por el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI, 2018) en 2017 (Tabla 4).

Tabla 4. Resultado del censo del INEI-censo XII de Población y VII de Vivienda de 2017.

Provincia	Distrito	Altura (m s. n. m.)	Población Total	Viviendas
Arequipa	San Juan de Tarucani	4217	1377	946
Gral. Sánchez Cerro	Chojata	3634	708	786
Gral. Sánchez Cerro	Coalaque	2300	948	733
Gral. Sánchez Cerro	Ichuña	3794	2901	2966
Gral. Sánchez Cerro	Lloque	3325	570	379
Gral. Sánchez Cerro	Matalaque	2577	455	544
Gral. Sánchez Cerro	Ubinas	3395	1741	1468
Gral. Sánchez Cerro	Yunga	3619	864	484
TOTAL			9564	8306

En áreas aledañas al Ubinas (entre 20 km y 40 km del volcán) se distinguen aproximadamente ocho distritos localizados dentro de su área de influencia. Entre ellos se encuentran San Juan de Tarucani (perteneciente a la región Arequipa), Chojata, Coalaque, Ichuña, Lloque, Matalaque, Ubinas y Yunga (Tabla 4) (pertenecientes a la región Moquegua). En estos distritos existe una población total de 9564 habitantes. El número de viviendas de estos ocho distritos es de 8306.

En cuanto a la actividad económica, la población del valle de Ubinas se dedica, principalmente, a la actividad agrícola y ganadera. La agricultura se desarrolla principalmente debajo de los 3600 m s. n. m., con el cultivo de maíz, papa, trigo, cebada, hortalizas, entre otros. La actividad ganadera está relacionada a la crianza de ganado ovino, bovino y caprino; sin embargo, por encima de los 4000 m s. n. m., la crianza de camélidos es muy extendida.

Por otro lado, en áreas aledañas al volcán existen obras civiles importantes que podrían ser afectadas en caso de una importante reactivación del Ubinas, las cuales se citan a continuación:

- Las represas Aguada Blanca y El Frayle (principales fuentes de agua y de electricidad de la ciudad de Arequipa).



Figura 4. El poblado de Ubinas es uno de los siete poblados localizados en el valle de Ubinas, y se sitúa aproximadamente a 6 km al sureste del cráter del volcán del mismo nombre.

- Empresa Minera de Borateras Salinas "INKABOR".
- Carretera afirmada Arequipa-Santa Lucía de Salinas-Moche-Logen-Ubina-Matalaque.
- Carretera afirmada Arequipa-Santa Lucía de Salinas-Tite-Yalagua.
- Proyectos mineros en fase exploratoria.

2. Los peligros volcánicos

Estudios efectuados por diversos autores (p. ej. Blong, 1984; Tilling, 1989; Hoblitt et al., 1995; Scott et al., 1997, Bignami et al., 2012) determinaron que los peligros volcánicos incluyen las caídas de tefras y proyectiles balísticos, los flujos piroclásticos (flujos de escorias, flujos de bloques y cenizas e ignimbritas), oleadas piroclásticas, lahares (flujos de lodo volcánico), flujos de lava, los peligros asociados al crecimiento de domos, las emisiones de gases y las avalanchas de escombros. Estos eventos pueden ser generados por diversos tipos de erupción volcánica, en diferentes escenarios eruptivos. Desde luego, una erupción volcánica puede generar más de dos tipos de los peligros descritos anteriormente (Figura 5).

2.1 Caída de piroclastos (tefras)

Las erupciones explosivas emiten fragmentos de roca o piroclastos que son expulsados de manera violenta hacia la atmósfera para formar una columna eruptiva densa que puede alcanzar varios kilómetros de altura. Posteriormente, los fragmentos más grandes y densos caen cerca del volcán, a los cuales se les denomina 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 roca dependerá de la magnitud de la erupción, la distancia al cráter y la velocidad del viento al momento de la erupción. Las partículas pueden cubrir y afectar extensas áreas, de algunas centenas a varios cientos de km² (Cas y Wright, 1987).

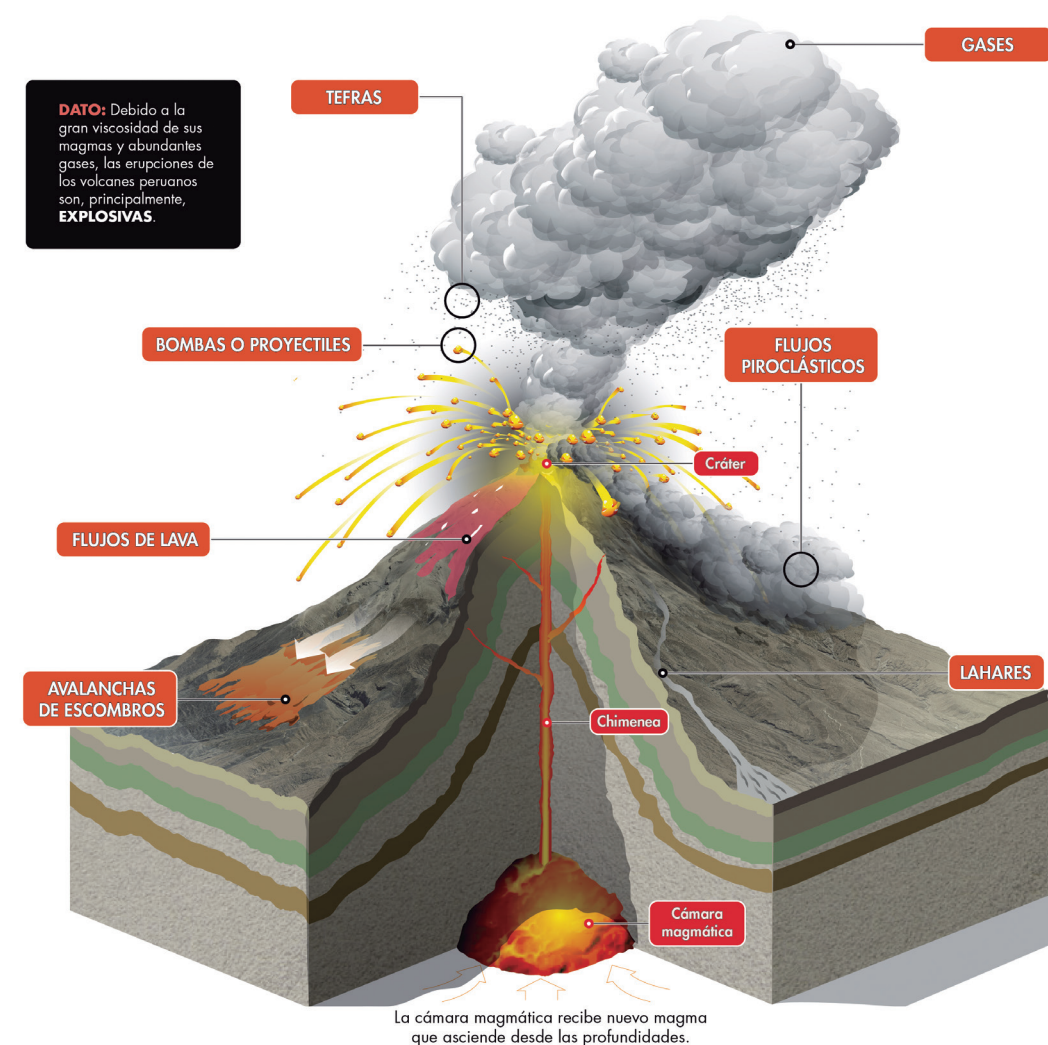


Figura 5. Tipos de peligros volcánicos que puede presentar durante una erupción un estratovolcán como el Ubinas.

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

En el sur peruano, todos los volcanes activos, a lo largo de su evolución, han presentado actividad explosiva con emisión de volúmenes variables de ceniza, lapilli de pómez y escorias. 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 1600 d. C., la cual afectó a todo el sur peruano, así como los efectos ocasionados por la actividad explosiva moderada e intermitente de los volcanes Ubinas y Sabancaya durante los últimos 500 años.

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 del volcán. Pueden fluir por el fondo de los valles y alcanzar varios kilómetros de distancia; rara vez, recorren más de 8 km del centro de emisión (Francis, 1993). Los volcanes del sur peruano han emitido lavas viscosas que recorrieron algunos kilómetros de distancia, mientras que otras se enfriaron en la zona del cráter y formaron domos de lava.

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

2.3 Flujos y oleadas piroclásticas

Los flujos piroclásticos son masas calientes (300 °C a 800 °C) conformadas por una mezcla de ceniza, fragmentos de rocas volcánicas y gases. Estos flujos descienden por los flancos del volcán a ras de la superficie del suelo y a grandes velocidades, comprendidas entre 100 m/s y 300 m/s (Hoblitt et al., 1995). Poseen generalmente 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 con facilidad sale del valle, sobrepasa relieves

importantes y afecta una mayor área. Estos flujos y oleadas destruyen y calcinan todo lo que encuentran a su paso (Tilling, 1989).

Los estudios vulcanológicos realizados muestran que la gran mayoría de los volcanes activos del sur peruano, como el Ubinas, Misti, Tutupaca, Yucamane y Ticsani, presentaron durante su evolución erupciones explosivas con emisiones de flujos piroclásticos, cuyos depósitos 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 que son movilizadas por el agua y 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 (Naranjo et al., 1986). El área inundada o afectada 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, pueden alcanzar grandes distancias (>100 km) e, incluso, generar inundaciones cerca al cauce de ríos (Tilling, 1989).

La mayoría de volcanes activos en los Andes peruanos presentan este tipo de peligro, sobre todo en periodos de lluvia (diciembre a marzo), cuando ocurren precipitaciones en sus laderas o cumbres situadas sobre los 4500 m s. n. m., lo que da lugar a lahares que descienden por las quebradas que surcan los volcanes. Existen volcanes como el Coropuna en Arequipa que presentan un casquete glaciar. En este caso, los productos emitidos durante una erupción efusiva o explosiva pueden interactuar con la nieve y el hielo, y generar lahares. El volumen total y distancia a recorrer por el lahar dependen del volumen de agua, el volumen del material suelto, la temperatura del material emitido y la pendiente del volcán.

2.5 Avalanchas de escombros

Las avalanchas de escombros son derrumbes o colapsos de un sector del volcán. Se originan debido a factores de inestabilidad, tales como la elevada pendiente del edificio volcánico, presencia de fracturas o fallas tectónicas, movimientos sísmicos fuertes y explosiones volcánicas. Las avalanchas de escombros ocurren con poca frecuencia. Comúnmente, pueden alcanzar decenas de kilómetros de distancia mientras se desplazan a gran velocidad. Por ejemplo, en el caso del volcán Mount St. Helens (EE. UU.), la avalancha registrada estuvo asociada a una erupción lateral dirigida; en este episodio 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, los cuales van 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).

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 Ubinas

El volcán Ubinas está conformado por una potente intercalación de lavas y depósitos de flujos piroclásticos en la que predominan las lavas. Estos depósitos, en su conjunto, le dan una geometría cónica asimétrica (Figura 6). El cono, ligeramente alargado en dirección noroeste a sureste, tiene aproximadamente 1200 m de altura. Sobre su estructura lávica yacen depósitos de caídas piroclásticas retrabajadas, emplazadas durante el Holoceno y la época histórica. La parte baja del cono presenta suaves pendientes ($<20^\circ$), mientras que la parte alta presenta pendientes muy inclinadas ($>40^\circ$). El estratocono posee un volumen aproximado de 54 km^3 . Este estratocono se ha instalado sobre el borde de una altiplanicie y en la cabecera del valle del río Ubinas. El volcán Ubinas se ha construido sobre secuencias de rocas volcánicas del Mioceno y Pleistoceno, pertenecientes a los grupos Tacaza y Barroso (Thouret et al., 2005).

El Ubinas presenta en su cima una amplia caldera, en cuyo sector sureste se ubica el cráter y un cono extenso de cenizas (Figura 7). La caldera es producto de, al menos, dos grandes episodios explosivos distintos asociados posiblemente a un colapso de caldera ocurrido entre 20 000 y 14 000 años AP (Thouret et al., 2005).



Figura 7. Vista de la caldera del volcán Ubinas, en cuyo sector sureste se localiza el cráter.

El cráter es de forma semicilíndrica, de una profundidad aproximada de 280 m. En su fondo se encuentra el viento activo por donde emanan los gases y productos volcánicos. Sus bordes son subverticales y están constituidos por lavas hidrotermalizadas, cubiertas por capas de cenizas y lapilli estratificadas de colores ocre y gris que miden más de 30 m de espesor.

3.1 Historia eruptiva

Los estudios vulcanológicos sobre el volcán Ubinas realizados por Thouret et al. (2005), Rivera (2010) y Samaniego et al. (2020) muestran que este volcán tuvo al menos dos etapas de evolución:

(I) “Ubinas I” ($>370\,000$ años): Durante esta etapa, el Ubinas presentó una actividad principalmente efusiva en la que se emplazaron flujos de lava andesíticos visibles en la base del volcán (Figura 8). Posteriormente, se destruyó el flanco sur del volcán, proceso que dio lugar a depósitos de avalanchas de escombros de alrededor de 2.8 km^3 , distribuidos en la parte baja del flanco sur y visibles a más de 12 km al sureste del volcán.



Figura 8. Vista del flanco norte del volcán Ubinas donde se distinguen las lavas emplazadas en los periodos “Ubinas I” y “Ubinas II”.

“Ubinas II” (370 000 años-hasta el presente): Inicialmente, entre $\sim 370\,000$ y $270\,000$ años AP, se produjo el crecimiento y destrucción de domos de lava en el Ubinas, seguidos o asociados al emplazamiento de lavas que conforman el cono superior del volcán. Posteriormente, hace $269\,000$ años AP, se produjo una erupción explosiva que generó una secuencia de flujos piroclásticos de pómez y cenizas que aflora entre 7 km y 8 km al sureste del cráter y cuyo volumen fue calculado en alrededor de 1.8 km^3 . Tras ello, entre $\sim 250\,000$ y $170\,000$ años AP, se produjo el crecimiento y destrucción de domos de lava. Entre $170\,000$ y $20\,000$ años AP predomina una importante actividad efusiva que terminó por formar el cono superior del volcán.

En una última etapa, ocurrida hace menos de $20\,000$ años AP, se produjeron importantes erupciones explosivas, entre ellas erupciones de tipo pliniana. Una de las erupciones plinianas más antiguas, de hace $14\,000$ años AP, depositó una capa de pómez riolíticos de 4.5 m de espesor a 9 km al sur del cráter (visibles en los sectores de Sacohaya y Anascapa), sobre la cual existe otro depósito de caída pliniana de 1.2 m de espesor, constituido de lapilli pómez datado en 7480 años AP (Thouret et al., 2005). Hace cerca de

3670 años ocurrió un segundo derrumbe del flanco sur del volcán que depositó una avalancha de escombros de aproximadamente 1.2 km^3 . Estos depósitos formaron montículos al pie de la pared sur del cono (Querapi). Hace 980 años AP ocurrió la última erupción pliniana del Ubinas, episodio que depositó una capa de caída de lapilli pómez andesíticos de 2.8 m de espesor a 6 km al sureste del volcán (Figura 9).

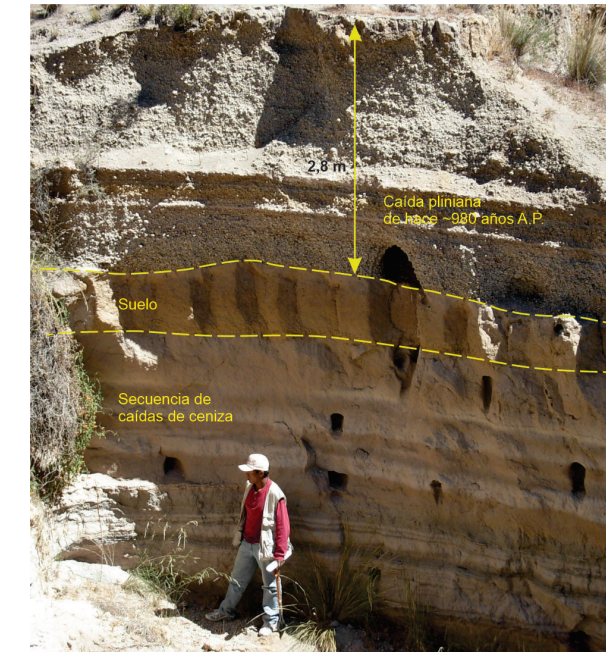


Figura 9. Secuencia piroclástica visible en el sector de Corohuayo (6.5 km al este del Ubinas), en la cual se distingue el depósito de caída pliniana de hace ~ 980 años AP que cubre delgados niveles de cenizas grises.

Desde el año de 1550 d. C. hasta la actualidad, el Ubinas ha presentado aproximadamente 28 eventos volcánicos referidos a erupciones explosivas de magnitud leve a baja (IEV 1-3), como la actividad eruptiva desarrollada entre los años 2006-2009; 2013-2016; 2019 y 2023-actualidad.

3.2 Características de la actividad volcánica histórica del Ubinas

Concerniente a la actividad histórica, es decir, la actividad registrada desde 1550 d. C., las crónicas y estudios recientes (Hantke y Parodi, 1966; Simkin y Siebert, 1994; Rivera et al., 1998; Rivera et al., 2014 y Samaniego et al., 2020) muestran que



Figura 6. Vista del flanco oeste del volcán Ubinas.

Tabla 5. Resumen de las características de la actividad eruptiva histórica y reciente del volcán Ubinas.

Año	Inicio	Final	Tipo de Actividad	IEV	Observaciones
1550			Erupción central y explosiva	¿3?	
1599	7 feb.	22 feb.	Erupción explosiva moderada	2	Cenizas grises cayeron cerca de Arequipa.
1600			Erupción explosiva		
1662			Erupción explosiva	¿2?	Las cenizas alcanzaron hasta las pampas de Sama y Locumba.
1677			Erupción explosiva de gran magnitud	3	Cayeron cenizas y flujos de escorias encontrados al noroeste y norte del volcán.
1778			Erupción explosiva		
1784			Erupción central y explosiva	2	Alta actividad fumarólica y emisión de cenizas.
1826			Erupción explosiva	2	
1830			Erupción explosiva	2	
1862			Erupción explosiva	2	
1865			Erupción explosiva	2	Emisión de cenizas grises.
1867	24 may.	28 may.	Erupción explosiva	2	
1869		Octubre	Erupción explosiva	2	
1906		Octubre	Erupción explosiva	2	
1907		Octubre	Erupción explosiva	2	
1912-1913 ?			Erupción explosiva	2	Cenizas cayeron sobre Ubinas, Chojata y Yalahua. Afectó tierras de cultivo y murieron ganados por epidemias.
1923-1925 ?			Erupción explosiva		Cenizas grises cayeron cerca de la ciudad de Arequipa.
1936	3 en.	Julio	Erupción explosiva y fumarólica	2	En el valle de Ubinas, las cenizas destruyeron los cultivos.
1937	Mayo	Julio	Erupción central y explosiva	2	Las cenizas destruyeron terrenos de cultivo y generaron epidemias en el valle de Ubinas.
1951	Mayo	21 oct.	Erupción central y explosiva	2	Las cenizas causaron daños en el valle de Ubinas.
1956	Junio		Erupción explosiva y fumarólica	2	Las cenizas causaron daños en los terrenos de cultivo y en poblados del valle de Ubinas.
1969	Mayo	¿Dic.?	Erupción explosiva	2	Las cenizas destruyeron cultivos y afectaron a la población del valle de Ubinas.
1995-1996	Diciembre	¿Abril ?	Alta actividad fumarólica	1	Alarmó a la población en general. Fue reportado por el IGP e IRD.
2006-2009	Marzo	Junio	Erupción explosiva: freatomagmática, vulcaniana	2	Las cenizas afectaron la salud de la población. Los habitantes de cinco poblados del valle de Ubinas fueron evacuados en junio de 2006 a la zona de Chacchagen.
2013-2017	Septiembre	Enero	Erupción explosiva: vulcaniana	2	Las cenizas fueron dispersadas en diversas direcciones a más de 20 km del Ubinas.
2019	Junio	Septiembre	Actividad explosiva: vulcaniana	2	Las cenizas fueron dispersadas a más de 250 km de distancia en direcciones este y sureste del Ubinas. Las cenizas afectaron la salud de la población del valle de Ubinas.
2023	Junio	Actualidad (al cierre de este informe)	Actividad explosiva: vulcaniana	2	Las cenizas fueron dispersadas a más de 80 km de distancia en dirección oeste, este, noreste y sureste del Ubinas. Las cenizas afectaron la salud de la población del valle de Ubinas.

el Ubinas ha presentado al menos 28 episodios eruptivos (Tabla 5) de bajo a moderado IEV (1-3), con una recurrencia de 2 a 6 eventos por siglo, lo que ha valido para que sea catalogado como el volcán más activo del Perú. Esos episodios corresponden a erupciones vulcanianas y a importantes crisis fumarólicas. La erupción explosiva de tipo vulcaniana de 1677 (IEV 3, según Simkin y Siebert, 1994) ha emitido flujos de escorias de color gris que miden hasta 0.8 m de espesor, emplazados a 1 km al oeste del cráter. Durante esta erupción fueron emitidas cenizas que se dispersaron hacia áreas mediales y distales del cráter (>4 km).

3.3 Actividad volcánica reciente

3.3.1 Actividad eruptiva 2006-2009

Este proceso eruptivo se inició el 25 de marzo de 2006. El análisis de los registros sísmicos y el tipo de actividad ha permitido dividir el proceso eruptivo 2006-2009 en 3 etapas: (1) desde abril de 2006 a agosto de 2007, en la que se registró la mayor actividad sísmica de tipo Largo Periodo (LP), ligada a la circulación de fluidos magmáticos. El 14 de abril se produjo la primera explosión que arrojó fragmentos de lava incandescente. El 19 de abril de 2006 se logró visualizar un cuerpo de lava en el fondo del cráter del volcán.

Durante los días siguientes, la actividad volcánica se incrementó y las cenizas emitidas alcanzaron entre 1000 m y 3500 m de altura. Posteriormente, durante mayo a agosto de 2006, la actividad se mantuvo constante, con la generación de explosiones volcánicas con caídas de cenizas en un radio mayor de 15 km alrededor del volcán. Desde septiembre de 2006 hasta julio de 2007, la actividad volcánica fue disminuyendo, las explosiones volcánicas se hicieron más esporádicas. (2) Entre septiembre de 2007 a septiembre de 2008, se registró un decrecimiento en el número de las señales sísmicas de tipo Largo Periodo (LP); sin embargo, continuaron detectándose explosiones. La actividad más importante fue observada entre enero y abril de 2008, con columnas eruptivas de ceniza y gases de hasta 3000 m de altura. Posteriormente, de mayo a septiembre de 2008, las columnas de gases alcanzaron alturas de 600 m a 800 m y, en ocasiones, se observaron algunos picos de 2000 m a 2500 m; y (3) desde octubre de 2008 a julio de 2009, etapa en la

cual se hizo más notorio el decaimiento de la actividad volcánica. El último evento explosivo fue detectado el 14 de junio de 2009. Durante este proceso eruptivo se registraron en total 162 explosiones volcánicas.

3.3.2 Actividad eruptiva 2013-2017

Este proceso eruptivo se inició el 2 de septiembre de 2013. El análisis de los registros sísmicos y el tipo de actividad ha permitido dividir el proceso eruptivo 2013-2017 en 4 fases: Fase 1, ocurrida entre marzo y octubre de 2013, caracterizada por el incremento de sismos de tipo Volcano-Tectónico (VT) y el registro frecuente de señales de tipo Tornillo, especialmente entre el 8 de marzo y el 15 de junio (33 eventos por día). En este periodo ocurrieron 10 explosiones volcánicas. Fase 2, comprende desde diciembre de 2013 a noviembre de 2014. Desde diciembre de 2013 a enero de 2014, se registró un incremento en el número de sismos de tipo VT. Entre el 1 y 31 de marzo de 2014, el promedio de ocurrencia de sismos de tipo Híbrido, vinculados al ascenso de magma, se incrementó hasta un máximo de 182 eventos por día, con un pico de energía máxima de 29 Megajoules (MJ). Durante esta fase se registró el mayor número de explosiones volcánicas (604 eventos). Entre febrero y fines de julio de 2014, las columnas de gases y cenizas alcanzaron alturas de hasta 5000 m (22 de abril de 2014). Las cenizas se dispersaron en un radio de 20 km alrededor del volcán. Una de estas explosiones (23 de abril de 2014) generó una columna de gases y cenizas que fue dispersada a 70 km al oeste del volcán, en dirección de la ciudad de Arequipa. Entre agosto y diciembre de 2014, las columnas fumarólicas alcanzaron, en promedio, los 500 m de altura sobre la cima del volcán. La Fase 3 ocurrió entre el 7 de diciembre de 2014 y el 7 de noviembre de 2015. Entre los meses de diciembre de 2014 hasta marzo de 2015, la alturas de las plumas fumarólicas fueron menores a 1500 m. Posteriormente, desde abril hasta octubre de 2015, las columnas de gases y cenizas alcanzan los 4000 m de altura (26 de julio y 28 de septiembre de 2015). La Fase 4, identificada entre diciembre de 2015 y el 24 de enero de 2017, se caracterizó por el registro de señales sísmicas de tipo VT con valores promedio por debajo de 4 eventos diarios. Las emisiones de gases en el volcán Ubinas experimentaron un incremento desde el 13 de septiembre de 2016, con alturas de hasta 1200 m de altura sobre la cima del volcán. Posteriormente, los días

2 y 3 de octubre de 2016, se empezaron a registrar emisiones de ceniza que alcanzaron alturas de hasta de 2000 m. Luego, desde el 3 de octubre de 2016, se registró solamente la ocurrencia de 8 explosiones. Finalmente, el 24 de enero de 2017 se registró la última explosión con emisiones de ceniza de este proceso eruptivo.

3.3.3 Actividad eruptiva 2019

El 18 de junio de 2019 se detectó un enjambre de sismos de tipo Volcano-Tectónico bajo el volcán Ubinas, a una profundidad aproximada de 7.5 km. Posteriormente, desde el 19 de junio al 10 de julio se registraron señales sísmicas de tipo Tornillo, las cuales se incrementaron a razón de 2 a 8 eventos por día. El día 24 de junio se registró una emisión de cenizas de 1.5 km de altura que marcó el inicio de este proceso eruptivo. En ese mismo periodo, del 19 de junio al 13 de julio, se registró un incremento en el número y la energía de las señales sísmicas de tipo Híbrido, con la ocurrencia promedio de 23 eventos por día. La actividad explosiva se inició el 19 de julio, con el registro de tres importantes explosiones. En ese día, el Ubinas generó una columna de cenizas y gases sostenida que sobrepasó los 5000 m de altura sobre la cima del volcán (Del Carpio & Rivera, 2019). Las cenizas emitidas fueron dispersadas por los vientos hacia zonas distales del volcán, en direcciones sureste y este, lo que produjo afectaciones en poblados cercanos del valle de Ubinas y en algunas localidades de las regiones de Moquegua, Tacna y Puno, así como algunas ciudades del vecino país de Bolivia, como La Paz.

Posteriormente, entre el 28 de julio y el 12 de septiembre de 2019, ocurrieron 5 explosiones volcánicas que generaron columnas de gases y cenizas de más de 4 km de altura sobre la cima del volcán. La última de ellas fue registrada el 12 de septiembre de 2019.

3.3.4 Actividad eruptiva 2023

El 22 de junio de 2023, un mes después de presentar signos de intranquilidad sísmica, el volcán Ubinas inició un nuevo proceso eruptivo. La fase magmática de este proceso eruptivo empezó el día 4 de julio, con el registro de explosiones volcánicas que generaron columnas de gases y cenizas que alcanzaron alturas de hasta 5400 m

por encima del cráter. Asimismo, en algunos días específicos se registró la expulsión de proyectiles balísticos y la emisión de mayores volúmenes de ceniza que han afectado a los distritos aledaños ubicados en un radio menor de 30 km del volcán. Desde septiembre de 2023 hasta noviembre de 2024 (fecha de publicación de este informe), la actividad del Ubinas ha mostrado niveles bajos.

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 relacionado a la geología, petrología, geoquímica, etc., disponible en tesis universitarias, boletines y revistas científicas.
- Procesamiento de imágenes de satélite Landsat del volcán Ubinas para el cartografiado de los depósitos volcánicos.
- Uso de un Modelo Digital de Elevación (DEM) elaborado por CONIDA a través de imágenes satelitales SPOT 6 de alta resolución.
- Modelamiento de procesos volcánicos: dispersión de ceniza con el *software* Ash3d (Mastin et al., 2009) y la delimitación del alcance de flujos piroclásticos, lahares y avalanchas de escombros con el *software* LaharZ (Schilling, 1998).
- Elaboración de gráficos y tablas diversas.
- Elaboración de los mapas de peligros volcánicos del Ubinas.

4.2 Softwares empleados

4.2.1 Modelo Ash3d

El Ash3d (Mastin et al., 2009) es un *software* basado en los principios Eulerianos tridimensionales, desarrollado por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés), y sus 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 de dispersión de ceniza futuros. 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 en una columna de células sobre el volcán y distribuye la masa verticalmente usando el sistema Suzuki (Suzuki, 1983; Carey, 1996). Posteriormente, resuelve la ecuación de advección, difusión y sedimentación para simular el transporte y depósito de partículas de ceniza eyectadas a la atmósfera por medio de una columna eruptiva generada por la actividad volcánica de tipo explosiva (Schwaiger et al., 2012). La advección del viento se calcula usando datos preexistentes que varían con el tiempo, así como métodos que usan volúmenes finitos de material. La velocidad de caída, distribución y duración del transporte se ve influenciada por el tamaño de grano designada por el programa; la distribución vertical de la masa y elevación son calculadas usando la ecuación de Suzuki (1983).

Las variables que ingresa el usuario en una plataforma virtual son el nombre del volcán, la fecha, hora y duración de la erupción, la altura de la pluma, volumen (km³) emitido como roca densa equivalente del magma (DRE) y la duración de la simulación. Los archivos resultantes que entrega el modelo son concentración (mg/m³) 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 (hrs), así como los aeropuertos afectados. Los parámetros eruptivos utilizados en el modelo Ash3D corresponden a los dos escenarios de erupciones vulcanianas y subplinianas.

En el modelamiento de dispersión de cenizas del Ubinas para un escenario de erupción subpliniana (IEV 4) se consideró un volumen de ceniza menor a 0.8 km³, basado en el último episodio explosivo subpliniano del volcán Chaiten (Chile) de 2008, con un volumen de productos de alrededor de 1 km³ y un IEV 4. También se consideró una altura de la pluma de ceniza de 14 km con una duración de 2.5 horas (Folch et al., 2008).

Para simular la dispersión de tefras del Ubinas durante una erupción pliniana (IEV 5) se consideró un volumen de pómez emitido de 1.4 x 10⁹ m, ello con base al volumen de pómez emitido durante la erupción de hace 2000 años AP del volcán Misti

(Harpel et al., 2011). Dicha erupción generó una pluma de pómez y ceniza de aproximadamente 29 km de altura, con una duración aproximada del orden de 4 horas.

En todos los casos se consideraron las direcciones predominantes del viento que, en el caso del Misti, es hacia los sectores sureste y suroeste de su cráter. Los datos de vientos fueron tomados del Centro Nacional de Predicción Ambiental de los EE. UU.

4.2.2 Modelo LaharZ

Para delimitar las zonas de alcance de los flujos piroclásticos, lahares y avalanchas de escombros se utilizó el programa LAHARZ_py (Iverson et al., 1998; Schilling, 1998) y datos de campo sobre áreas cubiertas con erupciones pasadas. El programa LAHARZ_py se ejecuta dentro de un Sistema de Información Geográfica (GIS) y un Modelo de Elevación Digital (DEM). El DEM empleado ha sido elaborado con base en imágenes satelitales. En las quebradas y ríos de interés se ubican las celdas de inicio, es decir, dentro de la zona proximal (cono de energía), mientras que el final de la distancia fue calculado por el programa LAHARZ_py. También se consideran en este estudio tres escenarios de volúmenes de lahares.

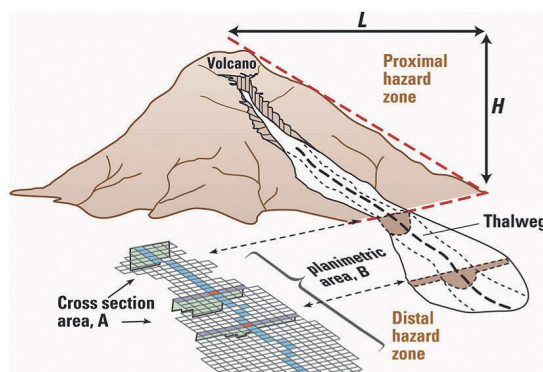


Figura 10. Relaciones entre la distancia (L) y la altura (H) por donde recorrerían los lahares, así como las áreas en sección transversal (A) y planimétrica (B) inundadas por un lahar (Schilling, 1998).

Para delimitar el alcance de los flujos piroclásticos y avalanchas de escombros se empleó la metodología denominada “cono de energía” (Malin & Sheridan, 1982), la cual 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 está determinado en 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.

4.3 Parámetros de entrada para posibles escenarios eruptivos

Para la elaboración de los escenarios eruptivos se han considerado los estudios geológicos y vulcanológicos realizados sobre el volcán Ubinas por Thouret et al. (2005); Rivera et al. (2011) y Samaniego et al. (2020). Además, se tuvo en cuenta los siguientes aspectos descritos a continuación:

- Los tipos de dinamisismos eruptivos reconocidos en el volcán Ubinas, los cuales podrían volver a presentarse.
- La magnitud de las erupciones del volcán Ubinas es inferida en función del volumen de material emitido y el área cubierta.
- El comportamiento de otros volcanes peruanos u otros de la Zona Volcánica Central de los Andes, considerados como “análogos” al volcán Ubinas.
- Características morfológicas del volcán y de las áreas aledañas.

Los escenarios establecidos en este estudio también toman en cuenta modelos existentes sobre la dispersión de tefras (Carey, 1996), extensión de flujos piroclásticos (Hayashi y Self, 1992), flujos de barro y avalanchas de escombros (Crandell, 1988) en caso de erupciones en volcanes andesíticos. También toman en cuenta los ejemplos de erupciones volcánicas recientes ocurridas al norte de la Zona Volcánica de los Andes Centrales: volcanes Misti (Thouret et al., 2001; Rivera, 2010), Huaynaputina (Thouret et al., 2002) y Sabancaya (Thouret et al., 1994; Gerbe y Thouret, 2004).

Desde luego, se supone que una próxima erupción no diferirá mucho de las anteriores en cuanto a sus características, y que el área afectada también será similar. Todo lo expuesto a continuación, referente a los peligros del volcán Ubinas, se refleja en los mapas de peligro volcánico presentados en este estudio (capítulo 5).

4.3.1 Erupción de tipo vulcaniana (IEV 1-2)

Una erupción vulcaniana consiste en una serie de explosiones discretas que tienen lugar a intervalos de minutos a horas. A menudo, el material expelido es juvenil, y corresponde a fragmentos despedazados de un tapón de lava solidificada en el conducto de emisión o cráter (Morrissey & Mastin, 2000). La erupción se origina debido a la presión en el reservorio generada por la exsolución del magma a profundidad (Francis, 1993).

Durante una erupción vulcaniana, las tefras son eyectadas a la atmósfera en forma de una pluma que puede alcanzar alturas de hasta 10 km. Las tefras están conformadas de proporciones variables de fragmentos de rocas arrancados del conducto, además de material juvenil, cuyos tamaños varían desde cenizas hasta bloques y bombas (proyectiles balísticos). Estos materiales también son conocidos como depósitos de caída, y pueden asentarse en áreas mayores a 200 km² alrededor de un volcán. Las tefras pueden causar víctimas y daños a la propiedad por el impacto de los materiales que caen sobre estas y forman una capa encima del terreno.

Existe una gran probabilidad de que la próxima erupción del Ubinas sea de tipo vulcaniana, la cual generaría caídas de cenizas. Este es el tipo de actividad que se ha ido dando en los últimos 500 años y durante las últimas dos décadas. En una erupción vulcaniana se generarán depósitos de caída. La distancia recorrida para las caídas de cenizas podría sobrepasar los 200 km. Las cenizas y demás productos asociados a erupciones vulcanianas pueden contaminar el agua destinada al consumo humano, terrenos de cultivos y pastizales. En caso de una importante explosión, las cenizas pueden afectar las represas El Frayle y Aguada Blanca, cuyas aguas abastecen a la ciudad de Arequipa.

Los datos sobre erupciones históricas muestran que las emisiones de cenizas son los productos más comunes en el volcán Ubinas; algunas veces

se ha reportado transformación de cenizas en flujos de lodo o barro debido a la ocurrencia de lluvias intensas durante un proceso eruptivo (p. ej., lahar del 17 de febrero de 2007).

Durante una erupción vulcaniana también pueden generarse flujos piroclásticos que corresponden a nubes secas y calientes compuestas de una mezcla de bloques, bombas y lapilli dentro de una emulsión de gases y cenizas calientes que las soportan. En una erupción vulcaniana del volcán Ubinas, la probabilidad de ocurrencia de flujos piroclásticos es de moderada a baja. Los flujos pueden alcanzar hasta una distancia de 6 km de la cima del volcán.

Asimismo, en el volcán Ubinas pueden generarse lahares (flujos de lodo), con o sin erupción (período de lluvias), ya que, entre los meses de diciembre a marzo ocurren lluvias intensas que arrastran ceniza y material volcánico presentes en las laderas del volcán. También juegan un rol importante la pendiente del terreno (45° en la parte alta del volcán), la sinuosidad del cauce de las quebradas Volcanmayo, Sacohaya y Chillón, por donde se desplazarían los materiales acarreados por el lahar. La presencia de depósitos de lahares recientes en los cauces de los ríos Ubinas y Para, y en las quebradas Infiernillo, Sacohaya y Chillón, indican que la probabilidad de ocurrencia de este tipo de evento ante cualquier erupción volcánica es alta. Los lahares generados en el Ubinas pueden afectar varios tramos de la carretera Arequipa-Ubinas-Matalaque, y afectar canales de agua, terrenos de cultivos, entre otros.

4.3.2 Erupción de tipo pliniana (IEV 3-4)

Una erupción pliniana consiste en la descarga sostenida de material volcánico inyectado en la atmósfera mediante una gran columna o pluma volcánica mayor a 20 km de altura (Francis, 1993). Dicha pluma está constituida de tefras que, a la vez, se depositan en áreas mayores a 800 km² debido a la gran altura de la columna eruptiva que la erupción produce (Cas y Wright, 1987). Además, una erupción pliniana produce frecuentemente flujos y oleadas piroclásticas. Los factores que controlan estas erupciones son variados e incluyen el contenido de gas en el magma, la forma del conducto volcánico, el radio del conducto y el volumen del magma (Francis, 1993). Generalmente, estas erupciones involucran magmas ricos en sílice como riolitas y dacitas.

La erupción ocurrida en el volcán Huaynaputina (Moquegua) en febrero de 1600 d. C. representa un ejemplo clásico de erupción pliniana ocurrida en el sur peruano y dentro de la Zona Volcánica de los Andes Centrales en tiempos históricos. Según los estudios, el 19 de febrero de 1600, tras una intensa actividad sísmica que duró más de cuatro días, sobrevino una intensa actividad explosiva que duró 16 días y que generó una columna eruptiva de pómez y cenizas de cerca de 32 km de altura. Estos productos cubrieron un área que sobrepasa los 210 000 km², con afectación a gran parte del sur del Perú, norte de Chile y Bolivia (Thouret et al., 1999; Adams et al., 2001; Thouret et al., 2002). La erupción fue catalogada con un IEV 6, causó la muerte de más de 1500 personas, sepultó más de siete poblados aledaños al volcán y, a la vez, generó efectos climáticos globales.

Para el volcán Ubinas, la ocurrencia de este tipo de erupción, en un corto o mediano plazo, tiende a ser poco probable. Sin embargo, es necesario realizar la estimación sobre una probable erupción pliniana, toda vez que este tipo de actividad se ha manifestado en varias ocasiones en la historia eruptiva del Ubinas. La última erupción pliniana ocurrió hace aproximadamente 980 años, cuyos depósitos cubrieron un área de 800 km² y su eje máximo se prolongó a más de 40 km en dirección este-sureste, donde el espesor del depósito alcanza 25 cm. Las erupciones plinianas en el Ubinas se producen entre 1000 y 7000 años.

Una erupción pliniana frecuentemente genera flujos piroclásticos, comúnmente debido al colapso de la columna eruptiva. Estos flujos generados son expulsados hacia la superficie y se mueven rápidamente a lo largo del terreno. Por lo tanto, tienen la tendencia de desplazarse por las depresiones topográficas y luego encauzarse a lo largo de las quebradas y valles. Algunos flujos voluminosos logran sobrepasar barreras topográficas (cerros, lomas, etc.). Los flujos piroclásticos generados por una erupción pliniana pueden desplazarse a velocidades de entre 100 km/h a 300 km/h, y cubrir áreas que van de 1 km² a más de 10 000 km² (Hoblitt et al., 1995). Las amenazas y riesgos asociados con los flujos piroclásticos, que incluyen asfixia, entierro, incineración y daños a la propiedad, se deben a su alta velocidad, densidad y temperatura.

Los flujos piroclásticos generados por erupciones plinianas del Ubinas son productos poco abundantes, ocurridos entre 240 000 y 14 000 años AP (Rivera, 2010). En cuanto a la cantidad de eventos registrados en su historia eruptiva y su distribución en el área, básicamente

dichos depósitos corresponden a flujos de pómez y cenizas distribuidos en la quebrada Infiernillo y en el valle de Ubinas, a distancias de hasta 11 km de la cima. En una posible erupción pliniana pueden producirse flujos piroclásticos que recorrerían distancias de más de 10 km, tal como han ocurrido anteriormente. Desde luego, la ocurrencia de una erupción pliniana del Ubinas es de baja a moderada probabilidad.

Durante una erupción pliniana se podrían generar lahares (flujos de lodo) que descenderían por las diversas quebradas que drenan del volcán Ubinas. Los lahares que desciendan por los flancos oeste, suroeste y sur convergerían en los ríos Sacohaya, Volcanmayo y Ubinas, y luego continuarían con dirección al río Tambo. Por otro lado, los lahares que desciendan de los flancos norte y oeste convergerían en el río Para y luego continuarían con dirección al río Tambo. Estos flujos serían tan voluminosos y móviles que podrían viajar hasta el océano Pacífico. Esta hipótesis se basa en la presencia de depósitos de lahares antiguos en los cauces de ríos Ubinas y Para, y en las quebradas Infiernillo, Sacohaya y Chillón, así como en los lahares generados durante la erupción pliniana del año 1600 d. C. del volcán Huaynaputina (Thouret et al., 2002).

4.3.3 Colapso o derrumbe de flanco sur: avalancha de escombros

Los volcanes con conos muy elevados y con pendientes muy empinadas están propensos a colapsar o derrumbarse debido al fracturamiento, grado de alteración en que se encuentran las rocas o por la influencia de sismos fuertes, erupciones o crecimientos de domos. Varios volcanes del sur del Perú, como Misti, Ubinas, Tutupaca, Ticsani y otros, han presentado colapsos o derrumbes de sus flancos, procesos que se constituyen como uno de los principales peligros volcánicos. Las avalanchas de escombros pueden involucrar más de 1 km³ de material suelto, y desplazarse a más de 40 km de su fuente (Hoblitt et al., 1995; Scott et al., 1997).

El volcán Ubinas presenta una morfología característica de colapsos (caldera de avalancha en forma de herradura) en el flanco sureste, debido a que este flanco ha colapsado al menos dos veces durante la historia del Ubinas. En la actualidad, este flanco es inestable por tres razones: (1) presenta fuertes pendientes (>70°) y mide entre 1.2 km a 1.4 km de altura; (2) se

encuentra alterado e hidrotermalizado; y (3) muestra una red de fracturas verticales y fallas.

En caso de la ocurrencia de un sismo de gran magnitud, de una erupción violenta (pliniana o subpliniana) o del crecimiento de un domo de lava dentro del cráter, se puede provocar el colapso o derrumbe de la pared sur con la consecuente generación de avalanchas de escombros. Estas avalanchas se canalizarían por las quebradas Sacohaya, Volcanmayo y Chillón, y extenderse hasta la parte baja del valle de Ubinas, a una distancia mayor a 8 km del volcán, para luego convertirse en lahares y canalizarse en el río Tambo. La hipótesis sobre la generación de avalanchas de escombros está basada en la existencia de dos depósitos de avalanchas: a) avalanchas de escombros del Pleistoceno superior (>340 000 años), las cuales, actualmente, ocupan todo el valle del río Ubinas hasta la confluencia con el río Tambo (10 km al sureste del cráter). Estas avalanchas poseen un volumen aproximado de 2.6 km³. b) Avalanchas de escombros recientes de hace 3670 ± 60 años AP (Thouret et al., 2005), depositadas al pie de la pared sur del edificio volcánico, a 4.5 km al sureste del cráter, sobre cuyos depósitos se asientan poblados como Querapi y Sacohaya. Estas avalanchas poseen un volumen aproximado de 0.8 km³.

4.3.4 Erupción de tipo efusiva con emisión de lavas

Una erupción efusiva consiste en la emisión de flujos y coladas de lava. En nuestro medio, las lavas son principalmente de composición andesítica, con velocidades de efusión que no superan los metros cúbicos por segundo y un alcance que raramente llega a más de 8 km de la fuente (Francis, 1993).

Aunque el volcán Ubinas ha emitido gran cantidad de flujos de lava durante su historia eruptiva (hace más de 20 000 años AP [Rivera, 2010]), es poco probable que ocurra tal evento en una próxima actividad. Esto se sustenta en los diversos depósitos de caída y flujos piroclásticos recientes encontrados sobre los afloramientos lávicos que alegan que la actividad eruptiva durante el Holoceno y la época histórica fue de tipo explosiva.

Actualmente, si se produjera una erupción efusiva, las lavas serían similares a las emitidas en épocas anteriores, es decir, de composición andesítica o dacítica. Estas lavas tendrían que

rellenar la caldera para luego desplazarse por los flancos. Para que ocurra este proceso, las lavas deberían sobrepasar un volumen mayor a 1 km³ y, desde luego, no recorrerían mucha distancia a partir del cráter (menos de 6 km), con lo que se podría predecir su curso. Además, es necesario mencionar que el emplazamiento de lavas dentro del cráter y la caldera del Ubinas pueden propiciar el colapso del flanco sur del volcán, el cual es débil y poco resistente al embalse de la lava. Si las lavas lograran rebalsar la caldera, estas recorrerían por las quebradas de los flancos norte, noroeste y noreste. Los flujos de lava causarían graves daños por incendio, impacto e incineración, y consecuentemente, enterrarían todo lo que encuentren a su paso. En cualquier caso, los flujos de lava rara vez amenazarían la vida de los pobladores ya que les daría tiempo para evacuar la zona.

Asociado a cualquier erupción efusiva puede presentarse el descongelamiento de la nieve que se encuentra eventualmente entre los meses de diciembre a marzo en la cumbre del volcán y, en consecuencia, dar lugar a la formación de lahares. Estos flujos, al recorrer hacia las partes bajas, serían más peligrosos que las lavas.

4.3.5 Erupción con crecimiento de domo

En el Ubinas es probable una erupción con la formación de un domo de lava. El domo se forma cuando la lava por extrusión del conducto volcánico es demasiado viscosa para fluir más de unas decenas o cientos de metros (Francis, 1993). Durante el crecimiento, los extremos del domo se vuelven inestables, con lo pueden caer o colapsar y dar lugar a la formación de flujos piroclásticos.

El escenario que describe una futura erupción generada por el colapso de un domo de lava y la subsecuente formación de flujos piroclásticos en el volcán Ubinas está basado en los depósitos de flujos de bloques y cenizas antiguos que se encuentran distribuidos en la parte baja del valle de Ubinas (sector de Corohuayo, localidad de Tonohaya, quebrada Infiernillo y río Para).

La mayor amenaza asociada a domos de lava es la generación de una explosión lateral dirigida ("blast"). Estos son fenómenos complejos que comparten características de flujos piroclásticos y oleadas, y pueden afectar a amplios sectores de un volcán, de hasta 180 grados alrededor

del cráter, y alcanzar distancias de decenas de kilómetros. Un ejemplo de explosión lateral dirigida ocurrió en 1980 en el Mount St. Helens en EE. UU. (Decker y Decker, 1989), donde un cuerpo magmático estuvo en crecimiento dentro del volcán por un período de 52 días. El crecimiento de dicho cuerpo provocó el “hinchamiento del volcán”. Un sismo subsecuente generó una avalancha de escombros, producto de la despresurización del cuerpo magmático, y dio lugar a una explosión lateral dirigida. Los depósitos de avalancha y los flujos piroclásticos generados por dicha explosión viajaron alrededor de 28 km de distancia desde el cráter. Desde aquel entonces se sabe que las grandes explosiones dirigidas resultan de la despresurización repentina del sistema magmático o hidrotermal dentro del volcán por el deslizamiento de una parte del flanco.

Aunque en la historia eruptiva del volcán Ubinas no se ha registrado tal evento, en un futuro puede producirse. Este se generaría por la intrusión de un domo que generaría el colapso del flanco sureste, ya que dicho flanco se encuentra alterado, hidrotermalizado y, a la vez, debilitado por procesos de colapso. Los flujos piroclásticos recorrerían por los flancos este y sureste, y cubrirían las lomas y laderas localizadas al pie del Ubinas, para luego canalizarse por los cauces de los ríos y quebradas del valle de Ubinas y Para, hasta una distancia mayor de 6 km del volcán.

5. Resultados: mapas de peligros del volcán Ubinas

Un mapa de peligro volcánico corresponde a un documento de comunicación que muestra el grado de peligro al que están expuestas las áreas adyacentes a un volcán activo. En muchos países, los mapas de peligros forman una parte fundamental de los planes de emergencia y respuesta, y son considerados vitales para la coordinación de prevención, protección y evacuación (Nourbakhsh et al., 2006).

La zonificación de peligros en el mapa está basada en las áreas afectadas en erupciones pasadas del Ubinas, en las características morfológicas del área circundante al volcán y en la actividad eruptiva ocurrida hace menos de 1000 años, la cual fue de tipo explosiva alta a moderada.

Los mapas que se presentan en este estudio toman en cuenta diversos escenarios eruptivos descritos anteriormente. Los mapas muestran diversas áreas que incluyen poblados, terrenos agrícolas y carreteras que podrían ser afectadas por una erupción del volcán Ubinas, suponiendo que el comportamiento eruptivo sea similar al que ha presentado el Ubinas a lo largo de su historia eruptiva, principalmente, durante los últimos 1000 años, periodo en el cual desarrolló erupciones vulcanianas, freatomagmáticas y una erupción pliniana (erupciones explosivas moderadas a fuertes). Estos mapas podrán ser utilizados para las futuras gestiones de crisis del Ubinas.

5.1 Mapa de peligros volcánicos múltiples para la zona proximal

El mapa de peligros está constituido de un mapa principal (Figura 11), en el cual se diferencian tres zonas pintadas de diferentes colores:

5.1.1 Zona de alto peligro (rojo)

Comprende un área alargada de noroeste a sureste, que involucra el cono volcánico y diversas

quebradas y valles que drenan del volcán Ubinas, las cuales pueden ser severamente afectadas por la ocurrencia de lahares (flujos de lodo), flujos piroclásticos, flujos de lava, proyectiles balísticos o colapso del flanco sur. Cualquier tipo de erupción puede afectar dicha área, incluso las de baja magnitud, como las ocurridas desde el año de 1550 hasta la actualidad (IEV 1-2). La probabilidad de ocurrencia de erupciones de magnitud baja (IEV 1-2) es alta, aproximadamente, de uno a seis eventos cada 100 años.

5.1.2 Zona de moderado peligro (naranja)

Corresponde inmediatamente a la zona colindante con la zona de alto peligro. Esta zona comprende el cono inferior del volcán Ubinas (sectores oeste, norte y noreste del Ubinas) y parte de la altiplanicie volcánica. Hacia el sector sureste del volcán, la zona se extiende desde ~7 km hasta una distancia de ~9 km del cráter. Esta zona involucra cauces de quebradas y valles localizados al pie del volcán. Esta zona puede ser cubierta por flujos piroclásticos, oleadas piroclásticas, lahares o avalanchas de escombros en caso de que la erupción explosiva sea moderada a alta (IEV 3-4).

5.1.3 Zona de bajo peligro (amarillo)

Esta zona se proyecta a más de 12 km al sureste y más de 4 km al oeste, norte y noreste del cráter del volcán. Esta zona puede ser afectada por flujos piroclásticos, oleadas piroclásticas, lahares (flujos de barro) y avalanchas de escombros, en caso de que la erupción explosiva sea muy importante (IEV > 4).

5.2 Mapa de peligros por caídas piroclásticas para una erupción vulcaniana (IEV1-2)

En el mapa de peligro se han definido zonas de alto, moderado y bajo peligro, con probabilidad de ser afectadas con depósitos de cenizas y lapilli (Figura 12).

5.2.1 Zona de alto peligro (rojo)

La zona de alto peligro es el área proximal y comprende una zona de geometría elíptica, con una distancia de 15 km al este-sureste y 8 km al oeste del cráter del volcán Ubinas (Figura 12). Durante erupciones vulcanianas con IEV 1-2, esta área puede ser afectada por caídas de cenizas de algunos milímetros a centímetros de espesor. El escenario está basado en la dispersión de cenizas de erupciones vulcanianas presentadas por los volcanes Sabancaya, Ubinas y Misti.

5.2.2 Zona de moderado peligro (naranja)

Los límites de la zona de moderado peligro se hallan aproximadamente entre 15 km y 56 km al este y entre 8 km y 42 km al oeste del volcán Ubinas (Figura 12). Durante erupciones vulcanianas con IEV 1-2, esta área puede ser afectada por caídas de cenizas de varios milímetros de espesor. Esta hipótesis también está basada en los depósitos de cenizas generadas en las erupciones del volcán Ubinas de 2006-2009; 2013-2017; 2019;

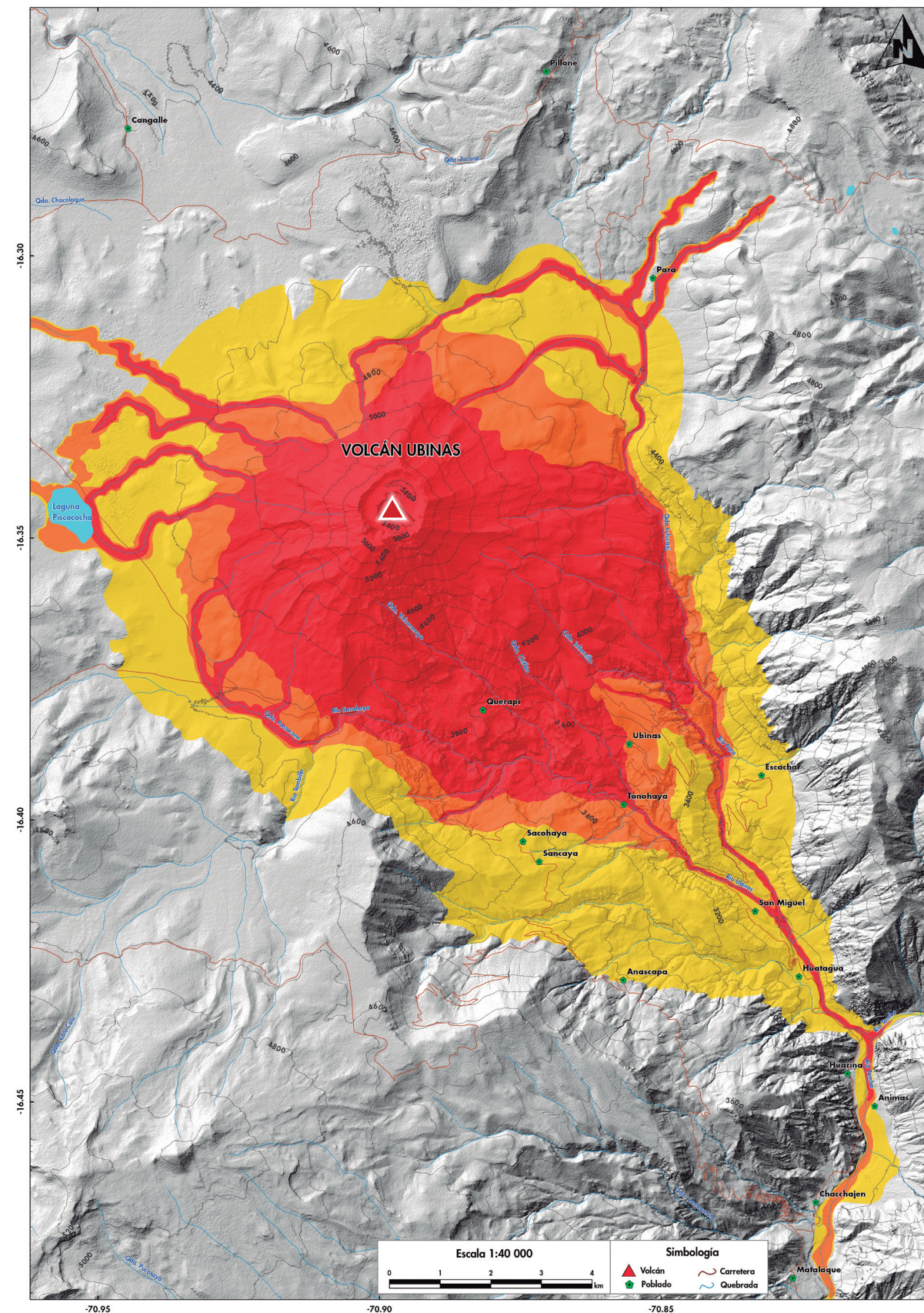


Figura 11. Mapa proximal de peligro múltiples en el cual se muestran las zonas de peligro por el emplazamiento de flujos piroclásticos, flujos de lava, avalanchas de escombros, lahares y eyección de proyectiles balísticos. De color rojo se representa la zona de alto peligro; de naranja, la zona de moderado peligro y, de amarillo, la zona de bajo peligro.

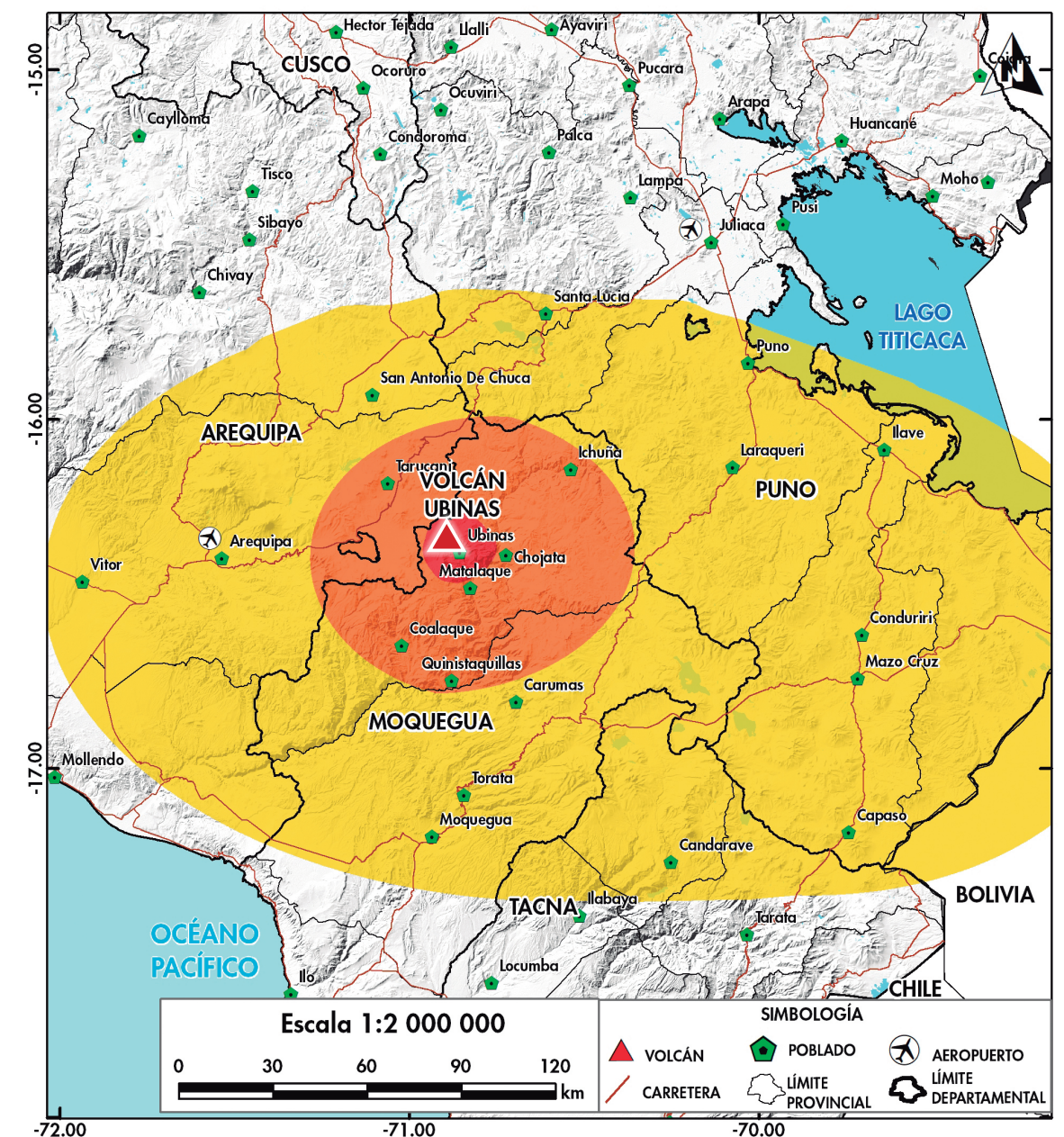


Figura 12. Mapa de peligro por caída de cenizas del volcán Ubinas para un escenario eruptivo de tipo vulcaniano con IEV 1-2 (simulación con apoyo de USGS, 2024).

2023-actualidad. Durante la erupción de 2019 se produjeron depósitos de caídas de cenizas de 1 mm de espesor a 20 km de distancia al sureste del volcán Ubinas.

5.2.3 Zona de bajo peligro (amarillo)

La zona de bajo peligro tiene una configuración elíptica, con una distancia de más de 240 km al este, 125 km al oeste y 100 km al sur del volcán Ubinas (Figura 12). Durante erupciones vulcanianas con IEV 1-2, esta área puede ser afectada por caídas de cenizas de menos de 1 mm de espesor. En la erupción de 2019 se produjeron depósitos de caídas de cenizas de menos de 1 mm de espesor a 90 km al sureste del volcán Ubinas.

5.3 Mapa de peligros por caídas piroclásticas durante una erupción subpliniana o pliniana (IEV 4-5)

Una erupción subpliniana o pliniana producida por el volcán Ubinas generará tefras, principalmente caída de pómez, escorias y cenizas. Las pómez caerán en áreas aledañas, mientras que las cenizas se depositarán en áreas lejanas al volcán (>50 km). Esta hipótesis está basada en fenómenos similares ocurridos en el Holoceno y hace aproximadamente 980 años AP (Thouret et al., 2005; Rivera et al., 1998; Samaniego et al., 2020).

5.3.1 Zona de alto peligro (rojo)

Para el escenario de una erupción altamente explosiva (subpliniana o pliniana), la zona de alto peligro muestra una configuración elíptica alrededor del cráter, con una distancia de más de 600 km al este, 320 km al oeste y 280 km al sur (Figura 13). Dicha zona puede ser afectada por caídas de cenizas y lapilli de pómez que formarían una capa de ceniza de más de 1 cm de espesor. De manera local, en caso de una erupción altamente explosiva, se generaría caída de pómez de más de 0.5 m de espesor que cubrirían zonas adyacentes al Ubinas, hasta un radio de 15 km alrededor del volcán. Esta hipótesis está basada en

el área cubierta durante las erupciones plinianas ocurridas hace 7000 y 1000 años AP del volcán Ubinas (Thouret et al., 2005).

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 más de 640 km a 740 km al este, 320 km a 550 km al oeste y 280 km a 380 km al sur (Figura 13). Durante erupciones subpliniana o plinianas con IEV 4-5, esta área puede ser afectada por caídas de cenizas de varios milímetros a centímetros de espesor.

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 de más de 740 km al este, más de 550 km al oeste y más de 380 km al sur (Figura 13). En esta zona se depositarían cenizas de menos de 1 mm de espesor; los vientos van a influenciar su distribución.

Desde el punto de vista de peligros y riesgos, las tefras (lapilli pómez, bloques y cenizas) expelidas por dicha erupción pueden causar daños a la propiedad y generar víctimas por impacto de los materiales que caen sobre estas. La acumulación de las tefras puede causar que las construcciones (viviendas, colegios, centros médicos, etc.) colapsen. Otros impactos están vinculados a la ruptura de las líneas de transmisión de energía, afectación a la agricultura, ganadería y fuentes de agua para consumo humano. La tefra suspendida en el aire puede causar serios problemas respiratorios, dañar las maquinarias, perturbar el tráfico vehicular y el transporte aéreo. La capacidad destructiva de caída de tefras a gran escala dependerá de su volumen y dispersión (peso por m²), así como de la toxicidad de los gases asociados. Cuanto mayor sea el espesor de la caída de pómez, el tamaño y la temperatura de los materiales, más trágico serán los efectos sobre las áreas aledañas al volcán, poblaciones y medio ambiente.

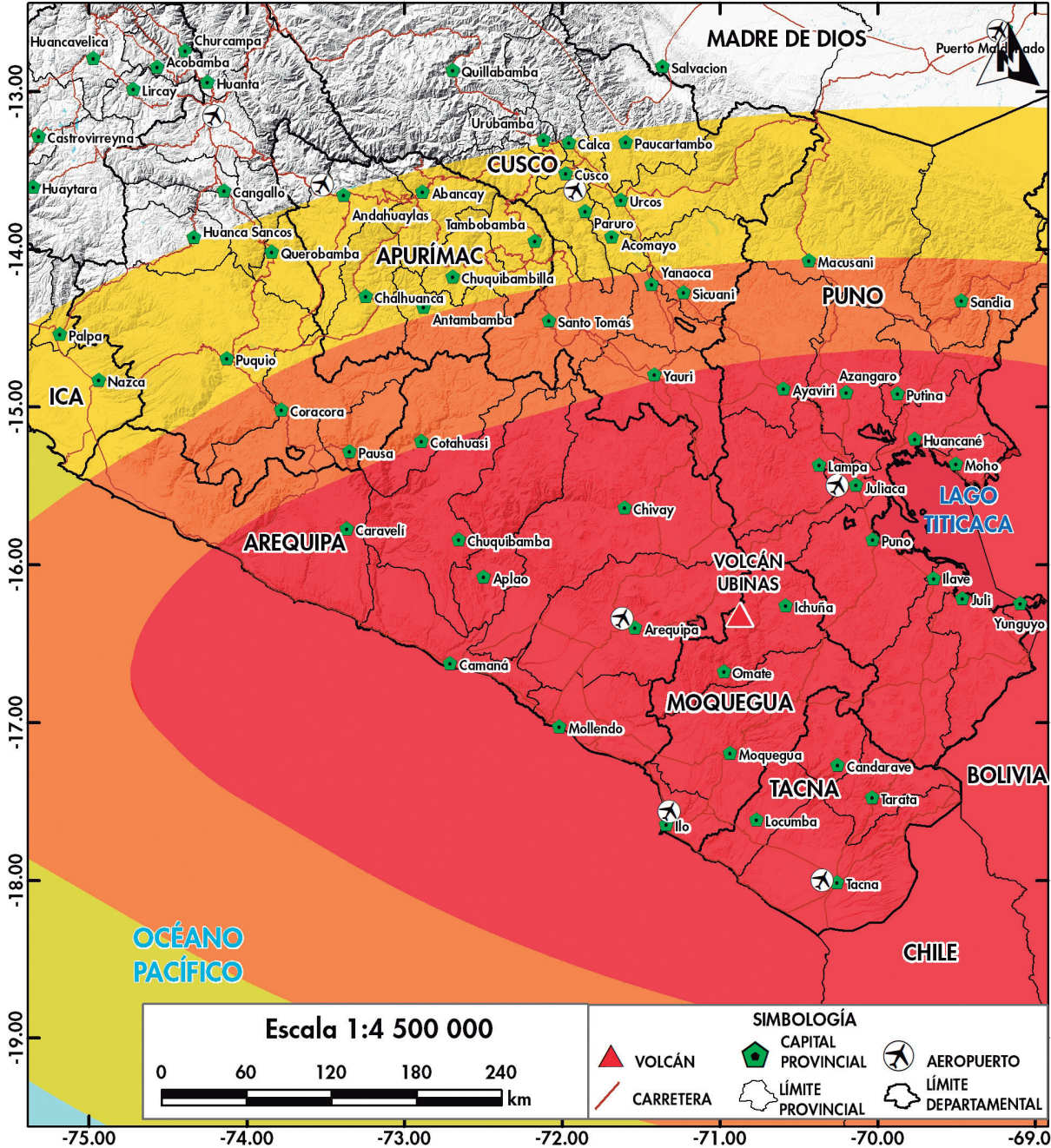


Figura 13. Mapa de peligro por caídas de cenizas del volcán Ubinas para un escenario eruptivo tipo subpliniano-pliniano con IEV 4-5.

5.4 Mapa de peligro por lahares

En el sur del Perú se han realizado pocas estimaciones de volúmenes de lahares. Solo se tienen cálculos para quebradas que descienden por los flancos del volcán Misti, además del río Chili que discurre entre los volcanes Misti y Chachani (Delaite et al., 2005). En dicho volcán, volúmenes de lahares del orden de 0.5 a 6 millones de m³ son frecuentes y ocurren cada 300 a 1000 años, aproximadamente, y su origen

está asociado a erupciones explosivas moderadas (IEV 1-2).

Para la construcción de escenarios de peligros por descenso de lahares del volcán Misti, asociados a lluvias intensas, Thouret et al., (2022) consideran volúmenes de lahar de 150 000 m³, 350 000 m³ y 500 000 m³. Tomando en consideración dichos datos, además de las condiciones climáticas de la zona y la inexistencia de un casquete glaciar en el Ubinas, los volúmenes de los eventos laháricos escogidos fueron de

300 000 m³, 1 Mm³ y 2 Mm³. Se escogió un volumen de 300 000 m³ para lahares de poco volumen que, se estima, son más frecuentes. Adicionalmente, se consideraron volúmenes de 1 y 2 millones de m³ para lahares de importante volumen, los cuales son menos frecuentes.

En el mapa de peligros por lahares, la zona roja es considerada la zona de alto peligro

(Figura 14) y corresponde a las áreas que pueden ser afectadas por lahares de hasta 300 000 m³; estos lahares podrían asociarse a erupciones leves a moderadas (IEV 1-2) o lluvias intensas. La zona naranja, denominada de moderado peligro, puede ser afectada por lahares de 1 millón de m³. La zona amarilla es considerada de bajo peligro y puede ser afectada por lahares de 2 millones de m³.

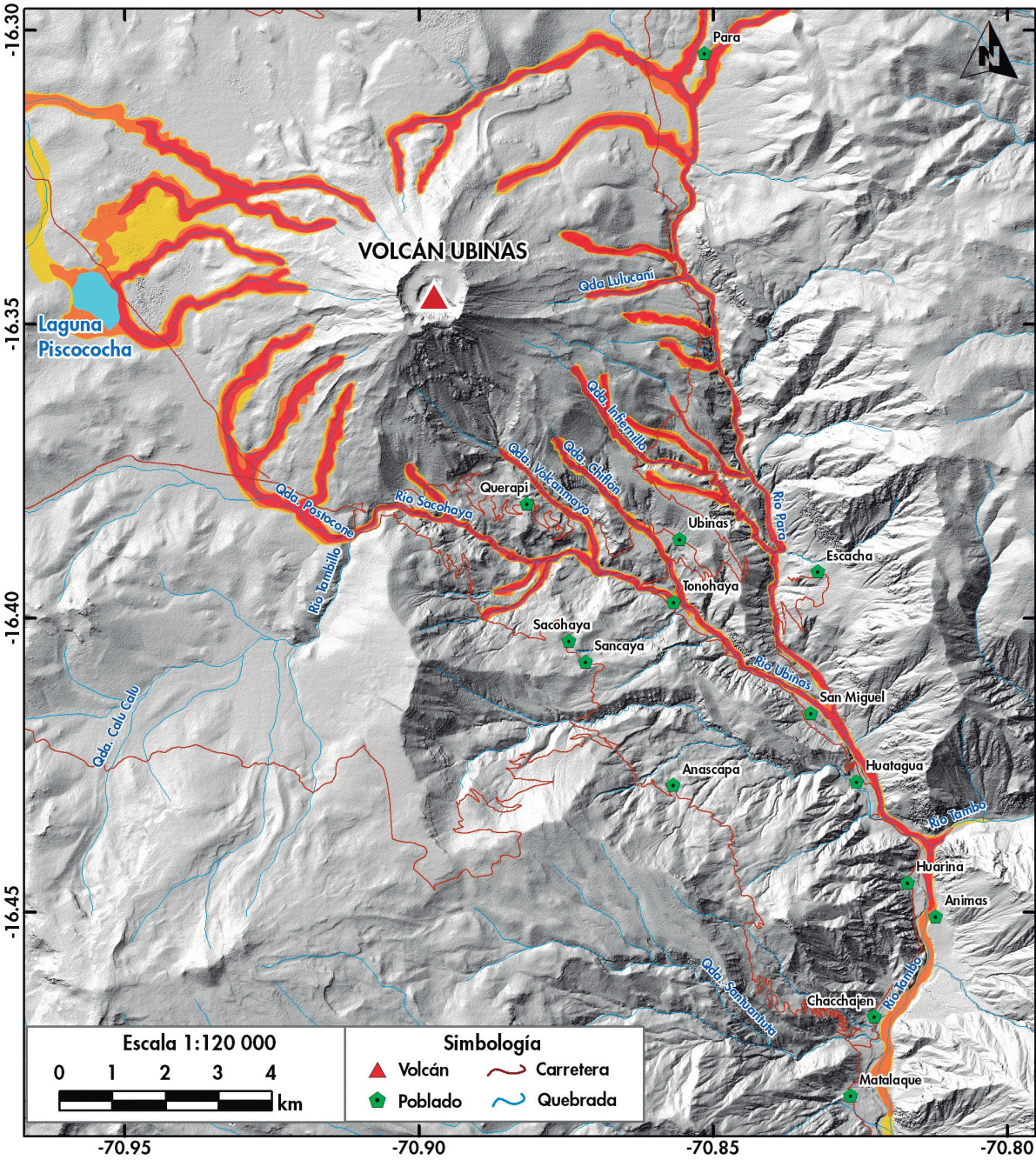


Figura 14. Mapa de peligros por lahares o flujos de lodo del volcán Ubinas.

Conclusiones

- El Ubinas es el volcán más activo del sur peruano. En las últimas dos décadas, años 2006-2009; 2013-2107; 2019 y 2023-actulidad, ha desarrollado erupciones vulcanianas. Existe una gran probabilidad de que la próxima actividad eruptiva del Ubinas sea de tipo explosiva moderada, es decir, vulcaniana, pero también existe la probabilidad que la actividad pueda incrementar.
- Los mapas de peligros del Ubinas presentados en este estudio fueron elaborados teniendo en cuenta el principio básico de que los volcanes tendrán un patrón de comportamiento similar al que han mostrado en el pasado reciente y en épocas históricas. Por tal razón, para la elaboración del mapa de peligros se tuvo en cuenta los relatos sobre erupciones históricas, estudios vulcanológicos y datos de campo que incluyen la identificación de productos asociados a la historia eruptiva pasada del Ubinas.
- El mapa de peligros volcánicos múltiples para la zona proximal muestra las áreas que serían afectadas en caso del emplazamiento de flujos de lava, flujos piroclásticos, lahares, bloques balísticos y avalanchas de escombros. Este mapa muestra una zona de alto peligro (rojo) que comprende un área alargada en sentido noroeste a sureste, que involucra el cono volcánico, además de diversas quebradas y valles que drenan del volcán Ubinas. Cualquier tipo de erupción puede afectar dicha área, incluso las de baja magnitud, como las ocurridas desde el año de 1550 hasta la actualidad (IEV 1-2). La zona de moderado peligro (naranja) corresponde inmediatamente a la zona colindante con la zona de alto peligro. Esta zona comprende el cono inferior del volcán Ubinas y parte de la altiplanicie volcánica. Hacia el sector sureste del volcán, la zona se extiende desde ~7 km hasta una distancia de ~9 km del cráter. Esta zona, que involucra cauces de quebradas y valles localizados al pie del volcán, puede ser afectada en caso de erupciones explosivas moderadas a altas (IEV 3-4). La zona de bajo peligro (amarillo) se proyecta a más de 12 km al sureste del cráter y más de 4 km al oeste, norte y noreste del cráter del volcán. Esta zona puede ser afectada en caso ocurra una erupción explosiva muy importante (IEV > 4).
- En el mapa de peligros por caídas de cenizas para un escenario de tipo vulcaniano (IEV 1-2) se aprecia que la zona de alto peligro (rojo) se halla a una distancia de 15 km al este-sureste y a 8 km al oeste del cráter del volcán Ubinas. Esta zona puede ser afectada por caídas de cenizas de varios milímetros a centímetros de espesor. La zona de moderado peligro (naranja) se halla aproximadamente entre 15 km y 56 km al este, y entre 8 km y 42 km al oeste del cráter del volcán Ubinas. Esta zona puede ser afectada por caídas de cenizas de algunos milímetros de espesor. La zona de bajo peligro (amarillo) tiene una configuración elíptica, con una distancia de más de 240 km al este, 125 km al oeste y 100 km al sur del volcán Ubinas. Esta zona puede ser afectada por caídas de cenizas de menos de 1 mm de espesor.
- El mapa de peligros por caídas piroclásticas para un escenario de tipo subpliniano-plinianiano (IEV 4-5) presenta la zona de alto peligro (rojo) con una configuración elíptica alrededor del cráter, a una distancia de más de 600 km al este, 320 km al oeste y 280 km al sur. Dicha zona puede ser afectada por la caída de ceniza y lapilli de pómez que formaría una capa de ceniza de más de 1 cm de espesor. De manera local, en caso de una erupción altamente explosiva, se generaría caída de lapilli de pómez de más de 0.5 m de espesor que cubrirían zonas adyacentes del Ubinas, hasta un radio de 15 km alrededor del volcán. La zona de moderado peligro (naranja) tiene una configuración elíptica alrededor del cráter, con una distancia de más de 640 km a 740 km al este, 320 km a 550 km al oeste y 280 km a 380 km al sur. Esta zona puede ser afectada por caídas de cenizas de más de 1 mm de espesor. La zona de bajo peligro (amarillo) tiene una configuración elíptica alrededor del cráter, con una distancia de más de 740 km al este, más de 550 km al oeste y más de 380 km al sur. En esta zona se depositarían cenizas de menos de 0.1 mm de espesor.
- En el mapa de peligros por lahares, la zona roja es considerada de alto peligro y corresponde a la zona de mayor probabilidad de ser afectada por lahares poco voluminosos 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 y, finalmente, la zona amarilla, considerada de bajo peligro, tiene menor

probabilidad de ser afectada por lahares muy voluminosos. Los lahares voluminosos (2 millones de m³) podrían estar asociados a erupciones de gran magnitud ($IEV \geq 3$), cuya probabilidad de ocurrencia es baja.

- Otro de los peligros volcánicos a tener en cuenta es el colapso o derrumbe del flanco sur del volcán Ubinas, situación que puede ser ocasionada como resultado de una erupción explosiva importante, el crecimiento de un domo de lava al interior del volcán, etc. Dependiendo de su magnitud, este suceso puede generar graves daños en los valles de los ríos Ubinas y Tambo. El alcance de la avalancha sería mayor a 8 km en el sector sureste del Ubinas. Tales avalanchas podrían transformarse en lahares y descender a lo largo del río Tambo hasta el océano Pacífico.

Referencias

- Adams, N.K., de Silva, S.L. Self, S., Salas, G., Schubring, S., Permenter, J.L., Arbesman, K., (2001). The physical volcanology of the 1600 eruption of Huaynaputina, southern Peru. *Bulletin of Volcanology* 62, 8, 493-518.
- Arana-Salinas, L., Siebe, C., Macías, J.L. (2010). Dynamics of the ca. 4,965 yr. B.P. "Ochre Pumice" Plinian eruption of Popocatepetl Volcano, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 192, 212-231.
- Bromley, G., Thouret, J.-C., Schimmelpfennig, I., Mariño, J., Valdivia, D., Rademaker, K., del Pilar Vivanco Lopez, ASTER Team, Aumaitre, G., Bourles, D., Keddadouche, K. (2019). In situ cosmogenic ³He and ³⁶Cl and radiocarbon dating of volcanic deposits refine the Pleistocene and Holocene eruption chronology of SW. Peru. *Bulletin of Volcanology* 81:64.
- Bulmer, M.; Johnston, A., Engle, F. (1998). *Analysis of Sabancaya volcano, southern Peru using RADARSAT and Landsat TM data*. Informe inédito. Center for Earth Planetary Studies. National Air and Space Museum, Smithsonian Institution. 10 p.
- Bustillos J., Samaniego P. (2011). *Volcán Tungurahua: tamaño de las erupciones explosivas*. En: Andrade D. (ed.). *Memorias de las séptimas jornadas en ciencias de la Tierra*. Quito : EPN, p. 131-134. *Jornadas en Ciencias de la Tierra; Encuentro sobre Riesgos y Desastres*, 7; 1. Quito.
- Carey S. (1996). "Modeling of tephra fallout from atmospheric eruptions", in Scarpa, L.A. and Tilling, R.I. (eds.), *Monitoring and Mitigation of Volcanic Hazards*, Berlin, Springer Verlag, pp. 429-463.
- Cas, R., Wright, J. (1987). *Volcanic successions, modern and ancient*, Allen & Unwin, London, 528 pp.
- Castruccio, A., Clavero, J., Rivera, A. (2010). Comparative study of lahars generated by the 1961 and 1971 eruptions of Calbuco and Villarrica volcanoes, Southern Andes of Chile. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 190, 297-311.
- Costantini, L., Pioli, L., Bonadonna, C., Clavero, J., Longchamp, C. (2011). A late Holocene explosive mafic eruption of Villarrica volcano, Southern Andes: the Chaimilla deposit. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 200(3-4), 143-158.
- Crandell D. R., (1988). *Deposits of pre-1980 pyroclastic flow and lahars from Mount St. Helens*, Washington, U.S. Geol. Serv. Prof. Paper 1444, 91 p.
- Croswell, H.S., Arora, B., Brown, S.K., Cottrell, E., Deligne, N.L., Guerrero, N., Hobbs, L., Kiyosugi, K., Loughlin, S.C., Lowndes, J., Nayembil, M., Siebert, L., Sparks, R.S.J., Takarada, S., Venzke, E. (2012). Global database on large magnitude explosive volcanic eruptions (LaMEVE). *Journal of Applied Volcanology* 1:4.
- Decker, R.; Decker, B., (1989). *Volcanoes*. W.H. Freeman and Company, New York, 285 p. (Edición revisada).
- Del Carpio J.; Rivera, M. (2019). *Aportes del monitoreo geofísico en el manejo de crisis del volcán Ubinas, actividad eruptiva 2019*. Informe Técnico IGP.
- De Silva S.L., Francis P.W. (1991). *Volcanoes of the Central Andes*. Berlin: Springer - Verlag, 216 p.
- Eychenne, J.; Le Pennec, J.-L.; Troncoso, L.; Gouhier, M. & Nedelec, 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* 74(1): 187-205.
- Folch, A., Jorba, O., Viramonte, J. (2008). Volcanic ash forecast-application to the May 2008 Chaitén eruption. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 8: 927-940.
- Fries A., Dominguez, L., Jarvis, P. Pistolesi, M., Manrique, N., Aguilar, R., Valdivia, D., Rossi, E., Pollastri, S., Horwell, C., Bonadonna, C., (2023). The post-2016 long-lasting Vulcanian activity of Sabancaya volcano (Peru) and associated aeolian remobilisation of volcanic ash. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 441, 107876
- Gerbe, M.C., Thouret, J.C. (2004). Role of magma mixing in the petrogenesis of lavas erupted through the 1990-98 explosive activity of Nevado Sabancaya in south Peru. *Bulletin of Volcanology* 66, 541-561.
- Harpel, C., de Silva, S., Salas, G. (2011). The 2ka eruption of Misti volcano, southern Peru-The most recent Plinian eruption of Arequipa's iconic volcano. *Geological Society of America Special papers* 484, 72 pp.
- Harpel, C., Cuno, J., Takach, M., Rivera, P., Aguilar, C., Tepley F., García, F. (2023). The late Pleistocene Sacarosa tephra-fall deposit, Misti Volcano, Arequipa, Peru: its magma, eruption, and implications for past and future activity. *Bulletin of Volcanology* 85, 46.
- Hoblitt R., Walder J., Driedger C., Scott K., Pringle P., Vallance J. (1995). *Volcano Hazards from Mount Rainier, Washington*, Open - File Report 95 - 273, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, 10 p.

- Instituto Nacional de Estadística e Informática (2018). *Resultados definitivos de los Censos Nacionales 2007: XII de Población, VII de vivienda y III de Comunidades Indígenas. Moquegua, Arequipa*. <https://censo2017.inei.gob.pe/resultados-definitivos-de-los-censos-nacionales-2017/>
- Juvigné, E., Thouret, J.-C., Gilot, E.; Leclercq, L., Gourgaud, A. (1998). L'activité du volcan Nevado Sabancaya (Pérou) au cours de l'Holocène. *Quaternaire*, 9(1): 45-51.
- Juvigné, E., Thouret, J.-C., Loutsch, I., Lamadon, S., Frechen, M., Fontugne, M., Rivera, M., Marino, J. (2008). Téphrostratigraphie et chronologie dans la region des Nevados Ampato et Sabancaya, sud du Pérou. *Quaternaire* 19, 161–178.
- Machacca R., Lesage, P., Larose, E., Lacroix, P., Ancasí, R. (2019). Detection of pre-eruptive seismic velocity variations at an andesitic volcano using ambient noise correlation on 3-component stations: Ubinas volcano, Peru, 2014. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 381:83–100
- Mastin, L. G., Guffanti, M., Servranckx, R., Webley, P., Barsotti, S., Dean, K., et al. (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.
- Morrissey, M.M., Mastin, L.G. (2000). Vulcanian eruptions. En: Sigurdsson, H.; Houghton, B.F.; McNutt, S.R.; Rymer, H. & Stix, J., eds. *Encyclopedia of volcanoes*. San Diego, CA: Academic Press, p. 463-475.
- Nakada, S. (2000). Hazards from pyroclastic flows and surges. En: Sigurdsson, H.; Houghton, B.F.; McNutt, S.R.; Rymer, H. & Stix, J., eds. *Encyclopedia of volcanoes*. San Diego, CA: Academic Press, p. 945-955.
- Nourbakhsh, I., Sargent, R., Wright, A., Cramer, K., McClendon, B., Jones, M. (2006). Mapping disaster zones. *Nature* 439:787–788.
- Prival J.M., Thouret, J.-C., Japura, S., Gurioli L., Bonadonna, C., Mariño, J., Cueva, K. (2020). New New insights into eruption source parameters of the 1600 CE Huaynaputina Plinian eruption, Peru. *Bulletin of Volcanology* 82:7
- Ramos, D., Ortega, M., Antayhua, Y., Ancasí, R., Ccallata, B., Miranda, R., Maquerhua, E., Cruz, L., Apaza, F., et al. (2019). *Informe Técnico Anual "Vigilancia del volcán Ubinas, periodo 2019" (distrito de Ubinas, provincia General Sánchez Cerro– región Moquegua)*.
- Rivera, M.; Thouret, J.-C., Gourgaud, A. (1998). Ubinas, el volcán más activo del sur del Perú desde 1550: geología y evaluación de las amenazas volcánicas. *Boletín Sociedad Geológica del Perú*, (88): 53-71.
- Rivera, M., Mariño, J., Samaniego, P., Delgado, R., Manrique, N. (2016). Geología y evaluación de peligros del complejo volcánico Ampato - Sabancaya (Arequipa), *INGEMMET. Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica*, 61, 122 p., 2 maps.
- Rivera, M. (2010). *Genèse et évolution des magmas andésitiques à rhyodacitiques récents des volcans Misti et Ubinas (Sud du Pérou)*. Unpublished PhD thesis, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, France, 407 pp
- Rivera, M., Thouret, J.-C., Mariño, J., Berolatti, R., Fuentes, J. (2010). Characteristics and management of the 2006–2008 volcanic crisis at the Ubinas volcano (Peru). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 198:19–34.
- Rivera, M., Marino, J., Thouret, J.-C. (2011). Geología y Evaluación de Peligros del volcán Ubinas. *Boletín N°46 Serie C, Geodinámica e ingeniería geológica, INGEMMET*, Lima, 83 p., anexos y mapas. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/302>
- 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., Nauret, F., Mariño, J., Liorzou, C. (2023). Petrological and geochemical constraints on the magmatic evolution at the Ampato-Sabancaya compound volcano (Peru). *LITHOS* 458-459; 107364
- Romero, J., Bustillos, J., Viramonte, J. (2015). Los depósitos de caída de tefras: Una breve revisión sobre su cuantificación y análisis para la clasificación de erupciones volcánicas explosivas, con ejemplos Latinoamericanos. *Pyroclastic Flow, Journal of Geology* 5(1): 1-33.
- Romero, J.E., Morgavi, D., Arzilli, F., Daga, R., Caselli, A., Reckziegel, F., Viramonte, J., DíazAlvarado, J., Polacci, M., Burton, M., Perugini, D. (2016). Eruption dynamics of the 22–23 April 2015 Calbuco Volcano (Southern Chile): analyses of tephra fall deposits. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 317, 15–29.
- Rose, W. I., Murrow, P., Bonadonna, C., Durant, A. J., Ernest, G. J. (2008). Nature and significance of small volume fall deposits at composite volcanoes: Insights from the October 14, 1974 Fuego eruption, Guatemala. *Bulletin of Volcanology*. 70(9): 1043-1067.
- Samaniego, P., Rivera, M., Mariño, J., Guillou, H., Liorzou, C., Zerathe, S., Delgado, R., Valderrama, P. (2016). The eruptive chronology of the Ampato-Sabancaya volcanic complex (Southern Peru). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 323:110–128.
- Samaniego, P., Rivera, M., Manrique, N., Schiavi, F., Nauret, F., Liorzou, C., Ancellin, M.-A. (2020). Linking magmatic processes and magma chemistry during the post-glacial to recent explosive eruptions of Ubinas volcano (southern Peru). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 407, 107095.
- 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 pp. doi:10.1029/2011JB008968.
- Scott, W., Pierson T., Schilling, Costa, J., Gardner, C., Vallance, J., Mayor J., (1997). *Volcano Hazards in the Mount Hood region, Oregón*, Open - File report 97-89, U.S. Department of the interior, U.S. Geological Survey, 14 p.
- Siebert, L., Simkim, T., Kimberley, P. (2010). *Volcanoes of the World*. Third Edition. Smithsonian Institution, Washington, University of California, pp. 537.
- Sigurdsson, H.; Houghton, B.F.; McNutt, S.R.; Rymer H. & Stix, J. eds (2000). *Encyclopedia of volcanoes*. San Diego, CA: Academic Press, 1442 p.
- Soto, G.J., Alvarado, G. (2006). Eruptive history of Arenal Volcano, Costa Rica, 7 ka to present. En: Gill, J., Reagan, M., Tepley, F. & Malavassi, E. (eds): Arenal Volcano Special Volume. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 157(1-3): 254-269.
- Suzuki, T. (1983). "A theoretical model for dispersion of tephra", in: D. Shimozuru, I. Yokoyama (eds.), *Arc Volcanism: Physics and Tectonics*, Terra Scientific Publishing Company (TERRAPUB), Tokyo, pp. 93-113
- Thouret, J.-C., Guillande, R., Huamán, 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*, 1(165): 49–63.
- Thouret, J.-C., Finizola, A., Fornari, M., Suni, J., Legeley-Padovani, A., Frechen, M. (2001). Geology of El Misti volcano nearby the city of Arequipa, Peru. *Geological Society of America Bulletin* 113 (12), 1593–1610.
- Thouret, J.-C., Juvigné, E., Mariño, J., Moscol, M., Legeley-Padovani, A., Loutsch, I., Dávila, J., Lamadon, S., Rivera, M. (2002). Late Pleistocene and Holocene tephro-stratigraphy and chronology in southern Peru. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, 93:45-61.
- Thouret, J.-C., Rivera, M., Worner, G., Gerbe, M.C., Finizola, A., Fornari, M., Gonzales, K. (2005). Ubinas: the evolution of the historically most active volcano in southern Peru. *Bulletin of Volcanology* 67:557–589.
- Tilling, R.I., ed. (1989). *Apuntes para un curso breve sobre los peligros volcánicos, Santa Fé, Nuevo México, 2-3 julio 1989*. [s.l.]: Organización Mundial de Observatorios Vulcanológicos, 125 p.
- Todde, A., Cioni, R., Pistolesi, M., Geshi, N., Bonadonna, C. (2017). The 1914 taisho eruption of Sakurajima volcano: Stratigraphy and dynamics of the largest explosive event in Japan during the twentieth century. *Bulletin of Volcanology* 79 (10), 72–22.
- Travada y Córdova, V. (1958). *El suelo de Arequipa convertido en cielo: Historia general de Arequipa*. Arequipa: Primer Festival del Libro Arequipeño, 121 p. Facsimil de la edición de 1758.
- Varekamp, J.C., Luhr, J.F., Prestegard, K. (1984). The 1982 eruptions of El Chichon volcano Chiapas, Mexico: character of the eruptions, ash-fall deposits, and gas phase. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 23, 39–68.
- Zamácola, J. (1888). *Apuntes para la historia de Arequipa*. Año de 1804. Arequipa: Imp. de La Bolsa, 98 p.

Información clave para ti

Puedes consultar el mapa de peligros del volcán Ubinas, 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 **CENVUL**



REGEN

Volcán Ubinas: inspección realizada por el IGP de la caldera y cráter del volcán durante las primeras emisiones de ceniza del proceso eruptivo 2023.





@igp.peru



@igp_peru



@igp.peru



@igp_videos



@institutogeofisicodelperu



@igp.peru