

DIRECCIÓN DE GEOLOGÍA AMBIENTAL Y RIESGO GEOLÓGICO

**Informe Técnico N° A7420**

# MONITOREO MULTIDISCIPLINARIO Y EVALUACIÓN DE PELIGRO VOLCÁNICO DEL ACTUAL PROCESO ERUPTIVO DEL VOLCÁN UBINAS 2023 (JUNIO A AGOSTO)

Departamento Moquegua  
Provincia General Sánchez Cerro  
Distrito Ubinas



SETIEMBRE  
2023

**MONITOREO MULTIDISCIPLINARIO Y EVALUACIÓN DE PELIGRO VOLCÁNICO  
DEL ACTUAL PROCESO ERUPTIVO DEL VOLCÁN UBINAS 2023 (JUNIO A  
AGOSTO)**

Departamento Moquegua, provincia General Sánchez Cerro, distrito Ubinas

*Elaborado por la Dirección de  
Geología Ambiental y Riesgo  
Geológico del INGEMMET.*

*Equipo de geología volcánica:*

*Jersy Mariño Salazar  
Nelida Manrique Llerena  
Kevin Cueva Sandoval  
Juan Cuno Bayta  
David Arteaga Utani  
Ana Pari Oscalla  
Carla Palacios Núñez  
Andy Ancalle Quispe  
Yeison Huamaní Morales  
Cesar Quispe Alvarez*

*Equipo de monitoreo volcánico:*

*Fredy Apaza Choquehuayta  
Edu Taipe Maquerhua  
Mayra Ortega Gonzáles  
Reynaldo Ccacyancco Ccacyancco  
Jorge Chalco Ibarcena  
Jorge Alcántara Oyarce  
Daniel Ramírez Guzmán  
Luis Cruz Mamani  
Rafael Miranda Cruz  
Saida Japura Paredes  
Gianella Paredes Cárdenas  
Veronica Tito Garcia  
Nely Sullca Tacuma*

**Referencia bibliográfica**

Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico (2023). *Monitoreo multidisciplinario y evaluación de peligro volcánico del actual proceso eruptivo del volcán Ubinas 2023 [junio a agosto], distrito Ubinas, provincia General Sánchez Cerro, departamento Moquegua*. Lima: Ingemmet, Informe Técnico A7420, 55 p.

## Índice

<b>I.</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>5</b>
1.1.	UBICACIÓN Y ACCESO	6
1.2.	POBLACIÓN	7
<b>II.</b>	<b>MONITOREO MULTIDISCIPLINARIO</b>	<b>7</b>
<b>III.</b>	<b>MONITOREO DE PRODUCTOS VOLCÁNICOS EMITIDOS</b>	<b>8</b>
3.1.	MUESTREO DE CENIZA	8
3.2.	MUESTREO DE BALÍSTICOS	10
3.3.	MAPAS DE CAÍDA DE CENIZA (MAPA DE ISÓPACAS)	11
3.4.	ESTIMACIÓN DE VOLUMEN DE CENIZA	13
3.5.	PARÁMETROS ERUPTIVOS	17
3.6.	DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA Y ANÁLISIS DE PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	19
3.7.	ANÁLISIS DE COMPONENTES DE LA CENIZA	25
3.8.	RECONOCIMIENTO GEOLÓGICO DEL CRÁTER DEL VOLCÁN UBINAS	28
3.9.	AFECTACIÓN A LOS POBLADOS	28
<b>IV.</b>	<b>SISMOLOGÍA VOLCÁNICA</b>	<b>30</b>
4.1.1.	Aplicación del modelo basado en procesos de patrones de sismicidad pre – eruptiva para el proceso del volcán ubinas 2023	34
<b>V.</b>	<b>QUÍMICA DE GASES VOLCÁNICOS</b>	<b>36</b>
<b>VI.</b>	<b>SENSORES REMOTOS</b>	<b>37</b>
<b>VII.</b>	<b>DEFORMACIÓN VOLCÁNICA</b>	<b>41</b>
<b>VIII.</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>43</b>
8.1.	ANÁLISIS MULTIPARAMÉTRICO	43
8.2.	MODELO GEOLÓGICO	44
<b>IX.</b>	<b>ASESORAMIENTO TÉCNICO Y CHARLAS DE SENSIBILIZACIÓN Y DIFUSIÓN DURANTE LA CRISIS VOLCÁNICA</b>	<b>45</b>
<b>X.</b>	<b>DISCUSIÓN</b>	<b>48</b>
<b>XI.</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>49</b>
<b>XII.</b>	<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>50</b>
<b>XIII.</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>52</b>

## Índice de figuras

<b>Figura 1.</b> Mapa de ubicación del volcán Ubinas, donde se indican los principales pueblos y rutas de acceso.....	6
<b>Figura 2.</b> a) Muestra 33U-UBI-R23-042 tomada el 13 de julio, capa fina de ceniza de color gris cubriendo una superficie rocosa. b) Toma de muestra del Cenizómetro UC-12, realizada el 06 de julio en el pueblo de Querapi. La muestra tenía un espesor de 0.1 mm aproximadamente.....	
<b>Figura 3.</b> a) Muestreo de ceniza del cenizómetro UC-05, realizado el 05 de agosto en la estación de Anascapa alcanzó un espesor de 0.1 mm. b) La toma de muestra de ceniza de la bandeja UB-08 se realizó el 05 de agosto, se reportó un espesor de 1.3 mm de ceniza.....	
<b>Figura 4.</b> Mapa de ubicación de muestras de proyectiles balísticos en el sector este y sureste a 1.5 km aproximadamente desde el cráter del volcán.....	10
<b>Figura 5.</b> a) Proyectil balístico escoriáceo. b) Proyectil balístico denso con xenolito.....	
<b>Figura 6.</b> Mapa de isópacas de la caída de cenizas durante el periodo eruptivo del volcán Ubinas del 22 de junio al 10 de agosto del año 2023.....	12
<b>Figura 7.</b> Gráfica de adelgazamiento exponencial, para el cálculo de volumen de la ceniza emitida durante desde el 22 de junio al 10 de agosto, donde se observa disminución exponencial del espesor respecto a la distancia de la fuente.....	15
<b>Figura 8.</b> Gráfica de adelgazamiento exponencial, para el cálculo de volumen, donde se observa la disminución exponencial del espesor respecto a la distancia de la fuente.....	15
<b>Figura 9.</b> El diagrama de Ley Potencial (Bonadonna and Houghton 2005) realiza el ajuste de la curva Ley de Potencial que se adapta mejor que los segmentos en base a la ley del potencial.....	17
<b>Figura 10.</b> Mapa de ubicación de muestras para realizar el análisis granulométrico.....	20
<b>Figura 11.</b> Curva de frecuencia en base a la asimetría.....	22
<b>Figura 12.</b> Curva de frecuencia en base a la Curtosis (Folk & Ward, 1957).....	22
<b>Figura 13.</b> a) Histograma de la muestra 33U-UBN-R23-028 b) Curva granulométrica.....	23
<b>Figura 14.</b> a) Histograma de la muestra 33U-UBN-R23-030 b) Curva granulométrica.....	23
<b>Figura 15.</b> a) Histograma de la muestra 33U-UBN-R23-048 b) Curva granulométrica.....	23
<b>Figura 16.</b> a) Histograma de la muestra 33U-UBN-R23-026 b) Curva granulométrica.....	24
<b>Figura 17.</b> Distribución granulométrica, según el diagrama los granos finos tienden a concentrarse en mayor cantidad en las zonas medial – distal.....	24
<b>Figura 18. a)</b> Fotografía del cráter del volcán Ubinas tomada el 11 de julio. b) Fotografía del cráter del volcán Ubinas, tomada el 04 de agosto. c) y d) Gráficos esquemáticos del cráter de las fechas del 11 de julio y 04 de agosto respectivamente.....	28
<b>Figura 19.</b> Poblados afectados por caída de ceniza del 04 de julio al 10 de agosto.....	29
<b>Figura 20.</b> Afectación por caída de ceniza por la explosión del 4 de julio. <b>Fuente:</b> Defensa Civil de Matalaque.....	29
<b>Figura 20.</b> Afectación por caída de ceniza en Chojata por la explosión del 6 de agosto.....	
<b>Figura 21.</b> Sismicidad del volcán Ubinas, periodo enero – agosto del 2023.....	30
<b>Figura 22.</b> Señal de tremor volcánico registrado en el volcán Ubinas a las 05:11: 26 horas UTC (por sus siglas en inglés: Tiempo Universal Coordinado), dicha actividad se asoció a las emisiones registradas en horas de la noche.....	
<b>Figura 23.</b> Señales sísmicas de muy baja frecuencia (VLP) identificadas durante la actividad tremórica registrada el día 22 de junio a las 05:11: 26 horas UTC (por sus siglas en inglés: Tiempo Universal Coordinado).....	32
<b>Figura 24.</b> Evolución temporal de las explosiones, tanto en número como en energía sísmica liberada, registradas en el volcán Ubinas, periodo 2023.....	32
<b>Figura 25.</b> Señales sísmicas de largo periodo LP acompañada de tremor volcánico, asociada a explosión seguida de emisiones continuas de gases y ceniza respectivamente. Evento registrado el día 21 de julio a las 14:21:59 horas UTC (por sus siglas en inglés: Tiempo Universal Coordinado) .....	33



<b>Figura 26.</b> a) Mapa de localización y perfil O-E de sismos VT en el volcán Ubinas entre marzo y julio del 2023. b) Variación temporal de sismos VT en el volcán Ubinas entre marzo y julio del 2023.....	33
<b>Figura 27.</b> Modelo conceptual geológico basado en procesos de sismicidad pre eruptiva donde se muestran las cuatro etapas generales y tipo de sismicidad observados antes y durante las erupciones (Modificado de White & McCausland, 2019) y con detalles específicos para el volcán Ubinas tomados de Rivera et al. (2014) y Kono et al. (1989).....	35
<b>Figura 28.</b> Representación gráfica de las etapas de progresión sísmica identificadas en el volcán Ubinas (2023). La sismicidad asociada a la intrusión de magma (etapa 2) está representada por las barras azules. La sismicidad asociada a la apertura y/o limpieza del conducto (Etapa 3) está representada por las barras verdes. La sismicidad asociada al movimiento y/o ascenso de fluidos está representada por las barras rojas (Etapa 4) y finalmente la actividad magmática explosiva está representada por la barra amarillo - naranja.....	36
<b>Figura 29.</b> Flujo de SO <sub>2</sub> registrado en el volcán Ubinas.....	37
<b>Figura 30.</b> Relación de gases volcánicos CO <sub>2</sub> /SO <sub>2</sub> en el volcán Ubinas.....	37
<b>Figura 31.</b> Altura de columna eruptiva y dispersión de ceniza del volcán Ubinas.....	39
<b>Figura 32.</b> Proyectiles balísticos e incandescencias registradas en el volcán Ubinas.....	
<b>Figura 33.</b> Altura máxima de emisiones del volcán Ubinas.....	41
<b>Figura 34.</b> Rosa de vientos del 04 de julio al 10 de agosto. Los vientos en el volcán Ubinas tuvieron una dirección predominante hacia el noroeste alcanzando sus mayores velocidades hacia el oeste, con cifras entre 10.8 m/s y 13.4 m/s; estos valores son brindados por la plataforma internacional de NOAA.....	41
<b>Figura 35.</b> A)Serie temporal de línea base entre las estaciones GNSS UBPRD y UBGW, las líneas rojas muestran el periodo de alargamiento de la línea base. B) Serie temporal de línea base entre las estaciones GNSS y UBHU. C) Serie temporal de la componente vertical de la estación GNSS UBGW y d) UBPR.....	42
<b>Figura 36.</b> Mapa de velocidad horizontal de las estaciones GNSS del volcán Ubinas entre el 11 de mayo y 14 de junio.....	42
<b>Figura 37.</b> Resultados del modelamiento de los datos GNSS del volcán Ubinas entre el 11 de mayo y 14 de junio. A la derecha las velocidades horizontales y a la izquierda, las velocidades verticales. Los vectores rojos representan los datos obtenidos. Los vectores azules representan los datos resultantes tras aplicar el modelo esférico de Mc Tigue. El círculo rojo representa la ubicación del cráter y el cuadrado amarillo la ubicación del centro de la fuente de presión modelada. Las elipses representan el error.....	43
<b>Figura 38.</b> Evolución Multidisciplinaria de la actividad del volcán Ubinas.....	44
<b>Figura 39.</b> Modelo geológico del proceso eruptivo del volcán Ubinas.....	44

## Índice de tablas

<b>Tabla 1.</b> Cantidad de habitantes (INEI, 2018) de los principales poblados ubicados dentro del radio de influencia del volcán Ubinas.....	7
<b>Tabla 2.</b> Datos de espesor de cada isópaca, área, raíz del área y logaritmo natural.....	13
<b>Tabla 3.</b> Parámetros para el cálculo de volumen con el método de Adelgazamiento Exponencial.	15
<b>Tabla 4.</b> Parámetros para el cálculo de volumen con el método de la Ley de Potencial (2005).....	16
<b>Tabla 5.</b> Cálculo de volumen a través de TephraFits para los métodos empíricos Exponential fitting y Power Law.....	17
<b>Tabla 6.</b> Parámetros eruptivos para erupción del volcán Ubinas de junio a agosto.....	19
<b>Tabla 7.</b> Datos obtenidos de ensayos granulométricos de muestras de ceniza del 12 al 13 de julio	20
<b>Tabla 8.</b> Clasificación de la desviación estándar ( $\sigma$ ) para caracterizar el tipo de depósito.....	21
<b>Tabla 9.</b> Clasificación de la asimetría.....	21
<b>Tabla 10.</b> Resumen de los parámetros granulométricos de las muestras analizadas.....	22
<b>Tabla 11.</b> Porcentaje de componentes identificados en la muestra de ceniza 33U-UBI-R23-006	26
<b>Tabla 12.</b> Componentes identificados al binocular.....	25
<b>Tabla 13.</b> Porcentaje de componentes identificados en las cenizas del volcán Ubinas de la muestra 33U-UBI-R23-010.....	26
<b>Tabla 14.</b> Componentes identificados al binocular.....	27
<b>Tabla 15.</b> Asesoramiento técnico para toma de decisiones de las autoridades y reuniones de coordinación.....	45
<b>Tabla 16.</b> Charlas de sensibilización y difusión en el poblado de Ubinas.....	47

## I. INTRODUCCIÓN

El volcán Ubinas considerado uno de los volcanes más activos del Perú localizado en el distrito de Ubinas, departamento de Moquegua, ha tenido 28 eventos volcánicos registrados desde el siglo XVI hasta la actualidad, con Índice de Explosividad Volcánica (IEV) entre 1 a 3, y erupciones de tipo vulcaniana. La recurrente actividad ha generado considerables daños a los poblados localizados alrededor del volcán, por lo cual el Observatorio Vulcanológico del INGEMMET, realiza el monitoreo, estudio y evaluación de peligros volcánicos en los alrededores del volcán. El 27 de marzo del 2006, el volcán Ubinas comenzó a emitir cenizas de manera leve, afectando principalmente a la localidad de Querapi, que se encuentra a 4 km al sur del cráter y donde habitaban 42 familias. El 01 de abril del 2006 se produjo la primera explosión y durante los siguientes días la actividad volcánica incrementó de manera importante, las columnas eruptivas alcanzaron hasta 4000 m sobre el nivel del cráter, con emisión de balísticos que alcanzaron hasta 2 km desde el cráter, con un rango de afectación de caída de ceniza de 2 km y con un IEV de 1-2. A partir de septiembre del 2006, la actividad volcánica disminuyó y cesó en el 2009 ([Mariño et al., 2011](#); [Rivera et al., 2010](#)).

Entre el 2013 y el 2017, el volcán Ubinas presentó una actividad eruptiva considerada entre baja y moderada, que estuvo caracterizada por explosiones, emisiones continuas de ceniza, vapor de agua y gases. Esta erupción presentó columnas eruptivas que llegaron hasta los 5000 m sobre el cráter, y se dispersaron principalmente al noreste, este, sureste y suroeste, con un área de dispersión mayor a 30 km. Los mapas de isópacas estimaron volúmenes de caída de ceniza entre 800 000, 1 400 000 y 2 000 000 m<sup>3</sup> correspondientes a los meses de abril, junio y agosto del 2014. Se observaron proyectiles balísticos que cayeron en una distancia de hasta 2.5 km del cráter, afectando principalmente los flancos sureste, sur, suroeste, noroeste y oeste. Considerando las mediciones y observaciones se ha determinado que este proceso eruptivo tuvo un IEV de 2. A principios del 2016, se divisó la presencia de un pequeño lago cratérico, generado por las aguas acumuladas producto de las lluvias ([Anccasi et al., 2022](#)).

Uno de los últimos episodios eruptivos registrados en el Ubinas corresponde al 19 de julio del 2019, considerado como una de las actividades explosivas vulcanianas más energéticas que ha tenido el Ubinas ya que liberó una energía de hasta 284 MJ (Megajoule), y un volumen estimado de  $3.5 \times 10^6$  m<sup>3</sup> entre cenizas y productos volcánicos. La altura de la columna eruptiva alcanzó los 6 500 m sobre el cráter, los fragmentos balísticos de hasta 2.5 cm alcanzaron hasta una distancia de 3.5 km del cráter, el desplazamiento de la pluma volcánica (cenizas) según las imágenes de satélite viajaron por más de 180 km, atravesando las regiones de Moquegua, Puno, Oruro (Bolivia), incluido Salta (Argentina, reportó caída de ceniza), la magnitud de la erupción se ha clasificado con un IEV de 2 ([Ramos et al., 2019](#)).

Luego de la última erupción del volcán Ubinas, la actividad se ha mantenido baja, sin embargo, en febrero del 2023 se identificaron cambios en la actividad, con un ligero incremento en la sismicidad desde el 17 de mayo y emisiones de gases en el cráter el 17 de junio. El 22 de junio a las 00:21 horas se registraron emisiones de ceniza que alcanzaron una altura máxima de 2 500 m sobre el nivel del cráter marcando el inicio de un nuevo proceso eruptivo del volcán Ubinas; posterior a ello se han identificado nuevos cambios en los parámetros de monitoreo principalmente en la cantidad de gases volcánicos SO<sub>2</sub> (8100 ton/día) y anomalías térmicas (7MW).

Debido a la actividad reciente del volcán Ubinas el equipo de investigadores del Observatorio Vulcanológico del INGEMMET realizaron trabajos de campo del **24 al 25 de junio, 10 al 14 de julio y del 03 al 10 de agosto** con la finalidad de monitorear, tomar muestras de ceniza y medir espesores, para elaborar mapas de isópacas, calcular el volumen del material emitido y obtener los parámetros eruptivos de la erupción en curso.

### I.1. UBICACIÓN Y ACCESO

El volcán Ubinas (16° 20.681' S, 70° 53.865' O; 5762 m s. n. m.) está localizado en la región Moquegua, a 70 km al este de la ciudad de Arequipa. Políticamente, se encuentra en la jurisdicción de la región Moquegua, provincia General Sánchez Cerro, distrito de Ubinas (Figura 1). Se puede acceder a la zona del volcán Ubinas a través de una carretera afirmada que parte desde la ciudad de Arequipa y sigue la ruta Chiguata- Lagunas-Salinas-Moche-Ubinas (Figura 1).

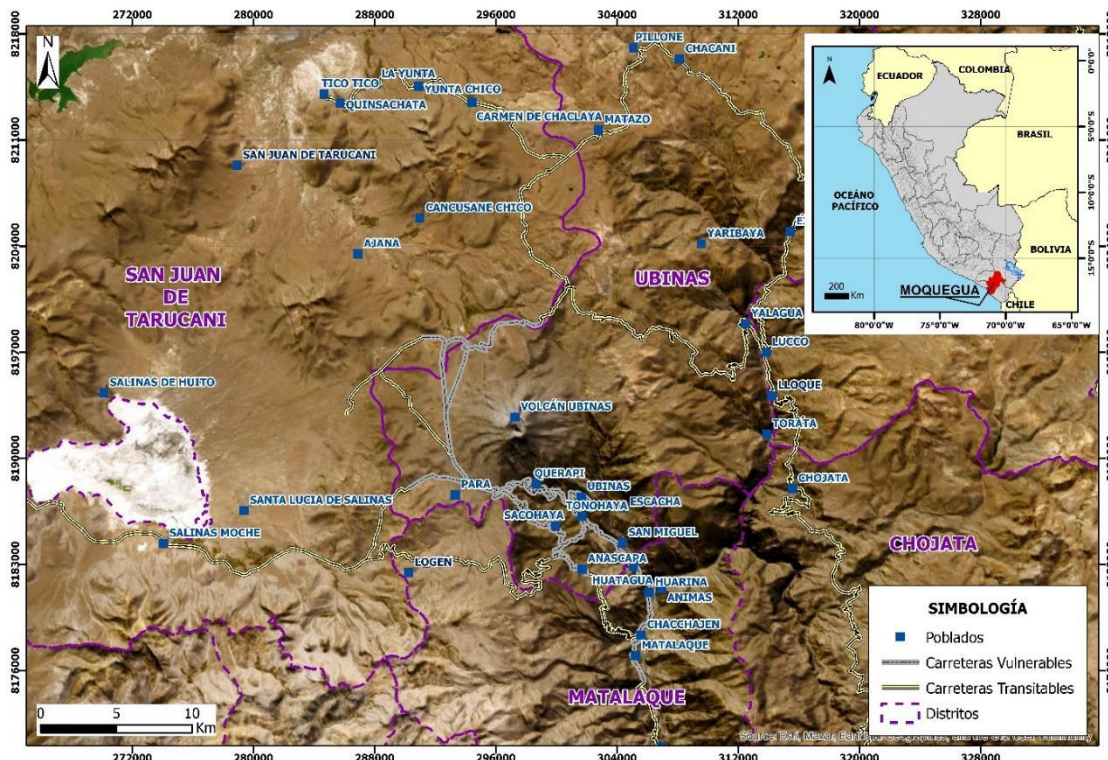


Figura 1. Mapa de ubicación del volcán Ubinas, donde se indican los principales pueblos y rutas de acceso.



## I.2. POBLACIÓN

Los principales poblados ubicados dentro del radio de influencia del volcán Ubinas se localizan al sur y sureste del cono volcánico, entre ellos Querapi, Ubinas, Tonohaya, Escacha, Sacohaya, San Miguel, Anascapa, Huatagua, Huarina, Animas, Chacchajen, Matalaque y Chojata de los distritos de Ubinas, Matalaque y Chojata de la provincia General Sánchez Cerro, departamento de Moquegua. Hacia el oeste y noroeste se encuentran los pueblos Ancasi, Santa Lucía de Salinas, Salinas Huito, Cieneguillas, Ajana, San Juan de Tarucani, Layunta y Chaclaya del distrito de San Juan de Tarucani de la provincia y departamento de Arequipa. De acuerdo a la información de XII Censo de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas o Censo Peruano 2017 (INEI, 2018), en los principales poblados habitan un total de 2109 personas (Tabla 1).

**Tabla 1.**

Cantidad de habitantes (INEI, 2018) de los principales poblados ubicados dentro del radio de influencia del volcán Ubinas.

Departamento	Provincia	Distrito	Pueblo	Cantidad de habitantes
Moquegua	General Sánchez Cerro	Ubinas	Querapi	10
Moquegua	General Sánchez Cerro	Ubinas	Ubinas	301
Moquegua	General Sánchez Cerro	Ubinas	Tonohaya	47
Moquegua	General Sánchez Cerro	Ubinas	Escacha	2
Moquegua	General Sánchez Cerro	Ubinas	Sacohaya	148
Moquegua	General Sánchez Cerro	Ubinas	San Miguel	-
Moquegua	General Sánchez Cerro	Matalaque	Anascapa	189
Moquegua	General Sánchez Cerro	Matalaque	Huatagua	47
Moquegua	General Sánchez Cerro	Matalaque	Huarina	19
Moquegua	General Sánchez Cerro	Matalaque	Animas	15
Moquegua	General Sánchez Cerro	Matalaque	Chacchajen	11
Moquegua	General Sánchez Cerro	Matalaque	Matalaque	186
Moquegua	General Sánchez Cerro	Chojata	Chojata	321
Arequipa	Arequipa	San Juan de Tarucani	Ancasi	7
Arequipa	Arequipa	San Juan de Tarucani	Santa Lucía de Salinas	28
Arequipa	Arequipa	San Juan de Tarucani	Salinas Huito	315
Arequipa	Arequipa	San Juan de Tarucani	Cieneguillas	1
Arequipa	Arequipa	San Juan de Tarucani	Ajana	3
Arequipa	Arequipa	San Juan de Tarucani	San Juan de Tarucani	268
Arequipa	Arequipa	San Juan de Tarucani	Layunta	19
Arequipa	Arequipa	San Juan de Tarucani	Chaclaya	172

## II. MONITOREO MULTIDISCIPLINARIO

Monitorear un volcán activo implica el empleo de una diversidad de equipos e instrumentos de alta precisión, ante ello y cuando un volcán se encuentra en un proceso pre eruptivo, existe un cuerpo de magma que se mueve en dirección hacia la superficie que interactúa con los sistemas hidrotermales, magmas antiguos, las rocas circundantes, a medida que avanza el

magma experimenta cambios debido a las condiciones de presión y temperatura en su camino hacia la superficie. Estos cambios generan una serie de señales, fenómenos geoquímicos, geofísicos y geológicos. El Observatorio Vulcanológico del INGEMMET monitorea el volcán Ubinas en tiempo real con la finalidad de detectar e interpretar adecuadamente las señales precursoras, ante una inminente erupción con base a diferentes disciplinas:

- **Monitoreo de productos volcánicos emitidos:** Técnica de monitoreo necesaria y valiosa para el seguimiento de la actividad volcánica, que permite realizar el seguimiento de las emisiones de manera directa. Puede identificar, detectar, clasificar y registrar los cambios superficiales y morfológicos apreciables en las emisiones como la altura.
- **Sismología volcánica:** Los diferentes procesos geológicos como el ascenso del magma, el movimiento de fluidos, en su paso hacia la superficie generan diversos tipos de señales precursoras que son identificadas en su etapa distal y proximal, generan señales sísmicas que permiten identificar y conocer el estado actual de un volcán.
- **Química de Gases volcánicos:** Permite cuantificar, determinar, fluctuaciones de la composición química de los gases volcánicos como el CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono), H<sub>2</sub>S (ácido sulfhídrico) y SO<sub>2</sub> (dióxido de azufre), asociados a movimientos de magma en profundidad.
- **Deformación volcánica:** Permite medir, cuantificar y determinar, los cambios morfológicos de la superficie de un volcán. La deformación del suelo es la consecuencia de la transferencia de esfuerzos a causa del incremento o pérdida de presión (inflación o deflación) que ejerce un fluido (magma, gas u otro fluido), las mismas que deben de ascender hacia la superficie generando una serie de señales y eventos precursores que advierten de un proceso eruptivo inminente.
- **Sensores remotos:** Técnica de monitoreo necesaria y valiosa para el seguimiento de la actividad volcánica, método que permite realizar el seguimiento de las emisiones de manera directa. Puede identificar, detectar, clasificar y registrar los cambios superficiales y morfológicos apreciables en las emisiones como la altura de la columna de gases, cenizas, color, olor, intensidad, dirección, incandescencia entre otros, que permiten identificar los cambios en las emisiones superficiales del comportamiento del volcán.

### III. MONITOREO DE PRODUCTOS VOLCÁNICOS EMITIDOS

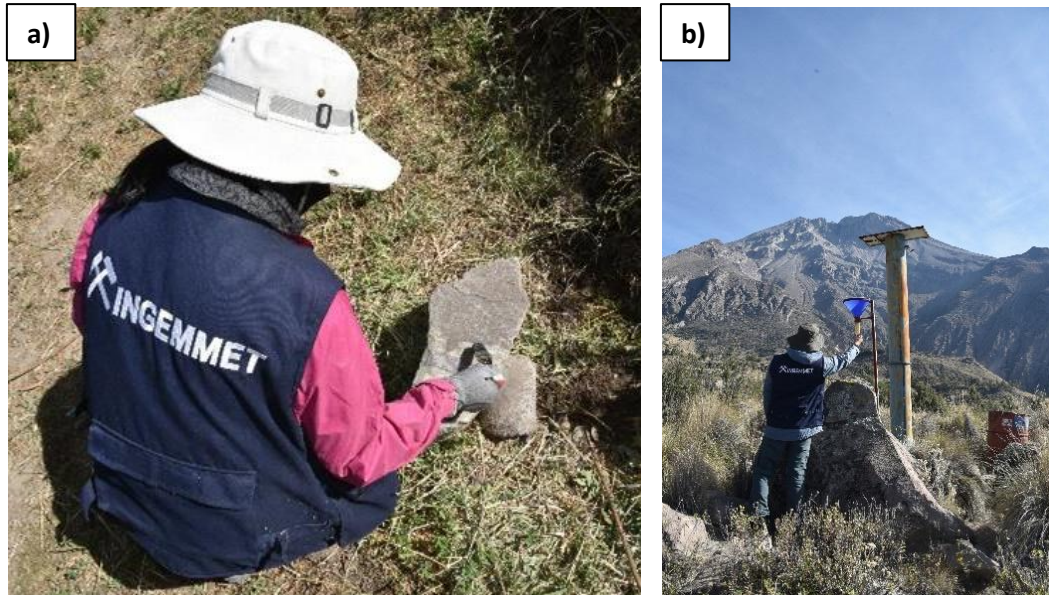
Los especialistas de INGEMMET han realizado la evaluación de peligros volcánicos, reconocimiento de la morfología del cráter con sobrevuelos de dron y muestreo de productos volcánicos (ceniza y balísticos). Dichos trabajos se han realizado en tres periodos, del 24 al 25 de junio, del 10 al 14 de julio y del 03 al 10 de agosto del presente año. Después de las salidas de campo los datos fueron procesados en gabinete con la finalidad de caracterizar el material volcánico emitido, calcular los parámetros eruptivos y analizar la morfología del cráter.

#### III.1. MUESTREO DE CENIZA

El primer muestreo se realizó posterior a la primera emisión y caída de cenizas ocurridas el 22 de junio, en esta primera etapa se tomaron 5 muestras de ceniza en los flancos oeste y noroeste del volcán.

El segundo muestreo se realizó después de la primera explosión del 04 de julio, recolectándose 44 muestras de cenizas, en el sector sureste principalmente, de las cuales cuatro corresponden a los cenizómetros (colectores de ceniza; [Figura 2b](#)) y las restantes se tomaron del suelo o superficies planas ([Figura 2a](#)). Así mismo, se midieron espesores en el suelo utilizando una regla protractor de escala 1: 100,000 y se tomaron medidas de áreas rectangulares en superficies planas.

El tercer muestreo corresponde al periodo del 03 al 10 de agosto, en la cual se tomaron 38 muestras de ceniza en el sector noreste, noroeste, sureste y suroeste, alcanzando un radio de más de 20 km de distancia desde el cráter del volcán Ubinas. Al igual que en la primera campaña, se tomaron muestras de los cenizómetros (Figura 3a), superficies planas, bandejas metálicas (Figura 3b) y tubos de PVC.



**Figura 2.** a) Muestra 33U-UBI-R23-042 tomada el 13 de julio, capa fina de ceniza de color gris cubriendo una superficie rocosa. b) Toma de muestra del Cenizómetro UC-12, realizada el 06 de julio en el pueblo de Querapi. La muestra tenía un espesor de 0.1 mm aproximadamente.



**Figura 3.** a) Muestreo de ceniza del cenizómetro UC-05, realizado el 05 de agosto en la estación de Anascapa alcanzó un espesor de 0.1 mm. b) La toma de muestra de ceniza de la bandeja UB-08 se realizó el 05 de agosto, se reportó un espesor de 1.3 mm de ceniza.



### III.2. MUESTREO DE BALÍSTICOS

Durante el actual proceso eruptivo, además de la emisión de ceniza, se generó expulsión de proyectiles balísticos (fragmentos de magma incandescente), debido a la súbita descompresión de los gases.

Los primeros proyectiles balísticos fueron emitidos durante las explosiones registradas el 23 de julio, el 01 y 06 de agosto. El muestreo de los balísticos fue realizado el 06 de agosto, en los flancos este y sureste a una distancia de 1.5 km aproximadamente (Figura 4).

Se han identificado dos tipos de bloques: 1) bloques de color negro, con vesículas irregulares (< 5 mm), miden alrededor de 30 cm de diámetro, no presentan alteración hidrotermal, tienen textura porfírica, con 20% de fenocristales, 75% de matriz y 5% de vesículas. Principalmente predominan fenocristales de plagioclasa (12%, < 4mm), con forma euhedral de hábito prismático, algunos presentan textura aglomerádica y piroxenos (3%, < 3mm), con forma subhedral y euhedral de hábito octogonal y prismático (Figura 5a). 2) bloques de color negro denso, porfíricos, con pequeñas vesículas (< 2 mm) engloban xenolitos blanquecinos subredondeados de 1.3 cm de diámetro. La muestra (Figura 5b) está constituida por 20% de fenocristales y 80% de matriz, donde predominan los fenocristales de plagioclasa (18%, <1mm) y en menor porcentaje los piroxenos (2%, <2mm).

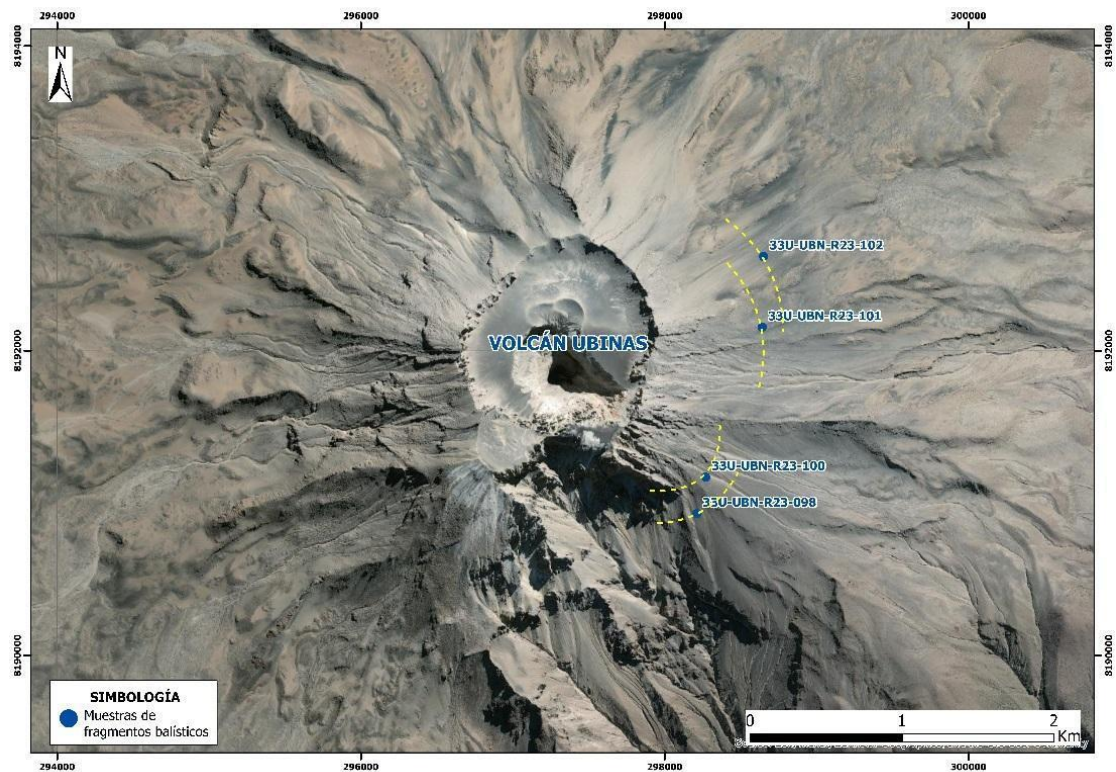
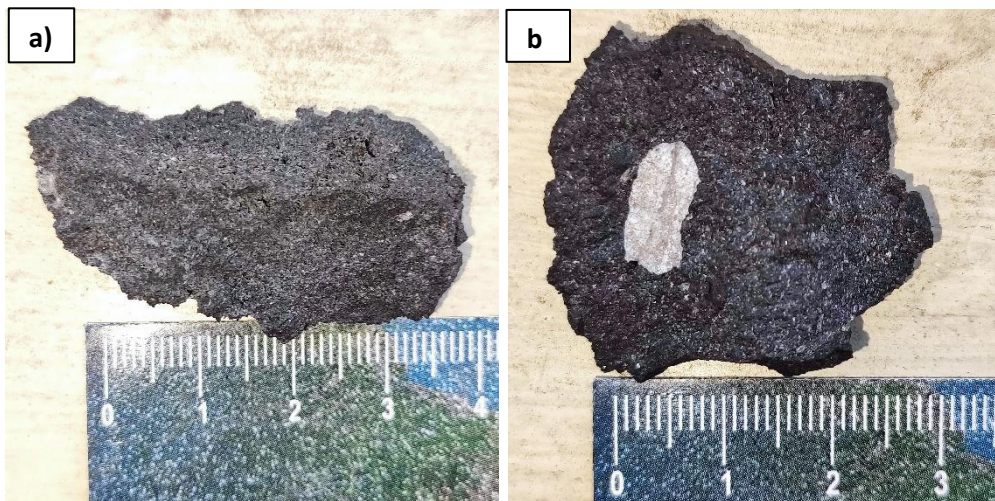


Figura 4. Mapa de ubicación de muestras de proyectiles balísticos en el sector este y sureste a 1.5 km aproximadamente desde el cráter del volcán.





**Figura 1.** a) Proyectoil balístico escoriáceo. b) Proyectoil balístico denso con xenolito.

### III.3. MAPAS DE CAÍDA DE CENIZA (MAPA DE ISÓPACAS)

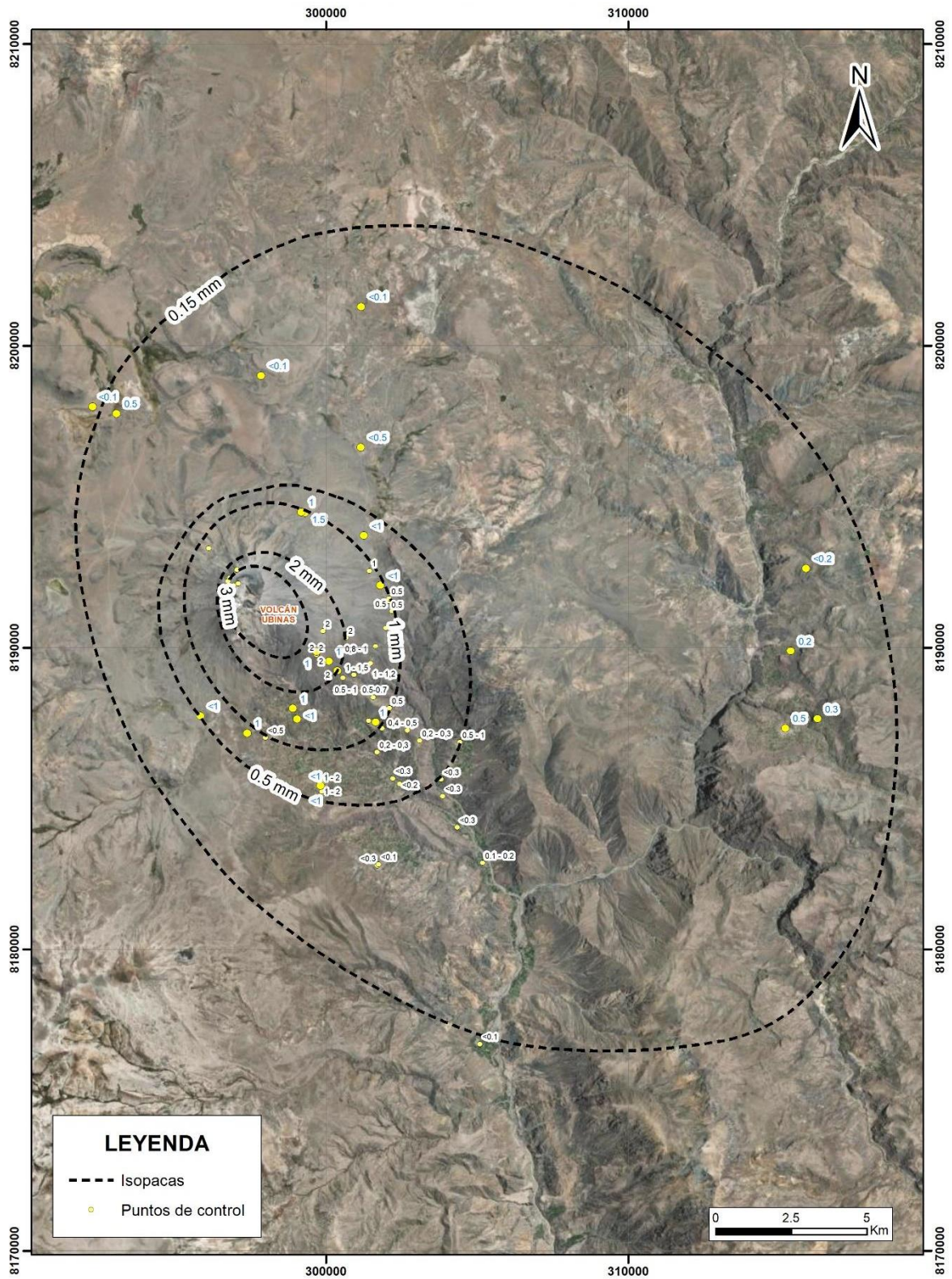
Durante el actual periodo eruptivo del volcán Ubinas, se ha evidenciado que, a partir del 22 de junio, la dirección de caída y dispersión de cenizas reportada por el OVI y observación de los pobladores locales, fueron predominantemente al sureste, este, suroeste y oeste del cráter del volcán, donde gran parte de los poblados ubicados alrededor del volcán fueron afectados por la caída de cenizas.

Tras una de las explosiones más energéticas ocurrida el 4 de julio, se revisaron imágenes satelitales GOES-16 para observar la dispersión de la ceniza, determinándose un alcance de más de 55 km.

Con las 3 campañas realizadas, se tienen 110 puntos de control de espesores, tomados en cenizómetros, medidas directas en el suelo y bandejas. Además, se recolectaron 87 muestras con datos de espesores, áreas y peso.

Como resultado se observó que en el pueblo de Querapi a 4 km del cráter se depositó alrededor de 1.5 mm de espesor de ceniza, en Ubinas a 6 km 1 mm de espesor, mientras que en los pueblos de Sacohaya Viejo, Tonohaya, Chaloge, Escacha, Escacha Bajo, Sacohaya, Sancaya, San Miguel Viejo, Anascapa, San Miguel Viejo, Chimpa, San Miguel, Tahuaca y Huatagua Y Matalaque se registraron caídas inferiores a 1 mm de espesor (Figura 6). Sin embargo, cabe mencionar que se reportó caída de ceniza en pueblos que se encuentran en un radio de más de 20 km durante este periodo.

Con estos datos se procedió a realizar el mapa de isópacas, el cual consiste en unir puntos con espesores similares, generando elipses y que posteriormente fueron digitalizadas en el software SIG ArcMap 10.4. Como primeros resultados se obtuvo el área de afectación para cada una de las isópacas, la raíz cuadrada del área y el logaritmo natural del espesor (Tabla 2).



**Figura 6.** Mapa de isópacas de la caída de cenizas durante el periodo eruptivo del volcán Ubinas del 22 de junio al 10 de agosto del año 2023.



**Tabla 2.**

Datos de espesor de cada isópaca, área, raíz del área y logaritmo natural.

Isópaca (mm)	Área (km <sup>2</sup> )	Raíz del área (km)	Ln (t) (m)
3	5.96	2.44	-5.80914299
2	14.67	3.83	-6.214608098
1	44.92	6.70	-6.907755279
0.5	83.29	9.13	-7.60090246
0.15	570.68	23.89	-8.804875264

### III.4. ESTIMACIÓN DE VOLUMEN DE CENIZA

Los depósitos de caída piroclástica preservan información valiosa relacionada a parámetros físicos como el volumen y la altura de la columna.

Uno de los parámetros más importantes que pueden ser derivados del análisis de los depósitos de caída piroclástica es el volumen emitido durante la erupción (volumen bulk), el cual es esencial para la evaluación de peligros y riesgos volcánicos (Bonadonna & Costa, 2012).

Sin embargo, el cálculo de volumen del depósito de caída es complicado debido a que:

- La relación de adelgazamiento del espesor del depósito con la distancia desde el ventó (cráter) no es universal.
- La pobre preservación y la falta de accesibilidad a zonas importantes del depósito (afloramientos limitados y/o tefras dispersos a menudo sobre cuerpos de agua).

Para el cálculo del volumen se han aplicado 2 métodos los cuales son:

El primer método de **“adelgazamiento exponencial”** (Rose et al., 1973; Pyle 1989; Fierstein & Nathenson 1992), consiste en la disminución exponencial del espesor con respecto a la distancia de la fuente, el cual toma en cuenta el logaritmo natural del espesor y la raíz cuadrada del área de isópaca representado en la siguiente ecuación:

$$T(x) = T_0 e^{-kA^{0.5}}$$

Dónde:

- **K:** Pendiente del segmento la gráfica la raíz cuadrada del área de la isópaca vs LnT
- **To:** es el espesor máximo extrapolado
- **A:** es el área del contorno de la isopaca de espesor.

La representación gráfica resultante es el logaritmo del espesor de una isópaca en función de la raíz cuadrada del área de la misma que se muestra mediante una o varios segmentos de línea recta.

Pyle (1989), propone que para isópacas de forma circular, se utilizó las siguientes fórmulas para el cálculo de volumen:

$$b_T = \frac{\ln(2)}{k\sqrt{\pi}} \quad V = 13.08T_o b_T^2$$

Además, Fierstein & Nathenson (1992), extendieron este enfoque integrando directamente la ecuación de Pyle, sin asumir una forma específica para las isópacas, hallando así el volumen del depósito por la siguiente ecuación:

$$Volumen = 2 * \frac{T_o}{k^2}$$

- $T_o$ : Máximo espesor extrapolado.
- $K$ : es la pendiente del segmento exponencial mejor trazado en la gráfica la raíz cuadrada del área de la isópaca vs  $\ln T$

Se obtiene la Figura 8 formando un solo segmento, con puntos que se representan en la ecuación de la recta.

$$y=kx+T_0$$

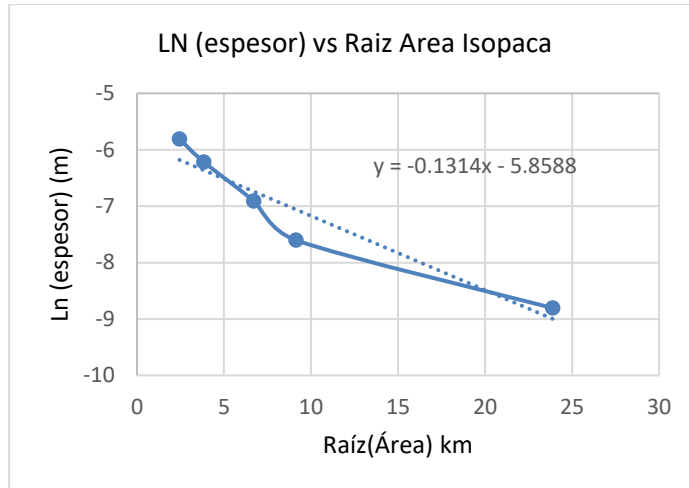
$$y= -0.1314x-5.8588$$

**Tabla 3.**

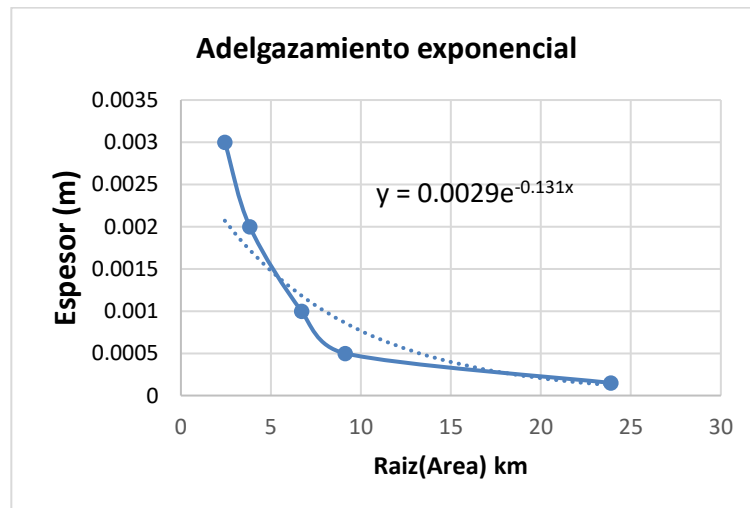
Parámetros para el cálculo de volumen con el método de Adelgazamiento Exponencial.

DATOS	VALORES
K	0.131
Ln (To)	-5.843
To	0.0029
Ln2	0.69
Pi <sup>1/2</sup>	1.77245
Bt	2.99
Bt <sup>2</sup>	8.91
c.f	13.08
<b>VOLUMEN</b>	<b>338036.96 m<sup>3</sup></b>





**Figura 7.** Gráfica de adelgazamiento exponencial, para el cálculo de volumen de la ceniza emitida durante desde el 22 de junio al 10 de agosto, donde se observa disminución exponencial del espesor respecto a la distancia de la fuente.



**Figura 8.** Gráfica de adelgazamiento exponencial, para el cálculo de volumen, donde se observa la disminución exponencial del espesor respecto a la distancia de la fuente.

Con los datos obtenidos y reemplazados en la ecuación obtenemos un volumen mínimo de **338037 m<sup>3</sup>**.

El segundo método es la **“Ley Potencial”** (Bonadonna and Houghton 2005; Bonadonna and Costa 2012; Bonadonna et al., 1998) que considera depósitos pobremente expuestos y que decrecen en espesor con respecto a la distancia al viento. En este método se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$T(x) = Tpl\sqrt{A}^{(-m)} \quad (3)$$

Donde  $Tpl$  es el coeficiente de la Ley de Potencial y  $m$  es el exponente de la Ley de Potencial:

$$V = \int_0^{\infty} T dA V = \left[ 2T_{pl} \frac{\sqrt{A}^{(2-m)}}{2-m} \right]_0^{\infty}$$

Esta ecuación no puede ser integrada entre 0 y el infinito, los límites de integración proximal (*B*) y distal (*C*) han sido definidos con propósito de estimar el volumen.

$$V = \frac{2T_{pl}}{2-m} \left( C^{(2-m)} - B^{(2-m)} \right)$$

*B* es el límite proximal que representa la máxima distancia desde el viento hasta donde el espesor alcanza su máximo valor, el cual puede ser determinado en base a la extrapolación del primer segmento exponencial (Bonadonna and Houghton 2005). La determinación de *C* es de acuerdo al límite distal, la máxima distancia del sotavento durante la dispersión de la nube eruptiva en la atmósfera. Esta distancia puede ser determinada a través de imágenes satelitales durante una erupción, en caso sea un depósito antiguo quedará a criterio del investigador. El espesor máximo (*T*) igual a *T<sub>0</sub>*, *B* es designada como la distancia del espesor máximo dada por la siguiente fórmula:

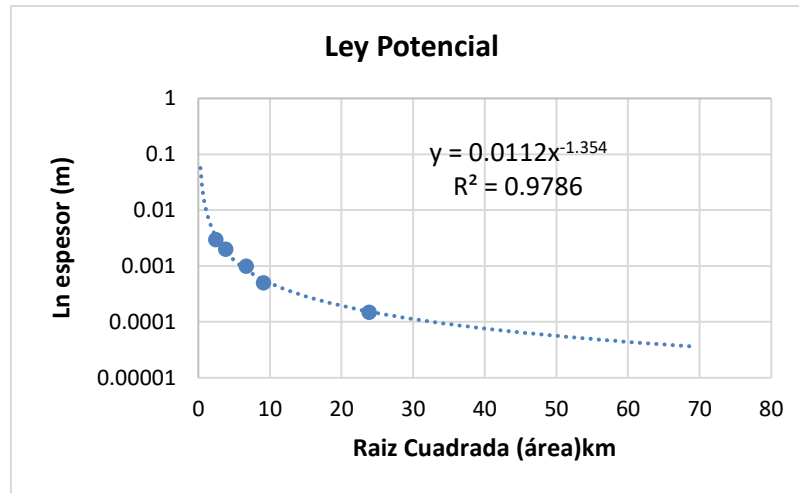
$$B = \left( \frac{T_0}{T_{pl}} \right)^{\left( -\frac{1}{m} \right)}$$

**Tabla 4.**

Parámetros para el cálculo de volumen con el método de la Ley de Potencial (2005).

DATOS	VALORES
<b>T<sub>max</sub></b>	0.0029
<b>T<sub>pl</sub></b>	0.0112
<b>m</b>	1.354
<b>B(km)</b>	2.71
<b>C(km)</b>	45
<b>VOLUMEN</b>	339432.078 m <sup>3</sup>

Para introducir los datos en el diagrama de Ley de Potencial utilizamos el valor de *T<sub>0</sub>* de la [Tabla 3](#), donde el eje X corresponde a la raíz cuadrada del área que cubre las isópacas y el eje Y se ubica el logaritmo natural del espesor de las isópacas ([Figura 6](#)). Luego hallamos la ecuación de la curva de la ley de Potencial, seguidamente reemplazamos los parámetros en la fórmula anteriormente mencionada.



**Figura 9.** El diagrama de Ley Potencial (Bonadonna and Houghton 2005) realiza el ajuste de la curva Ley de Potencial que se adapta mejor que los segmentos en base a la ley del potencial.

Con los datos obtenidos y reemplazados en la ecuación obtenemos un volumen mínimo de **339432 m<sup>3</sup>**.

Finalmente, [Biaass et al. \(2019\)](#), escribió en Matlab el código **TephraFits** que caracteriza los depósitos de caídas de tefras basados en isópacas, isomasas e isopletas, así como transectos de espesores en diferentes distancias desde la fuente. Toma los métodos empíricos de integración más frecuentes (Adelgazamiento exponencial, Ley de Potencial y Weibull; [Tabla 5](#)). El TephraFits proporciona una descripción de los parámetros clave que se pueden recuperar de los depósitos de caídas. Parámetros como volumen del depósito, la masa, índice de explosividad volcánica y magnitud.

Se ha utilizado el siguiente script con la finalidad de corroborar los resultados obtenidos por los modelos de adelgazamiento exponencial y Ley Potencial (Power Law).

```
clear;
thickness = [0.3, 0.2, 0.1, 0.05, 0.015]; % Isopach thickness (cm)
areaT = [2.44, 3.83, 6.70, 9.13, 23.89]; % Square-root of area (km)
isopach = tephraFits(areaT, thickness, {'exponential', 'powerlaw', 'weibull'}, 'BIS', 2, 'C', 45); % Poor weibull fit
isopach = tephraFits(areaT, thickness, {'exponential', 'powerlaw', 'weibull'}, 'BIS', 2, 'C', 45, 'lambdaRange', [.01 100], 'nRange', [.01 100]); % Refined
```

**Tabla 5.**

Cálculo de volumen a través de TephraFits para los métodos empíricos Exponential fitting y Power Law.

	<b>ADELGAZAMIENTO EXPONENCIAL</b>	<b>LEY POTENCIAL</b>
<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>	346120	360330

En base a estos 2 métodos se calculó un volumen mínimo de ceniza entre **346120 a 360330 m<sup>3</sup>**.

### III.5. PARÁMETROS ERUPTIVOS

En función a los datos de campo volumen, espesor y área se procedió a calcular otros parámetros eruptivos como: densidad de la muestra de ceniza, masa del depósito, volumen equivalente de roca densa (DRE), tasa de descarga de masa (MER) e índice de explosividad volcánica (IEV).

La masa del depósito se obtuvo convirtiendo el volumen en masa eyectada en función a la densidad promedio del depósito, para este cálculo se utilizó un rango de volumen 346120 a 360330 m<sup>3</sup>. De esta manera se calculó una masa que va de 2.25 x10<sup>8</sup>kg a 2.34 x10<sup>8</sup>kg. La masa calculada incluye la masa del material juvenil, líticos no juveniles co-genéticos y cristales.

**Masa = (Densidad x Volumen)**

$$\text{Volumen del depósito} = 346120 - 360330 \text{ m}^3$$

$$\text{Densidad del depósito} = 0.65 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Masa del depósito con } 346120 \text{ m}^3 = 346120 \text{ m}^3 \times 650 \text{ kg/m}^3 = \mathbf{2.25 \times 10^8 \text{ kg}}$$

$$\text{Masa del depósito con } 360330 \text{ m}^3 = 360330 \text{ m}^3 \times 650 \text{ kg/m}^3 = \mathbf{2.34 \times 10^8 \text{ kg}}$$

El volumen equivalente de roca densa - DRE es el volumen calculado del material emitido por una erupción, corregido a una densidad asumida, equivalente a la densidad del magma sin burbujas (Sidgursion et al. 2015).

De acuerdo a Tepley et al., 2008, un magma andesítico sin vesículas tiene una densidad aproximadamente de 2.4 g/cm<sup>3</sup>, equivalente a 2400 kg/m<sup>3</sup>; este volumen DRE del magma es útil ya que es la densidad del magma sin vesículas (o densidad antes de la expansión del magma, ya que las burbujas de gas producen que el magma se expanda).

El volumen DRE del magma se obtiene mediante la división de la masa del magma emitido (masa densa equivalente del material juvenil) entre la densidad del magma sin vesículas.

**Volumen DRE = (Masa del depósito/Densidad del magma)**

$$\text{Masa del depósito} = 2.25 \times 10^8 \text{ kg a } 2.34 \times 10^8 \text{ kg}$$

$$\text{Densidad del magma} = 2.4 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{V(DRE) del magma para } 346120 \text{ m}^3 = \mathbf{93750 \text{ m}^3}$$

$$\text{V(DRE) del magma para } 360330 \text{ m}^3 = \mathbf{97500 \text{ m}^3}$$

La tasa de descarga de masa (MER-Mass Eruption Rate), se define como la masa (kg) arrojada a través del cráter durante una unidad de tiempo (s). Es difícil de ser medido directamente y es comúnmente relacionado con la altura de la columna eruptiva utilizando relaciones semi-empíricas basados en la teoría de una pluma flotante (Sigurdsson et al., 2015; Mastin et al., 2009; Sparks et al., 1997).

La duración de una erupción es el parámetro que define el tiempo de emisión de los productos de caída. Por lo tanto, el volumen de magma producido por una erupción es directamente proporcional al tiempo e inversamente proporcional a la tasa de emisión del magma, según la ecuación de Walker (1980).

$$Ed = \frac{Mt}{MER}$$

Donde Ed= tiempo de emisión o duración de la erupción (s), Mt= masa total de productos de caída emitidos, MER= Tasa de descarga de masa (kg/s).

Para el caso de la duración de la erupción del volcán Ubinas, se consideró 14 horas de emisión de ceniza constante durante los meses de junio a agosto. Este dato de tiempo se considera en



base a las señales sismo volcánicas de tipo tremor, que se relacionan directamente con la emisión de cenizas. Tomando en cuenta la masa del depósito de  $2.34 \times 10^8$  kg y el tiempo de 14 horas = 50400 s, la tasa de descarga de masa (**MER**) es de  $4.6 \times 10^3$  kg/s.

Finalmente se estimó el Índice de Explosividad Volcánica (IEV), el cual es una escala logarítmica que va de 0 a 8 y es proporcional al incremento de explosividad (Newhall & Self 1982). Para la estimación del IEV de la erupción del Ubinas entre junio a agosto, se consideró un volumen entre 346120 a 360330 m<sup>3</sup>, con una columna eruptiva de 5.5 km, según estos datos el Índice de Explosividad Volcánica está iniciando el 2; es importante mencionar que el proceso continúa.

**Tabla 6.**

Parámetros eruptivos para erupción del volcán Ubinas de junio a agosto.

PARÁMETROS	VALORES
Altura de columna máxima	5.5 km
Volumen emitido	346120 a 360330 m <sup>3</sup>
Densidad promedio del depósito	0.65 g/cm <sup>3</sup>
Masa del depósito	$2.25 \times 10^8$ a $2.34 \times 10^8$ kg
Volumen de roca densa equivalente DRE	93750 a 97500 m <sup>3</sup>
Duración máxima de las emisiones	14 horas
Tasa de descarga de masa	$4.6 \times 10^3$ kg/s
IEV	2

### III.6. DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA Y ANÁLISIS DE PARÁMETROS ESTADÍSTICOS

El objetivo del análisis granulométrico es conocer sus condiciones de sedimentación mediante la cuantificación de los parámetros granulométricos, que nos permiten establecer su grado de selección, distancia recorrida, niveles de energía, etc. (Spallett, 1980).

Se tomaron 4 muestras de caídas de ceniza (33U-UBN-R23-028, 33U-UBN-R23-030, 33U-UBN-R23-026, 33UBN-R23-048) correspondientes a los días 12 y 13 de julio a una distancia de 4 km (proximal) y 16 km (distal) del cráter del volcán Ubinas (Figura 10). El primer paso fue realizar el tamizado utilizando tamices de 1 mm hasta < 63 μm en el tamizador vibratorio FORNEY. Una vez separada la muestra de cada tamiz se procedió a pesar en una balanza de precisión (0.01 g) AND GX-1000.

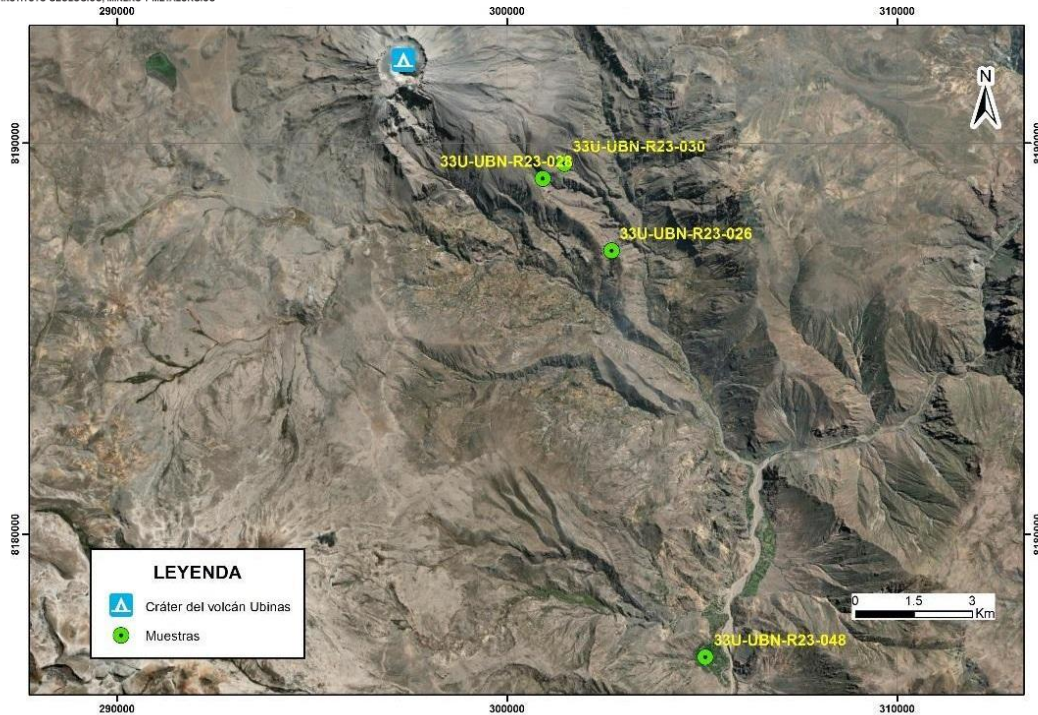


Figura 10. Mapa de ubicación de muestras para realizar el análisis granulométrico.

Luego, se procedió a realizar el análisis estadístico tomando los parámetros granulométricos (Folk y Ward, 1957), con la finalidad de estudiar el modo de emplazamiento y sus relaciones con el dinamismo eruptivo pliniano a partir de las características sedimentológicas del depósito de caída. Los datos obtenidos son representados gráficamente en histogramas, donde el eje X van los diámetros de las partículas que están expresadas en unidades ( $\Phi$ ), mientras en que el eje Y van los pesos en cada fracción retenida expresadas en porcentaje (%). Las partículas más grandes corresponden a valores negativos de  $\Phi$  y estas se representan a la izquierda del diagrama. Para graficar los histogramas se utilizó el software Microsoft Excel (Tabla 7).

Tabla 7. Datos obtenidos de los ensayos granulométricos de muestras de ceniza del 12 al 13 de julio.

Tamiz		33U-UBN-R23-028			33U-UBN-R23-030			33U-UBN-R23-026			33U-UBN-R23-048		
		Peso	Peso	Peso Acum.	Peso	Peso	Peso Acum.	Peso	Peso	Peso Acum.	Peso	Peso	Peso Acum.
( $\mu$ m)	Phi	(gr)	(%)	(%)	(gr)	(%)	(%)	(gr)	(%)	(%)	(gr)	(%)	(%)
1000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
500	1	0.595	0.5	0.5	0.016	0.1	0.1	0.038	0.3	0.3	0.002	0.1	0.1
250	2	25.835	23.7	24.2	4.667	16.0	16.1	0.701	5.3	5.6	0.105	5.8	5.9

125	3	51.183	47.0	71.2	13.025	44.6	60.7	6.161	46.6	52.2	0.47 3	26.3	32.2
63	4	11.804	10.8	82.0	5.302	18.2	78.9	4.092	31.0	83.2	0.78 0	43.4	75.6
<63	5	19.589	18.0	100	6.165	21.1	100	2.218	16.8	100	0.43 9	24.4	100
Tota l		109.006			29.175			13.210			1.79 9		

Los parámetros estadísticos según Folk (1965) e Imman (1952), incluyen la mediana (Md), media (Mz), desviación estándar ( $\sigma$ ), asimetría (SkI) y curtosis (KG).

**Mediana (Md).** Según Folk (1965), es el punto medio de la distribución o el tamaño de grano para el que el 50% de la muestra es más fina y el 50 % más gruesa.

$$Md \phi = \phi 50.$$

**Media (Mz).** Según Folk (1965), es el tamaño promedio-aritmético, de la distribución de granos. Para el cálculo de la media (de manera gráfica) se utiliza la siguiente fórmula:

$$Mz = (\phi 16 + \phi 50 + \phi 84) / 3$$

**Desviación estándar gráfica ( $\sigma\phi$ ).** Según Folk (1965) Corresponde al coeficiente de la dispersión o sorteo, refleja la variación del tamaño de grano adentro de la población. El índice de sorteo se define mediante la siguiente escala:

$$\sigma\phi = (\phi 84 - \phi 16) / 4 + (\phi 95 - \phi 5.5) / 6.6 \text{ (Folk, 1965; Índice de sorteo, según Imman, 1952)}$$

**Tabla 8.**

Clasificación de la desviación estándar ( $\sigma\phi$ ) para caracterizar el tipo de depósito.

CLASIFICACIÓN ( $\sigma\phi$ )	DEPÓSITO PIROCLÁSTICO
<0.35	Muy bien sorteado
0.35 - 0.50	Bien sorteado
0.50 - 0.71	Moderadamente bien sorteado
0.71 - 1	Moderadamente sorteado
1.0 - 2.0	Mal sorteada
2.0 - 4.0	Muy mal sorteado
>4	Extremadamente mal sorteado

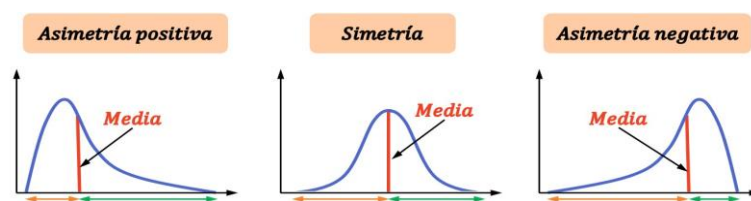
**Asimetría o skewness (SkI).** Mide la desigualdad de la curva de frecuencia, la cual se establece graficando tamaño de grano y frecuencia de ocurrencia en la muestra. Según Folk (1965) Un valor positivo indica el desvanecimiento de la curva a la derecha de la media, con un exceso de partículas finas. Un valor negativo indica un desvanecimiento de la curva a la izquierda de la media, con un exceso de gruesos. Los resultados se interpretan en base a los siguientes intervalos. Para el cálculo de la desviación estándar se usa la siguiente fórmula:

$$(Sk_l) \phi = (\phi_{84} + \phi_{16} - 2\phi_{50} / 2(\phi_{84} - \phi_{16})) + (\phi_5 - \phi_{95} - 2\phi_{50} / 2(\phi_{95} - \phi_5))$$

(Folk, 1965)

**Tabla 9.**  
 Clasificación de la asimetría.

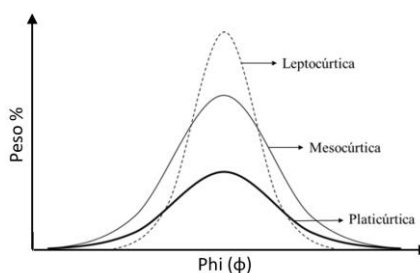
CLASIFICACIÓN	ASIMETRÍA
-1.00 a -0.30	Asimetría muy negativa
-0.30 a -0.10	Asimetría negativa
-0.10 a 0.10	Cercanamente simetría
0.10 a 0.30	Asimetrías positivas
0.30 a 1.00	Asimetrías muy positivas



**Figura 11.** Curva de frecuencia en base a la asimetría.

**Curtosis (KG).** Mide la forma de la parte central de una curva Gaussiana, es decir, peakedness agudeza o la forma del pico central de la curva estadística. Se establece haciendo una comparación entre el calibrado en las colas de la distribución y el calibrado en la porción central de la misma. Las curvas se denominan Leptocúrticas o puntiaguda si la porción central de la curva es mejor seleccionada. Si ocurre lo contrario la curva es platicúrtica o achatada. Una curtosis con valor de 1 indica que la curva tiene distribución log normal; una aproximación a esta distribución da como resultado una curva mesocúrtica.

$$kG = (\phi_5 - \phi_{95}) / 2.44 (\phi_{75} - \phi_{25})$$



**Figura 12.** Curva de frecuencia en base a la Curtosis (Folk & Ward, 1957).

**Tabla 10.**  
 Resumen de los parámetros granulométricos de las muestras analizadas.

CÓDIGO	Mediana (Md) Inman	Media (Mz) Folk	Desviación Estándar (σ) folk	Descripción n	Asimetría (Sk <sub>l</sub> ) Folk	Descripción n	Curtosis (KG) Folk	Descripción n
--------	--------------------	-----------------	------------------------------	---------------	-----------------------------------	---------------	--------------------	---------------



33U-UBN-R23-028	2.549	2.767	1.142	Pobrement e sorteado	0.246	Asimetría negativa	1.079	Mesocúrtica
33U-UBN-R23-030	2.760	2.993	1.077	Pobrement e sorteado	0.232	Asimetría negativa	0.891	Platicúrtica
33U-UBN-R23-026	2.953	3.070	0.875	Moderada mente sorteado	0.215	Asimetría negativa	0.872	Platicúrtica
33U-UBN-R23-048	3.405	3.371	0.928	Moderada mente sorteado	-0.61	Cercanamente simétrico	0.959	Mesocúrtica

De los resultados obtenidos se observa que en la zona proximal (Figura 13 y 14) las muestras tienen una distribución bimodal y los valores de la mediana ( $M_d$ ) se muestran entre 2.549 a 2.760  $\phi$ , con un tamaño promedio de grano ( $M_z$ ) de 2.767 a 2.993  $\phi$ , los depósitos están pobrementemente sorteados ( $\sigma$ ), con curvas con asimetría negativa ( $Sk_l$ ), que indica predominancia a partículas finas. La angulosidad gráfica presenta una curva mesocúrtica y una curva platicúrtica.

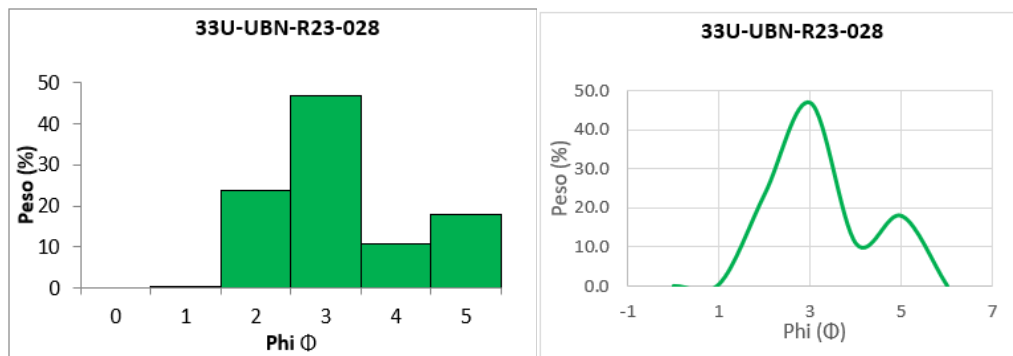


Figura 13. a) Histograma de la muestra 33U-UBN-R23-028 b) Curva granulométrica.

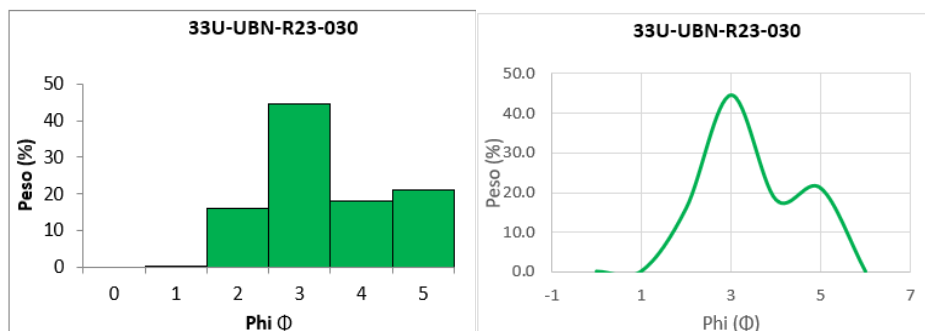


Figura 14. a) Histograma de la muestra 33U-UBN-R23-030 b) Curva granulométrica.

En las zonas medial y distal (Figura 15 y 16) las muestras tienen una distribución unimodal y los valores de la mediana ( $M_d$ ) se muestran entre 2.953 a 3.405  $\phi$ , con un tamaño promedio de grano ( $M_z$ ) de 3.070 a 3.371  $\phi$ , los depósitos están pobrementemente sorteados ( $\sigma$ ), con curvas con asimetría negativa ( $Sk_l$ ), que indica predominancia a partículas finas. La angulosidad gráfica presenta una curva platicúrtica para la muestra 33U-UBN-R23-026 y una curva mesocúrtica para la muestra 33U-UBN-R23-048.

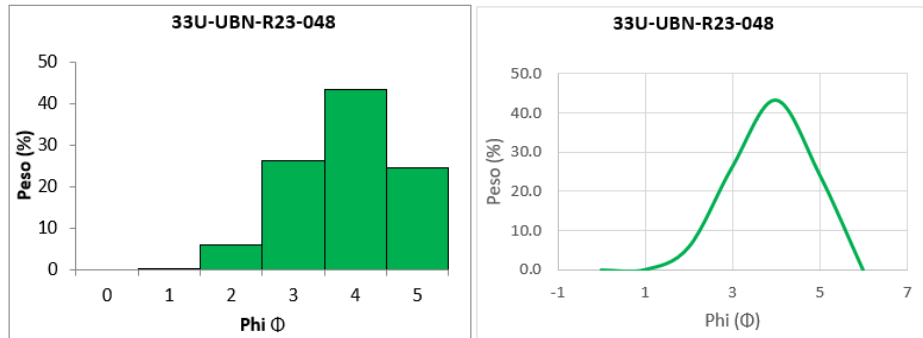


Figura 15. a) Histograma de la muestra 33U-UBN-R23-048 b) Curva granulométrica.

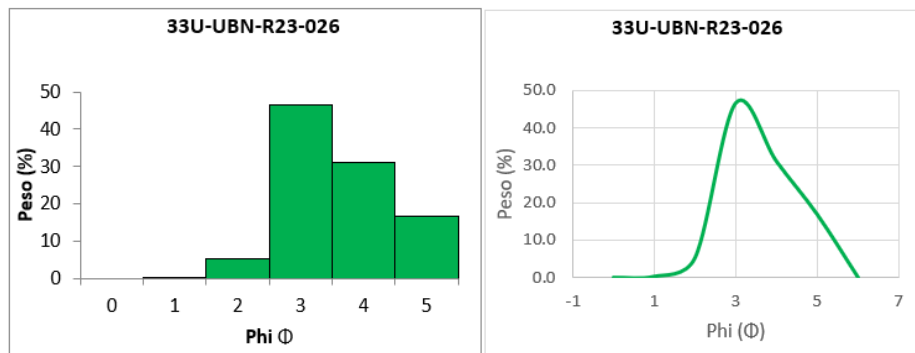


Figura 16. a) Histograma de la muestra 33U-UBN-R23-026 b) Curva granulométrica.

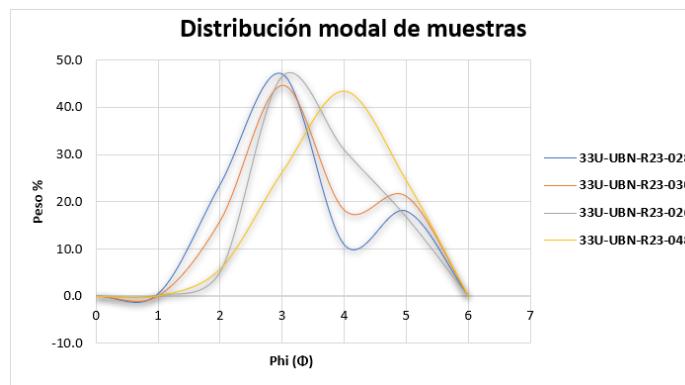


Figura 17. Distribución granulométrica, según el diagrama los granos finos tienden a concentrarse en mayor cantidad en las zonas medial – distal.

Los depósitos presentan curvas con tendencia bimodal en la zona proximal y unimodal en la zona medial - distal. Esto indica que la sedimentación del tamaño de partículas es variable según la distancia al cráter, puede ser influenciada por la dirección del viento (sotavento), combinación de dos o más eventos seguidos de caída de ceniza. Debido a que las 2 muestras proximales fueron extraídas de superficies rocosas también se puede inferir que hubo intervención de procesos post – depositacionales como transporte o re – deposición y así mezclas de dos tamaños de grano de ceniza. La agregación de partículas en el momento de la sedimentación da origen a distribuciones bimodales (Biaass and Bonadonna, 2011).

La mediana ( $Md$ ) presenta valores entre en 2.549 a 3.405  $\Phi$  y la media 2.767 a 3.371  $\Phi$ . Esto indica que mientras más alejado del cráter la mediana y media se acerca a los valores positivos

(partículas finas), esto se debe a la dispersión de las partículas a causa de la dirección del viento (sotavento).

Las muestras en la zona proximal están pobremente sorteadas y moderadamente sorteado en la zona medial - distal, lo que indica una variación de ordenamiento de las partículas por acción del viento (sotavento) u otros factores generando una sedimentación de partículas de forma heterogénea.

La asimetría (*SkI*) en las muestras presentan tendencia hacia los finos, estos debido a la densidad de las partículas, fuerza e influencia seleccionadora del viento paralela al eje de dispersión.

Las curvas presentan una variación entre platicúrtica a mesocúrtica, que indica una moderada selección del depósito.

### III.7. ANÁLISIS DE COMPONENTES DE LA CENIZA

Las muestras de ceniza estudiadas corresponden a los días 25 de junio y 04 de julio. De las muestras tamizadas, se eligió la muestra retenida en el tamiz 0.125 mm y se realizó el cuarteo hasta obtener una cantidad óptima de partículas para facilitar el conteo de componentes y su identificación. Para realizar este trabajo se utilizaron los microscopios binoculares LEICA EZ4W y MICROSCOPEWORLD.

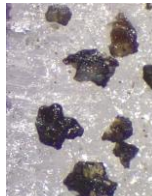
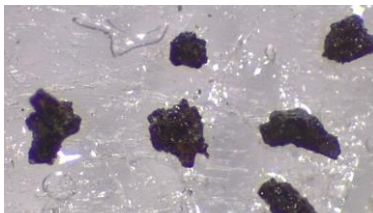
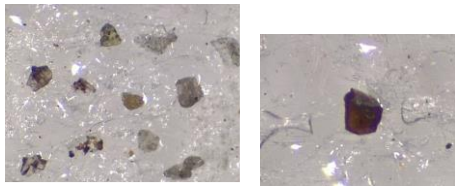
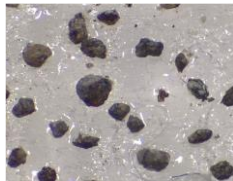
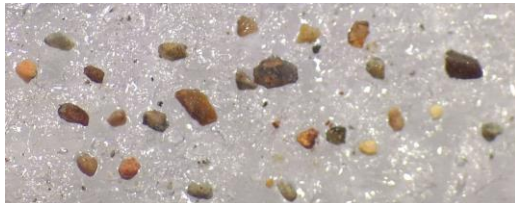
Para las muestras del 25 de junio, tomadas en el borde noreste del cráter del volcán Ubina, se han identificado los siguientes componentes (Tabla 11 y 12): material juvenil (47%) representado por vidrio volcánico (39%) y escorias (8%), cristales libres representado por plagioclasas (17%) y piroxenos (0.2%), fragmentos accesorios (27%) representado por escorias con patina blanquecina de arcilla (27%), yeso, fragmentos accidentales hidrotermalizados y oxidados (10%). Los componentes tienen tamaños entre 0.125-0.250 mm.

**Tabla 11.**

Porcentaje de componentes identificados en la muestra de ceniza 33U-UBI-R23-006.

33U-UBI-R23-006			
Componentes		Cantidad de Componentes	% Componentes
Material Juvenil	Vidrio/Plagioclasa	164	47
	Escorias	32	
Fragmentos accesorios	Escorias con patinas blanquecinas	113	27
Fragmentos Hidrotermalizados/Oxidados	Líticos hidrotermalizados	41	10
Cristales libres	Plagioclasa	70	17
	Piroxeno	1	

**Tabla 12.**  
 Componentes identificados al binocular.

TIPO DE COMPONENTE	CARACTERÍSTICAS	FOTOGRAFÍA
<b>FRAGMENTOS JUVENILES (47%)</b>	<b>Vidrio volcánico</b> De color negro con aspecto brillante, englobando cristales de plagioclasa.	
	<b>Escoria</b> De color negro con brillo lustroso y bordes angulosos.	
<b>CRISTALES LIBRES (17%)</b>	<b>Cristales de plagioclasa</b> son translucidos y opacos.  <b>Piroxeno</b> De color negro rojizo.	
<b>FRAGMENTOS ACCESORIOS (31%)</b>	<b>Escoria</b> Con una pátina de arcilla, presentan bordes subredondeados.	
<b>FRAGMENTOS OXIDADOS/ HIDROTHERMALIZADOS (10%)</b>	De coloración rojiza a amarillenta, con bordes subangulosos.	

Las muestras recolectadas el 04 de julio corresponden a la explosión ocurrida a las 03:16 am, éstas fueron tomadas en el borde noreste del cráter del volcán Ubinas De acuerdo al análisis de componentes se han identificado fragmentos juveniles (48%) representado por vidrio volcánico (31 %) y escorias (17%), con bordes angulosos con brillo lustroso. Además, se presentan cristales libres de plagioclasas (27%), fragmentos accesorios (25%) como escorias y líticos con bordes redondeados a subredondeados, no se han encontrado fragmentos hidrotermalizados (Tabla 13 y 14). Los componentes tienen tamaños entre 0.125-0.250 mm.

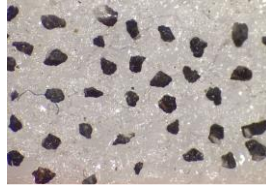
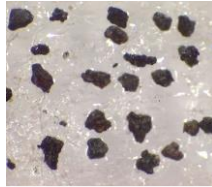
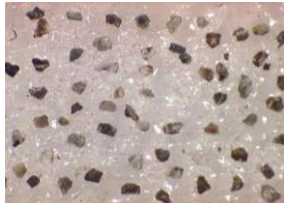
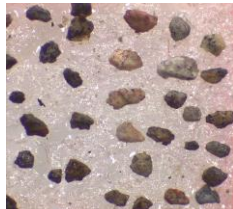
**Tabla 13.**

Porcentaje de componentes identificados en las cenizas de la muestra 33U-UBI-R23-010.

33U-UBI-R23-010				
Componentes		Cantidad de Componentes	% Componentes	% Componentes
Material Juvenil	Vidrio/Plagioclasa	180	31	48
	Escorias	98	17	
Fragmentos accesorios	Escorias con patinas blanquecinas	146	25	25
Cristales libres	Plagioclasa	156	27	27
		580	100	

**Tabla 14.**

Componentes identificados al binocular.

TIPO DE COMPONENTE	CARACTERÍSTICAS	FOTOGRAFÍA
FRAGMENTOS JUVENILES (48%)	<b>Vidrio volcánico</b> De color negro con aspecto brillante, englobando cristales de plagioclasa.	
	<b>Escoria</b> De color negro con brillo lustroso y bordes angulosos	
CRISTALES LIBRES (27%)	<b>Cristales de plagioclasa</b> Son translúcidos y opacos.	
FRAGMENTOS ACCESORIOS (25%)	<b>Escorias y líticos oxidados</b> Presentan pátinas de arcilla, con bordes subredondeados a subredondeados	

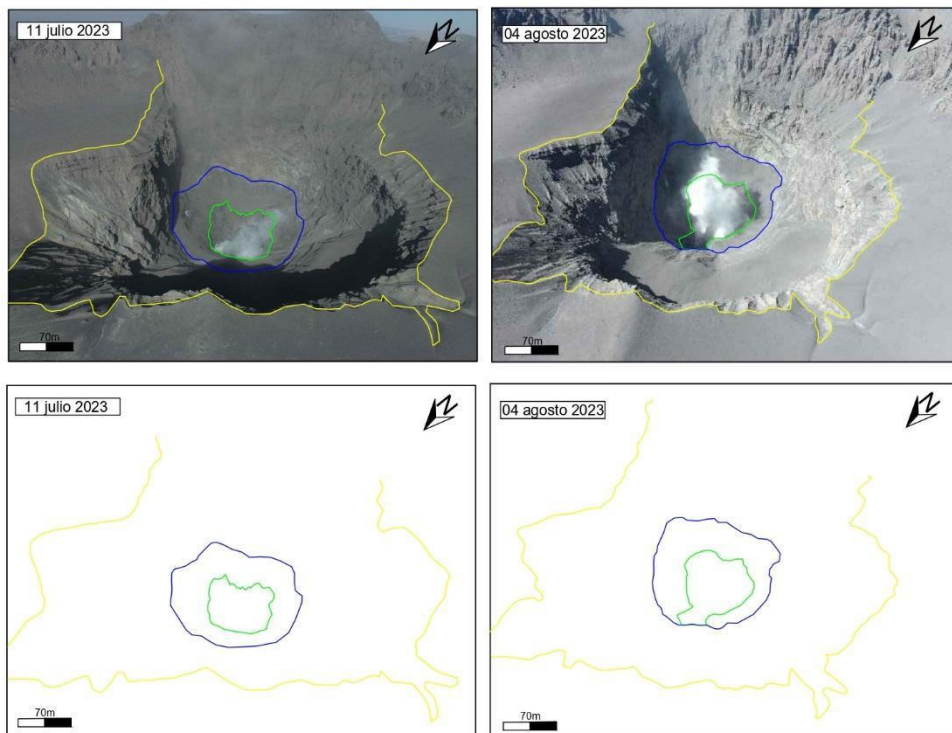


### III.8. RECONOCIMIENTO GEOLÓGICO DEL CRÁTER DEL VOLCÁN UBINAS

El reconocimiento geológico se realizó mediante dos sobrevuelos en la zona del cráter y caldera, utilizando un dron Phantom 4, el 11 de julio desde el 12:30 a 13:30 horas y el 04 de agosto del 2023 desde las 09:00 a 10:30 horas. Este trabajo se efectuó en cooperación con la Dirección de Preparación del Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI), quienes proporcionaron y operaron el dron. El sobrevuelo del 11 de julio se inició desde el flanco noroeste del volcán, a una altitud de 5170 msnm. El sobrevuelo del 04 de agosto se realizó desde el flanco noroeste del cráter, a una altitud de 5145 msnm.

Realizando la comparación de imágenes de los vuelos realizados el 11 de julio y el 04 de agosto se tiene las siguientes conclusiones:

- No se observan cambios morfológicos importantes en la zona del cráter. Sin embargo, hacia el norte en el borde interno del cráter se evidencia un pequeño derrumbe (Figura 18).
- Continúan las constantes emisiones de ceniza, gases y vapor de agua en el volcán Ubinas.
- En los alrededores del cráter no se observan proyectiles balísticos recientes.
- Con los dos vuelos de dron realizados hasta el momento, no se observa un cuerpo de lava en la base del cráter.
- Continúa la removilización de ceniza en los flancos, principalmente hacia el noroeste, sureste y cumbre del volcán.



**Figura 18.** a) Fotografía del cráter del volcán Ubinas tomada el 11 de julio. b) Fotografía del cráter del volcán Ubinas, tomada el 04 de agosto. c) y d) Gráficos esquemáticos del cráter de las fechas del 11 de julio y 04 de agosto respectivamente.

### III.9. AFECTACIÓN A LOS POBLADOS

Las explosiones entre el 4 al 6 de julio, generaron caída de ceniza alcanzando un radio de 20 km del volcán, con dirección predominante sur y sureste, afectando a los poblados de Ubinas, Anascapa, San Miguel, Tonohaya, Huarina, Escacha, Matalaque, anexos de Santa Rosa de Phara

y Logén. Asimismo, del 16 de julio al 10 de agosto, la caída de ceniza afectó poblados en un radio de 30 km con dirección al sureste, suroeste, noreste y este del volcán. Afectando los poblados de Ubinas, San Miguel, Tonohaya, Escacha, Sacohaya, Anascapa, Huarina, Huatagua, Matalaque, Salinas Moche, Santa Lucía de Salinas, Yalagua, Lloque, Lucco, Curo, Umalso, Chojata, Torata, La Pampilla, Exchaje, Yunga, San Juan de Tarucani y anexos de Santa Rosa de Phara, Logén y San Carlos de Tite (Figura 19).

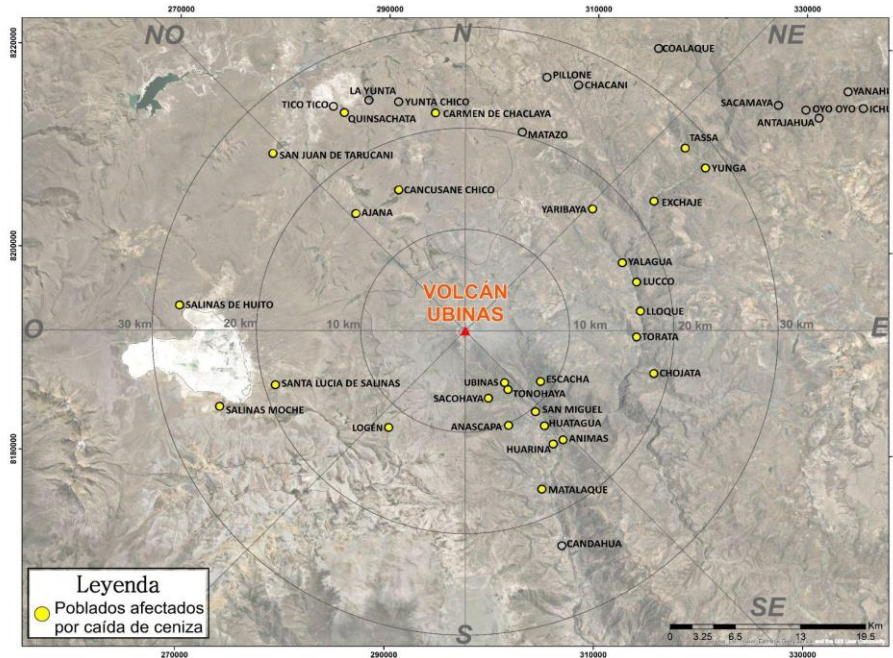


Figura 19. Poblados afectados por caída de ceniza del 04 de julio al 10 de agosto.



Figura 20. Afectación por caída de ceniza en Chojata por la explosión del 6 de agosto.

#### IV. SISMOLOGÍA VOLCÁNICA

La sismicidad del volcán Ubinas durante este año (Figura 21), se ha caracterizado principalmente por sismicidad asociada a procesos de fracturamiento interno y a movimiento de fluidos por los conductos del volcán. En lo que va del año se registraron cambios importantes en la actividad sismo – volcánica del Ubinas.

En principio, entre el 13 de febrero y 18 de marzo, se observó un primer incremento, con la ocurrencia de sismos por fracturamiento energéticos (amplitudes mayores a los 20  $\mu\text{m/s}$ ), posteriormente, a partir del 27 de marzo se comienza a registrar un ligero incremento en la sismicidad por fluidos en un promedio de 5 sismos LP por día y mayormente poco energéticos (amplitudes menores a los 2  $\mu\text{m/s}$ ). Por su parte los sismos Tornillo, se comenzaron a registrar con mayor frecuencia a partir del 12 de marzo hasta el 05 de abril, a razón 01 sismo por día, dichos eventos fueron poco energéticos (amplitudes menores a 1.5  $\mu\text{m/s}$ ) y frecuencias dominantes altas alrededor de los 5 y 8 Hz. Un segundo incremento se registró entre el 17 y 31 de mayo, inicialmente con un aumento en el número de sismos por fracturamiento, contabilizándose en promedio 15 sismos VT, sin embargo, estos en su mayoría fueron poco energéticos (amplitudes menores a los 5  $\mu\text{m/s}$ ), de igual manera, posterior a este incremento se observó un aumento en la sismicidad por movimiento de fluidos tanto en número (de 5 a 20 LP/día) como en energía (de hasta 0.1 MJ), además de predominar las bajas (1.2 Hz.), también, se pudo registrar cambios en la forma de onda, los cuales, comenzaron a presentar un comportamiento armónico con algunos sobretonos (frecuencias subdominantes).

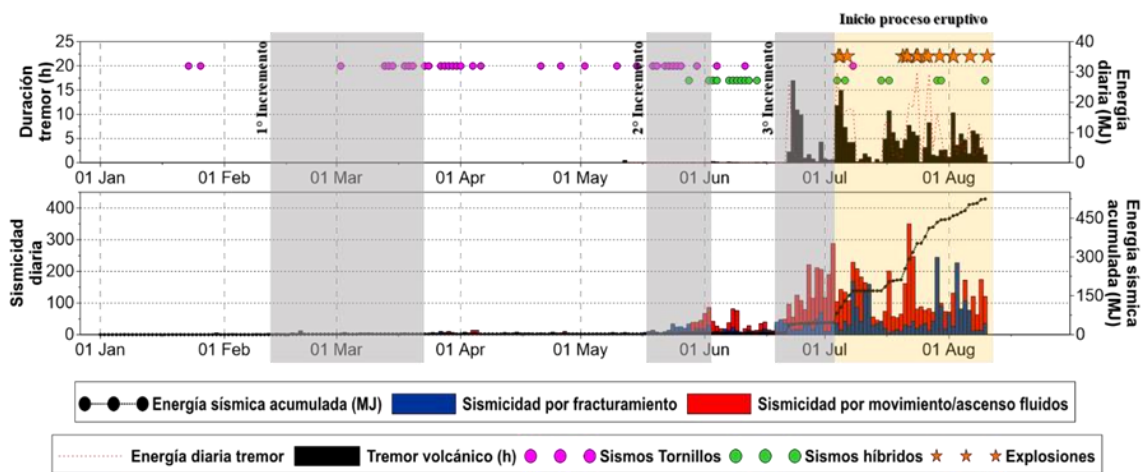
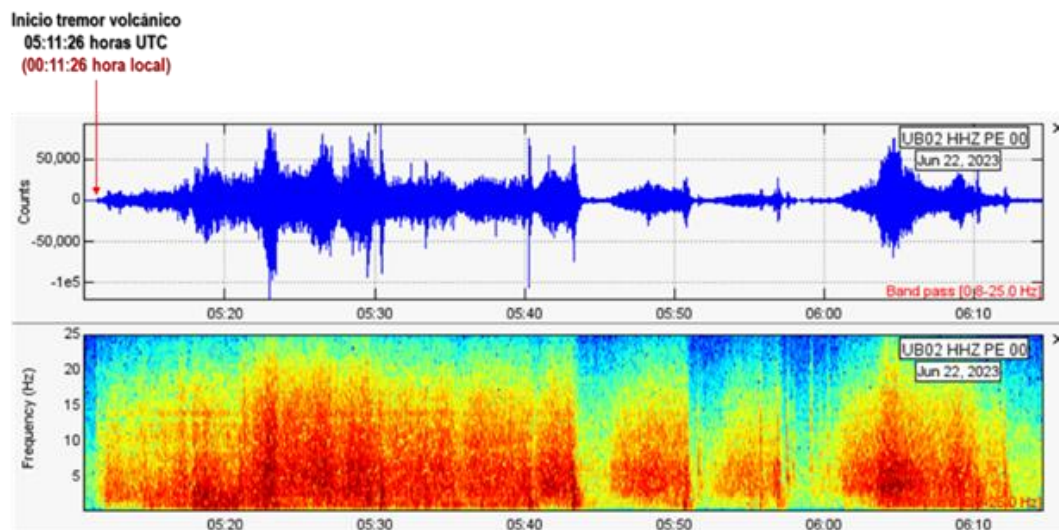


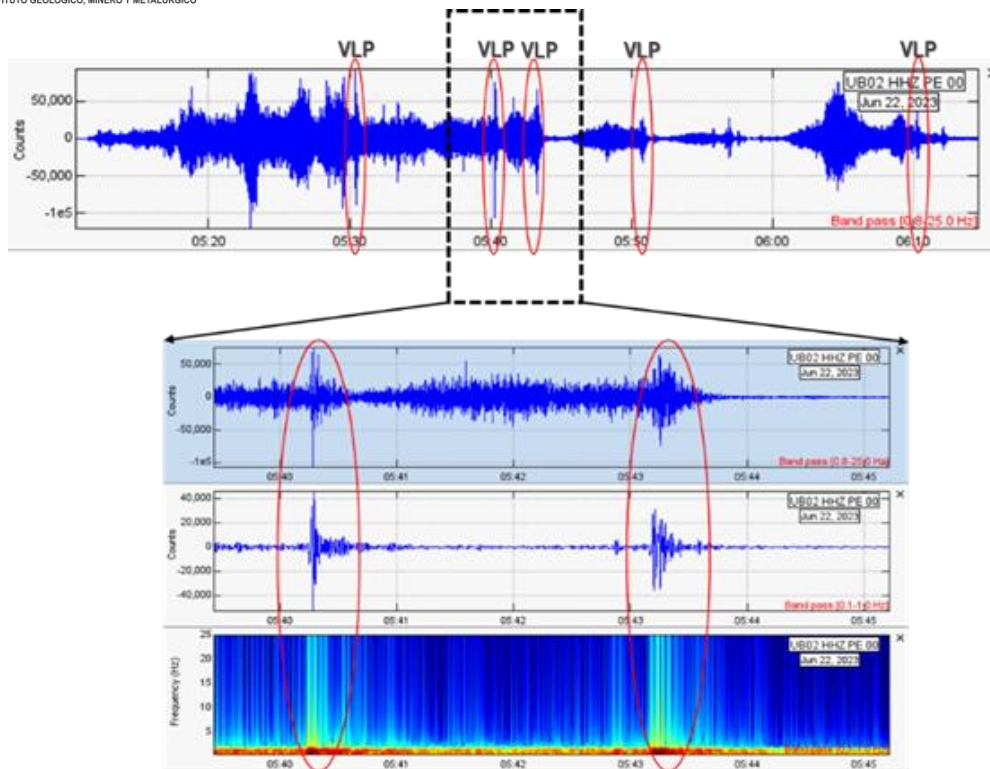
Figura 21. Sismicidad del volcán Ubinas, periodo enero – agosto del 2023.

El tercer incremento se registró entre el 22 de junio y el 3 de julio, donde la actividad sísmo – volcánica mostró un cambio importante en su comportamiento principalmente reflejado en la energía sísmica liberada, la cual, alcanzó un valor máximo de 30 MJ (Megajoules), este aumento se generó a raíz de la ocurrencia de una señal sísmica denominada “tremor volcánico”, la misma que comenzó aproximadamente a las 05:11 horas UTC (00:11 hora local), tuvo una duración de 60 minutos (Figura 22). Es importante mencionar que, acompañando a esta actividad tremórica, ha sido posible identificar la ocurrencia de sismos de muy baja frecuencia – VLP (frecuencias entre 0.3 y 0.7 Hz), dichas señales (Figura 23) pueden considerarse como el resultado de fuerzas de inercia asociadas con perturbaciones en el flujo de magma y gases a través de conductos (Chouet & Matoza, 2013).



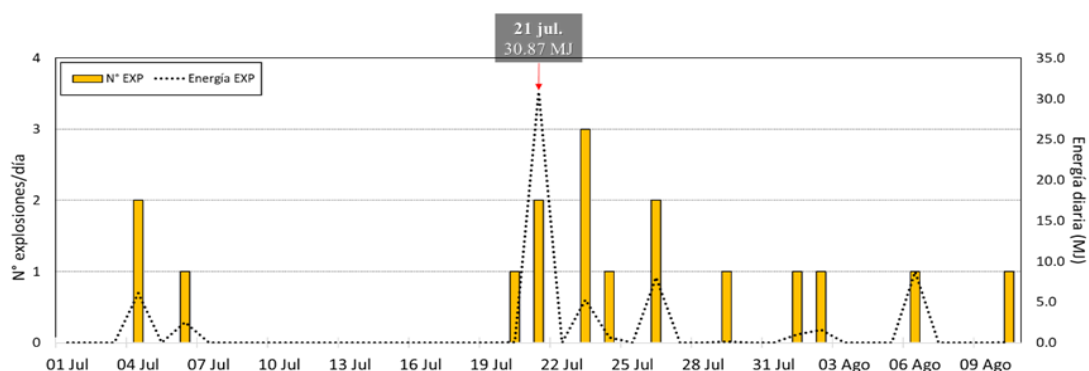
**Figura 32.** Señal de tremor volcánico registrado en el volcán Ubinas a las 05:11: 26 horas UTC (por sus siglas en inglés: Tiempo Universal Coordinado), dicha actividad se asoció a las emisiones registradas en horas de la noche.



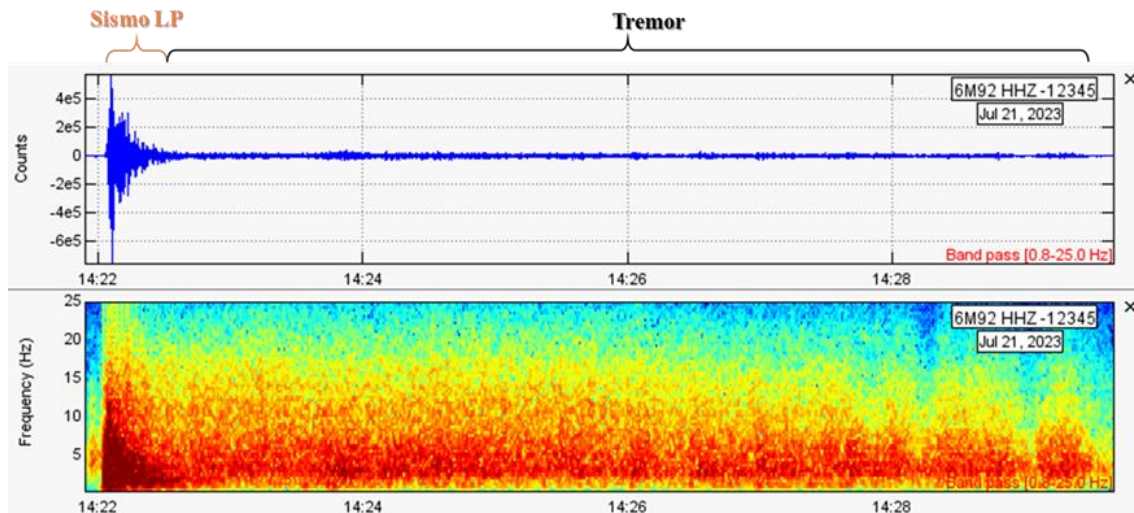


**Figura 23.** Señales sísmicas de muy baja frecuencia (VLP) identificadas durante la actividad tremórica registrada el día 22 de junio a las 05:11: 26 horas UTC (por sus siglas en inglés: Tiempo Universal Coordinado).

El 04 de julio, inició el nuevo proceso eruptivo del volcán Ubinas con la ocurrencia de dos explosiones acompañadas de tremor (09:56 y 19:01 UTC), desde entonces se han venido generando una serie de explosiones con energías de leves a altas (entre 0.03 y 30.00 MJ) y que de igual forma han sido acompañadas de importante actividad tremórica. Hasta la fecha, se han identificado un total de 17 explosiones (Figura 24), siendo la más energética la ocurrida el día 21 de julio a las 14:21 UTC (09:21 hora local), la misma que liberó una energía de 27.01 MJ (Figura 24 y 25), marcando así, el inicio de un periodo de mayor actividad explosiva que hasta la fecha continua (Figura 25).

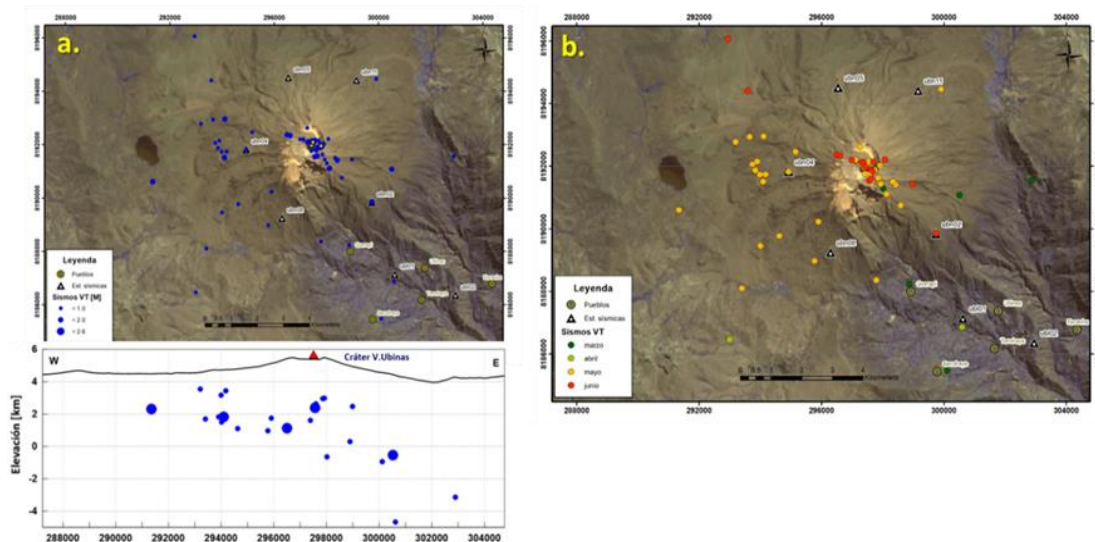


**Figura 24.** Evolución temporal de las explosiones, tanto en número como en energía sísmica liberada, registradas en el volcán Ubinas, periodo 2023.



**Figura 25.** Señales sísmicas de largo periodo LP acompañada de tremor volcánico, asociada a explosión seguida de emisiones continuas de gases y ceniza respectivamente. Evento registrado el día 21 de julio a las 14:21:59 horas UTC (por sus siglas en inglés: Tiempo Universal Coordinado).

En la [Figura 26a](#), se muestra la ubicación de los sismos volcano-tectónicos (VT), los cuales fueron localizados principalmente en el flanco oeste y cráter del volcán, así mismo, se observa una sismicidad más dispersa en los flancos suroeste y sureste. La profundidad máxima de los sismos fue de 4.4 km por debajo del nivel del mar y se calculó una magnitud máxima de 2.6 ML (25 de mayo). La [Figura 26b](#) indica la variación en el tiempo de los sismos VT registrados entre marzo y julio del 2023, los cuales durante los primeros meses (marzo-abril) fueron localizados en el flanco sureste y este del volcán, sin embargo, en mayo y julio se nota un incremento y predominancia de la sismicidad VT en el flanco oeste y cráter del volcán, este comportamiento se observó en anteriores procesos eruptivos (2013-2017 y 2019).

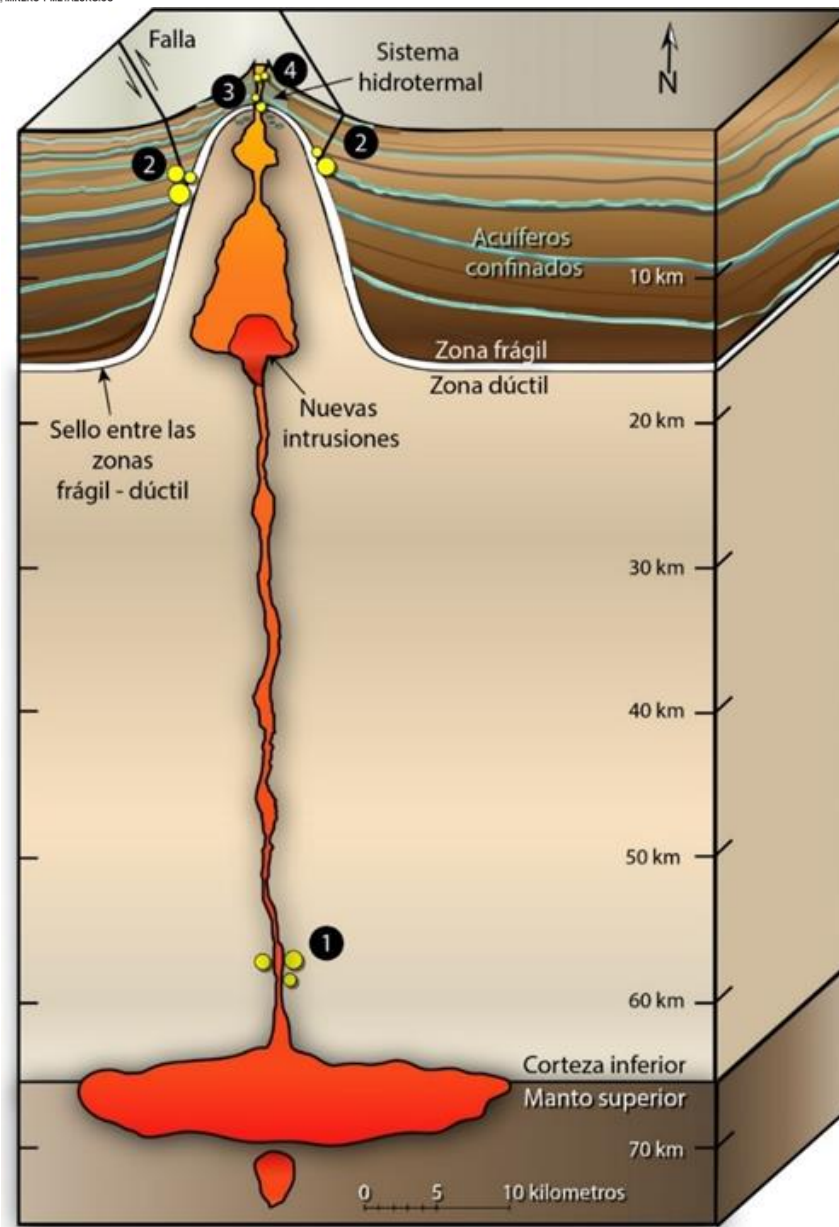


**Figura 26.** a) Mapa de localización y perfil O-E de sismos VT en el volcán Ubina entre marzo y julio del 2023. b) Variación temporal de sismos VT en el volcán Ubina entre marzo y julio del 2023.

#### IV.1.1. APLICACIÓN DEL MODELO BASADO EN PROCESOS DE PATRONES DE SISMICIDAD PRE – ERUPTIVA PARA EL PROCESO DEL VOLCÁN UBINAS 2023

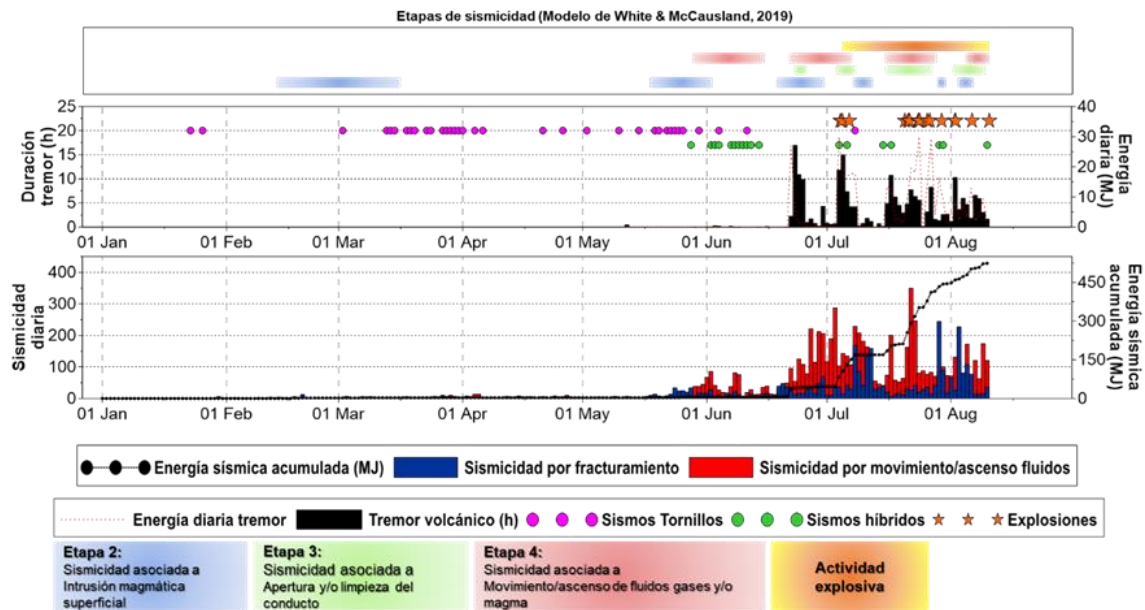
De acuerdo con el análisis de la sismicidad del volcán Ubinas durante el presente año, se hace uso del modelo basado en procesos de patrones de sismicidad pre – eruptiva propuesto por [White & McCausland \(2019\)](#), asimismo, empleando dicho modelo para el proceso eruptivo del año 2019 ([Figura 27](#)), se demostró que, aplica bastante bien para sismicidad cercana a la superficie ([Ortega et al, 2021; 2022](#)). A continuación, se detalla la progresión sísmica y las respectivas etapas identificadas asociadas a procesos geológicos para la actual erupción del volcán Ubinas ([Figura 28](#)).

- El primer signo de intrusión de magma se produjo con la sismicidad por fracturamiento registrada entre febrero y marzo y posteriormente en mayo del presente año (Etapas 2) localizada en el flanco oeste y cráter del volcán, sugiriendo posiblemente la intrusión de un nuevo magma en una de las cámaras magmáticas que se encuentran en la corteza superior.
- Luego, desde finales de mayo, la sismicidad por fracturamiento (localizada principalmente por debajo del cráter del volcán) y movimiento de fluidos mostró periodos de importante incremento, lo cual, probablemente indicó la ruptura progresiva del sello de transición frágil – dúctil, generando un cambio drástico de presión y, por consiguiente, se inició la descompresión de fluidos y gases atrapados por debajo de este sello ([White & McCausland, 2019](#)), este comportamiento a su vez sugirió la reactivación y aparición de nuevas fracturas y conductos, los mismos que habrían sido la vía de ascenso para los gases y fluidos hacia la superficie (Etapas 3). Asimismo, el 22 de junio se registró una importante y energética actividad tremórica, posiblemente, a raíz de la interacción del sistema hidrotermal con la transferencia de calor debido a un cuerpo de magma en ascenso que a medida que iba ascendiendo, creaba y limpiaba el conducto para las futuras explosiones (Etapas 3).
- El 04 de julio se registraron las dos primeras explosiones acompañadas de actividad tremórica, iniciándose así la etapa explosiva, la misma que tuvo un periodo de reposo hasta el 20 de julio, donde nuevamente se registró la ocurrencia de una tercera explosión y a partir de ese entonces hasta la fecha, se han venido generando una serie de explosiones seguidas de temblores volcánicos y en ciertas ocasiones acompañadas por sismicidad repetitiva (enjambres de sismos LP), pero aún irregulares en tamaño y espaciamiento (Etapas 4). Este tipo de sismicidad ocurre justo antes de que el magma alcance la superficie ([White & McCausland, 2019](#)) por ejemplo, Usu ([Minakami et al., 1951](#)), Redoubt ([Power et al., 1994](#)) Kelud ([Lesage & Surono, 1995](#)), Soufrière Hills ([Miller et al., 1998](#)), Unzen ([Nakada et al., 1999](#)), Mt. St. Helens ([Moran et al., 2008](#)) y Nevado del Huila ([Cardona et al., 2009](#)).



**Figura 27.** Modelo conceptual geológico basado en procesos de sismicidad pre eruptiva donde se muestran las cuatro etapas generales y tipo de sismicidad observados antes y durante las erupciones (Modificado de White & McCausland, 2019) y con detalles específicos para el volcán Ubina tomados de Rivera et al. (2014) y Kono et al. (1989).





**Figura 28.** Representación gráfica de las etapas de progresión sísmica identificadas en el volcán Ubinas (2023). La sismicidad asociada a la intrusión de magma (Etapa 2) está representada por las barras azules. La sismicidad asociada a la apertura y/o limpieza del conducto (Etapa 3) está representada por las barras verdes. La sismicidad asociada al movimiento y/o ascenso de fluidos está representada por las barras rojas (Etapa 4) y finalmente la actividad magmática explosiva está representada por la barra amarillo - naranja.

## V. QUÍMICA DE GASES VOLCÁNICOS

Los gases volcánicos están presentes en los volcanes activos y presentan cambios cuando el magma asciende a la superficie, durante este proceso el magma libera los gases; estos según su abundancia son: vapor de agua ( $H_2O$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), dióxido de azufre ( $SO_2$ ), entre otros.

Los análisis periódicos y el monitoreo de las emisiones de gases volcánicos proporcionan información importante sobre los procesos de desgasificación con el objetivo de mejorar la predicción de la actividad volcánica y los peligros asociados.

El (OVI), realiza mediciones de los gases volcánicos, como el dióxido de azufre ( $SO_2$ ), el cual se realiza mediante el uso de espectrómetros ópticos diferenciales denominados escáner DOAS. De la misma manera realiza la medición de Dióxido de carbono  $CO_2$ , sulfuro de hidrógeno  $H_2S$ , y vapor de agua con el equipo MultiGAS. Además, se realiza el estudio de la composición química de los gases mediante el muestreo directo.

La red de monitoreo de gases volcánicos en el volcán Ubinas consta de 4 equipos DOAS y un equipo MultiGAS instalados alrededor del volcán, se recolecta información de la concentración de los gases volcánicos ( $H_2O$ ,  $SO_2$ ,  $H_2S$  y  $CO_2$ ) y flujo de  $SO_2$  en tiempo real.

Entre enero y junio del 2023 se registró valores menores a 1000 ton/día, a partir del 22 de junio se observa un incremento en los flujos de  $SO_2$  registrando un valor máximo de 5000 ton/día el día 24 de junio, posterior a ello inicia la etapa explosiva del volcán. Durante los meses de julio y agosto, la cantidad de desgasificación se incrementa; los últimos días se ha notado un incremento en los valores de desgasificación con un máximo de 8100 ton/día el día 17 de agosto (Figura 29).

El proceso de migración de magma hacia la superficie se refleja en los gases magmáticos  $CO_2$  y  $SO_2$ , la relación entre ambos representa la cercanía del magma a la superficie; los valores registrados desde junio del 2023 indican el ascenso de magma, representado por la relación

entre ambos gases. A partir de julio esta relación se mantiene muy cercana a 1 indicando que el proceso de migración de magma continua (Figura 30).

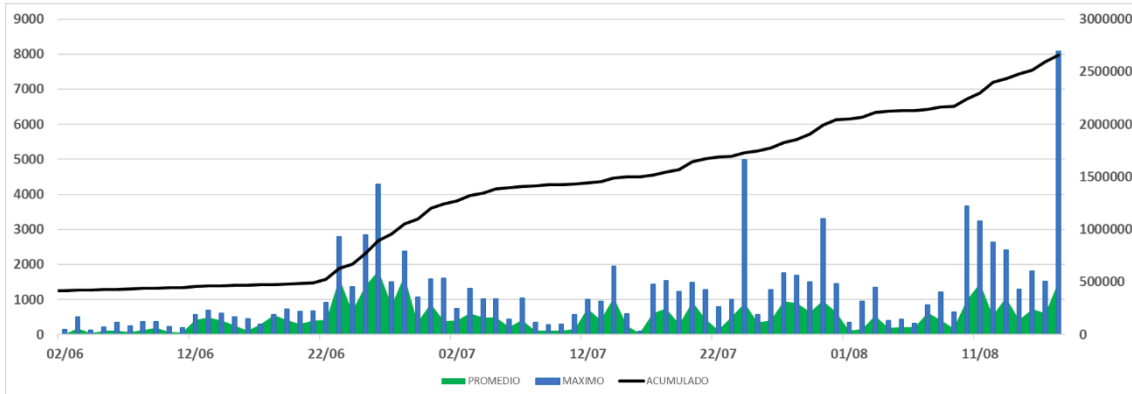


Figura 29. Flujo de SO<sub>2</sub> registrado en el volcán Ubinas.

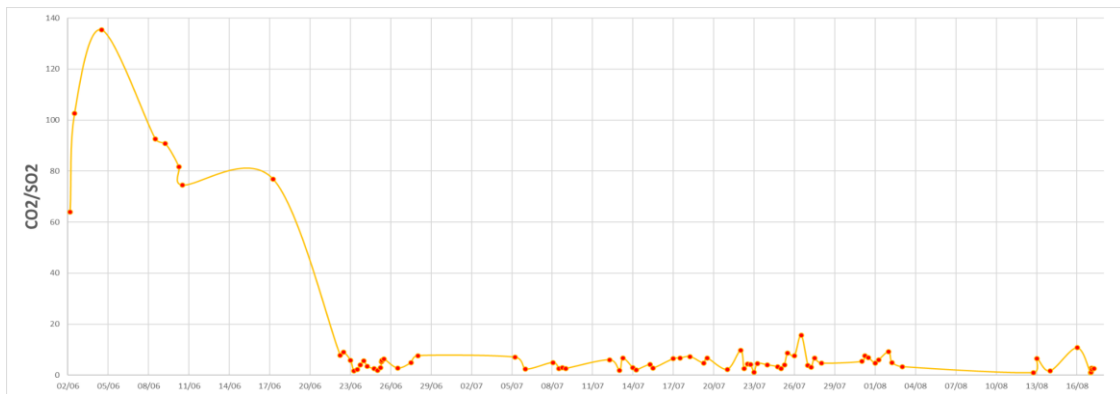



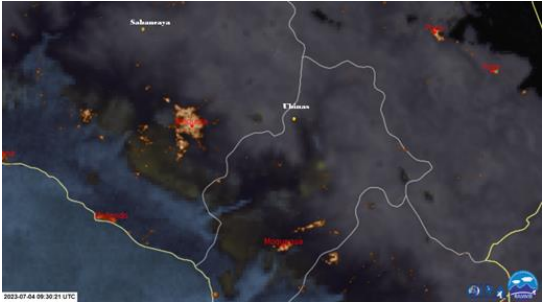

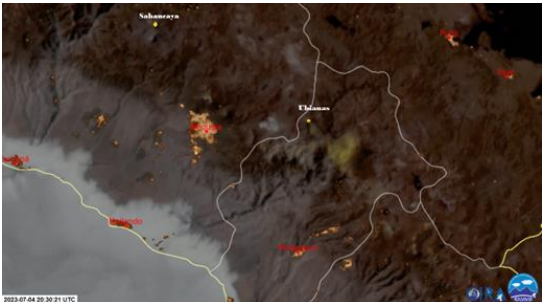


Figura 30. Relación de gases volcánicos CO<sub>2</sub>/SO<sub>2</sub> en el volcán Ubinas.

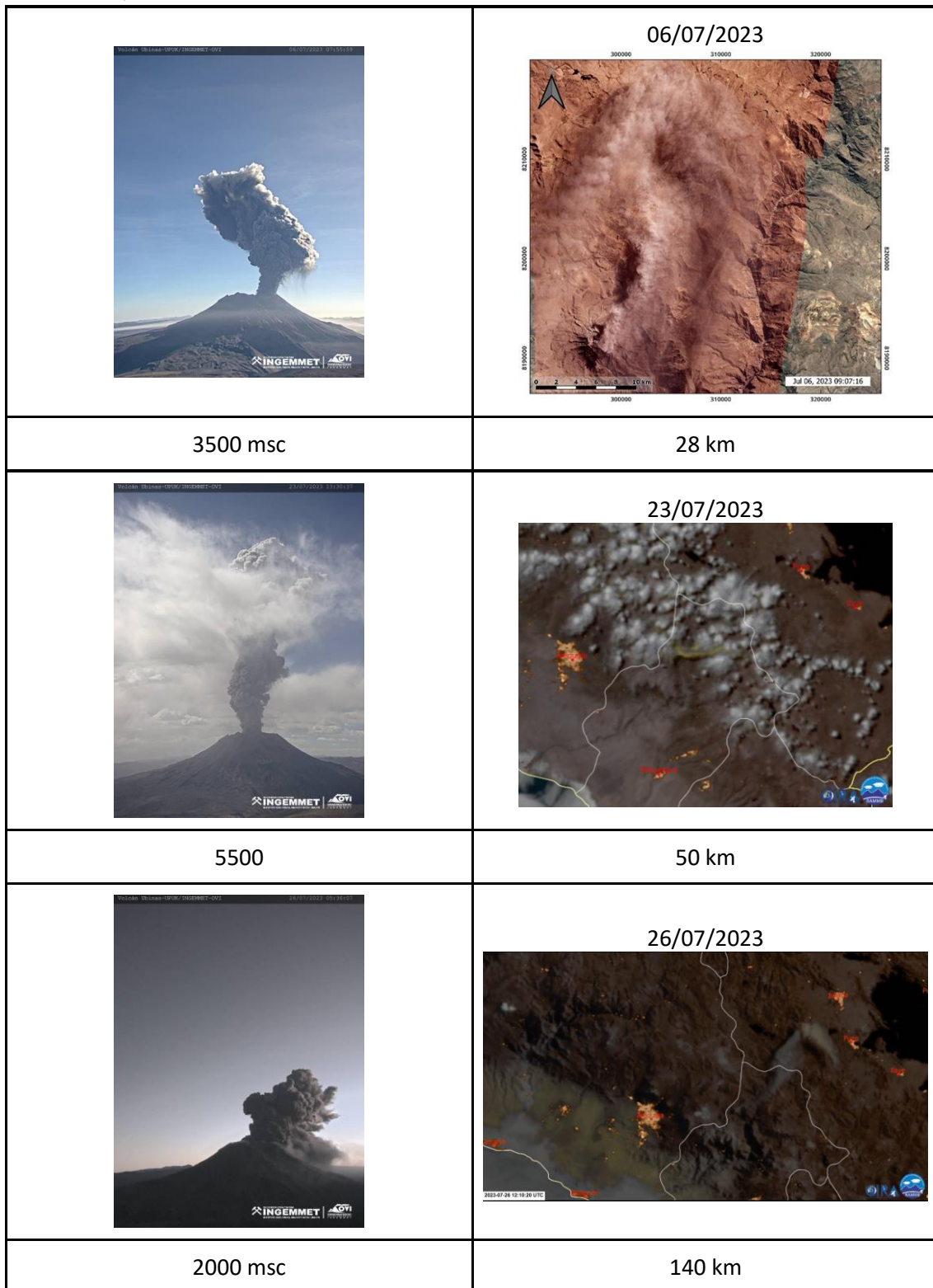
## VI. SENSORES REMOTOS

La red local de sensores de video vigilancia en el volcán Ubinas nos ha permitido registrar la actividad superficial del presente proceso eruptivo, en imágenes se registraron las emisiones de vapor de agua, expulsión de balísticos, incandescencias y las columnas de ceniza volcánica. Además, los sensores remotos satelitales han dado detalle de la dispersión o alcance de la ceniza volcánica.

La actividad superficial del proceso eruptivo inició el 22 de junio, la cual presentó emisiones de ceniza de 2500 metros sobre el cráter (msc), en los siguientes días se observaron emisiones leves a moderadas. El 4 de julio inicia la etapa magmática (fase explosiva del volcán) con una explosión que generó una columna eruptiva de hasta 5500 msc con la ocurrencia de incandescencias y emisión de balísticos, en los dos días subsiguientes la actividad continúa con dos explosiones que generan columnas eruptivas considerables y alta densidad de ceniza, esta actividad generó dispersión de la ceniza que logró alcanzar hasta 55 km de dispersión de distancia desde el cráter (Figura 31). Del 07 al 19 de julio las emisiones fueron de muy leves a moderadas, en este periodo se pudo observar emisiones con coloración azulina correspondientes a la combustión del azufre y blancas correspondientes a vapor de agua. A partir del 20 de julio se vuelven a presentar explosiones que generan columnas de moderadas de hasta 5500 msc, en los posteriores días se registra la ocurrencia de incandescencias, emisión de balísticos y dispersión de la ceniza que logró alcanzar hasta 140 km de distancia desde el cráter.

A continuación, se muestran las imágenes representativas de la actividad superficial e imágenes satelitales de la dispersión de la ceniza volcánica que se registraron en Moquegua, Arequipa y Puno.

Altura de columna eruptiva	Distancia de dispersión de ceniza
	<p data-bbox="1007 456 1152 488">04/07/2023</p> 
<p data-bbox="453 880 571 911">5500 msc</p>	<p data-bbox="1042 880 1118 911">55 km</p>
	<p data-bbox="1007 965 1152 996">04/07/2023</p> 
<p data-bbox="453 1388 571 1420">3500 msc</p>	<p data-bbox="1042 1388 1118 1420">50 km</p>
	<p data-bbox="1007 1451 1152 1482">05/07/2023</p> 
<p data-bbox="453 1955 571 1986">1000 msc</p>	<p data-bbox="1042 1955 1118 1986">30 km</p>

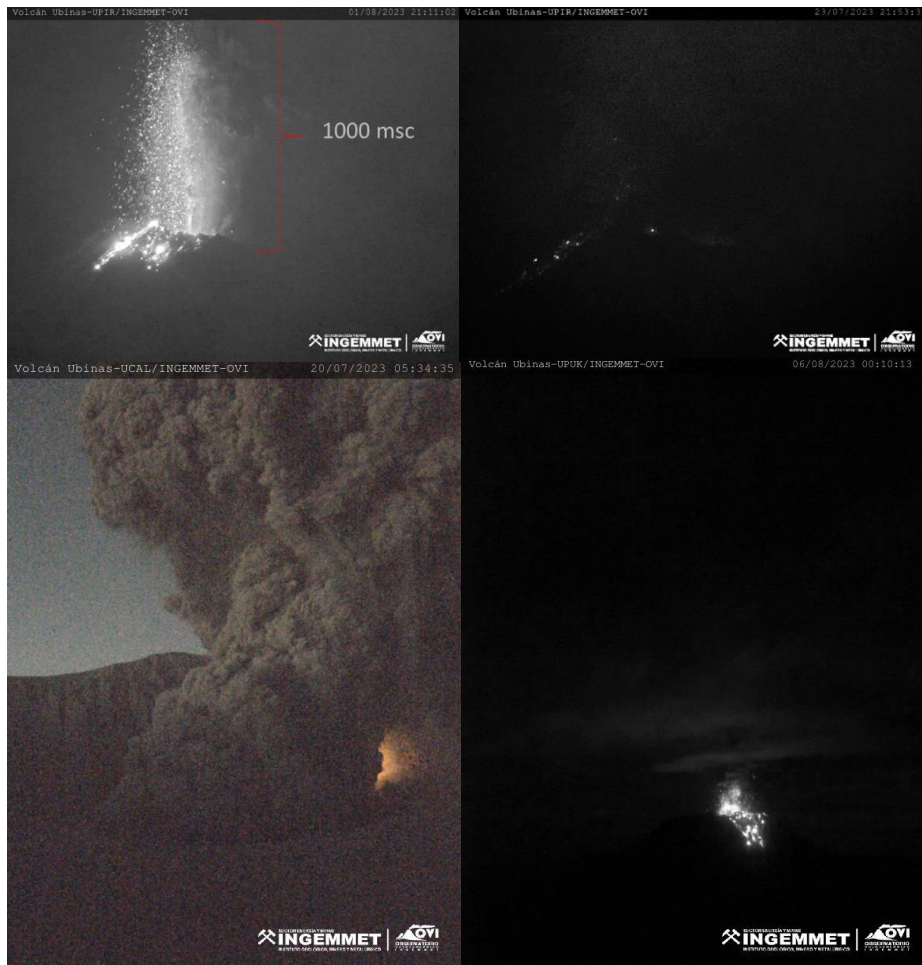


**Figura 31.** Altura de columna eruptiva y dispersión de ceniza del volcán Ubinas.

Una de las características de este proceso eruptivo es la presencia de balísticos e incandescencias, que son registrados mediante las cámaras ópticas de video vigilancia (Figura 32), las cuales son efectos de luz que produce el material magmático que se encuentra a altas temperaturas. En dichos eventos de incandescencias se aprecian los proyectiles balísticos



(fragmentos de magma incandescente), los cuales se elevan hasta 1000 msc para luego caer en los flancos este y sureste del volcán.



**Figura 42.** Proyectiles balísticos e incandescencias registradas en el volcán Ubinas.

La actividad eruptiva ha presentado emisiones de ceniza a manera de pulsos, emisiones continuas y en columnas eruptivas, las cuales alcanzaron una altura máxima de 5500 msc (Figura 33). Las emisiones tuvieron coloraciones blancas, gris claro, gris oscuro y azulinas; las coloraciones grises corresponden al contenido de ceniza, que en las columnas de mayor altura presentaron una alta densidad o mayor contenido de esta; también, se presentaron columnas eruptivas de disposición vertical, dispersas e inclinadas en forma de coliflor, algodón, difusas y hongo.

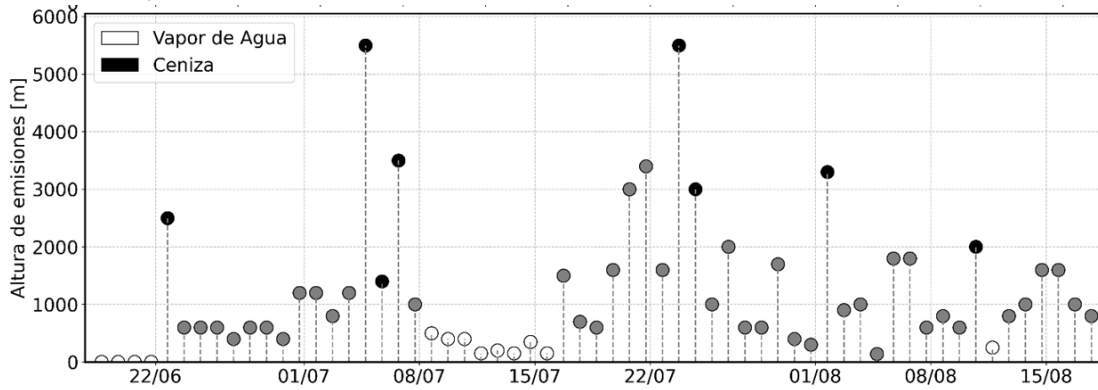


Figura 33. Altura máxima de emisiones del volcán Ubinas.

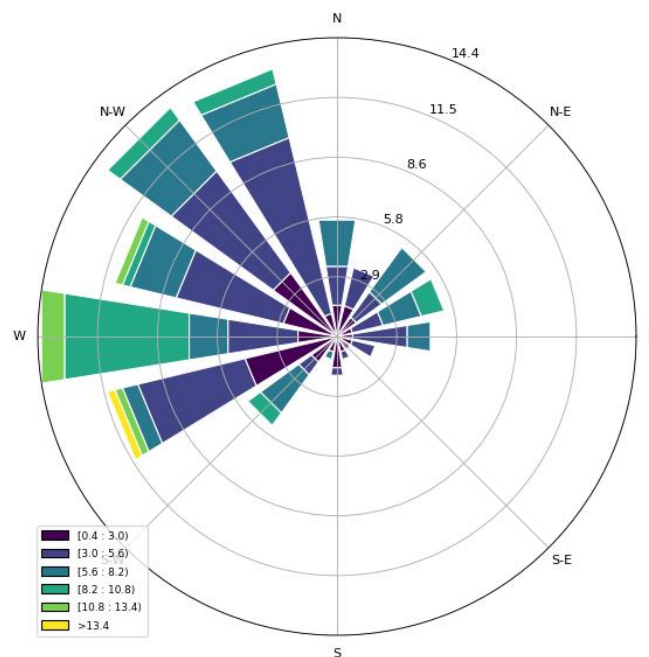
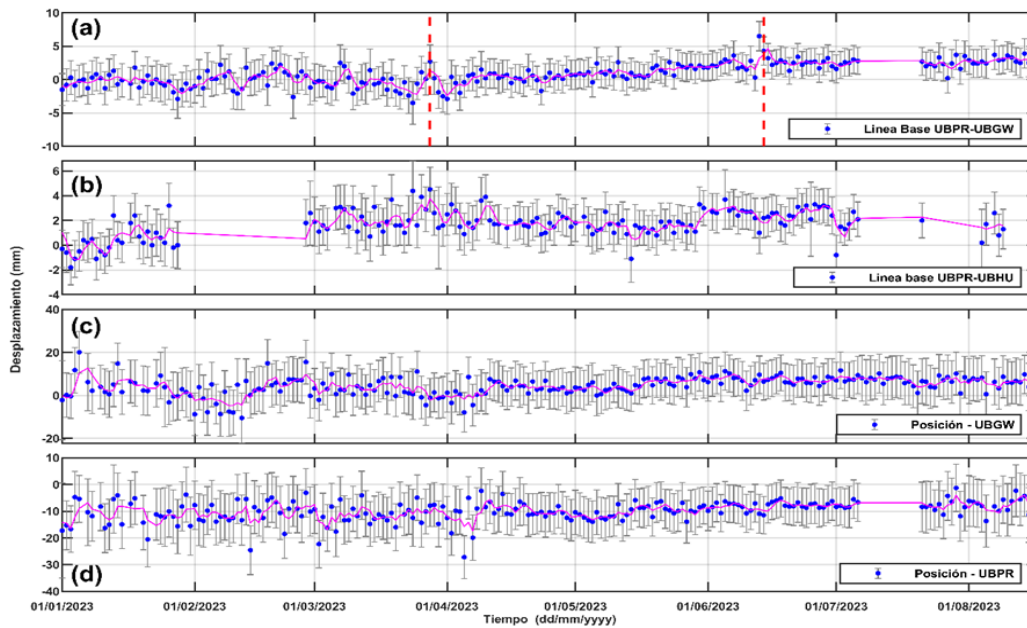


Figura 34. Rosa de vientos del 04 de julio al 10 de agosto. Los vientos en el volcán Ubinas tuvieron una dirección predominante hacia el noroeste alcanzando sus mayores velocidades hacia el oeste, con cifras entre 10.8 m/s y 13.4 m/s; estos valores son brindados por la plataforma internacional de NOAA.

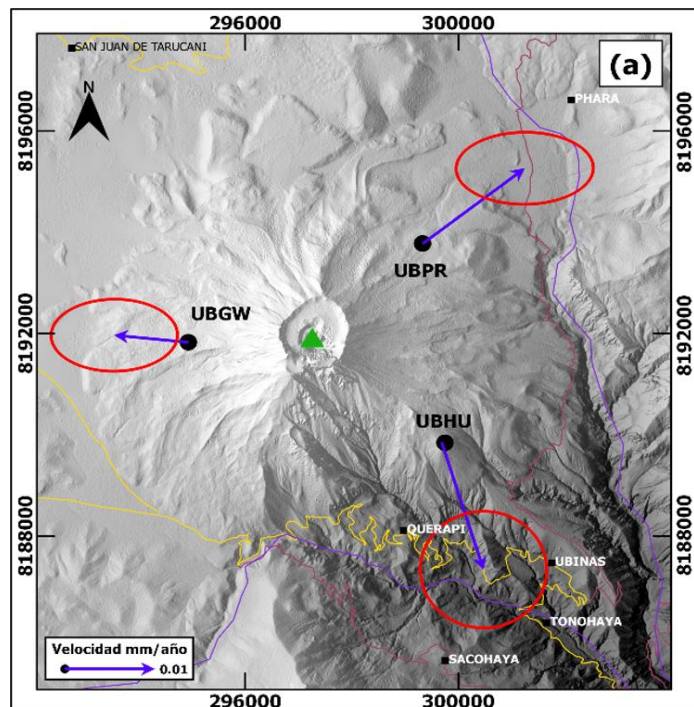
## VII. DEFORMACIÓN VOLCÁNICA

La red de monitoreo geodésico del volcán Ubinas está conformada por una red de 3 antenas con sus respectivos receptores GNSS (Sistema Global de Navegación por Satélite). Esta información permite estimar el posicionamiento relativo de los puntos de instalación e identificar procesos de deformación del suelo asociados a pérdida o acumulación de presión. El análisis de la información mediante el cálculo de líneas base (técnica que se basa en comparar el desplazamiento horizontal entre dos estaciones) (Figura 34a y 34b) registró un alargamiento de 4 mm aproximadamente entre las estaciones GNSS de Phara (UBPR) y Ubinas Oeste (UBGW), ubicadas al noreste y oeste respectivamente, entre el 22 de abril y 14 de junio. La componente vertical de este par de estaciones GNSS (Figura 34c y 34d) no mostró un claro proceso de levantamiento del suelo, sin embargo, las componentes horizontales sí.



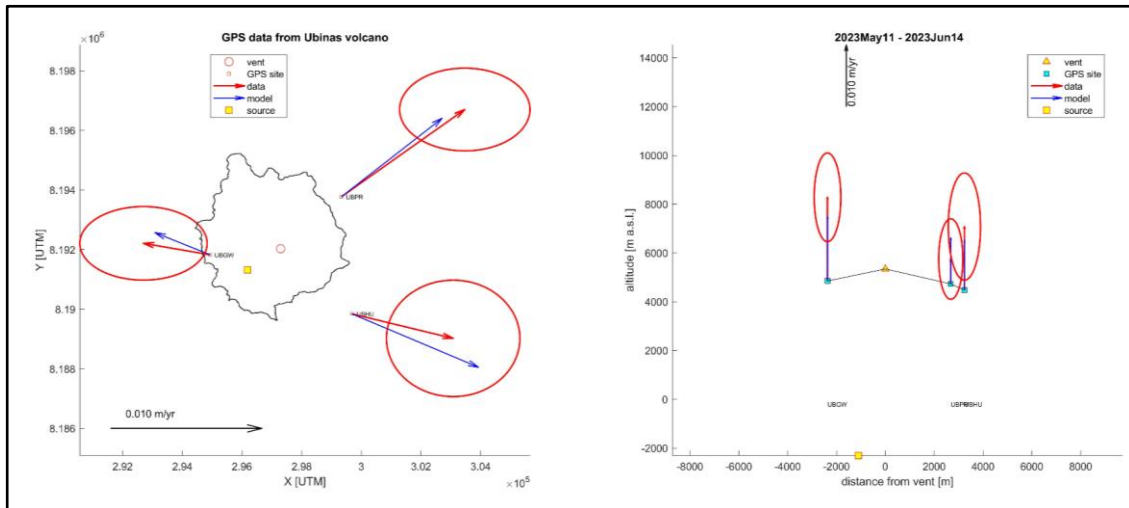
**Figura 35.** a) Serie temporal de línea base entre las estaciones GNSS UBPR y UBGW, las líneas rojas muestran el periodo de alargamiento de la línea base. b) Serie temporal de línea base entre las estaciones GNSS UBPR y UBHU. c) Serie temporal de la componente vertical de la estación GNSS UBGW y d) UBPR.

El periodo de alargamiento evidenciado en la línea base entre las estaciones GNSS UBGW y UBPR se evidenció también en las componentes horizontales de las tres estaciones (Figura 35). Entre el 22 de abril y 14 de junio se observa una deformación horizontal radial hacia fuera del cráter del volcán, lo cual representa un proceso de presurización dentro del volcán.



**Figura 36.** Mapa de velocidad horizontal de las estaciones GNSS del volcán Ubina entre el 11 de mayo y 14 de junio.

El modelamiento de las velocidades de deformación observadas ubica la fuente de presión a una profundidad entre 7 y 8 km bajo el nivel del cráter y a 1.5 km al oeste del cráter aproximadamente (Figura 36). El cambio de volumen causante de la deformación observada en superficie se estimó en 9 millones de metros cúbicos aproximadamente. La dimensión del campo de presión estimada está entre 500 y 1000 metros de radio.



**Figura 37.** Resultados del modelamiento de los datos GNSS del volcán Ubinas entre el 11 de mayo y 14 de junio. A la derecha las velocidades horizontales y a la izquierda, las velocidades verticales. Los vectores rojos representan los datos obtenidos. Los vectores azules representan los datos resultantes tras aplicar el modelo esférico de Mc Tighe. El círculo rojo representa la ubicación del cráter y el cuadrado amarillo la ubicación del centro de la fuente de presión modelada. Las elipses representan el error.

## VIII. RESULTADOS

### VIII.1. ANÁLISIS MULTIPARAMÉTRICO

En el 2023 se registran los primeros cambios en febrero con un ligero incremento en la sismicidad, desde el 17 de mayo se registró un evidente incremento en la actividad interna del volcán Ubinas, y el 17 de junio se observó cambios en las emisiones de gases que cubren el cráter del volcán, a partir del día 22 de junio se registran las primeras emisiones de ceniza, el 04 de julio inicia la etapa magmática con explosiones más energéticas y con mayor contenido de ceniza volcánica afectando principalmente el valle de Ubinas. A partir del 21 de julio se registra un incremento importante de la actividad con 4 explosiones en un día, a partir de esta fecha inicia el periodo de mayor actividad.

Los parámetros **geológicos** que se registran son los siguientes:

- A. Deformación volcánica (inflación debido a presión interna)
- B. Movimiento de fluidos magmáticos
- C. Desgasificación magmática
- D. Emisión de ceniza volcánica y balísticos (magma)
- E. Anomalías térmicas, mayor temperatura detectada en el cráter del volcán

En la **figura 37** se muestran los resultados del monitoreo multidisciplinario y los cambios registrados desde el 22 de junio, con importantes cambios relacionados al proceso de migración de magma y actual proceso eruptivo.



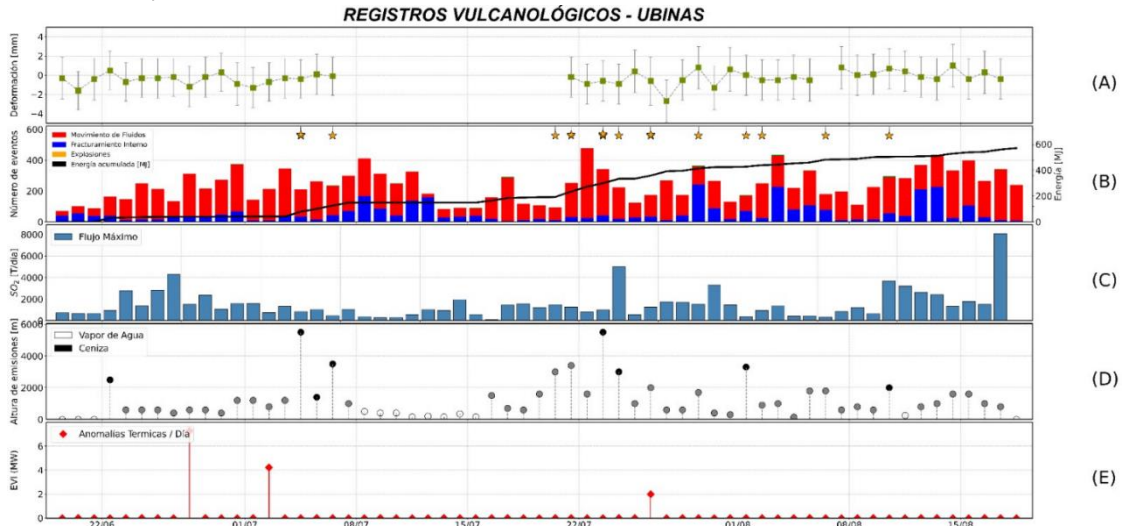


Figura 38. Evolución Multidisciplinaria de la actividad del volcán Ubinas.

**VIII.2. MODELO GEOLÓGICO**

El volcán Ubinas en los últimos 20 años ha presentado 3 procesos eruptivos caracterizados por presentar un proceso geológico dividido en 5 etapas: (1) Etapa Pre eruptiva, (2) Erupción con explosiones freáticas y/o freatomagmáticas, (3) Erupción magmática, (4) Etapa de mayor actividad explosiva y (5) Etapa de decaimiento. Estas etapas se han presentado muy claramente y evidencian el proceso de la migración de magma hacia la superficie (Figura 38). En el 2023 se ha evidenciado las 4 primeras etapas y actualmente nos encontraríamos en la etapa (4) “etapa de mayor actividad” con la posibilidad de la ocurrencia de explosiones de mayor magnitud similares a los procesos eruptivos 2006-2009, 2013-2017 y 2019.

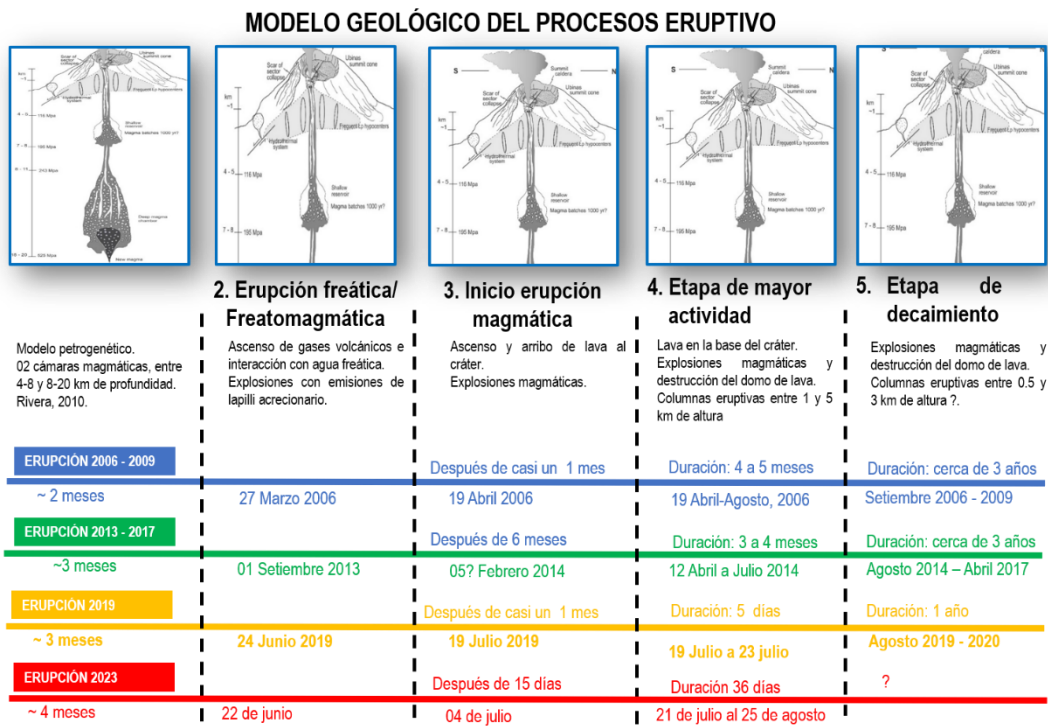


Figura 39. Modelo geológico del proceso eruptivo del volcán Ubinas.



## IX. ASESORAMIENTO TÉCNICO Y CHARLAS DE SENSIBILIZACIÓN Y DIFUSIÓN DURANTE LA CRISIS VOLCÁNICA

En la [Tabla 15](#) se puede apreciar las diferentes reuniones de coordinación con el objetivo de realizar un asesoramiento técnico a las autoridades para la toma de decisiones en relación al proceso eruptivo del volcán Ubinas. Participación en reuniones de las plataformas de defensa civil del Gobierno Regional de Moquegua y la Municipalidad distrital de Ubinas.

**Tabla 15.**

Asesoramiento técnico para toma de decisiones de las autoridades y reuniones de coordinación.


FECHA	REUNIÓN	PARTICIPANTES	FOTO
02/06/2023	Reunión de la plataforma regional de Defensa Civil - Moquegua (cambio del semáforo volcánico de verde a amarillo)	Miembros de la Plataforma de Defensa Civil del Gobierno Regional de Moquegua y representantes del INGEMMET.	PLATAFORMA VIRTUAL
29/06/2023	Reunión de coordinación sobre la ubicación del albergue de Siraguaya en relación al mapa de peligros del volcán Ubinas.	Representante y gerentes del gobierno regional de Moquegua, jefe del COER Moquegua, representantes del INGEMMET y pobladores de las diferentes comunidades de Ubinas.	
30/06/2023	Reunión con la Presidencia del Consejo de ministros (cambio del semáforo volcánico de amarillo a naranja)	L. Fidel, E. Taipe, F. Apaza, J. Mariño.	PLATAFORMA VIRTUAL
02/07/2023	Reunión de coordinación sobre el trabajo a realizarse esa semana en el poblado de Ubinas entre el INGEMMET, Municipalidad distrital de Ubinas, COER e INDECI Moquegua.	Director de la DDI Moquegua, jefe del COER Moquegua, alcalde de la Municipalidad distrital de Ubinas y personal del INGEMMET.	
02/07/2023	Reunión de coordinación en el albergue de Siraguaya, sobre el trabajo que se realizaría con la población del distrito de Ubinas entre el INGEMMET,	Director de la DDI Moquegua, jefe del COER Moquegua, encargado de Defensa Civil de la Municipalidad	

	Municipalidad distrital de Ubinas, COER e INDECI Moquegua.	provincial de Sánchez Cerro, alcalde de la Municipalidad distrital de Ubinas, Comisario de Ubinas y personal del INGEMMET.	
06/07/2023	Charla sobre el trabajo que realiza INGEMMET en el volcán Ubinas	Ministra de Transportes y Comunicaciones y representante del INGEMMET.	
06/07/2023	Charla sobre la situación del volcán Ubinas y el mapa de peligros volcánicos	Gobernadora del Gobierno Regional de Moquegua y representante del INGEMMET.	
08/07/2023	Charla informativa sobre el volcán Ubinas y los peligros volcánicos a los que están expuestos la población de Ubinas y el monitoreo volcánico.	Jefe Nacional de Defensa Civil, director de la DDI Moquegua, jefe del COER Moquegua, Plataforma de Defensa Civil de la Municipalidad distrital de Ubinas y representantes del INGEMMET.	
14/07/2023	Reunión sobre el reasentamiento poblacional, recalando la participación del INGEMMET en estos procesos a través de estudios e informes técnicos que realizan, como es el caso de Querapi y Tonohaya.	Autoridades de las comunidades de los distritos de Ubinas y Matalaque, INDECI, COER Moquegua y representantes del INGEMMET.	

14/07/2023	Asistencia técnica sobre el Mapa de Peligros del volcán Ubinas.	Miembros del INDECI, COER Moquegua y representantes del INGEMMET.	
11/08/2023	Asistencia técnica sobre el volcán Ubinas- COER Puno en relación al Oficio N° 165-2023 GR. PUNO/ORGRDyS	Miembros del COER Puno, gerentes de GRD de las diferentes provincias de Puno y representantes del INGEMMET.	
14/08/2023	Reunión sobre la situación del volcán Ubinas, los peligros volcánicos y el monitoreo que se realiza en el volcán Ubinas.	Alcaldes de los distritos de Ubinas, Chojata, Yunga, Ichuña, Matalaque y Lloque.	
14/08/2023	Reunión de coordinación con la Plataforma de Defensa Civil de la Municipalidad distrital de Ubinas, para acordar sobre el desarrollo del simulacro por erupción volcánica.	Plataforma de Defensa Civil y representante del INGEMMET.	

En la [Tabla 16](#) se muestran charlas de educación y sensibilización que se han dado al sector educación, autoridades y a la población en general.

**Tabla 16.**  
Charlas de sensibilización y difusión en el poblado de Ubinas.

FECHA	REUNIÓN	PARTICIPANTES	FOTO
04/07/2023	Primera charla de sensibilización a los brigadistas del sector de Ubinas.	Brigadistas del poblado de Ubinas.	

<p>04/07/2023</p>	<p>Charla de sensibilización sobre los peligros volcánicos, el monitoreo volcánico y la situación del volcán Ubinas.</p>	<p>Presidente de la Comunidad de Ubinas, Representante de la DDI Moquegua, el representante del COER Moquegua, población de Ubinas y personal del INGEMMET.</p>	
<p>05/07/2023</p>	<p>Charla de sensibilización al ejército peruano, sobre el mapa de peligros del volcán Ubinas.</p>	<p>Coronel de la 3ra brigada del Ejército peruano, miembros del ejército y representante del INGEMMET.</p>	
<p>06/07/2023</p>	<p>Charla sobre la situación del volcán Ubinas y el mapa de peligros volcánicos.</p>	<p>Coronel de la Policía Nacional del Perú de la sede Moquegua, Prefecta de Moquegua, Subprefectos de Ubinas y Matalaque.</p>	
<p>14/07/2023</p>	<p>Charla sobre el monitoreo volcánico, los peligros volcánicos y la situación del volcán Ubinas.</p>	<p>Alcalde de San Juan de Tarucani, alcaldes de las diferentes comunidades de este distrito, COER Arequipa y representantes del INGEMMET.</p>	
<p>21/07/2023</p>	<p>Charla sobre el mapa de peligros del volcán Ubinas.</p>	<p>Director del colegio I.E. 43183 de la comunidad Carmen de Chacalaya.</p>	
<p>08/08/2023</p>	<p>Charla de sensibilización sobre los peligros volcánicos del volcán Ubinas</p>	<p>Pobladores del Anexo San Pedro de Chacalaque.</p>	



## X. DISCUSIÓN

Del análisis del actual proceso eruptivo del 22 de junio al 10 de agosto (50 días) se observa que durante este periodo las columnas eruptivas alcanzaron hasta 5 500 m sobre el nivel del cráter, superando la altura máxima de los procesos eruptivos del 2006 – 2009 y del 2013 - 2017, en los cuales alcanzaron 4 000 m y 5 000 sobre el nivel de cráter respectivamente (Ancasi et al., 2022, Rivera et al., 2011; Rivera et al., 2010). Sin embargo, es inferior al proceso eruptivo del 2019, en el cual la columna eruptiva alcanzó hasta 6 500 m sobre el nivel del cráter.

En este proceso el área de afectación por caída de ceniza se dio principalmente en el sector sur – sureste en los pueblos del valle de Ubinas, superando los 90 km de distancia, mientras que en el periodo del 2006 – 2009 se reportó afectación por caída de ceniza a más de 12 km, en el periodo del 2013 – 2017 las caídas de ceniza superaron los 13 km y en la erupción del 2019 se reportó caída de ceniza hasta la frontera con el país de Bolivia a 190 km de distancia.

En la actual erupción del Ubinas los primeros proyectiles balísticos fueron emitidos durante las explosiones registradas el 23 de julio, el 01 y 06 de agosto en dirección sureste y este a 1.5 km de distancia del cráter. En los anteriores procesos también se identificaron proyectiles balísticos; en el proceso 2006 – 2009 los balísticos alcanzaron hasta 2 km de distancia desde el cráter en dirección noroeste con 60 cm de diámetro, en el 2013-2017 los balísticos alcanzaron 2.5 km del cráter, afectando principalmente los flancos sureste, sur, suroeste, noroeste y oeste, y en el 2019 los balísticos alcanzaron hasta una distancia de 3.5 km del cráter en dirección sureste, con diámetros de hasta 2.5 cm. Hasta el momento el alcance de los proyectiles balísticos ha sido mayor en los anteriores procesos eruptivos.

La estimación del volumen mínimo de esta erupción está en el rango de 346120 a 360330 m<sup>3</sup>, en la erupción del 2013 – 2017 se estimaron volúmenes mínimos de 800 000, 1 400 000 y 2 000 000 m<sup>3</sup>, mientras que en el 2019 el volumen mínimo estimado fue de 3 500 000 m<sup>3</sup>.

El Índice Explosividad Volcánica de la erupción del 2023 hasta el momento se encuentra iniciando un 2, para los procesos anteriores en el caso de la actividad del 2006 – 2009 y 2013 - 2017 el IEV estimado fue entre 1 y 2, mientras que para la erupción del 2019 el IEV fue de 2.

Durante las erupciones de los años 2006-2009 y 2014-2017, se registraron sucesivos emplazamientos de lava en el cráter, así como una importante eyección de balísticos durante la actividad eruptiva explosiva, lo que evidenció una fragmentación parcial del magma. Estas características no se observan en lo que va del actual proceso eruptivo.

## XI. CONCLUSIONES

Las imágenes satelitales GOES-16 muestran que la dispersión de ceniza alcanzó más de 55 km en dirección sur – sureste.

En el pueblo de Querapi a 4 km del cráter, se depositó alrededor de 1.5 mm de espesor de ceniza, en Ubinas a 6 km se reportó 1 mm de espesor, mientras que en los pueblos de Sacohaya Viejo, Tonohaya, Chaloge, Escacha, Escacha Bajo, Sacohaya, Sancaya, San Miguel Viejo,

Anascapa, Chimpa, San Miguel, Tahuaca y Huatagua se registraron caídas de ceniza inferiores a 1 mm de espesor.

Los parámetros eruptivos calculados para la erupción entre junio a agosto son: densidad promedio  $0.65 \text{ g/cm}^3$ , masa del depósito  $2.25 \times 10^8$  a  $2.34 \times 10^8 \text{ kg}$ , volumen de roca equivalente (DRE)  $93750$  a  $97500 \text{ m}^3$ , tasa de descarga de masa (MER)  $4.6 \times 10^3 \text{ kg/s}$ .

PARÁMETROS	VALORES
Altura de columna máxima	5.5 km
Volumen emitido	$346120$ a $360330 \text{ m}^3$
Densidad promedio del depósito	$0.65 \text{ g/cm}^3$
Masa del depósito	$2.25 \times 10^8$ a $2.34 \times 10^8 \text{ kg}$
Volumen de roca densa equivalente DRE	$93750$ a $97500 \text{ m}^3$
Duración máxima de las emisiones	14 horas
Tasa de descarga de masa	$4.6 \times 10^3 \text{ kg/s}$
IEV	2

Hasta el momento, la ausencia de lava en la base del cráter, sugiere una fragmentación casi total del magma, que dio lugar a la actividad eruptiva explosiva entre junio y agosto.

El volumen final de la tefra emitida oscila entre  $346120$  a  $360330 \text{ m}^3$  y corresponde a los valores mínimos y máximos.


Hasta la fecha, la erupción de junio-julio 2023, presenta varias características similares a la erupción de julio 2019, tales como una rápida evolución hacia una erupción magmática, alta fragmentación, ausencia de lava y de proyectiles balísticos. Sin embargo, difieren en cuanto a intensidad, ya que la tasa de descarga y volumen emitido en la erupción del 2019 fue mucho más alta.

Los registros de monitoreo de deformación del volcán Ubinas registraron un periodo inflacionario desde el 22 de abril al 14 de junio, a razón de hasta 4 mm. Utilizando la información geodésica obtenida por las tres estaciones de monitoreo y el modelo esférico de Mc Tigue (1987) se estimó que la fuente de presión se sitúa entre 7 y 8 km de profundidad y a 1.5 km al oeste del cráter del volcán, además, el cambio de volumen que provocó la deformación en el Ubinas es de 9 millones de metros cúbicos.

La actividad del volcán Ubinas presenta dos escenarios, que la erupción continúe presentando emisiones de magnitud similar a los registrados en los últimos días o que incremente la actividad con mayor cantidad de explosiones y de mayor magnitud.

## XII. RECOMENDACIONES

- Implementar acciones de preparación, tales como simulacros de evacuación, señalización de rutas de evacuación, entre otros.
- Tener operativo el albergue de Siraguaya, a fin de que se constituya como un refugio permanente, pero de uso temporal. Según el mapa de peligros del volcán Ubinas, este refugio no será afectado por flujos piroclásticos, flujos de lava, lahares o avalanchas de escombros. Sin embargo, si puede ser afectado por caídas de ceniza, peligro que puede ser mitigado.
- Mitigar el impacto de las caídas de ceniza en las personas. Para ello utilice lentes con protección lateral y mascarillas, cubra las fuentes de agua, y limpie la ceniza en techos, patios y calles.
- Mitigar el impacto de las caídas de ceniza en ganado ovino, vacuno y camélidos, principalmente evitar que se alimenten de pastos y agua contaminada con ceniza.
- Realizar un constante monitoreo de la calidad del aire, agua e impacto en los cultivos, en las zonas afectadas por caídas de ceniza.
- Utilizar el mapa de peligros del volcán Ubinas elaborado por el INGEMMET, para identificar zonas de alto peligro y lugares seguros.
- Culminar el proceso de reasentamiento poblacional (reubicación definitiva) de Querapi, prohibir su repoblamiento y declararlo como zona intangible e inhabitable.
- Continuar y culminar el proceso de reasentamiento poblacional (reubicación definitiva) de Tonohaya.
- Construir puentes resistentes al paso de lahares (huaycos), especialmente en las vías que cruzan los ríos Volcanmayo, Ubinas y Anascapa.
- Para una rápida evacuación, asfaltar las vías de acceso al refugio de Siraguaya (Escacha-Tonohaya-Siraguaya, Sacohaya-Anascapa-Siraguaya).



Ing. KEVIN ARNOLD CUEVA SANDOVAL  
 Especialista en Peligros  
 Volcánicos  
 INGEMMET



ING. JERSY MARIÑO SALAZAR  
 Director (e)  
 Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico  
 INGEMMET

### XIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anccasi, R.; Taípe, E.; Mariño, J.; Apaza, F.; Miranda, R.; Ramos, D.; Calderón, J.; Masías, P.; Ortega, M.; Ccallata, B.; Paxi, R.; Japura, S. & Valdivia, D. (2022). *Caracterización del proceso eruptivo del volcán Ubinas 2013 - 2017*. INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 90, 180 p.
- Biass, S. & Bonadonna, C. (2011). *A quantitative uncertainty assessment of eruptive parameters derived from tephra deposits: the example of two large eruptions of Cotopaxi volcano, Ecuador*. Bulletin of Volcanology, 73(1): 73-90. <https://doi.org/10.1007/s00445-010-0404-5>
- Biass, S., Bonadonna, C. & Houghton, B.F. (2019). *A step-by-step evaluation of empirical methods to quantify eruption source parameters from tephra-fall deposits*. J Appl. Volcanol. 8, 1. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/3780>
- Bonadonna C. and Costa A. (2012). *Estimating the volume of tephra deposit: A new simple strategy*. Geological Society of America p. 415-418.
- Bonadonna C. and Houghton B.F. (2005). *“Total grain-size distribution and volume of tephra-fall deposit*. Bull Volcano 67: 441 – 456.
- Bonadonna, C., Ernest, G.G.J., Sparks, R.S.J. (1998). *Thickness variations and volume estimates of tephra fall deposits: The importance of particle Reynolds number*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 81: 173-187.
- Cardona, C., Santacoloma, C., White, R., McCausland, W., Trujillo, N., Narváez, A., Bolaños, R. and Manzo, O. (2009). *Sismicidad tipo “Drumbeat” asociada a la erupción y emplazamiento de un domo en el volcán Nevado del Huila, noviembre de 2008*. Memorias XII Congreso Colombiano de Geología, 7-11 de septiembre de 2009, Paipa. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2460.7440>
- Chouet, B. and Matoza, R. (2013). *A multi-decadal view of seismic methods for detecting precursors of magma movement and eruption*. Journal of Volcanology and Geothermal Research 252 (2013) 108–175. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2012.11.013>
- Fierstein, J. and Nathenson, M. (1992). *“Another look at the calculation of fallout tephra volumes”*. Bulletin of Volcanology, 54, 156-167.
- Folk, R.L. & Ward, W.C. (1957). *Brazos River bar [Texas]; a study in the significance of grain size parameters*. Journal of Sedimentary Research, 27(1): 3-26.
- Folk, R.L. (1966). *A review of grain-size parameters*. Sedimentology, 6(2): 73-93. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1966.tb01572.x>
- George P.L. Walker (1980). *Generation and dispersal of fine ash and dust by volcanic eruptions*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 11, 81 – 92.
- INEI (2018). *Directorio Nacional de Centros Poblados Censos Nacionales 2017*. Instituto Nacional de Estadística e Informática. [https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib1541/index.htm](https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1541/index.htm)
- Inman, D.L. (1952). *Measures for Describing the Size Distribution of Sediments*. Journal of Sedimentary Research, 22, 125-145.
- Kono, M., Fukao, Y. and Yamamoto, A. (1989). *Mountain building in the Central Andes*. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 94(B4), 3891-3905. <https://doi.org/10.1029/JB094iB04p03891>



- L.G. Mastin, M. Guffanti, R. Servranckx, P. Webley, S. Barsotti, K. Dean, A. Durant, J.W. Ewert, A. Neri, W.I. Rose, D. Schneider, L. Siebert, B. Stunder, G. Swanson, A. Tupper, A. Volentik, C.F. Waythomas (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. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2009.01.008>
- Lesage, P. and Surono (1995). *Seismic precursors of the February 10, 1990 eruption of Kelut volcano, Java*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 65(1-2), 135-146. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(94\)00051-H](https://doi.org/10.1016/0377-0273(94)00051-H)
- Mariño, J.; Rivera, M.; Macedo, O.; Masías, P.; Antayhua, Y. (2011). *Gestión de la crisis eruptiva del volcán Ubinas 2006-2008*. INGEMMET. Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 45, 188 p., <https://hdl.handle.net/20.500.12544/301>
- Miller, A.D., Stewart, R.C., White, R.A., Lockett, R., Baptte, B.J., Aspinall, W.P., Latchman, J.L., Lynch, L.L & Voight, B. (1998). *Seismicity associated with dome growth and collapse at the Soufriere Hills Volcano, Montserrat*. Geophysical Research Letter, 25(18), 3401 – 3404 p. <https://doi.org/10.1029/98GL01778>
- Minakami, T., Ishikawa, T. & Yagi, K. (1951). *The 1944 eruption of volcano Usu in Hokkaido, Japan: history and mechanism of formation of the new dome "Syowa- Sinzan"*. Bulletin Volcanologique, 11(1), 45-157. <https://doi.org/10.1007/BF02596029>
- Moran, S.C., Malone, S.D., Qamar, A.I., Thelen, W.A., Wright, A.K. & Caplan-Auerbach, J. (2008). *Seismicity associated with renewed dome building at Mount St. Helens, 2004–2005*. En: Sherrod, D.R., Scott, W.E., & Stauffer, P.H., eds. *A Volcano rekindled: the renewed eruption of Mount St. Helens, 2004–2006*. U.S. Geological Survey, Professional Paper, 1750, chapter 2, p. 27-60. <https://pubs.usgs.gov/pp/1750/>
- Nakada, S., Shimizu, H. & Ohta, K. (1999). *Overview of the 1990-1995 eruption at Unzen Volcano*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 89(1-4), 1-22. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(98\)00118-8](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(98)00118-8)
- Newhall, C.G., Self, S. (1982). *The volcanic explosivity index (VEI) an estimate of explosive magnitude for historical volcanism*. Journal of Geophysical Research, 887, 1231–1238.
- Ortega, M., McCausland, W., White, R., Aguilar, R., Ancasí, R. and Ccallata, B. (2021). *Aplicación de un modelo basado en procesos de patrones de sismicidad pre – eruptiva al volcán Ubinas, episodio eruptivo 2019*. Incasience, revista del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico, Vol.1 Año 2021, N° 01: 24 – 63 p. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/3547>
- Ortega, M., McCausland, W., White, R., Ancasí, R., Ccallata, B. and R., Aguilar. (2022). *Application of a process-based model of pre-eruptive seismic patterns to the open system volcano Ubinas*. Abstract of 11° Cities on Volcanoes Congress. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2013.11.010>
- Power, J.A., Lahr, J.C., Page, R.A., Chouet, B.A., Stephens, C.D., Harlow, D.H., Murray, T.L. and Davies, J.N. (1994). *Seismic evolution of the 1989–1990 eruption sequence of Redoubt Volcano, Alaska*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 62(1-4), p. 69-94. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(94\)90029-9](https://doi.org/10.1016/0377-0273(94)90029-9)
- Pyle, D. (1989). *The thickness, volume and grainsize of tephra fall deposits*. Papers 51: 1-15 p.
- Ramos, D.; Ortega, M.; Antayhua, Yanet.; Ancasí, R.; Ccallata, Pacsi.; Miranda, R.; Taipe, E.; Mamani, L.; Apaza, F.; Masías, P.; Valdivia, D.; Luza, C. (2019). *Informe Técnico Anual:*

*Vigilancia del volcán Ubinas, periodo 2019.* INGEMMET. Informe Técnico N° A7000.  
<https://hdl.handle.net/20.500.12544/2580>

- Rivera, M., Thouret, J.C., Samaniego, P. & Le Pennec, J.L. (2014). *The 2006-2009 activity of the Ubinas volcano (Peru): Petrology of the 2006 eruptive products and insights into genesis of andesite magmas, magma recharge and plumbing system.* Journal of Volcanology and Geothermal Research, 270, 122-141. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2013.11.010>
- Rivera, M.; 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(1-2): 19-34. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2010.07.020>
- Rivera, M.; Mariño, J.; Thouret, J. (2011). *Geología y Evaluación de Peligros del Volcán Ubinas.* Boletín N° 46 Serie C, Geodinámica e Ingeniería Geológica.
- Rose, W.; Bonis, S.; Stoiber, R; Keller, M; Bickford, T. (1973). *Studies of volcanic ash from two recent Central America eruptions.* Bulletin of Volcanology, v. 37, p. 338-364.
- Sidgurdsson Haraldur, Houghton Bruce, McNutt R. Stephen, Rymer Hazel, Stix John (2015). *The Encyclopedia of Volcanoes.* Academic Press.
- Spallet, L.A. (1980). *Paleoambientes Sedimentarios en secuencias silicoclásticas.* Serie B Didáctica y Complementaria, N° 8. Asociación Geológica Argentina. pp. Buenos Aires.
- Sparks, RSJ and Bursik, MI and Carey, SN and Gilbert, Jennifer and Glaze, LS and Sigurdsson, H and Woods, A. (1997). *Volcanic Plumes.* Wiley. ISBN 0471939013.
- Tepley, F.J., III, de Silva, S.L., and Salas, G. (2008). *Unraveling complex volcanic processes using amphibole: A case study from El Misti: Geochimica et Cosmochimica.* Acta, v. 72, no. 12, p. A941.
- White R. and McCausland, W. (2019). *A process-based model of pre-eruption seismicity patterns and its use for eruption forecasting at dormant stratovolcanoes.* Journal of Volcanology and Geothermal Research, 382, 267-297. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.03.004>