



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Instituto
Geofísico del Perú - IGP



Imagen del domo de lava en el cráter del volcán Sabancaya capturada por dron del IGP

INFORME TÉCNICO

Identificación de cambios morfológicos en el cráter del volcán Sabancaya mediante sobrevuelo de drones

Fecha: diciembre de 2019

Instituto Geofísico del Perú

Presidente Ejecutivo: Hernando Tavera

Director Científico: Danny Scipión

Autores:

John Edward Cruz Igme

Katherine Andrea Vargas Alva

Marco Rivera Porras

Este informe ha sido producido por el Instituto Geofísico del Perú

Calle Badajoz n.º 169, Mayorazgo, Ate

Teléfono: 51-1-3172300

RESUMEN EJECUTIVO

Desde el año 2016, el volcán Sabancaya viene presentando una actividad explosiva leve a moderada con la emisión de columnas de gases y cenizas que eventualmente alcanzan alturas de hasta 4 km sobre la cima del volcán. Las cenizas emitidas durante las últimas semanas vienen siendo dispersadas a más de 30 km por los vientos en direcciones suroeste, oeste y noroeste del volcán. Asociado a esta actividad, durante los últimos meses, viene ocurriendo el crecimiento de un domo de lava en el fondo del cráter de este volcán.

Los días 11 y 12 de diciembre de 2019, profesionales del Instituto Geofísico del Perú (IGP) realizaron el sobrevuelo de drones en la cumbre del volcán Sabancaya, con el objeto de identificar cambios morfológicos que ocurren en el cráter y determinar el tipo de actividad que viene presentado este volcán con fines de prevención y/o mitigación de desastres.

Los resultados obtenidos muestran la presencia de un domo de lava con un diámetro de 282 m y un volumen de $\sim 4.43 \times 10^6 \text{ m}^3$, sobre un área de 54 700 m². Este domo tiene una forma elíptica irregular, ligeramente cóncava cubierto de bloques de lava angulosos de hasta 20 m de diámetro dispersos en su superficie. El domo de lava se encuentra cerca al borde del sector norte del cráter, a solo 20 m de distancia. En este sector, el nivel de elevación del domo es ligeramente mayor al cráter, lo cual se constituye como un entorno favorable para la ocurrencia de eventuales flujos piroclásticos. Actualmente, las emisiones de gases y ceniza del Sabancaya se dan en dos sectores: uno localizado en el sector norte del domo y el otro en el borde sureste del mismo.

Respecto a la actividad volcánica futura del Sabancaya, se han identificado dos escenarios eruptivos: a) erupciones explosivas leves a moderadas, de tipo vulcanianas (IEV 1-2), con la ocurrencia de eventuales lahares y probabilidades limitadas de ocurrencia de flujos piroclásticos; b) crecimiento y colapso de domo, con la generación de flujos piroclásticos de poco volumen que pueden alcanzar distancias de hasta 8 km y podrían afectar pastizales y bofedales.

ÍNDICE

RESUMEN EJECUTIVO.....	3
1. INTRODUCCIÓN	5
1.1 OBJETIVOS.....	6
1.2 UBICACIÓN Y ACCESO.....	6
1.3 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN	7
2. DATOS Y METODOLOGÍA.....	8
2.1 VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS, PLAN DE VUELO Y LEVANTAMIENTO FOTOGRAMÉTRICO	8
2.1.1 <i>Sobrevuelos del 11 de diciembre de 2019</i>	10
2.1.2 <i>Sobrevuelos del 12 de diciembre de 2019</i>	10
2.2 PUNTOS DE CONTROL GEODÉSICO.....	10
2.3 PROCESAMIENTO DE DATOS AEROFOTOGRAMÉTRICOS PARA LA OBTENCIÓN DE UN MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN (DEM) DE TERRENO	11
3. RESULTADOS.....	13
3.1 CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DEL CRÁTER Y DOMO DEL VOLCÁN SABANCAYA	13
4. DISCUSIONES.....	16
4.1 CAMBIOS MORFOLÓGICOS DESDE 2017	16
4.2 CAMBIOS MORFOLÓGICOS OBSERVADOS EN DICIEMBRE DE 2019.....	18
5. PELIGROS VOLCÁNICOS Y ESCENARIOS ERUPTIVOS	22
5.1 PELIGROS VOLCÁNICOS.....	22
5.1.1 <i>Peligros por caídas de ceniza</i>	22
5.1.2 <i>Peligros por lahares (flujos de lodo)</i>	22
5.1.3 <i>Peligros por flujos de lava</i>	23
5.1.4 <i>Peligros por flujos piroclásticos</i>	23
5.2 ESCENARIOS ERUPTIVOS FUTUROS	23
5.2.1 <i>Primer escenario: erupción vulcaniana (IEV 1-2)</i>	23
5.2.2 <i>Segundo escenario: crecimiento de domo y colapso de domo</i>	24
CONCLUSIONES.....	25
RECOMENDACIONES.....	26
REFERENCIAS	27

1. INTRODUCCIÓN

El Instituto Geofísico del Perú (IGP) emplea diversas herramientas y métodos en el monitoreo y estudio de volcanes activos del sur peruano. Una herramienta útil empleada son los vehículos aéreos no tripulados (drones) que permiten la adquisición de fotografías de gran detalle. El procesamiento fotogramétrico de estas imágenes permite realizar mediciones e interpretaciones confiables con las que se obtienen modelos digitales de elevación de terreno de gran resolución y su reconstrucción en 3D. La aplicación de esta técnica en el monitoreo de volcanes ha demostrado ser muy eficiente, ya que ha permitido obtener resultados de alto nivel de detalle y precisión que han servido para detectar cambios morfológicos en macizos volcánicos (Diefenbach et al., 2012). Además, el uso de esta técnica disminuye el grado de exposición de los vulcanólogos de campo frente a las explosiones que puede presentar el volcán y acceder a zonas inaccesibles del mismo.

El IGP cuenta con drones de gran performance para la vigilancia de la actividad volcánica diseñados en cooperación con la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) con el financiamiento de Innóvate Perú. Estos drones son capaces de sobrevolar a altitudes superiores a los 5000 m s.n.m., sobre los macizos volcánicos que están en actividad, entre ellos los volcanes Sabancaya y Ubina.

El volcán Sabancaya es el segundo volcán más activo del sur peruano, edificado al menos durante los últimos ocho mil años. Desde el año 2016 hasta la actualidad se encuentra en proceso eruptivo. En los últimos meses, viene registrando entre 25 a 30 explosiones por día. Desde octubre de 2019, se ha logrado distinguir cambios dinámicos en su actividad debido al crecimiento del domo (cuerpo de lava) emplazado en el interior del cráter del volcán.

Los domos de lava, como el que se observa en el cráter del Sabancaya, son extrusiones de magma viscosas de formas y tamaños variables emplazadas en el interior o en inmediaciones de las estructuras volcánicas. La mayoría de estos están compuestos de un núcleo dúctil, un caparazón sólido y un talud de detritos (Hale et al., 2009). Vistos en perfil pueden ser escarpados o tabulares; vistos en planta, pueden ser circulares, elípticos o irregulares. Sus dimensiones diametrales varían desde unos metros a pocos kilómetros y su altura típicamente es de unas decenas de metros a menos de 1 km (Fink & Anderson, 2000). El ciclo de vida de un domo de lava está caracterizado por periodos de crecimiento, reposo y colapso o derrumbe.

En este informe se presentan los resultados de la campaña realizada en diciembre de 2019 en el volcán Sabancaya, durante la cual se realizó el sobrevuelo de drones para la adquisición de imágenes del cráter y cima del volcán. El análisis de estas imágenes ha permitido identificar cambios morfológicos del cráter del Sabancaya ocurridos durante los últimos meses y la presencia de un domo de lava en su interior. Los resultados obtenidos son un insumo valioso para la prevención de riesgos por erupción volcánica y sirven para mejorar el plan de contingencia frente a la erupción del volcán Sabancaya.

1.1 Objetivos

Mostrar los cambios morfológicos ocurridos en la cumbre y cráter del volcán Sabancaya ligados a la actividad explosiva actual y al crecimiento de un domo de lava mediante el sobrevuelo y análisis de imágenes de dron recientemente adquiridas. Información que nos permitirá establecer escenarios de peligros y riesgos volcánicos con fines de prevención y/o mitigación de desastres.

1.2 Ubicación y acceso

El volcán Sabancaya (15.79°S, 71.86°O; 5960 m s.n.m.) se ubica en la región Arequipa, provincia de Caylloma, distritos de Maca y Lluta (Figura 1), a 76 km al noroeste de la ciudad de Arequipa y 32 km al suroeste de Chivay.

En un radio de 30 km desde el cráter del Sabancaya, habitan alrededor de 30 mil personas distribuidas entre los distritos de Chivay, Coporaque, Ichupampa, Achoma, Lari, Madrigal, Maca, Cabanaconde, Tapay, Huanca, Lluta y Huambo.

Para acceder a la zona del volcán Sabancaya se debe tomar, desde la ciudad de Arequipa, la ruta PE-34E hasta interceptar la ruta departamental AR-109 con dirección a la localidad de Chivay. Desde allí es posible alcanzar el flanco noroeste del complejo volcánico Ampato-Sabancaya por una ruta vecinal que cruza el C.P. de Achoma. La segunda ruta de acceso corresponde a la AR-579 que circunda al edificio volcánico por el flanco este, en la zona de Cajamarca (Figura 1). La mayor parte de la vía es asfaltada, mientras que los últimos tramos antes de llegar al volcán Sabancaya corresponden a una trocha carrozable.

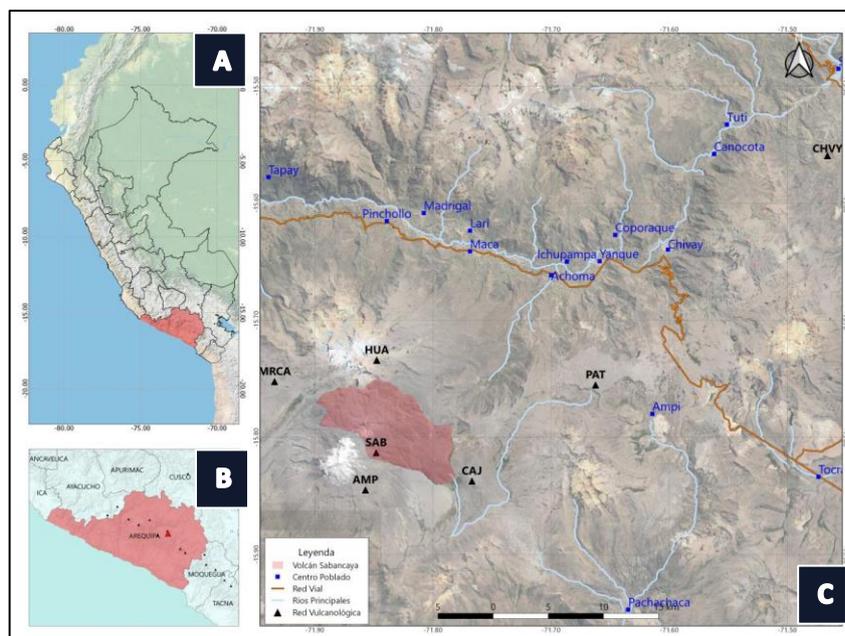


Figura 1.- (a) Ubicación de la región Arequipa sobre un Modelo de Elevación Digital del Perú; (b) Mapa político de la región Arequipa. El volcán Sabancaya está ubicado en la provincia de Caylloma; (c) Mapa de ubicación del volcán Sabancaya (sombra roja) y de los principales centros poblados.

1.3 Antecedentes y justificación

El 6 de noviembre de 2016, el volcán Sabancaya entró en un nuevo proceso eruptivo, el cual se ha mantenido en niveles bajos a moderados. Durante el 2019, el volcán Sabancaya ha presentado una actividad explosiva moderada con columnas de gases y cenizas que eventualmente alcanzaron alturas de hasta 4 km sobre la cima del volcán; ligado a esta actividad, se viene reportando caída de ceniza fina en áreas ubicadas a más de 30 km del volcán. Desde el segundo trimestre de 2019, se observa un incremento en la energía de las explosiones, así como un incremento en los valores de las anomalías térmicas asociadas a la presencia y crecimiento de un domo de lava en el fondo del cráter del volcán Sabancaya (Del Carpio & Rivera, 2019). Estas observaciones, complementadas con los datos geodésicos, indican un ligero levantamiento en el sector norte del Sabancaya, dando cuenta de la importante actividad presentada por dicho volcán.

Por otro lado, las observaciones en campo han corroborado el crecimiento de un domo emplazado en el cráter del Sabancaya que experimentó una ligera aceleración en el mes de octubre de 2019. También se observó la emisión de columnas de gases y cenizas a través de dos ventos o puntos de emisión (Puma & Del Carpio, 2019). La continuidad de la actividad del Sabancaya podría implicar el colapso parcial del domo con la generación de flujos piroclásticos que alcanzarían áreas aledañas del volcán.

La realización de vuelos de drones sobre este volcán permite la identificación de cambios estructurales, morfológicos o la aparición de cuerpos de lava generados durante el reciente proceso eruptivo. Por su gran precisión y alto nivel de detalle, las imágenes tomadas con dron permiten la generación de Modelos Digitales de Elevación de resoluciones del orden de centímetros, productos que son herramientas útiles para la estimación del riesgo de desastres. La utilización de drones sobre el volcán Sabancaya complementa de manera eficaz los trabajos de monitoreo volcánico y permiten otorgar información oportuna y fiable a las autoridades para la toma de decisiones.

2. DATOS Y METODOLOGÍA

En el Perú, el IGP es pionero en el monitoreo de volcanes utilizando vehículos aéreos no tripulados (VANT o dron). En el año 2016, el IGP realizó el primer sobrevuelo de drones en el volcán Ubinas, el cual permitió adquirir información del estado situacional de la superficie del cráter y del flanco sur del volcán. Posteriormente, en septiembre de 2018, efectuó un sobrevuelo en el Sabancaya. Los resultados de estas campañas han servido como línea de base para realizar nuevas mediciones que permiten evaluar y medir cambios en la superficie del cráter. Tras la importante actividad explosiva del Sabancaya ocurrida en los últimos meses de 2019, el 11 y 12 de diciembre de 2019 se han llevado a cabo sobrevuelos utilizando un dron de ala fija y otro dron multirotor; se han obtenido imágenes y videos que han permitido recolectar información sobre el estado actual del cráter y del domo de lava, con el fin de cuantificar posibles cambios morfológicos.

El principio básico de la fotogrametría consiste en obtener dos fotografías aéreas verticales sucesivas que enfocan un punto común del terreno. A partir de la restitución de los haces de proyección y con base en un eje de referencia relativo, se pueden determinar las coordenadas del punto.

2.1 Vehículos aéreos no tripulados, plan de vuelo y levantamiento fotogramétrico

Los vehículos aéreos no tripulados desarrollados por el IGP consisten en un dron tipo "Skywalker X8" de ala fija y un *hexacopter* multirotor (Figura 2), los cuales llevan incorporadas dos cámaras GoPro modelo HERO4 (*Silver* y *Black*). La realización de los planes de vuelo se efectuaron en gabinete haciendo uso del software *Mission Planner*, el cual permitió establecer y configurar diversos parámetros, entre ellos la ruta de desplazamiento del dron, la altura, velocidad, potencia del motor, tasa de muestreo de adquisición de imágenes, porcentaje de traslape, los puntos de despegue y aterrizaje del dron, además de otros aspectos. Asimismo, para el despegue y aterrizaje se tuvo en cuenta la orientación y velocidad promedio del viento, el tiempo de duración estimado de las baterías y un modelo de topografía regional del área de interés. Es preciso mencionar que el dron de mayor performance para la adquisición de datos fue el *Skywalker X8*. El *hexacopter* multirotor fue utilizado para la realización de pruebas de registro fotográfico en modo estático.



Figura 2.- Vehículo aéreo no tripulado "Skywalker X8" (foto de arriba) y dron multirotor (foto de abajo). Ambos vehículos fueron desarrollados por el IGP.

Tomando en cuenta las áreas de interés, los parámetros antes mencionados y los fuertes vientos que prevalecen en la zona se establecieron dos planes de vuelo para dos días de trabajo: 11 y 12 de diciembre. La adquisición del registro fotográfico para el primer y segundo día se realizó a una tasa de 3 imágenes cada 2 segundos. Es preciso señalar que en el plan de vuelo 1 se consideró el registro filmico.

En la Figura 3 se muestran el punto de despegue y planes de vuelo efectuados los días de trabajo. Cabe señalar que el área de mayor enfoque fue la zona del cráter y el sector SE del volcán Sabancaya.

2.1.1 Sobrevuelos del 11 de diciembre de 2019

- **Plan de vuelo 1:** en el marco de este plan de vuelo se realizaron dos sobrevuelos: el primero para la adquisición del registro fotográfico y el segundo vuelo para la adquisición del registro fílmico (Figura 3).

2.1.2 Sobrevuelos del 12 de diciembre de 2019

- **Plan de vuelo 2:** en este plan se adquirieron solo imágenes y se realizó solo un sobrevuelo debido a las malas condiciones del tiempo y a la intensa caída de cenizas que afectaron al dron. Durante este sobrevuelo se adquirieron imágenes del cráter y también imágenes del sector SE del Sabancaya (Figura 3).

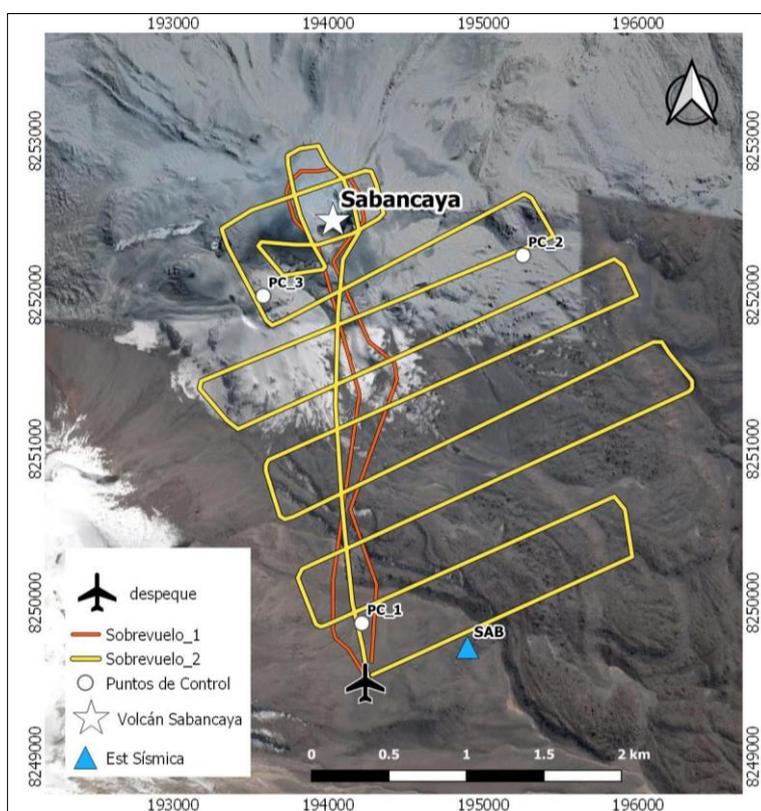


Figura 3.- Mapa que muestra la ubicación de los puntos de control (círculos blancos) y las trayectorias de los 2 planes de vuelo (líneas continuas en naranja y amarillo). Se observa que los sobrevuelos cubren principalmente la zona del cráter y el sector SE del volcán Sabancaya.

2.2 Puntos de control geodésico

Previo al sobrevuelo de los drones se llevó a cabo la instalación y medición de tres puntos de control geodésico y dos puntos referenciales, ubicados en inmediaciones del volcán Sabancaya (Figura 3, 4 y Tabla 1). Para ello, se hizo uso de instrumentos GNSS en modo RTK (Cinemático en Tiempo Real) con la finalidad de contar con puntos de referencia precisos. Las coordenadas de los puntos de control y de referencia permiten corregir y georreferenciar las fotografías aéreas y obtener un modelo de elevación de alta resolución. Cada punto de control en el terreno fue

debidamente señalado (Figura 4), de modo que dichos puntos fueran lo suficientemente visibles en las fotografías aéreas.



Figura 4.- Punto de control geodésico PC_5 (izquierda) y PC_1 (derecha). Se muestra el instrumento GNSS móvil con el cual se realiza la medición de las coordenadas del eje central del punto de control.

Para el procesamiento fotogramétrico de las imágenes se materializaron en total cinco puntos de control, destacando, por su ubicación, los puntos PC_1, PC_2 y PC_3, situados a menos de 3.5 km del cráter del Sabancaya.

Código	Coordenadas UTM este	Coordenadas UTM norte	Elevación m s.n.m.
PC_1	194215.72	8249866.04	5331.00
PC_2	195255.00	8252257.00	5518.00
PC_3	193579.00	8251994.00	5980.00
PC_4	194909.25	8248408.21	5104.00
PC_5	198038.18	8248123.14	4658.00

Tabla 1.- Coordenadas UTM WGS84 de puntos de control instalados en las proximidades del volcán Sabancaya.

2.3 Procesamiento de datos aerofotogramétricos para la obtención de un Modelo Digital de Elevación (DEM) de terreno

Para la generación del Modelo de Elevación Digital (DEM) de alta resolución se utilizó el software *Agisoft Metashape*, el cual permite crear un DEM con base en el alineamiento de imágenes utilizando la tecnología multivisor de reconstrucción 3D. Los datos de entrada fueron 364 imágenes recolectadas durante el levantamiento aerofotogramétrico y los parámetros de las cámaras utilizadas. Para la reducción de errores y proyección precisa de la nube de puntos se llevó a cabo la corrección y ajuste de imágenes utilizando las coordenadas de tres puntos de control establecidos en el terreno (Tabla 1). Como resultado, el programa genera una nube de puntos

georreferenciados a partir de la cual se texturiza la superficie del terreno digitalizada de alta resolución.

Las imágenes adquiridas que constituyen el ortomosaico fueron adquiridas durante un periodo de relativa calma del volcán.

3. RESULTADOS

El área de estudio se enfocó en el cráter y el sector sureste del volcán Sabancaya, donde se encuentran las coladas de lava recientes emitidas por dicho volcán. Con base en las aerofotografías tomadas en campo se ha generado la construcción de un Modelo Digital de Elevación (DEM) de 83 cm por pixel de resolución, con cotas máximas de elevación de 5100 a 6020 m s.n.m. El tamaño obtenido fue de 6486 x 6748 px, proyectados en el sistema de coordenadas WGS 84/UTM zona 19S (EPSG:32719). Con base en este producto se realizaron los cálculos de medida de distancias, volúmenes y curvas de nivel (Figura 5).

Otro producto obtenido ortomosaico georreferenciado, el cual consta de la unión de las imágenes adquiridas con una corrección de georreferenciación ortogonal en un archivo *Geotiff*. Este producto alcanzó una resolución de 20.7 cm y un tamaño de 25691 x 26870 m. Esta imagen permitirá realizar estudios posteriores para la identificación de estructuras volcánicas como grietas, fallas, tipos de depósitos volcánicos, etc. (Figura 5).

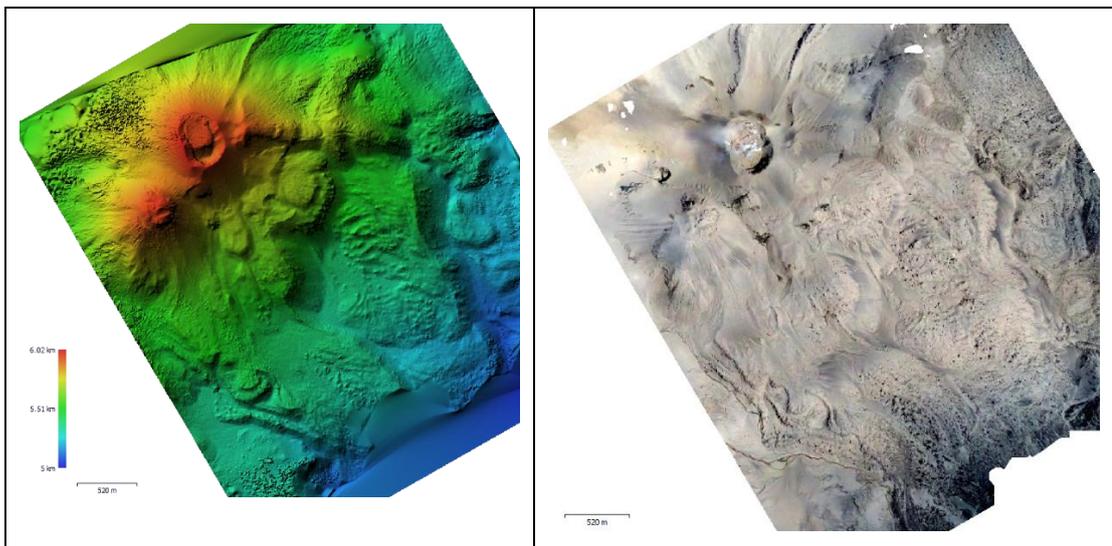


Figura 5.- Generación del Modelo Digital de Elevación (DEM) de 83 cm de resolución (izquierda) y la imagen ortomosaico de 20.7 cm de resolución (derecha).

3.1 Características morfológicas del cráter y domo del volcán Sabancaya

A lo largo del actual proceso eruptivo, las características del cráter del volcán Sabancaya fueron cambiando. Actualmente, el cráter tiene una forma semicircular, con un diámetro mayor de 486 m (Figura 6) y un diámetro menor de 331 m. Al interior del cráter, en su zona central y norte, yace un domo de lava con un diámetro máximo de 282 m y un diámetro mínimo de 221 m, con un área de aproximadamente 54 700 m².

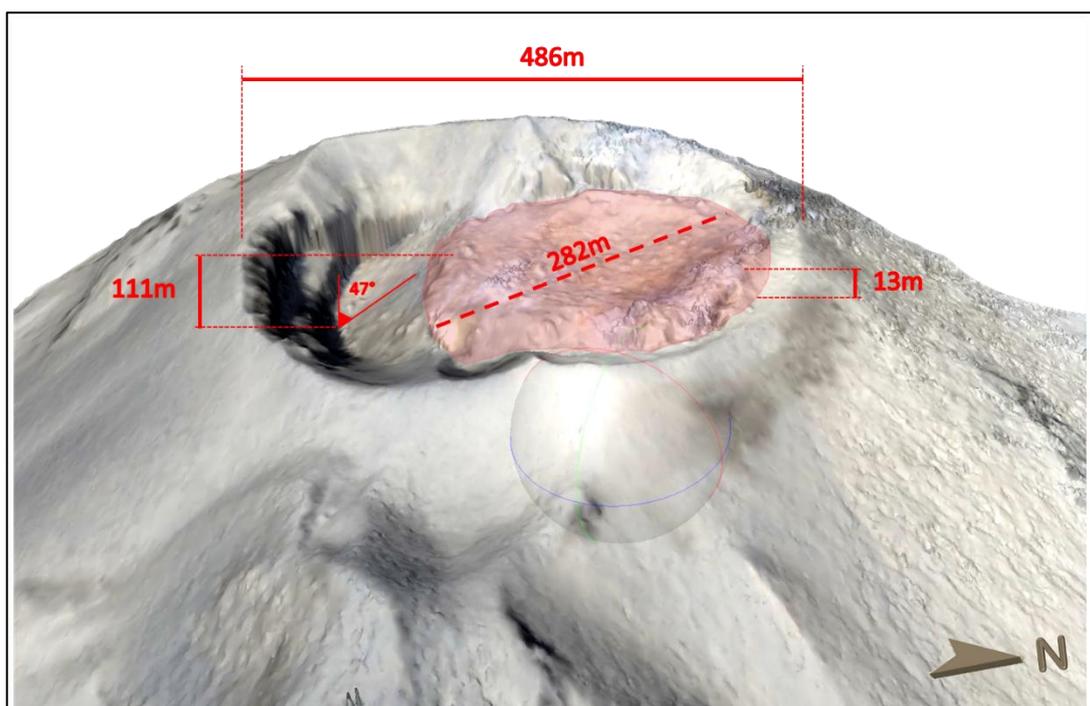


Figura 6.- Vista del cráter del volcán Sabancaya obtenido a partir del DEM de alta resolución. En su interior se puede observar el domo de lava (sombreado en rojo) con sus respectivas medidas.

El domo de lava emplazado presenta una forma elíptica irregular en su vista de planta, donde se aprecian, dispersos en su superficie, bloques de lava angulosos de hasta 20 m de diámetro. Asimismo, presenta una superficie ligeramente cóncava centrada. La cota más elevada del domo (5972 m s.n.m.) sobrepasa en 18 m el nivel del borde del cráter en el sector norte. Precisamente, en esta zona el borde del domo dista en 20 m al borde del cráter. En el sector sur se observa la parte más profunda del cráter que alcanza los 83 m de profundidad; en este sector, el frente del domo presenta una pendiente de 47°, en donde se aprecia fragmentos de roca y ceniza (Figura 6).

El procesamiento fotogramétrico de las imágenes adquiridas en los años 2018 y 2019 facilitó el cálculo del volumen del domo y proporcionó dimensiones precisas respecto a su variación morfológica. En complemento con los datos obtenidos se utilizó el método de aproximación geométrica, el cual asocia el volumen del domo a un cono truncado. Entre los datos consignados para el cálculo del volumen se tomó el valor de 124 m como radio promedio y 90 m como radio promedio menor con base en la fotogrametría utilizada en 2018. La profundidad fue obtenida con base en las proyecciones de los dos modelos, obteniendo un volumen de $\sim 4.43 \times 10^6 \text{ m}^3$ como primera aproximación.

A través de las imágenes, se han identificado zonas fumarólicas de constante emisión de gases. Es preciso señalar que las mayores emisiones se concentran en el sector norte y sector sureste del domo. También se observan emisiones fumarólicas en la pared oeste del cráter (Figura 7).

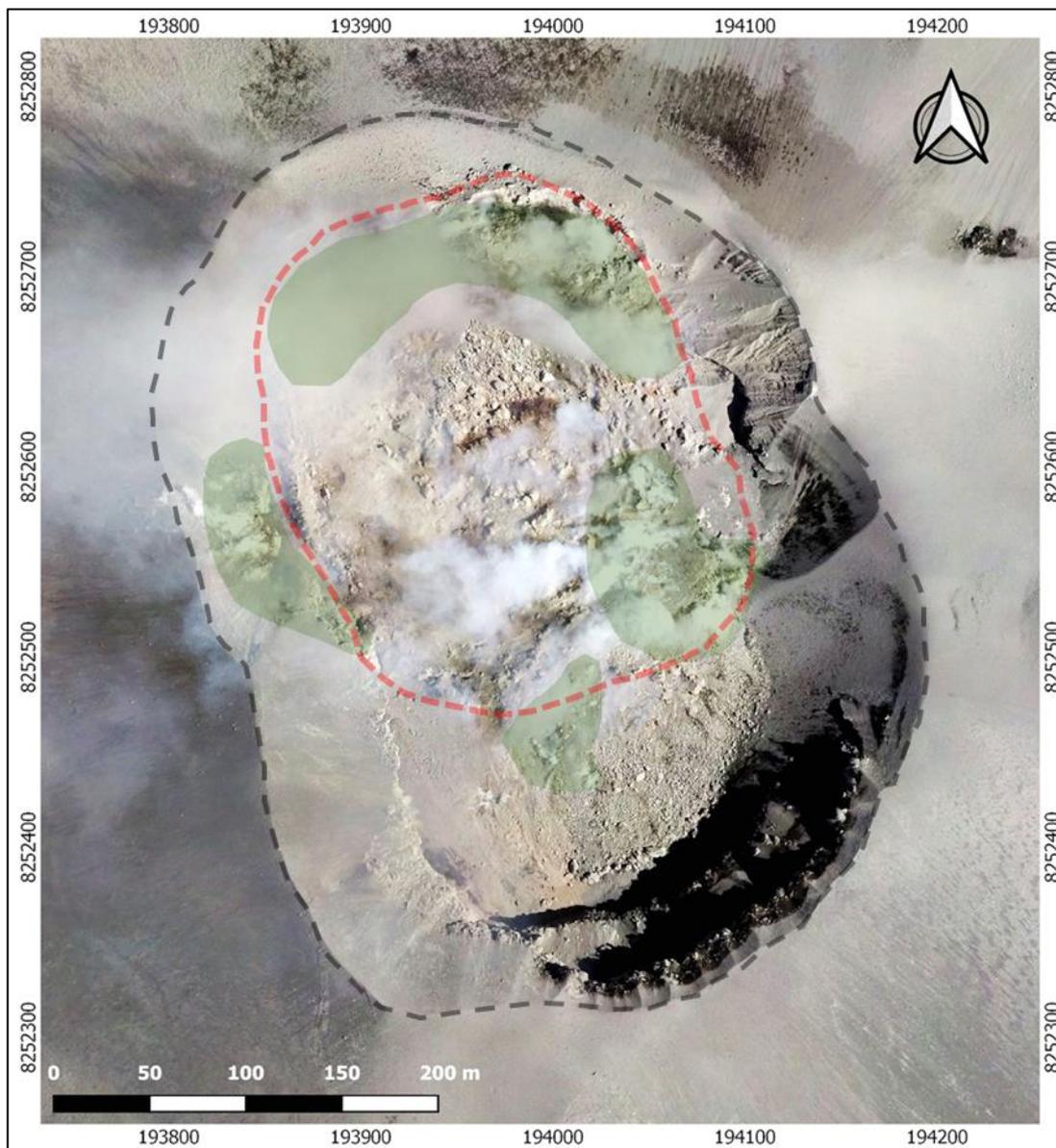


Figura 7.- Imagen corregida de la zona de cráter (líneas discontinuas en plomo muestran el borde del cráter), en cuyo interior se observa el domo del volcán Sabancaya (líneas discontinuas en rojo). Las sombras transparentes en verde representan las zonas de emisión constante de fumarolas.

4. DISCUSIONES

Los datos obtenidos a través del sobrevuelo de drones muestran cambios significativos en la morfología y características del cráter del volcán Sabancaya, en donde se aprecia un domo de lava.

4.1 Cambios morfológicos desde 2017

Desde febrero de 2017, se observaron cambios en la morfología del volcán y se distinguió un alargamiento del cráter hacia el norte del volcán, probablemente debido a la propia actividad explosiva. En esta fecha se registraron los primeros indicios de la formación del domo de lava en la zona noroeste del fondo del cráter del volcán Sabancaya, el cual está cubierto por bloques y ceniza (Figura 8).



Figura 8.- Imagen satelital Planet Scope del 5 de febrero de 2017 que evidencia la formación de un pequeño domo de lava en el sector norte del cráter del volcán Sabancaya.

En septiembre de 2018, se realizó una campaña de sobrevuelo de drones desarrollados por el IGP en cooperación con la Pontificia Universidad Católica del Perú. El resultado del procesamiento aerofotogramétrico de imágenes del cráter de este macizo durante esta fecha fue un DEM de 40 cm de resolución (Figura 9). Este modelo fue tomado como referencia para la comparación con el DEM obtenido en diciembre de 2019.

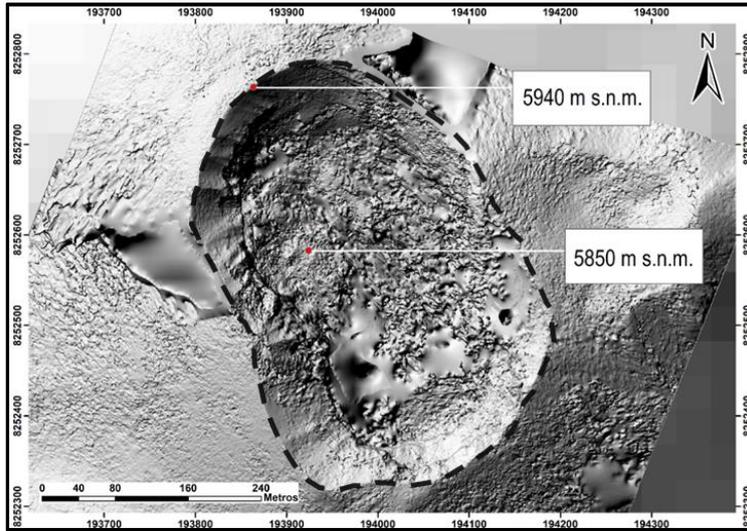


Figura 9.- Modelo de elevación digital (DEM) de alta resolución del cráter del volcán Sabancaya (líneas discontinuas) obtenido a partir del levantamiento aerofotogramétrico realizado el 17 de septiembre de 2018.

Desde octubre de 2019, se logra distinguir claramente el crecimiento significativo del domo (cuerpo de lava) emplazado en el cráter del volcán Sabancaya. Las imágenes satelitales Planet obtenidas del 11 al 21 de octubre muestran un cambio en el área del cuerpo de lava, el cual llega a duplicar la extensión del domo con respecto a las observaciones efectuadas en septiembre de 2019 (Figura 10).

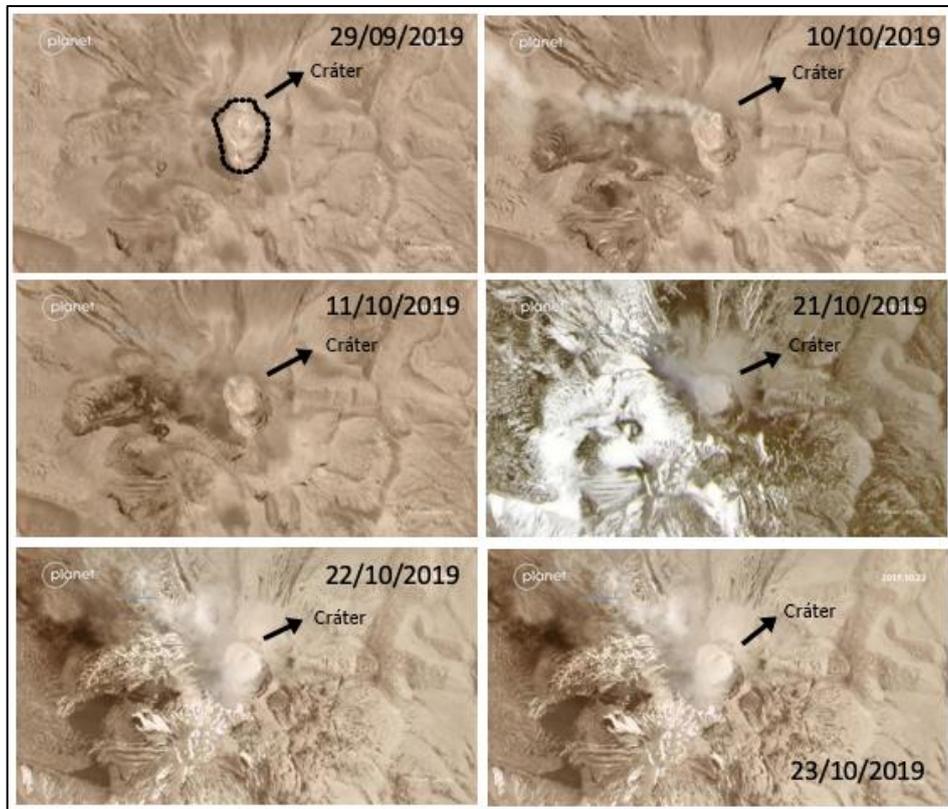


Figura 10.- Secuencia de imágenes satelitales PlanetView del cráter activo del volcán Sabancaya para el año 2019, en la cual se observa que el domo emplazado en el cráter continúa en crecimiento.

4.2 Cambios morfológicos observados en diciembre de 2019

Se han realizado diversos perfiles: N-S, O-E, NO-SE y el perfil SO-NE (Figura 11) en el DEM del cráter del volcán y se ha logrado identificar cambios notables respecto a la morfología del cráter y el crecimiento del domo. De la figura 11 se desprende que más del 60 % del área del cráter, en especial la zona centro y norte, ha sido rellenado por este domo.

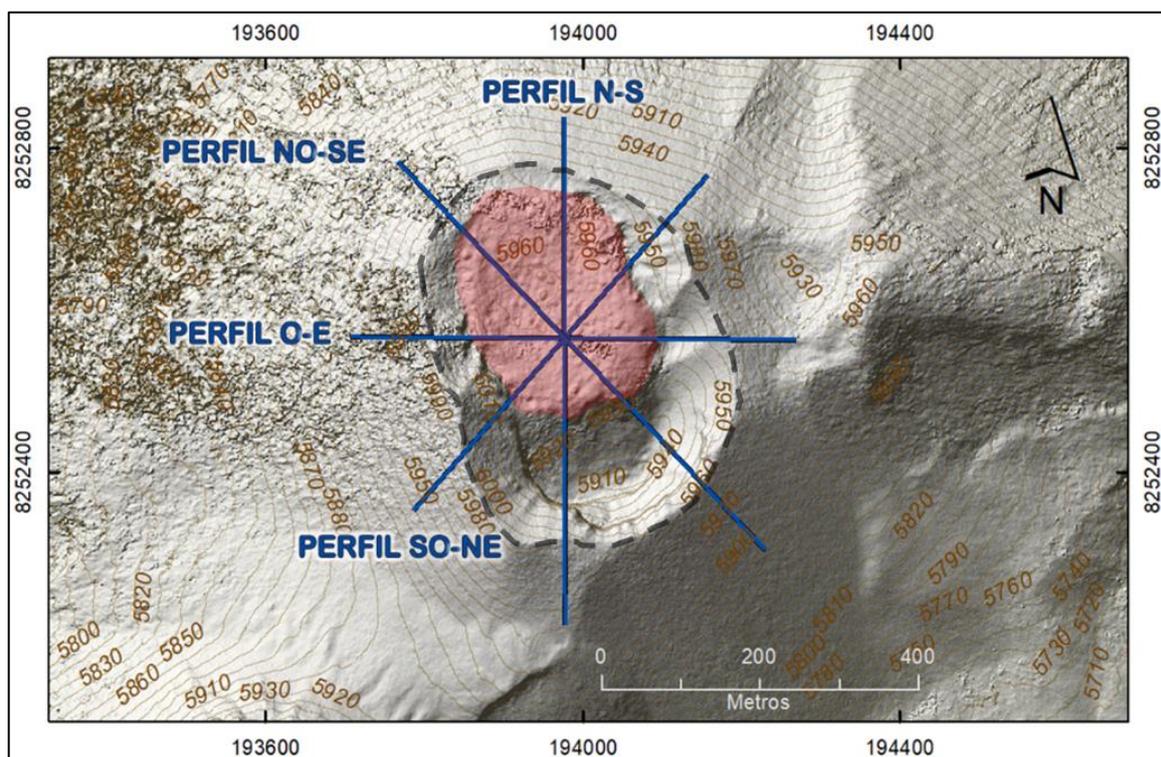


Figura 11.- Modelo de Elevación Digital (DEM) que muestra el cráter (líneas discontinuas) y el domo de lava (sombreado en rojo) del volcán Sabancaya, en el cual se han trazado cuatro perfiles. El DEM ha sido obtenido mediante el sobrevuelo de drones.

El domo de lava se encuentra muy cerca al borde del sector norte del cráter, a solo 20 m de distancia. Además, en este sector, el tope del domo está ligeramente sobre el nivel del cráter (Figura 12). En caso que el domo continúe creciendo, es por este sector donde ocurriría el colapso y el descenso de flujos piroclásticos. En el perfil obtenido se distingue que en la zona sur el domo aún no ha rellenado por completo el cráter, presentando una pendiente próxima a los 47°, lo que representa la parte más profunda del cráter con 83 m respecto a la cima.

En el perfil O-E (Figura 12) se destaca que la cota más elevada del borde del cráter alcanza los 6020 m s.n.m., ubicada en el borde oeste, zona donde también se observan constantes emisiones de gases (Figura 7). Por otro lado, es preciso señalar que la cota más elevada del domo alcanza los 5972 m s.n.m.

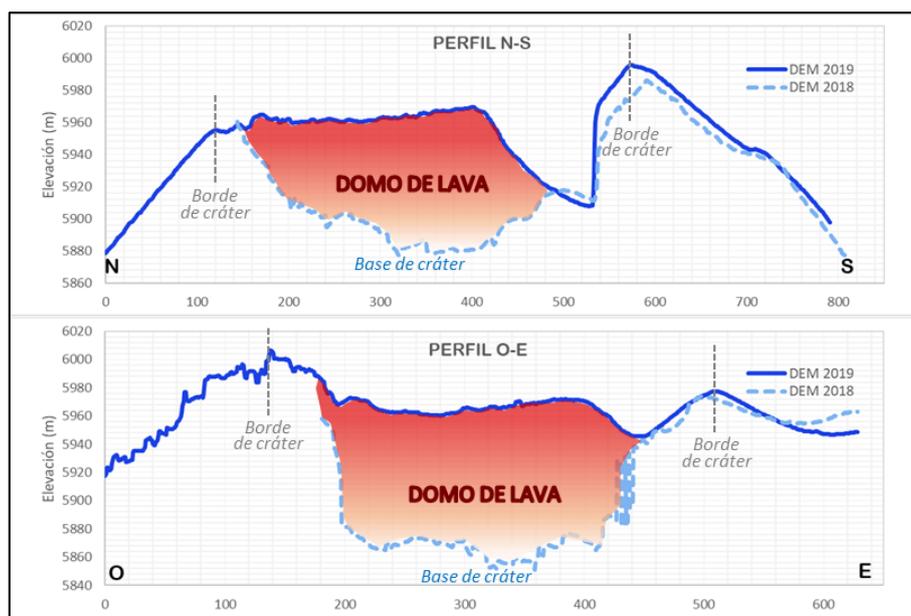


Figura 12.- Perfiles de dirección N-S y O-E del cráter del Sabancaya (líneas continuas en azul) obtenidos a partir del DEM realizado en diciembre de 2019. Las líneas discontinuas celestes corresponden al DEM obtenido en septiembre de 2018.

En el perfil NO-SE (Figura 13) se observa que el domo de lava, entre septiembre de 2018 y diciembre de 2019, creció aproximadamente 120 m verticalmente. En este perfil NO-SE también se puede apreciar que en el extremo NO del cráter hay una escasa diferencia de nivel de elevación entre el domo y el borde del cráter (Figura 13).

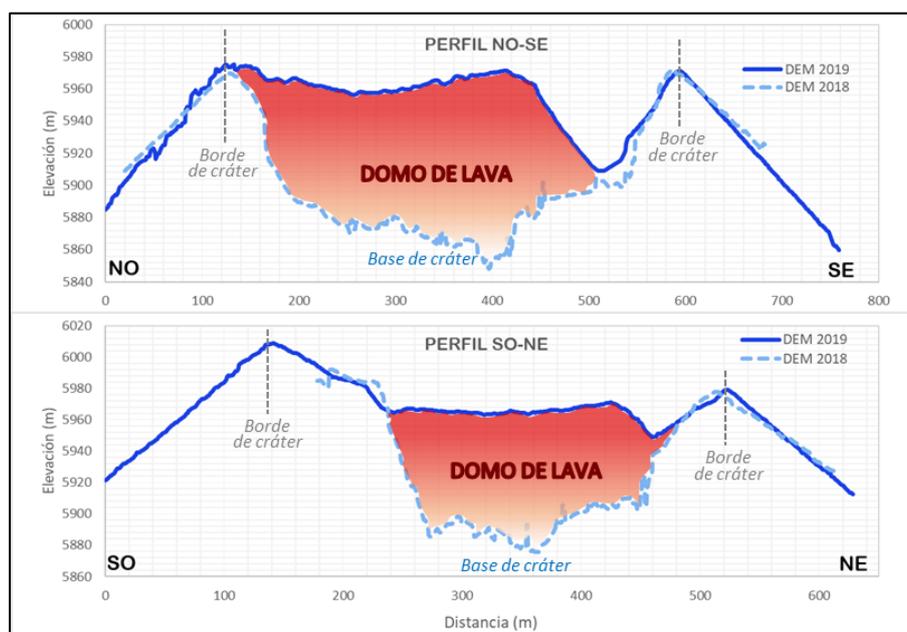


Figura 13.- Perfiles de dirección NO-SE y SO-NE del cráter del Sabancaya (líneas continuas en azul), obtenidos a partir del DEM realizado en diciembre de 2019. Las líneas discontinuas celestes corresponden al DEM obtenido en septiembre de 2018.



Figura 14.- Fotografía donde se observa el domo de lava emplazado sobre el cráter del Sabancaya.

En noviembre de 2019, registros fotográficos obtenidos por brigadas de campo del IGP evidenciaron que la parte superior del domo sobrepasa el límite de la cumbre del volcán (Figura 14). Los perfiles realizados en este trabajo confirman esta información y detallan la diferencia de altura entre el borde del cráter (sector norte) y la cota más elevada del domo en 18 m.

Por otro lado, los registros fotográficos muestran que en el sector norte del Sabancaya existen dos centros de emisión (Figura 15) por donde emanan las cenizas y gases en forma de columnas eruptivas. En ocasiones se ha observado la presencia de dos columnas eruptivas de modo simultáneo, tal como se observa en la figura 15.

Es necesario mencionar que las emisiones de gases y ceniza provienen principalmente de dos sectores: uno localizado en el sector norte del domo y el otro localizado en borde sureste del domo. Es muy posible que las zonas de emisiones se encuentren altamente fracturadas permitiendo la expulsión de materiales finos como las cenizas y gases.



Figura 15.- Fotografía donde se observan dos columnas de gases y cenizas: una emitida al norte y la otra en el sector sureste del domo.

5. PELIGROS VOLCÁNICOS Y ESCENARIOS ERUPTIVOS

En el volcán Sabancaya se han identificado peligros generados por la caída de ceniza, flujos de lava, lahares (flujos de lodo), flujos piroclásticos y avalanchas de escombros, los cuales se detallan a continuación:

5.1 Peligros volcánicos

5.1.1 Peligros por caídas de ceniza

Las erupciones explosivas emiten fragmentos de roca o piroclastos (ceniza, escoria) que son expulsados de manera violenta hacia la atmósfera y forman una columna eruptiva densa que, a veces, puede alcanzar varias decenas de kilómetros de altura. En el caso del Sabancaya, este volcán viene emitiendo cenizas desde noviembre de 2016 de manera casi permanente. Las cenizas corresponden a partículas finas (<2 mm) de magma pulverizado, las cuales pueden causar serios problemas en la salud de los habitantes del Valle del Colca en caso incrementa la actividad. Asimismo, las cenizas pueden contaminar las fuentes de agua y los pastos que sirven de alimento para el ganado camélido; de igual manera, pueden afectar cultivos, interrumpir el tráfico aéreo, entre otros. Si la actividad eruptiva actual del Sabancaya incrementara, las cenizas podrían provocar el colapso de techos de las viviendas por el peso acumulado.

5.1.2 Peligros por lahares (flujos de lodo)

Los lahares son mezclas de fragmentos de rocas volcánicas de tamaños diversos movilizados por el agua y que fluyen rápidamente (20-60 km/h). Se generan en periodos de erupción o de tranquilidad volcánica. El agua puede provenir de fuertes lluvias, fusión de hielo o nieve que yace en la cima del volcán, etc. Los lahares viajan a lo largo de quebradas o ríos y, eventualmente, pueden desbordarse tal como ocurrió con los lahares que destruyeron la ciudad de Armero en Colombia luego de la erupción del volcán Nevado del Ruiz en noviembre de 1985. El área que podría ser afectada dependerá del volumen de agua y de los materiales sueltos (arena, bloques) incorporados en el trayecto del lahar, así como de la pendiente y topografía de los valles o quebradas que surcan el volcán. Los lahares pueden alcanzar grandes distancias (>100 km).

El Sabancaya puede presentar este tipo de peligro, ya que anteriormente, en periodos de lluvia, se han generado lahares. Actualmente, hay ceniza acumulada en las laderas del volcán, la cual fue emitida o lo largo de su actual proceso eruptivo. Ante la ocurrencia de lluvias excepcionales, el agua y la ceniza pueden mezclarse y generar lahares que pueden discurrir por las quebradas y valles.

Pueden descender lahares por las quebradas que drenan del volcán Sabancaya (quebradas Mollebaya, Colihuiri, Sallalli y Sahuancaya-Pujro Huayj) e incluso por las quebradas que drenan por los volcanes Ampato y Hualca-Hualca. Los lahares causarían graves daños en terrenos de cultivo, carreteras, puentes, sobre todo si

descienden por las quebradas que drenan del volcán Hualca-Hualca, entre ellas quebrada Mollebaya-Río Sepina (Achoma), río de Hualca Hualca, quebrada Japo, quebrada Huayuray, entre otras.

5.1.3 Peligros por flujos de lava

Los flujos de lava son corrientes de roca fundida que son expulsadas por el cráter o fracturas existentes en los flancos de un volcán. Pueden desplazarse de manera lenta por las quebradas y valles. En Perú, los flujos de lava alcanzaron comúnmente poco más de 8 km de distancia del centro de emisión. En el Sabancaya, las lavas emitidas por este volcán fueron viscosas. En caso de ser emitidas en el actual proceso eruptivo, estas podrían recorrer poco más de 6 km de distancia. Estos flujos de lava pueden cubrir todo a su paso; sin embargo, no representan peligro para las personas debido a su baja velocidad de desplazamiento (de algunos metros por día), lo que permitiría realizar la evacuación oportuna de estancias localizadas en áreas cercanas al volcán.

5.1.4 Peligros por flujos piroclásticos

Los flujos piroclásticos son mezclas calientes (300 °C a 800 °C) de ceniza, fragmentos de roca y gases (Nakada, 2000) que descienden por los flancos del volcán al ras de la superficie y a grandes velocidades (100-300 m/s) (Hoblitt et al., 1995). Su desplazamiento transita por las laderas de un volcán para luego encauzarse por quebradas o valles. Estos flujos destruyen y calcinan todo lo que encuentran a su paso.

Anteriormente, no se han registrado flujos piroclásticos en el volcán Sabancaya. Sin embargo, en la actualidad, dado al crecimiento de un domo de lava en el cráter del volcán, es posible la generación de flujos piroclásticos de bajo a moderado volumen (menos de 0.0001 km³), los cuales recorrerían hasta 6 u 8 km de distancia del volcán. Dado que dentro de un radio de 8 km del volcán no existen poblados u obras de infraestructura, el riesgo que representa este tipo de peligro es bajo.

5.2 Escenarios eruptivos futuros

A continuación, se presentan posibles escenarios eruptivos futuros asociados a la actividad explosiva del volcán Sabancaya y al crecimiento del domo de lava visible en el cráter de este volcán.

5.2.1 Primer escenario: erupción vulcaniana (IEV 1-2)

Actualmente, el volcán Sabancaya viene generando explosiones que consecuentemente emiten ceniza y eventualmente expulsan bloques balísticos que caen en áreas próximas al volcán, típico de una actividad vulcaniana. Las explosiones se dan en intervalos de minutos a horas. Como resultado de estas explosiones, se generan columnas eruptivas de gases y cenizas de menos de 6 km de altura.

La última actividad del volcán Sabancaya, ocurrida entre los años 1988 y 1998, presentó dinamismos de tipo vulcaniano. La ceniza fue dispersada entre 20 km y 30

km al este del volcán. Luego de las explosiones, se expulsaron proyectiles balísticos en un radio de 2 km alrededor del cráter (Guillande et al., 1992; Thouret et al., 1994).

Por otro lado, los depósitos de caída de ceniza identificados por Samaniego et al., (2016) en las calicatas efectuadas al sureste y este del volcán Sabancaya, muestran capas de cenizas ligadas a erupciones leves a moderadas de tipo vulcaniano con IEV 1-2. Por lo antes citado, se concluye que la posibilidad de que el Sabancaya continúe con un dinamismo explosivo tipo vulcaniano es alto.

La actividad explosiva actual del Sabancaya puede erosionar y destruir en parte el domo de lava, como ha sido visualizado el día 11 de diciembre, durante el cual hubo explosiones con emisión de bloques incandescentes arrancados del domo que cayeron en el flanco norte del volcán.

También, es frecuente la formación de lahares durante la ocurrencia de este tipo de erupciones, sobre todo si consideramos que en inmediaciones del volcán Sabancaya ocurren lluvias intensas durante los meses de diciembre a marzo. Esto sucedió en el anterior proceso eruptivo (1988-1998), donde se generaron lahares en quebradas aledañas al volcán Sabancaya, Ampato y Hualca Hualca, específicamente en noviembre de 1990 y mayo de 1995 (GVN, 1995). Durante este proceso, algunos lahares alcanzaron el río Colca, situado a más de 15 km al norte del cráter del Sabancaya. En dicha ocasión, se trataron de lahares de pequeño volumen, posiblemente de 0.5 a 1 millón de m³.

Los lahares causarían graves daños en terrenos de cultivo y carreteras como la vía Chivay-Huambo, además de puentes, sobre todo si descienden del volcán Hualca Hualca. Los lahares pueden descender por la quebrada Mollebaya-río Sepina (Achoma), río de Hualca Hualca y la quebrada Huayuray.

Durante erupciones vulcanianas moderadas (IEV 2), también pueden generarse flujos piroclásticos de poco volumen y limitado alcance. En efecto, los flujos piroclásticos pueden alcanzar poco más de 6 km de distancia del cráter sin afectar la vida de los pobladores de la zona.

5.2.2 Segundo escenario: crecimiento de domo y colapso de domo

Actualmente, en el cráter del volcán Sabancaya se visualiza un domo de lava de 282 m de diámetro. El crecimiento de este domo por la extrusión de magma puede generar flujos piroclásticos (flujos incandescentes de bloques y cenizas) que pueden desplazarse principalmente por el flanco norte de dicho volcán y alcanzar distancias de hasta 8 km del volcán, afectando terrenos de pastizales y bofedales. Los flujos pueden desplazarse al ras del suelo a velocidades mayores de 50 m/s (Miller, 1989). Desde luego, asociado a este escenario, el Sabancaya puede continuar generando explosiones moderadas con la emisión de cenizas.

CONCLUSIONES

- Actualmente, el volcán Sabancaya presenta una actividad explosiva leve a moderada con emisión de columnas de gases y cenizas que eventualmente alcanzan alturas de hasta 4 km sobre la cima del volcán. Durante los últimos meses, la ceniza viene siendo dispersada en dirección suroeste, oeste y noroeste del volcán. Se ha reportado caída de ceniza fina en áreas ubicadas a más de 30 km de distancia del volcán.
- A raíz de la presencia de un domo de lava en el cráter del volcán, en diciembre de 2019 se realizó el sobrevuelo de drones en el cráter del volcán Sabancaya para la adquisición de imágenes de alta resolución. El análisis de estas imágenes, comparadas a imágenes y DEM obtenidos en septiembre de 2018 con este mismo método, ha permitido identificar cambios morfológicos en el cráter del Sabancaya y, sobre todo, la presencia de un domo de lava emplazado en su interior.
- El domo de lava se ha emplazado en el sector centro y norte del cráter del volcán Sabancaya. Este tiene aproximadamente 282 m de diámetro, con un volumen aproximado de $4.43 \times 10^6 \text{ m}^3$. Dicho domo presenta una forma elíptica irregular con una superficie ligeramente cóncava que, su cota más elevada, sobrepasa en 18 m al sector norte del borde del cráter.
- El domo de lava se encuentra muy cerca al borde del sector norte del cráter, a solo 20 m de distancia. En este sector el nivel de elevación del domo es ligeramente mayor al cráter, lo cual se constituye como un entorno favorable para la ocurrencia de flujos piroclásticos.
- Las emisiones de gases y ceniza provienen principalmente de dos sectores: uno localizado en el sector norte del domo y el otro localizado en el borde sureste del domo. Es muy posible que las zonas de emisiones se encuentren altamente fracturadas, lo que permite la expulsión de materiales finos como las cenizas y gases.
- Respecto a la actividad volcánica futura en el volcán Sabancaya, se han identificado dos escenarios eruptivos: a) erupciones explosivas leves a moderadas, de tipo vulcanianas (IEV 1-2), con la ocurrencia de eventuales lahares y probabilidades limitadas de ocurrencia de flujos piroclásticos. Este escenario tiene mayor probabilidad de ocurrir o seguir ocurriendo; b) crecimiento y colapso de domo, con la generación de flujos piroclásticos de poco volumen que pueden alcanzar distancias de hasta 8 km y podrían afectar pastizales y bofedales.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda mantener el nivel de alerta volcánica en color naranja.
- No acercarse a un radio menor de 12 km del cráter. Toda aproximación o ascenso al volcán es de muy alto riesgo.
- Ante el registro de precipitaciones pluviales, la probabilidad de generación de lahares es latente. En ese escenario, se recomienda a la población alejarse del lecho de ríos y quebradas.
- En caso de caída de cenizas, la población debe evitar el contacto con este material, cubrirse la nariz y boca con paños húmedos o mascarillas, además de mantener cerradas las puertas y ventanas de las viviendas.
- Las instituciones competentes deben realizar una evaluación permanente del impacto de las cenizas en el agua, suelo, cultivo, pastos naturales y animales, especialmente en zonas donde se viene registrando la caída de ceniza.
- Implementar acciones de prevención y mitigación ante un incremento de la actividad volcánica.
- Mantenerse informado en todo momento sobre la actividad volcánica del Sabancaya mediante los reportes emitidos por el IGP: (<http://www.igp.gob.pe/servicios/centro-vulcanologico-nacional/>).

REFERENCIAS

- Del Carpio, J. & Rivera, M. (2019). *Evaluación geofísica del comportamiento dinámico actual del volcán Sabancaya, periodo enero-octubre de 2019. Informe Técnico. Repositorio Instituto Geofísico del Perú.*
- Diefenbach, A. K., Crider, J. G., Schilling, S. P., & Dzurisin, D. (2012). *Rapid, low-cost photogrammetry to monitor volcanic eruptions: an example from Mount St. Helens, Washington, USA. Bulletin of volcanology, 74(2), 579-587.*
- Fink, J., Anderson, S. (2000). *Lava domes and coulees, en Sigurdsson, H. Encyclopedia of Volcanoes (307-319), Londres: Academic Press.*
- Guillande, R.; Thouret, J.-C.; Huamán, D. & Le Guern, F. (1992) - *L'activité éruptive actuelle du volcan Nevado Sabancaya (Sud du Pérou) et l'évaluation des menaces et des risques: géologie, cartographie et imagerie satellitaire, informe inédito. Paris: Ministère de L'Environnement et Centre National d'Etudes Spatiales, 120 p.*
- Hale, A.J, Calder, E.S., Wadge, G., Loughlin, S.C, Ryan, G.A. (2009). *Modelling the lava dome extruded at Soufrière Hills Volcano, Montserrat, August 2005-May 2006: Part I: Dome shape and internal structure. Journal of Volcanology and Geothermal Research, vol. 187, n°1-2, pp. 53-68.*
- Hoblitt, R.P.; Walder, J.S.; Driedger, C.L.; Scott, K.M.; Pringle, P.T. & Vallance, J.W. (1995) - *Volcano Hazards from Mount Rainier, Washington. U.S. Geological Survey, Open-File Report 95-273, 10 p.*
- Miller C., (1989) - *Potencial Hazards from Future Volcanic Eruptions in California. U.S. Geological Survey Bulletin 1847, United States, 17 p.*
- Nakada, S. (2000) - *Hazards from pyroclastic flows and surges. En: Sigurdsson, H.; Houghton, B.F.; McNutt, S.R.; Rymer, H. & Stix, J., eds. Encyclopedia of volcanoes. San Diego, CA: Academic Press, p. 945-955.*
- Puma, N., & Del Carpio, J. (2019). *Actividad eruptiva del volcán Sabancaya: observaciones de campo realizadas entre el 25 de noviembre al 1 de diciembre de 2019. Informe técnico. Repositorio Instituto Geofísico del Perú.*
- Thouret, J.-C.; Guillande, R.; Huamán, D.; Gourgaud, A.; Salas, G. & Chorowicz, J. (1994) - *L'activité actuelle du Nevado Sabancaya (Sud Pérou): reconnaissance géologique et satellitaire, évaluation et cartographie des menaces volcaniques. Bulletin Société Géologique de France, 165(1): 49-63.*