

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE GEOLOGÍA Y PETRÓLEOS

UNIDAD DE TITULACIÓN

**CARTOGRAFÍA DE ALTA RESOLUCIÓN Y CARACTERIZACIÓN
FÍSICO-QUÍMICA DE LOS FLUJOS DE LAVA DE LAS FISURAS 2 Y
6 DE LA ERUPCIÓN DE 2018 DEL VOLCÁN SIERRA NEGRA**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA GEÓLOGA**

PAOLA DOMINIQUE PAZMIÑO AGUIAR

dominique.p.a1998@gmail.com

DIRECTOR: PHD. BENJAMIN PIERRE THIBAUT BERNARD

bbernard@igepn.edu.ec

DMQ, Septiembre 2022

CERTIFICACIONES

Yo, PAOLA DOMINIQUE PAZMIÑO AGUIAR declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.



PAOLA DOMINIQUE PAZMIÑO AGUIAR

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por PAOLA DOMINIQUE PAZMIÑO AGUIAR, bajo mi supervisión.



PhD. BENJAMÍN PIERRE THIBAUT BERNARD
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

PAOLA DOMINIQUE PAZMIÑO AGUIAR

BENJAMIN PIERRE THIBAUT BERNARD

DEDICATORIA

A mi mamita Laura por ser la más grande inspiración y motivación de toda mi vida. Mi más grande admiración a usted por ser la mujer más fuerte que conozco, por enseñarme los principios y valores que ahora poseo, y por sacrificar todo para que mi ñaño y yo cumplamos nuestros sueños.

A mi papá Guillermo y hermano Fabri por apoyo y cariño durante toda mi vida, en especial durante este camino.

A toda mi familia por creer en mí y mediante sus oraciones, palabras y consejos me alentaron para cumplir mis metas y propósitos.

A mi Dieguito y Ruffito por todo ese amor peludo que me han brindado a través de los años.

AGRADECIMIENTO

A papito Dios y a la virgencita María por todas las bendiciones, protección y los dones que me han brindado durante toda mi vida.

A mi mamita Laura por todo el amor desinteresado que una madre puede brindar. Gracias a ti, soy lo que soy el día de hoy. Gracias por ser mi gran apoyo. ¡Te amo infinitamente!

A mi papá Guillermo por apoyarme de una u otra forma durante toda mi vida académica, nunca olvidaré esos días en los que me enseñabas matemáticas. ¡Gracias!

A mi hermano Fabricio por ser mi compañero de aventuras desde que tengo memoria, y por prestarme todo tu equipo geológico durante la carrera.

A Kelvin quien estuvo conmigo durante mi vida universitaria apoyándome, alentándome, aconsejándome, cuidándome, compartiendo momentos tristes y felices, pero sobre todo confiando en mi potencial aun cuando yo lo dudaba.

A Namie por ser mi primera poliamiga que conocí en el prepo, las aventuras en esta etapa han sido únicas.

A mis amigos de mi promoción de Geología en especial a: Dani C., Jannis, Isma, por ser los primeros amigos que conocí en la carrera, casi todos los campos en los que estuvimos juntos y todas las aulas de clase en las que compartimos.

A Dani V., Dani M., Yadi, Fer, Emi, Diego, Migue por ser ese grupo unido a lo largo de toda la carrera, esos campos fueron inolvidables con ustedes.

A mis amixes del Club de Geología por esa locura que se nos ocurrió hace casi 2 años: Dani C., Emi, Yadi, Isma, Fer y Dani V.

Al Dr. Benjamin Bernard por la guía, los consejos, la paciencia y sobre todo la confianza que depositó en mí para la realización de este trabajo.

A todos mis profesores de la Facultad de Geología y Petróleos de la EPN por las enseñanzas impartidas a lo largo de mi formación universitaria.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES	II
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	III
DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTO	V
ÍNDICE DE CONTENIDO	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	X
ÍNDICE DE ANEXOS.....	X
RESUMEN.....	XI
ABSTRACT	XII
1.1 Objetivo general	1
1.2 Objetivos específicos.....	2
1.3 Alcance.....	2
1.4 Marco teórico.....	3
Contexto Geodinámico	3
Volcanismo en Galápagos	5
Volcán Sierra Negra	7
Geología	7
Morfología	8
Elementos mayores y elementos traza.....	8
Actividad reciente.....	9
Conceptos generales.....	10
Volcanes tipo escudo	10
Conos de salpicadura y escoria	11
Fisuras eruptivas.....	11
Flujos de lava	12
Kipukas	13
Levees	13
2 METODOLOGÍA.....	15
2.1 Cartografía de alta resolución de la fisura 2 y 6 de la erupción del volcán Sierra Negra 1: 5000	15
2.2 Estimación del volumen del campo de lava de la fisura 2	19
2.3 Estimación de los parámetros reológicos.....	22
2.4 Descripción de la petrografía	25

2.5	Análisis geoquímicos	27
3	RESULTADOS, DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	28
3.1	Resultados	28
	Cartografía de alta resolución de la fisura 2 y 6 de la erupción del volcán Sierra Negra 1: 5000 y estimación de volumen del campo de lava de la fisura 2	28
	Estimación de los parámetros físicos y reológicos.....	32
	Fisura eruptiva 2	32
	Fisura eruptiva 6	34
	Descripción petrográfica de las lavas de la fisura 2 y 6.....	35
	F2-01A.....	35
	F2-02	37
	F2-03	37
	F6-01	37
	Análisis geoquímico.....	38
3.2	Discusión.....	41
	Orientación de las fisuras eruptivas	41
	Cronología de eventos.....	43
3.3	Conclusiones.....	45
3.4	Recomendaciones.....	47
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	48
5	ANEXOS.....	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Provincia Volcánica de Galápagos mostrando los principales elementos tectónicos, morfológicos y geológicos y la configuración tectónica entre el archipiélago de Galápagos y, América Central y del Sur. Cordilleras de Cocos, Carnegie, Coiba y Malpelo. El rango de edad del rastro de Cocos frente a la costa de Costa Rica (Werner et al., 1999) y de la Isla Malpelo (Hoernle et al., 2002); los datos de edad sobre la Placa de Nazca (Sinton et al., 1996). Movimiento relativo de las placas según Kellogg y Vega (1995). W. D. L. = Lineamiento de Wolf-Darwin. (Tomado de: Werner et al., 2003).	3
Figura 1.2. Evolución tectónica de GVP durante los últimos ~20 Ma. (Modificado de: Sallarès & Charvis, 2003).	5
Figura 1.3. Ubicación de islas en el Archipiélago de Galápagos en relación con el centro de expansión de Galápagos. El eje aproximado postulado del hotspot actual de Galápagos (círculo sólido) es de (Hooft et al., 2003). La flecha continua muestra la dirección del movimiento (91 °E) de la placa de Nazca (Hey y Vogt, 1977) (Tomado de: Gibson & Geist, 2010). Los sitios de vulcanismo activo reciente se muestran mediante cuadrados sólidos. A) Morfología de los volcanes occidentales y B) Morfología de los volcanes orientales (Tomado y modificado de: Harpp & Geist, 2018).	6
Figura 1.4. Diagramas Harker de elementos mayores vs. MgO (wt%) de muestras de las Islas Galápagos (IG), Cordillera de Carnegie (CC) y Placa de Nazca (PN). Tomado de (Hidalgo & Samaniego, 2009).	7
Figura 1.5. Mapa geológico del Volcán Sierra Negra. Tomado de (Bernard, 2022). Modificado de (Reynolds et al., 1995). Incluye los límites de (Geist et al., 2008; Vasconez et al., 2018) para las erupciones de 2005 y 2018 respectivamente.....	8
Figura 1.6. Diagrama de variación Sílice-Magnesio de 29 lavas de Sierra Negra. Los símbolos corresponden a unidades estratigráficas. La tendencia predicha es hacia el agotamiento del Si (Reynolds & Geist, 1995).	9
Figura 1.7. A) Morfología de volcán escudo con caldera del volcán Sierra Negra vista desde el aire. Tomado de: EIDiario.ec. B) Vista de los conos de escoria y salpicadura formados durante la erupción del volcán Sierra Negra en 2018 (Foto: B. Bernard, IG-EPN). C) Cono de salpicadura (Foto: B. Bernard, IG-EPN). D) Fisura circunferencial de la erupción de 2015 del volcán Wolf. Tomado de (Bernard et al., 2019).	10
Figura 1.8. Mapa morfológico que muestra la distribución de las fisuras radiales (color azul) y fisuras circunferenciales (color rojo) del volcán Wolf. Tomado de (Perez, 2019). .	11
Figura 1.9. A) Flujo Pāhoehoe y B) Flujo ‘A’ā y levee natural proyectados en el sistema de coordenadas Universal Transverse Mercator (UTM), Zona 15S, WGS84.Tomado de (B. Bernard; IGEPN).	13
Figura 1.10. Vista aérea del Carey Kipuka (Craters of the Moon, 2021).....	13
Figura 1.11. Desarrollo del canal ‘A’ā y levees desde el emplazamiento de (i) flujo disperso inicial, a través de (ii-iii) formación de levees de transición (escombros), terminando con la formación de (iv) levees de desbordamiento y finalmente (v) levees de deformación. Cada zona se caracteriza así por una morfología de levees cada vez más compleja. Modificado de Lipman y Banks, 1987. Tomado de (Harris y Rowland, 2015)...	14
Figura 2.1. Interfaz del Georreferenciador para la ortofotografía de la fisura 2, parte 1. ...	16
Figura 2.2. Interfaz de la hoja de cálculo con los valores estadísticos como: diferencia, máximo, mínimo, mediana, promedio (media), desviación estándar, límites y frecuencia usados para calcular el histograma de frecuencias.....	17
Figura 2.3. Histograma de frecuencias para el MDE de la F2-P1 mostrando una distribución normal o Gaussiana.	17

Figura 2.4. Metodología general para la cartografía de alta resolución.	18
Figura 2.5. Interfaz de Terrain Profile para exportar la información de los perfiles topográficos.	20
Figura 2.6. Cálculo del espesor estimado ponderado del lóbulo utilizando la ecuación 2.1.	21
Figura 2.7. Cálculo de la propagación de errores en el volumen utilizando la ecuación.	22
Figura 2.8. Esquema donde se muestran las mediciones realizadas en cada perfil topográfico. Arriba: lóbulo bien formado; Abajo: levee.	23
Figura 2.9. Ilustración de la metodología seguida para el cálculo de la pendiente del lóbulo (Calderón, 2022).	24
Figura 2.10. Instrumentos utilizados para el análisis petrográfico. Izquierda: Máquina de impregnación. Derecha: Microscopio petrográfico del Laboratorio del Instituto Geofísico EPN.	26
Figura 2.11. Trituración de muestras de roca. Izquierda: mortero de titanio. Derecha: Molino de ágata Retsch RM 200 (Calderón, 2022).	27
Figura 3.1. Cartografía a detalle (1: 5000) del campo de lava emitido en la fisura 6, Sierra Negra- 2018. WGS 84/UTM zona 15S.	28
Figura 3.2. Campo de lava de la fisura eruptiva 2 dividido en sectores.	30
Figura 3.3. Cartografía del campo de lava de la fisura 2 y 6 de la erupción de 2018 Sierra Negra. Este proyecto (campo anaranjado). Vasconez et al. (2018) (campo azul).	31
Figura 3.4. A) Cartografía del campo de lava con el flujo de lava estudiado junto con los perfiles topográficos realizados (líneas rojas). B) Ampliación de una sección del flujo de lava del perfil 6 principal con sus respectivos perfiles auxiliares. C) Representación de los perfiles topográficos, a la derecha de cada perfil se muestra el espesor promedio calculado, la línea roja representa la base del flujo de lava de 2018.	32
Figura 3.5. A) Vesículas, fenocristales de clinopiroxeno (F2-01A). B) Macla polisintética de un fenocristal de plagioclasa en una matriz microlítica de plagioclasa (F2-01A). C) Matriz microlítica de plagioclasa con vesículas con bordes de opacos(F2-02). D) Macla polisintética de plagioclasa en una matriz de vidrio (F2-02). E) Fenocristal del clinopiroxeno corroído con opacos y fenocristal de plagioclasa (F2-03). F) Cúmulo de plagioclasa en una matriz vítrea (F2-03). G) Vesícula ovalada con matriz vítrea y microlitos de plagioclasa (F6-01). H) Fenocristal de plagioclasa con macla polisintética y fenocristales de clinopiroxeno (F6-01).	36
Figura 3.6. Diagrama AFM (Álcalis: Na ₂ O+K ₂ O; F: FeO+Fe ₂ O ₃ ; M: MgO) para las rocas de la fisura 2 y 6 de la erupción del volcán Sierra Negra de 2018. La línea divisoria fue determinada por Irvine y Baragar (1971).	39
Figura 3.7. Diagrama álcalis total – sílice (TAS) de las muestras para la fisura 2 y 6. (Le Maitre- IUGS,1989).	39
Figura 3.8. Diagramas Harker: Elementos mayores vs SiO ₂ . Expresados en porcentaje en peso (Simbología en la Figura 3.6 y 3.7).	40
Figura 3.9. Diagramas Harker: Elementos traza vs SiO ₂ . Expresados en porcentaje en peso (Simbología en la Figura 3.6 y 3.7).	41
Figura 3.10. A) Mapa planimétrico del volcán Sierra Negra mostrando zonas eruptivas donde se puede observar con tendencia E-NE (fisuras circunferenciales y radiales) y fisuras radiales en el flanco norte similar a la fisura 2 y 6. B) Acercamiento a la zona de fisuras de la fisura eruptiva 2, donde se observa la orientación de los segmentos de fisura. C) Acercamiento a la zona de fisuras de la fisura eruptiva 6, donde se observa la orientación de los segmentos de fisura. Tomada y modificado de Reynolds et al. (1995), los límites rojizos representan los campos de lava de la erupción de 2018, para la fisura 2	

fueron obtenidos en este trabajo y para el resto de fisuras los datos fueron tomados de (Vasconez et al., 2018).....	42
Figura 3.11. Campo de esfuerzos en la cumbre del volcán Sierra Negra. Las flechas y los círculos sólidos indican una orientación de esfuerzo. 1: esfuerzo máximo; 2: esfuerzo intermedio; 3: esfuerzo mínimo (Reynolds et al. 1995).	43
Figura 3.12. Depósitos de la fisura eruptiva 2. A) Primer pulso. B) Segundo pulso temprano. C) Segundo pulso tardío. D) Distribución de los depósitos de lava de la fisura eruptiva 2.....	44

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Mediciones y estimación del volumen (<i>bulk</i>) de los sectores y el campo de lava.....	30
Tabla 3.2. Constantes físicas, parámetros morfológicos y reológicos del flujo de lava analizado de la fisura eruptiva 2.	33
Tabla 3.3. Espesores máximos de los perfiles analizados sobre el campo de lava de la fisura eruptiva 6.	35

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO I	
CARTOGRAFÍA DE ALTA RESOLUCIÓN DEL CAMPO DE LAVA DE LA FISURA ERUPTIVA 2. VOLCÁN SIERRA NEGRA 2018, GALÁPAGOS.....	52
ANEXO II	
ESTIMACIÓN DE VOLÚMENES.....	53
ANEXO III	
MEDICIONES MORFOLÓGICAS Y PARÁMETROS REOLÓGICOS DE LA FISURA ERUPTIVA 2.....	63
ANEXO IV	
ESTIMACIÓN DE ESPESORES MÁXIMOS DE LA FISURA ERUPTIVA 6.....	74
ANEXO V	
ANÁLISIS PETROGRÁFICO EN LÁMINA DELGADA, FISURA 2 y 6	80
ANEXO VI	
ANÁLISIS QUÍMICOS EN ROCA TOTAL, FISURA 2 y 6	88

RESUMEN

La erupción de junio de 2018 del volcán Sierra Negra ubicado en la isla Isabela, Galápagos, emitió flujos de lava a través de 6 fisuras eruptivas localizadas en el flanco norte y noroccidental.

En este trabajo se cartografió parte de la fisura eruptiva 2 y 6, ubicando elementos del campo de lava como: contactos internos, *levees*, eje del flujo, bordes externos y *kipukas* que permitió deducir que existieron al menos dos pulsos eruptivos durante el período de actividad de la fisura 2.

La estimación del área del campo de lava de la fisura 2 fue de $8.32 \pm 0.004 \text{ E}+05 \text{ m}^2$, el volumen total (bulk) y DRE del campo de lava dio como resultado $6.76 \pm 0.65 \text{ E}+05 \text{ m}^3$ y $5.07 \pm 0.49 \text{ E}+05 \text{ m}^3$ (asumiendo un porcentaje de espacios vacíos del 25%) respectivamente, y un espesor promedio para todo el campo de lava de $0.76 \pm 0.71 \text{ m}$.

La estimación de parámetros reológicos se los realizó en un flujo de lava donde se calculó un valor promedio de viscosidad de $3.52 \pm 0.2 \text{ E}+4 \text{ Pa s}$ con una velocidad promedio de $0.10 \pm 0.01 \text{ m/s}$ que muestra que el emplazamiento de este flujo de lava pudo tardar mínimo a 4 ± 0.2 horas. Se estimó una tasa de efusión mínima de $4.4 \pm 0.3 \text{ m}^3/\text{s}$. Y para el campo de lava, se estimó una tasa de efusión de $10\text{-}16 \text{ m}^3/\text{s}$ con un tiempo de duración de la erupción de 19 a 30 horas como lo reportó (Calderón, 2022).

La petrografía y geoquímica de la fisura 2 y 6 revelaron una similar y restringida composición de las lavas pāhoehoe y escorias basálticas (%SiO₂: 47.45-48.28), confirmando que la viscosidad no ha sido afectada por cambios químicos.

PALABRAS CLAVE: Sierra Negra, Galápagos, erupción, cartografía, volumen, reología.

ABSTRACT

June 2018 eruption of the Sierra Negra volcano located on Isabela Island, Galapagos, emitted lava flows through 6 eruptive fissures located on the northern and northwestern flank.

In this work, part of the eruptive fissure 2 and 6 was mapped, locating elements of the lava field such as: internal contacts, *levees*, flow axis, outer edges and *kipukas* that allowed to deduce that there were at least two eruptive pulses during the period of activity of fissure 2.

The estimate of the area of the lava field of fissure 2 was $8.32 \pm 0.004 \text{ E}+05 \text{ m}^2$, the total volume (bulk) and DRE of the lava field resulted in $6.76 \pm 0.65 \text{ E}+05 \text{ m}^3$ and $5.07 \pm 0.49 \text{ E}+05 \text{ m}^3$ (assuming a percentage of empty spaces of 25%) respectively, and an average thickness for the entire lava field of $0.76 \pm 0.71 \text{ m}$.

The estimation of rheological parameters were made in a lava flow where an average viscosity value of $3.52 \pm 0.2 \text{ E} + 4 \text{ Pa s}$ was calculated with an average speed of $0.10 \pm 0.01 \text{ m/s}$ that shows that the location of this lava flow could take at least 4 ± 0.2 hours. A minimum effusion rate of $4.4 \pm 0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ was estimated. And for the lava field, an effusion rate of $10\text{-}16 \text{ m}^3/\text{s}$ was estimated with an eruption duration time of 19 to 30 hours as reported (Calderón, 2022).

The petrography and geochemistry of fissure 2 and 6 revealed a similar and restricted composition of pāhoehoe lavas and basaltic slags (%SiO₂: 47.45-48.28), confirming that viscosity has not been affected by chemical changes.

KEYWORDS: Sierra Negra, Galapagos, eruption, cartography, volume, rheology.

1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

El volcán Sierra Negra ubicado a 23 km al NW de Puerto Villamil en la isla Isabela, archipiélago de Galápagos, es uno de los volcanes escudo más activos del archipiélago. Su último periodo eruptivo fue el 26 de Junio del 2018, y estuvo caracterizada por la emisión de flujos de lava que cubrieron un área total de 30.6 km² a lo largo de cinco fisuras ubicadas en los flancos N y NW (Vasconez et al., 2018). Posteriormente Bernard et al. (2022) reporta una sexta fisura ubicada entre la fisura 2 y 4. Esta erupción es un notable ejemplo de que el volcán Sierra Negra representa el mayor peligro volcánico en el archipiélago de Galápagos (Santa María y Bernard, 2018).

Reynolds (1996) describe seis tipos de peligros volcánicos asociados al volcán Sierra Negra: flujos de lava, emisión de gas volcánico, precipitación de tefra, deformación del terreno, explosiones freatomagmáticas y tsunamis.

El mayor peligro que puede provocar el volcán Sierra Negra son los flujos de lava, y existe mayor probabilidad de que las erupciones futuras se originen desde los centros históricos de actividad eruptiva localizados en el flanco norte superior del volcán, que es la zona con mayor riesgo (Reynolds, 1996).

Tilling (1989) describe al peligro volcánico como cualquier aspecto de una erupción que tiene el potencial de dañar la biota o causar destrucción de la propiedad, mientras que, el riesgo asociado con un peligro específico incluye todas las consecuencias esperadas del peligro.

Es importante realizar varios estudios de las etapas pre-eruptivos y eruptivos de los volcanes de Galápagos, especialmente en Sierra Negra debido a que es el único volcán activo que se encuentra cerca de una población humana permanente como es Puerto Villamil, ubicada al sur de la isla Isabela.

Este trabajo se centra en el estudio cartográfico y físico-químico de las fisuras 2 y 6 de la erupción de 2018 cuyos resultados obtenidos aportarán a los insumos que se requieren para evaluar el peligro volcánico a partir de simulaciones numéricas y en consecuencia evitar el riesgo que puede generar a la población humana permanente, y a la flora y fauna endémica de la isla Isabela.

1.1 Objetivo general

Obtener los datos cuantitativos vulcano-físicos y geoquímicos de alta resolución espacial de las fisuras 2 y 6 de la erupción de 2018 del volcán Sierra Negra y de sus productos para comprender los procesos eruptivos.

1.2 Objetivos específicos

1. Establecer la cartografía de alta resolución de los flujos de lava 2 y 6 de la erupción del 2018 en el volcán Sierra Negra.
2. Determinar las características físicas de los flujos de lava 2 y 6 de la erupción del 2018 en el volcán Sierra Negra.
3. Detallar la composición química y las características petrográficas de los flujos de lava 2 y 6 de la erupción del 2018 en el volcán Sierra Negra.

1.3 Alcance

El trabajo de integración curricular incluye realizar la cartografía a una escala de 1: 5000 de los flujos de lava de las fisuras 2 y 6 de la erupción de 2018 del volcán Sierra Negra donde se usarán cuatro ortofotografías para la fisura 2, y tres ortofotografías para la fisura 6 con una resolución <5 cm/px en todas las ortofotografías. Esto permitirá mapear límites externos de los campos de lava y, estructuras internas de las fisuras y de los flujos de lava como: centros de emisión, fisuras eruptivas, eje del flujo, *levees* y contactos internos, con la ayuda de un Sistema de Información Geográfica (SIG) de software libre Quantum GIS (QGIS).

Para la caracterización física de las fisuras y los flujos de lava se usarán cuatro y tres modelos digitales de elevación (MDE) para las fisuras 2 y 6 respectivamente, con una resolución de <10 cm/px que permitirá calcular el espesor y volumen de los depósitos, y estimar los parámetros eruptivos de la fuente (orientación y dimensiones de la fisura eruptiva, descarga magmática) y la reología de la lava (viscosidad, límite elástico, velocidad) por medio del uso de fórmulas empíricas propuestas por distintos autores.

Adicionalmente los datos físicos serán completados por seis análisis químicos para la fisura 2, y un análisis químico para la fisura 6, donde se clasificarán las composiciones geoquímicas del magma mediante el análisis de elementos mayores y trazas. En conjunto a ello, se realizará el análisis petrográfico de cuatro láminas delgadas (tres para la fisura 2, y una lámina delgada para la fisura 6) de los productos eruptivos proximales y distales (escoria, lava Pāhoehoe y lava 'A'Ā) donde se describirán detalladamente las composiciones minerales y texturas (burbujas, vesículas) que ayudarán a comprender los procesos magmáticos pre-eruptivos.

1.4 Marco teórico

Contexto Geodinámico

El archipiélago de Galápagos, ubicado a 1000 km al W de las Costas ecuatorianas, se formó a partir de la interacción entre el punto caliente de Galápagos que comenzó su actividad desde el Cretácico Superior (~75-100 Ma) y la dorsal Cocos-Nazca (Duncan & Hargraves, 1984). Esto permitió la orogenia de las cordilleras volcánicas submarinas de Carnegie y Cocos como resultado de un exceso de magmatismo durante la reorganización de placas.

Esta orogenia comenzó con la ruptura de la placa de Farallón en una dirección ENE, la cual originó las placas de Cocos y Nazca hace 22.7 Ma gracias a la expansión oceánica y a la apertura de la dorsal Cocos-Nazca (Barckhausen et al., 2001).

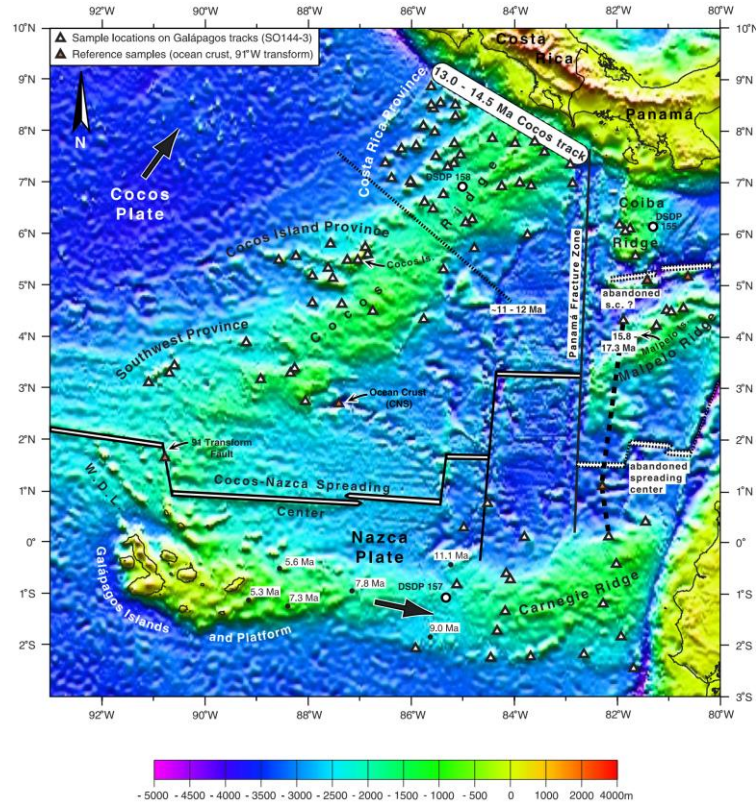


Figura 2.1. Provincia Volcánica de Galápagos mostrando los principales elementos tectónicos, morfológicos y geológicos y la configuración tectónica entre el archipiélago de Galápagos y, América Central y del Sur. Cordilleras de Cocos, Carnegie, Coiba y Malpelo. El rango de edad del rastro de Cocos frente a la costa de Costa Rica (Werner et al., 1999) y de la Isla Malpelo (Hoernle et al., 2002); los datos de edad sobre la Placa de Nazca (Sinton et al., 1996). Movimiento relativo de las placas según Kellogg y Vega (1995). W. D. L. = Lineamiento de Wolf-Darwin. (Tomado de: Werner et al., 2003).

Además, estas cadenas montañosas (Carnegie y Cocos) son el rastro del movimiento de las placas Nazca y Cocos durante los últimos 20 Ma (Hey, 1977; Lonsdale & Klitgord, 1978; Sallares et al., 2009; Sallarès & Charvis, 2003; Werner et al., 2003).

En base a datos magnéticos y batimétricos se ha podido generar varios modelos de evolución tectónica del archipiélago de Galápagos y en contraste, la tectónica actual de Galapagos se relaciona directamente a la interacción entre las placas de Nazca, Cocos y Pacífico (Lonsdale, 1988; Kellogg & Vega, 1995; Trenkamp et al., 2002). La placa de Cocos está subduciendo debajo de Mesoamérica a una velocidad de $79^{\circ} \pm 14$ km/Ma con una tendencia de $N44^{\circ} \pm 11^{\circ}E$ según el modelo predicho por Sallarès & Charvis (2003). Por otro lado, la placa de Nazca está subduciéndose bajo la placa Sudamericana con una tendencia E a una velocidad de 57 km/Ma (Sinton et al., 1996).

El modelo de evolución de la Provincia Volcánica de Galápagos (GVP) propuesto por Sallarès & Charvis (2003) divide en 5 etapas alrededor de 20 Ma para explicar la configuración tectónica del punto caliente de Galápagos y la dorsal Cocos-Nazca (Figura 1.2). Estas etapas son:

Etapa 1 (~20 Ma): Hace ~20 Ma la dorsal se encuentra sobre la pluma mantélica, pero genera un salto cambiando la geometría y orientación a $N74^{\circ} E$ con una velocidad de propagación menor, esto genera que se forme una corteza oceánica gruesa concentrada en la dorsal, que genera las cordilleras de Carnegie y Malpelo.

Etapa 2 (~15 Ma): El último salto de la dorsal se produce ~14.5 Ma, produciendo probablemente la Zona de Fractura Inca (IFZ) y posterior a ello, la configuración actual de las cordilleras submarinas. Alrededor de los 12 Ma, la IFZ migra por encima del punto caliente en sentido E-W lo que genera una separación de las cordilleras Cocos y Carnegie.

Etapa 3 (~10 Ma): Apertura de la zona de Fractura de Panamá (PFZ) debido al bloqueo de la subducción en América Central al E de la placa de Cocos. Mientras que, al W, la subducción y la expansión del fondo marino de la dorsal continúa, y posteriormente, la dorsal migra hacia el N, produciendo que el segmento E de Cocos se adhiera a la placa de Nazca, y debido al movimiento dextral a lo largo de PFZ genera la ruptura de la cordillera de Cocos derivando hacia el S a Malpelo. Durante este proceso, la dorsal pasó sobre el punto caliente, y hasta la actualidad se ha ido alejando hasta llegar a la ubicación actual.

Etapa 4 (~5 Ma): La IFZ se encuentra al E del punto caliente y Malpelo se separa de Cocos completamente debido a la PFZ. Carnegie se encuentra al S del punto caliente, y Cocos al N del punto caliente.

Etapa 5 (Presente): Corresponde a la configuración actual de la GVP que es el resultado de la interacción entre Cocos-Nazca, las dorsales y el punto caliente, las cuales generaron las cordilleras de Carnegie y Cocos.

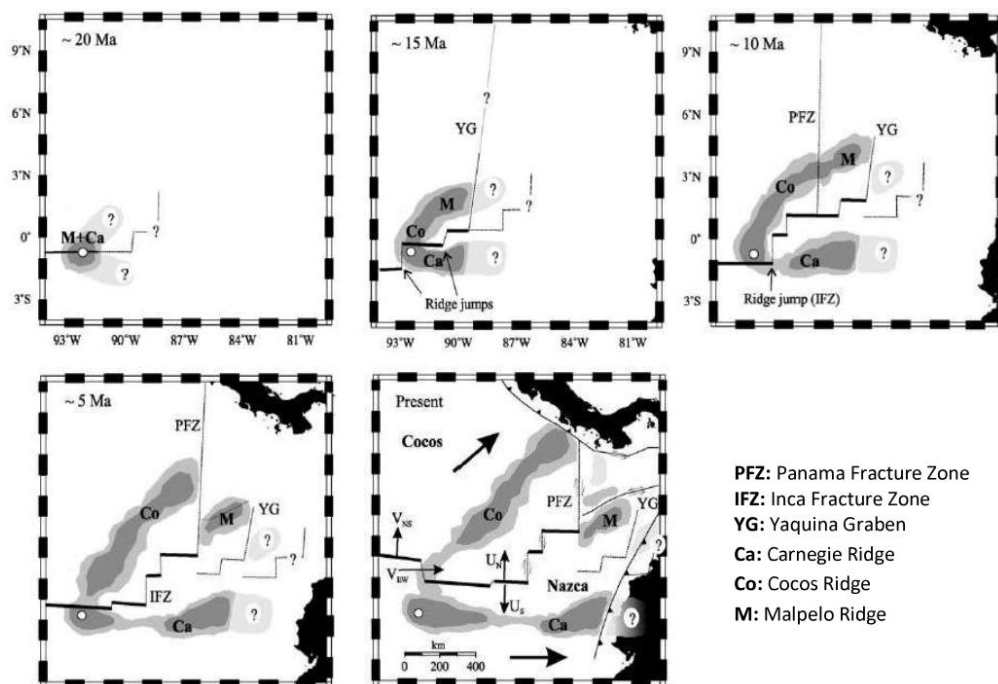


Figura 2.2. Evolución tectónica de GVP durante los últimos ~20 Ma. (Modificado de: Sallarès & Charvis, 2003).

Volcanismo en Galápagos

La ubicación actual del punto caliente de Galápagos se encuentra bajo a la isla Fernandina e Isabela, que se encuentran más al occidente del archipiélago y presentan actividad volcánica reciente (Gibson & Geist, 2010; Harpp & White, 2001; Vidito et al., 2013).

De acuerdo con el modelo de pluma mantélica, las edades de las islas Galápagos siguen el patrón de edad creciente hacia el E, en la dirección del movimiento de las placas. La isla Española, tiene una edad de ~3 Ma, seguida de cerca por la isla Santa Fe, con ~2.7 Ma, y San Cristóbal con ~2.3 Ma. La gran mayoría de las erupciones históricas han sido en Isabela y Fernandina, en el occidente del archipiélago (Harpp & Geist, 2019).

Además, Harpp & Geist (2018) en su estudio brindan un enfoque alternativo a la evolución de las Islas Galápagos, los cuales se denotan en la diferencia que existe entre

los volcanes orientales y occidentales del archipiélago en características como la edad, morfología (Figura 1.3), aporte de magma y composición.

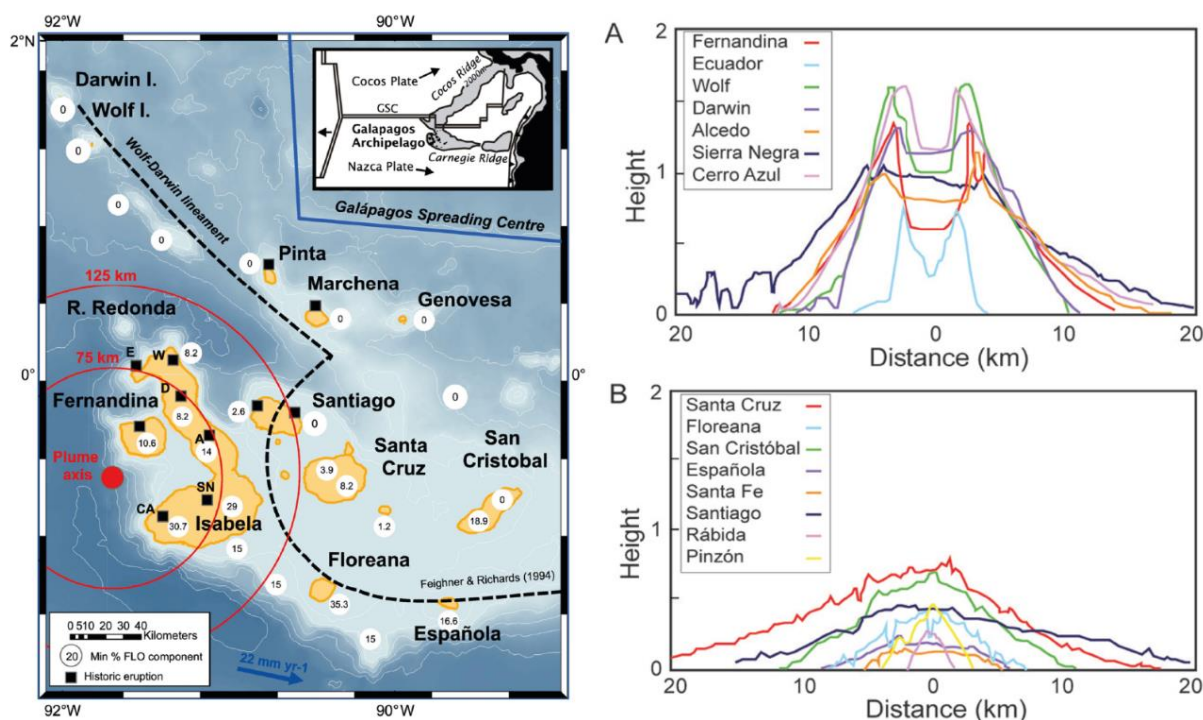


Figura 2.3. Ubicación de islas en el Archipiélago de Galápagos en relación con el centro de expansión de Galápagos. El eje aproximado postulado del hotspot actual de Galápagos (círculo sólido) es de (Hooft et al., 2003). La flecha continua muestra la dirección del movimiento (91 °E) de la placa de Nazca (Hey y Vogt, 1977) (Tomado de: Gibson & Geist, 2010). Los sitios de vulcanismo activo reciente se muestran mediante cuadrados sólidos. A) Morfología de los volcanes occidentales y B) Morfología de los volcanes orientales (Tomado y modificado de: Harpp & Geist, 2018).

De acuerdo con diversos estudios geoquímicos, las lavas de las Islas Galápagos comprenden un amplio rango de composiciones que van desde tipo OIB enriquecidas y radiogénicas en los sectores oeste y sur del archipiélago, hasta tipo MORB, cuyas lavas son empobrecidas y poco radiogénicas en la parte centro y norte del archipiélago, similares a una roca de dorsal (Geist et al., 1988; White et al., 1993; Geist et al., 1998; Harpp y White, 2001; Blichert-Toft y White, 2001).

Las muestras de las Islas Galápagos presentan elementos mayores con contenidos más restringidos de SiO₂: 48% y MgO: 14% y, muestras más diferenciadas entre 50-52% de SiO₂ y 5-6% de MgO (Geist et al., 2002, 2006; Harpp et al., 2003; White et al., 1993).

Las rocas de las Islas Galápagos muestran mayores contenidos de K₂O, Na₂O, y TiO₂ que las muestras de la Placa Nazca, con un contenido similar de MgO. El TiO₂ presenta valores más altos respecto a las muestras de la Placa Nazca (Figura 1.4) (Hidalgo & Samaniego, 2009).

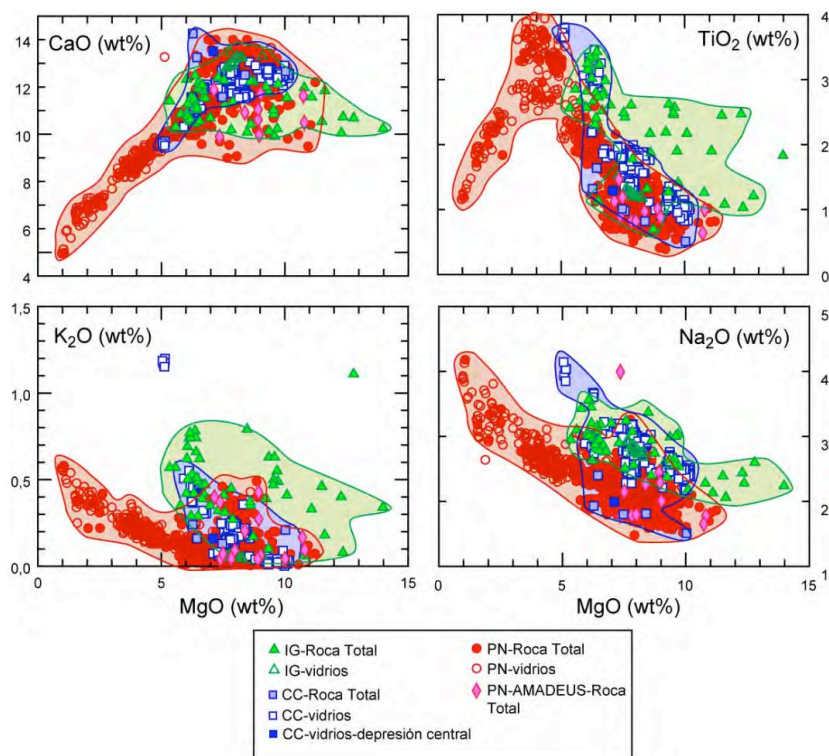


Figura 2.4. Diagramas Harker de elementos mayores vs. MgO (wt%) de muestras de las Islas Galápagos (IG), Cordillera de Carnegie (CC) y Placa de Nazca (PN). Tomado de (Hidalgo & Samaniego, 2009).

Volcán Sierra Negra

El volcán Sierra Negra se encuentra ubicado al S de la Isla Isabela, en el archipiélago de Galápagos (Lat: 0.83°S, Lon: 91.17°W, h: 1124 m snm). Es un volcán tipo escudo elíptico alargado en dirección WSW-ENE de 60 × 40 km de área y un volumen ~700 km³ (Bernard, 2017).

Geología

El volcán Sierra Negra emergió hace ~700 000 años con una tasa de emisión de lava entre 1-12 millones de m³/año. (D. Geist, 1997; Reynolds et al., 1995). Diversas erupciones han cubierto ~90% de su superficie en los últimos 4500 años debido a la alta tasa eruptiva. Este volcán se caracteriza por la predominancia de flujos de tipo “A’A” (Reynolds et al., 1995). En los últimos 200 años, las zonas más activas del volcán se encuentran al N de la caldera, el borde de la caldera y la zona conocida como Volcán Chico (Figura 1.5) (Delaney et al., 1973; Reynolds et al., 1995). Las lavas tienen texturas holocristalinas, afaníticas a poco porfírica con minerales de Plagioclasa ± Olivino ± Clinopiroxeno (Bernard, 2017).

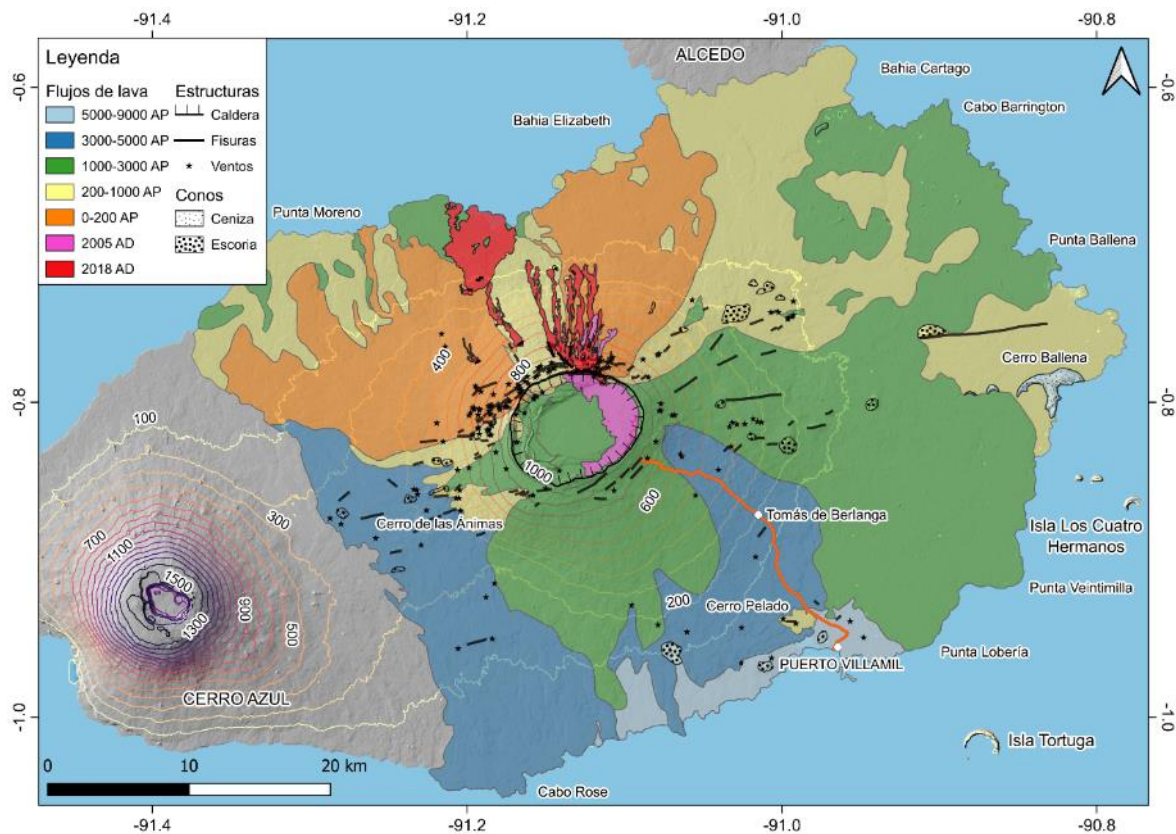


Figura 2.5. Mapa geológico del Volcán Sierra Negra. Tomado de (Bernard, 2022). Modificado de (Reynolds et al., 1995). Incluye los límites de (Geist et al., 2008; Vasconez et al., 2018) para las erupciones de 2005 y 2018 respectivamente.

Morfología

Sierra Negra es un volcán tipo escudo que presenta una plataforma con pendientes bajas menores a 5° al pie del volcán, pendientes más pronunciadas mayores a 10° en los flancos entre 950 y 1050 m snm, y una cumbre que se encuentra ocupada por una gran caldera (Mouginis-Mark et al. 1996). La caldera del Sierra Negra corresponde a una depresión de 110 m de profundidad y una forma elíptica de dimensiones 9.3×7.4 km (Munro and Rowland 1996). En sus flancos se encuentran numerosas fisuras eruptivas circunferenciales y radiales con pequeños conos (Bernard, 2017).

Elementos mayores y elementos traza

Las composiciones de elementos mayores de las lavas de Sierra Negra son intermedias entre las de las dorsales oceánicas y las de Hawái. La tendencia de las lavas de Sierra Negra obtenidas de las fisuras, la cumbre, los flancos, y todas las unidades estratigráficas del volcán están restringidas en MgO: 4.4- 6.9 % y MgO: 5-6 % (Reynolds & Geist, 1995).

En el diagrama de Sílice-Magnesio (Figura 1.6) se observa una dispersión de más del 1.5 % en sílice, lo que sugiere tanto un enriquecimiento como un agotamiento del sílice con diferenciación.

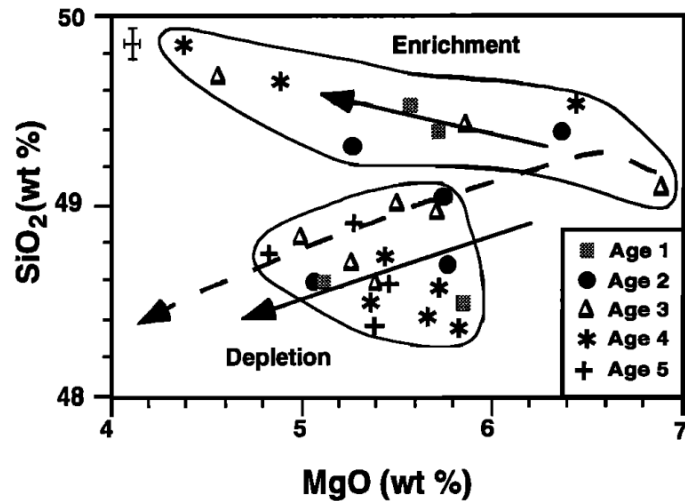


Figura 2.6. Diagrama de variación Sílice-Magnesio de 29 lavas de Sierra Negra. Los símbolos corresponden a unidades estratigráficas. La tendencia predicha es hacia el agotamiento del Si (Reynolds & Geist, 1995).

Otros diagramas de elementos mayores muestran que el Al_2O_3 , FeO y CaO disminuyen al aumentar el MgO, mientras que TiO_2 , K_2O y Na_2O aumentan a medida que disminuye el MgO (Reynolds & Geist, 1995).

Las tendencias de enriquecimiento de Ti y Fe observadas en las lavas de Sierra Negra se han observado durante mucho tiempo como características de las tholeítas del W de Galápagos (McBirney & Williams, 1969).

Las abundancias de elementos trazas altamente incompatibles como el Ba y Rb se correlacionan negativamente con el MgO. Las abundancias de Ni y Cr se correlacionan fuertemente con el contenido de MgO (Reynolds & Geist, 1995).

Actividad reciente

La actividad eruptiva desde 1813 incluye unas 13 erupciones, y su última erupción ocurrió entre el 26 de Junio y el 21 de agosto de 2018 que emitió $\sim 189 \pm 94$ millones de m^3 de lava (Vasconez et al., 2018). Típicamente, la actividad eruptiva de Sierra Negra es de tipo hawaiana, que corresponden a flujos de lava basálticos de baja viscosidad (muy fluido) que produce grandes campos de lava tipo 'A'ā y pāhoehoe.

Vasconez et al. (2018), menciona que la actividad eruptiva del 2018 se encontró a lo largo de cinco fisuras ubicadas en los flancos N y NW, las cuales se caracterizaron por la emisión de flujos de lava que cubrieron un área total de $30,6 \text{ km}^2$. Posteriormente al revisar las fotografías de la misión de campo se encontraron con una sexta fisura entre la fisura dos y cuatro (Bernard et al., 2022). La emisión de flujos de lavas se distribuyó en dos fases:

Fase 1: duró menos de un día y las fisuras 1, 2, 3, 4, 5 y 6 emitieron flujos de lava que cubrieron un área mayor a 17 km².

Fase 2: duró 57 días de emisiones de flujos de lava solamente en la fisura 4 cubriendo un área aproximada de 13 km², y cuyos flujos de lava llegaron al mar el 6 de julio de 2018 y modificaron la línea de costa de la isla produciendo que se incremente el territorio ecuatoriano en 1.5 km².

Conceptos generales

Volcanes tipo escudo

Son los volcanes más grandes de la Tierra con una composición principalmente de basalto, con un tipo de lava muy fluida que hace que sean de alturas pequeñas y con pendientes suaves. Presenta una fuente de baja explosividad que forma conos de ceniza y conos de salpicaduras en el que el 90% del volcán es lava en lugar de material piroclástico (Shield Volcanoes, 2010).

McBirney & Williams (1969) describieron las formas de los volcanes escudos occidentales de Galápagos donde los flancos inferior y superior presentan pendiente suaves, y los flancos medios presentan pendientes más empinadas (Harpp & Geist, 2019).

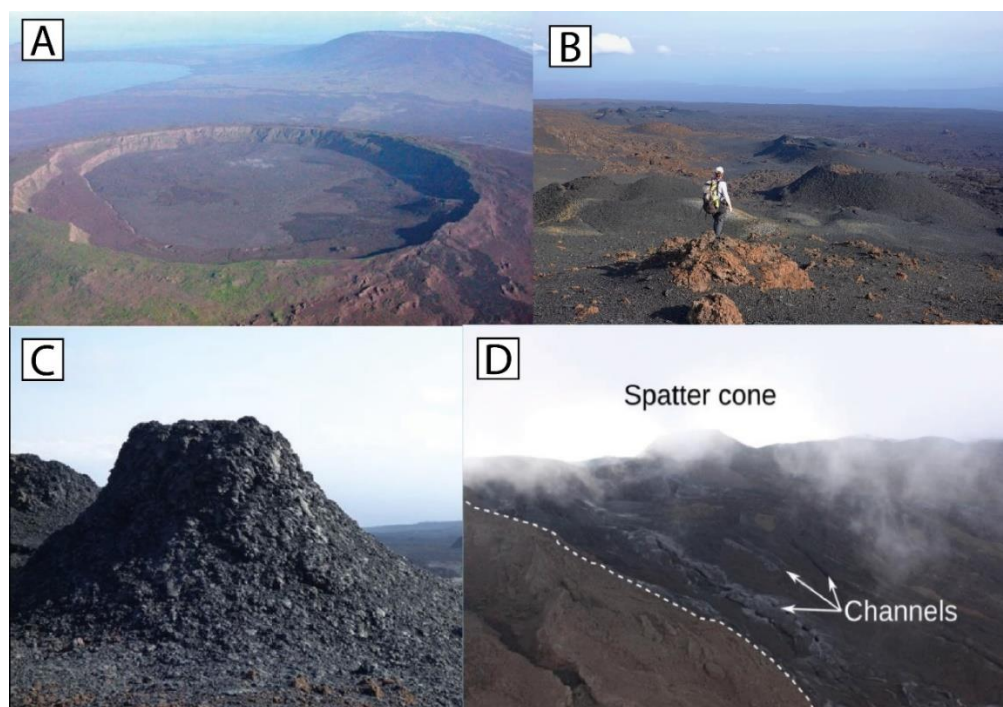


Figura 2.7. A) Morfología de volcán escudo con caldera del volcán Sierra Negra vista desde el aire. Tomado de: EIDiario.ec. B) Vista de los conos de escoria y salpicadura formados durante la erupción del volcán Sierra Negra en 2018 (Foto: B. Bernard, IG-EPN). C) Cono de salpicadura (Foto: B. Bernard, IG-EPN). D) Fisura circunferencial de la erupción de 2015 del volcán Wolf. Tomado de (Bernard et al., 2019).

Conos de salpicadura y escoria

Corresponden a formaciones volcánicas situadas en zonas de emisión de magma durante una erupción volcánica. Cuando la lava es expulsada a superficie se genera un cono volcánico pequeño entre 5 a 20 m de altura construido a partir de tefra expulsada como coágulos de lava basáltica relativamente fluida (Allaby, 2013).

Si la lava cae en la superficie todavía líquido, se conoce como cono de salpicadura (spatter cone), mientras que, si la lava cae en la superficie en sólido, se conoce como cono de escoria.

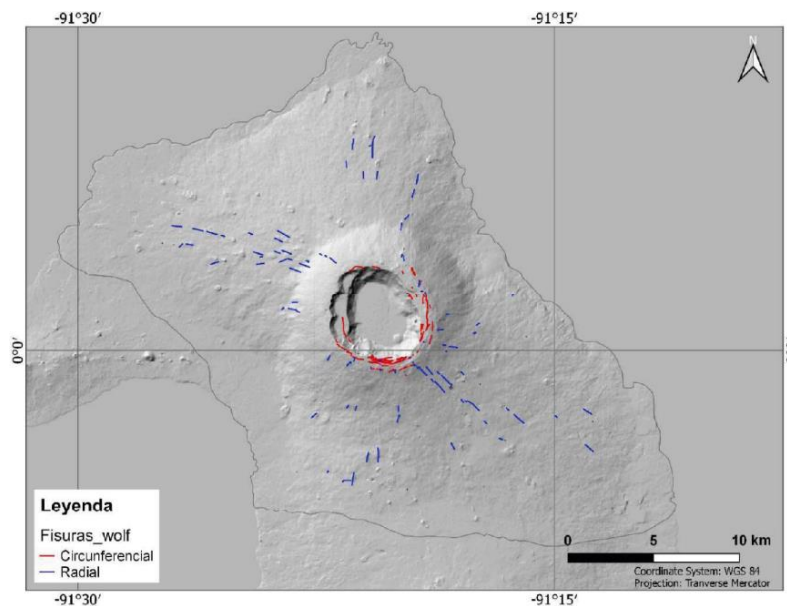


Figura 2.8. Mapa morfológico que muestra la distribución de las fisuras radiales (color azul) y fisuras circunferenciales (color rojo) del volcán Wolf. Tomado de (Perez, 2019).

Fisuras eruptivas

Fisuras radiales: estructuras casi lineales situadas generalmente en los flancos del volcán, bajo la zona de ruptura de la pendiente y cerca de la costa, que se forman cuando la superficie se rompe gracias a las intrusiones (diques) que se generan desde el reservorio magmático de manera radial (perpendicular a la caldera).

Fisuras circunferenciales: estructuras concéntricas paralelas a la caldera del volcán que se forman generalmente en las zonas más cercanas a la cumbre del volcán, cuya formación está asociada a la ocurrencia de diques que fluyen a través de fracturas o fallas preexistentes que se generan durante la formación de la caldera (colapso).

Flujos de lava

'A'ā: Tipo de lava con superficie autobrechificada y base de clastos espinosos de superficie rugosa y un interior coherente, típicamente no vesicular (Harris y Rowland, 2015).

Los flujos 'A'ā brechados presentan en superficie "clinkers", que corresponden a clastos subredondeados con superficies ásperas, espinosas y dentadas, vesiculados o escoráceos (Harris y Rowland, 2015).

Pāhoehoe: Presentan una superficie lisa, vítrea y coherente, que ocasionalmente contienen pliegues superficiales denominados "ropes" o cuerdas. Están asociados a tasas de efusión y avance muy bajas (Harris y Rowland, 2015).

Harris y Rowland, (2015) dividen a las lavas pāhoehoe en dos tipos de acuerdo a su corte: P o "pipe vesicle-bearing", y S o "spongy" (Harris y Rowland, 2015).

También existen varios subtipos de lavas pāhoehoe, cuya principal característica se debe a su textura particular en superficie, estos son: "**sheet flows**", "**shelly**", "**slabby, rough o rubbly**", "finger y entrail", "toothpaste lava" y "Transitional".

- Sheet Flows: tipo de pāhoehoe con láminas extensas, relativamente planas, que carecen de la morfología de superficie bulbosa de la clásica extensión de pāhoehoe de baja tasa de efusión. Como sugiere su nombre, fluyen como láminas alimentadas a altas tasas de efusión, típicamente cientos de m³/s, y los frentes de flujo pueden avanzar a varios kilómetros por hora (Harris y Rowland, 2015).
- Shelly: tipo de pāhoehoe rico en gas con superficies espumosas y grandes huecos en el interior. Por lo general, la corteza superior tiene un espesor de 1 a 2 cm y se superpone a un vacío interno que tiene una altura de 0.1 a 1.5 m (Harris y Rowland, 2015).
- Slabby, rough o rubbly: tipo de pāhoehoe que puede formarse si un flujo se detiene por un período de tiempo, ya que la lava se acumula debajo de la corteza y cuando la corteza falla, se rompe en losas que son arrastradas por la lava que fluye una vez más (Harris y Rowland, 2015).

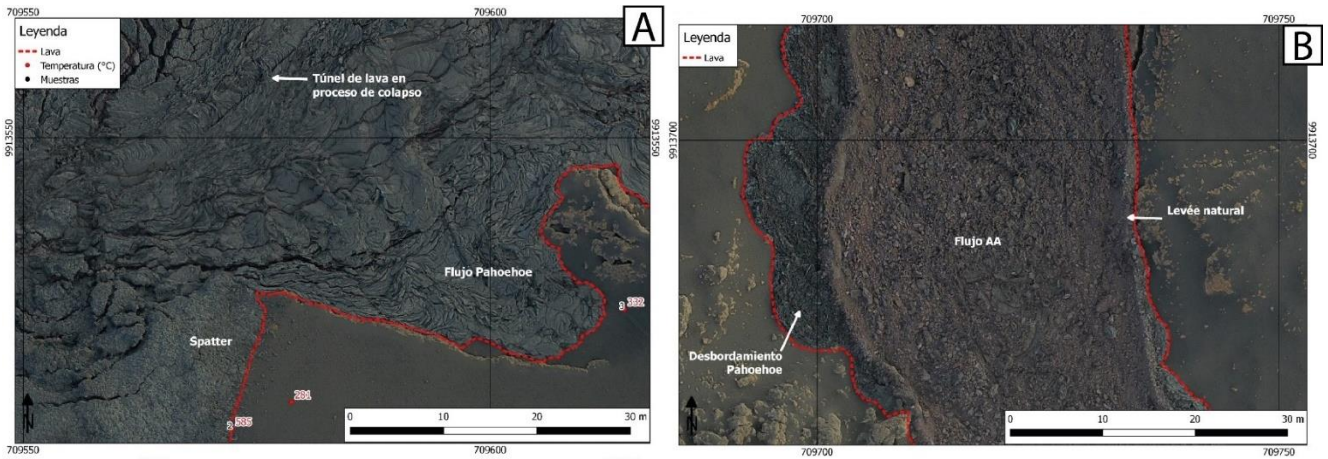


Figura 2.9. A) Flujo Pāhoehoe y B) Flujo 'A'Ā y levee natural proyectados en el sistema de coordenadas Universal Transverse Mercator (UTM), Zona 15S, WGS84. Tomado de (B. Bernard; IGEPN).

Kipukas

Zona de tierra rodeada por uno o más flujos de lava más jóvenes, que se generan cuando la lava fluye a ambos lados de una colina, cresta o domo de lava más antiguo a medida que esta avanza pendiente abajo, generalmente, parecen islas dentro de una mar de flujos de lava. Kipuka es una palabra hawaiana relacionada con la vulcanología que significa variación o cambio de forma (Hawaii National Park, 2021).



Figura 2.10. Vista aérea del Carey Kipuka (Craters of the Moon, 2021).

Levees

Estructuras estacionarias que se forman en los bordes de los canales de lava, generadas al comienzo de la vida de un flujo de lava y se extienden casi toda la longitud de este. (Harris y Rowland, 2015).

Sparks et al. (1976) clasificaron a los *levees* en cuatro tipos: (1) *Levees* iniciales (Initial *levees*), (2) *Levees* de escombros (Rubble *levees*), (3) *Levees* de sobre flujo (Overflow *levees*) y (4) *Levees* de acreción (Accretionary *levees*). Posteriormente, Lipman y Banks

(1987) incluyeron un nuevo tipo de *levees* a la clasificación: (5) *Levees de deformación* (Deformation levees).

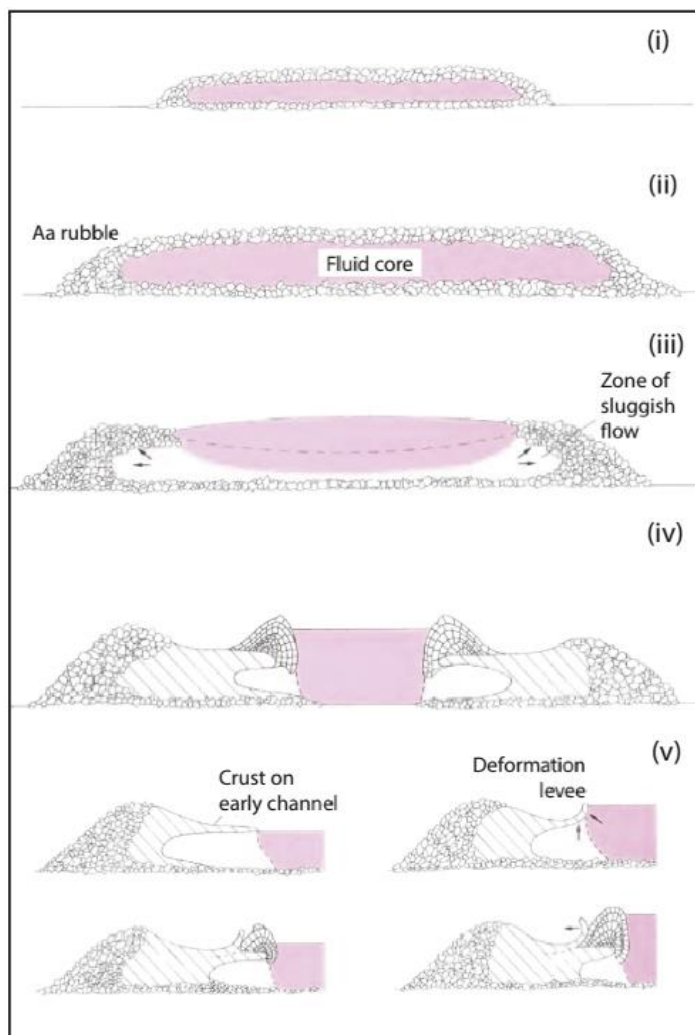


Figura 2.11. Desarrollo del canal 'A'ā y levees desde el emplazamiento de (i) flujo disperso inicial, a través de (ii-iii) formación de levees de transición (escombros), terminando con la formación de (iv) levees de desbordamiento y finalmente (v) levees de deformación. Cada zona se caracteriza así por una morfología de levees cada vez más compleja. Modificado de Lipman y Banks, 1987. Tomado de (Harris y Rowland, 2015).

2 METODOLOGÍA

El volcán Sierra Negra, ubicado al sur de la Isla Isabela ha experimentado diversas erupciones en los últimos años (1979, 2005, 2018). La erupción más reciente ocurrida en el año 2018 ha generado un cambio en la morfología del volcán y de la isla, por lo que la obtención de datos cuantitativos y la generación de una cartografía de alta resolución brindan una gran oportunidad de comprender el comportamiento eruptivo de las fisuras 2 y 6 de la erupción del 2018 en el volcán Sierra Negra.

El primer paso para realizar este proyecto es recopilar la información bibliográfica a partir de la búsqueda de artículos científicos, libros, mapas, fotografías y tesis de grado referentes al volcán Sierra Negra y sus últimas erupciones, para posteriormente crear una base bibliográfica que se utilizará en la ejecución de todo el proyecto. Además, gracias a las actividades de campo realizadas en marzo del 2020 se obtuvieron imágenes de alta resolución tomadas con un vehículo aéreo no tripulado. De las cuales se harán uso de ortofotografías (cuatro para la fisura 2, y tres para la fisura 6), y modelos de elevación digitales con una resolución <10 cm/px. También se obtuvo un Modelo Digital de Elevación (MDE) de 30 m de resolución por píxel de la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA, por sus siglas en inglés).

2.1 Cartografía de alta resolución de la fisura 2 y 6 de la erupción del volcán Sierra Negra 1: 5000

El objetivo de este proyecto es cartografiar la fisura eruptiva 2 y 6 generadas en la erupción del 2018 en el volcán Sierra Negra con una escala 1: 5000, donde se genera mapas de distribución espacial de las fisuras 2 y 6 con sus respectivos límites externos de los campos de lava, y estructuras internas de las fisuras y de los flujos de lava como: centros de emisión, fisuras eruptivas, eje del flujo, *levees* y contactos internos, con la ayuda de un Sistema de Información Geográfica (SIG) de software libre Quantum GIS (QGIS 3.16.16 Hannover).

La cartografía de alta resolución se pudo realizar solamente en la fisura 2, debido a que las ortofotografías y los MDE de la fisura 6 no abarcan el área suficiente del campo de lava para realizar un análisis cartográfico, reológico y volumétrico confiable.

Para realizar la georreferenciación de las ortofotografías y los MDE, se utiliza la herramienta **Raster>> Georreferenciador** de Q-GIS, en donde se ubica y se ingresa los puntos comunes entre las ortofotografías y el mapa *Satellite* de Google. Para el caso de los MDE se georreferencia con los mismos puntos.

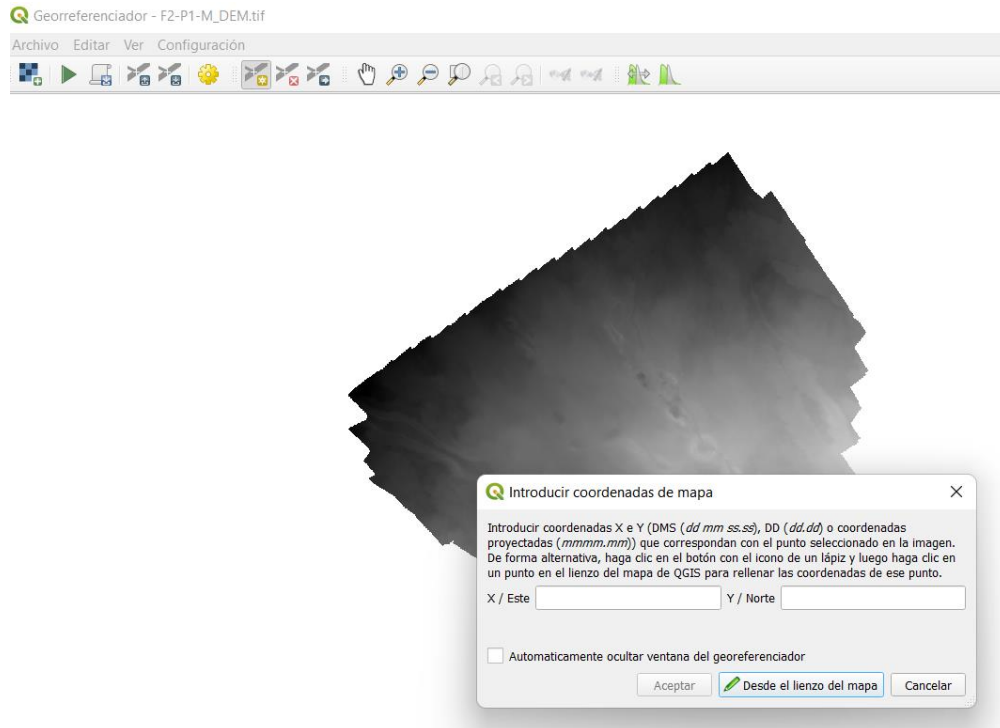


Figura 2.1. Interfaz del Georreferenciador para la ortofotografía de la fisura 2, parte 1.

Luego de la georreferenciación de las ortofotografías y MDE, se realiza la corrección de altura de los MDE ya que la información de alturas del VANT es un dato referencial. Por ello, se realiza un análisis estadístico entre de los MDEs de este proyecto y los de la JAXA. Para ello, lo primero que hace es construir uno o varios polígonos entre áreas comunes de la ortofotografía y el mapa *Satellite* de Google, cuidando que estas áreas no se encuentren muy cerca del campo de lava actual o los bordes de la ortofotografía. Posterior, se construye una grilla de la zona con un distanciamiento entre 5 y 10 m, luego, se genera una grilla a partir del polígono creado previamente, y con esa capa de puntos se extrae las alturas del MDE del vehículo aéreo no tripulado y del MDE de la JAXA con la ayuda de la herramienta *“Point Sampling Tool”*. Después, se realiza el histograma de frecuencias en una hoja de cálculo (en este caso se usó Libre Office) en el que se verifica si corresponde a un histograma con frecuencia normal o gaussiana, en el caso de serlo, se puede utilizar la media o promedio de la diferencia de alturas para corregir las alturas.

Si no es el caso, se analiza los valores conflictivos de alturas utilizando **propiedades de la capa**>> **simbología** >>**graduado** en intervalos iguales, y se analiza los valores cercanos a los picos del histograma. En este caso, los valores analizados no presentaban mayor problema, por tanto, se corrigió la altura con los mismos valores de la media o promedio obtenidos anteriormente.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1		JAXA			DRONE								
2	wkt_geom	fid	galapagos	wkt_geom	fid	F2-P1-M_DE	Diferencia	MáximaDif	MínimaDif	MaxMin	Mediana	Promedio	Desv. Estándar
3	Point (-10149	1	660	Point (-10149	1	622.28888	37.71112	46.6109	27.92816	18.68274	36.98907	36.9756086	2.57723711
4	Point (-10149	2	660	Point (-10149	2	624.81891	35.18109				N	IC	Cantidad Clase
5	Point (-10149	3	660	Point (-10149	3	624.64465	35.35535				6617	1.364476891	13.69223629
6	Point (-10149	4	660	Point (-10149	4	625.71088	34.28912						
7	Point (-10149	5	660	Point (-10149	5	623.89307	36.10693				Límites	Frecuencia	
8	Point (-10149	6	660	Point (-10149	6	623.36237	36.63763				[29.29, 30.66]	7	
9	Point (-10149	7	662	Point (-10149	7	624.12683	37.87317				[30.66, 32.02]	42	
10	Point (-10149	8	662	Point (-10149	8	624.85126	37.14874				[32.02, 33.39]	147	
11	Point (-10149	9	662	Point (-10149	9	626.68756	35.31244				[33.39, 34.75]	355	
12	Point (-10149	10	662	Point (-10149	10	625.57019	36.42981				[34.75, 36.12]	682	
13	Point (-10149	11	662	Point (-10149	11	625.54773	36.45227				[36.12, 37.48]	1190	
14	Point (-10149	12	662	Point (-10149	12	625.93591	36.06409				[37.48, 38.84]	1450	
15	Point (-10149	13	665	Point (-10149	13	625.79297	39.20703				[38.84, 40.21]	1267	
16	Point (-10149	14	665	Point (-10149	14	625.23834	39.76166				[40.21, 41.57]	789	
17	Point (-10149	15	665	Point (-10149	15	625.08099	39.91901				[41.57, 42.94]	409	
18	Point (-10149	16	665	Point (-10149	16	625.91217	39.08783				[42.94, 44.3]	192	
19	Point (-10149	17	665	Point (-10149	17	626.24255	38.75745				[44.3, 45.67]	76	
20	Point (-10149	18	666	Point (-10149	18	627.36975	38.63025				[45.67, 47.03]	10	
21	Point (-10149	19	666	Point (-10149	19	627.47345	38.52655				[47.03, 47.03]	1	
22	Point (-10149	20	666	Point (-10149	20	628.38037	37.61963						
23	Point (-10149	21	666	Point (-10149	21	628.59064	37.40936						
24	Point (-10149	22	666	Point (-10149	22	628.69666	37.30334						
25	Point (-10149	23	666	Point (-10149	23	628.61346	37.38654						
26	Point (-10149	24	666	Point (-10149	24	628.65002	37.34998						
27	Point (-10149	25	658	Point (-10149	25	617.97473	40.02527						
28	Point (-10149	26	658	Point (-10149	26	618.33459	39.66541						
29	Point (-10149	27	658	Point (-10149	27	620.56158	37.43842						
30	Point (-10149	28	658	Point (-10149	28	620.98515	37.03485						
31	Point (-10149	29	658	Point (-10149	29	620.96285	37.03735						
32	Point (-10149	30	660	Point (-10149	30	621.27228	38.72772						
33	Point (-10149	31	660	Point (-10149	31	624.83478	35.16522						
34	Point (-10149	32	660	Point (-10149	32	625.78595	34.21405						
35	Point (-10149	33	660	Point (-10149	33	626.68799	33.31201						
36	Point (-10149	34	660	Point (-10149	34	624.10352	35.89648						

Figura 2.2. Interfaz de la hoja de cálculo con los valores estadísticos como: diferencia, máximo, mínimo, mediana, promedio (media), desviación estándar, límites y frecuencia usados para calcular el histograma de frecuencias.

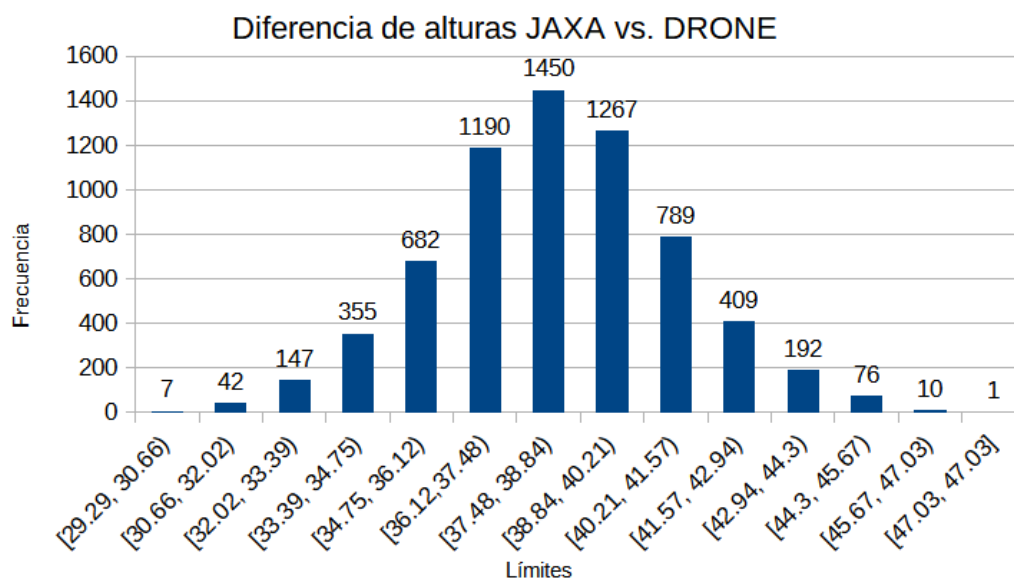


Figura 2.3. Histograma de frecuencias para el MDE de la F2-P1 mostrando una distribución normal o Gaussiana.

Finalmente, para la realización de la cartografía de alta resolución, se digitalizaron los shapefiles con la ayuda de las ortofotografías de alta resolución, los mapas de sombra obtenidos a partir de los MDE y la herramienta **Terrain Profile**, que ayuda a visualizar de mejor manera el límite de las estructuras como los límites del campo de lava, levees, contactos internos, eje del flujo y centros de emisión.

A continuación, se presenta un flujograma de la metodología usada para realizar la cartografía de alta resolución tanto para la fisura 2 y la fisura 6 de la erupción de 2018 del volcán Sierra Negra. La cartografía de alta resolución obtenida en este trabajo se encuentra en el Anexo I.

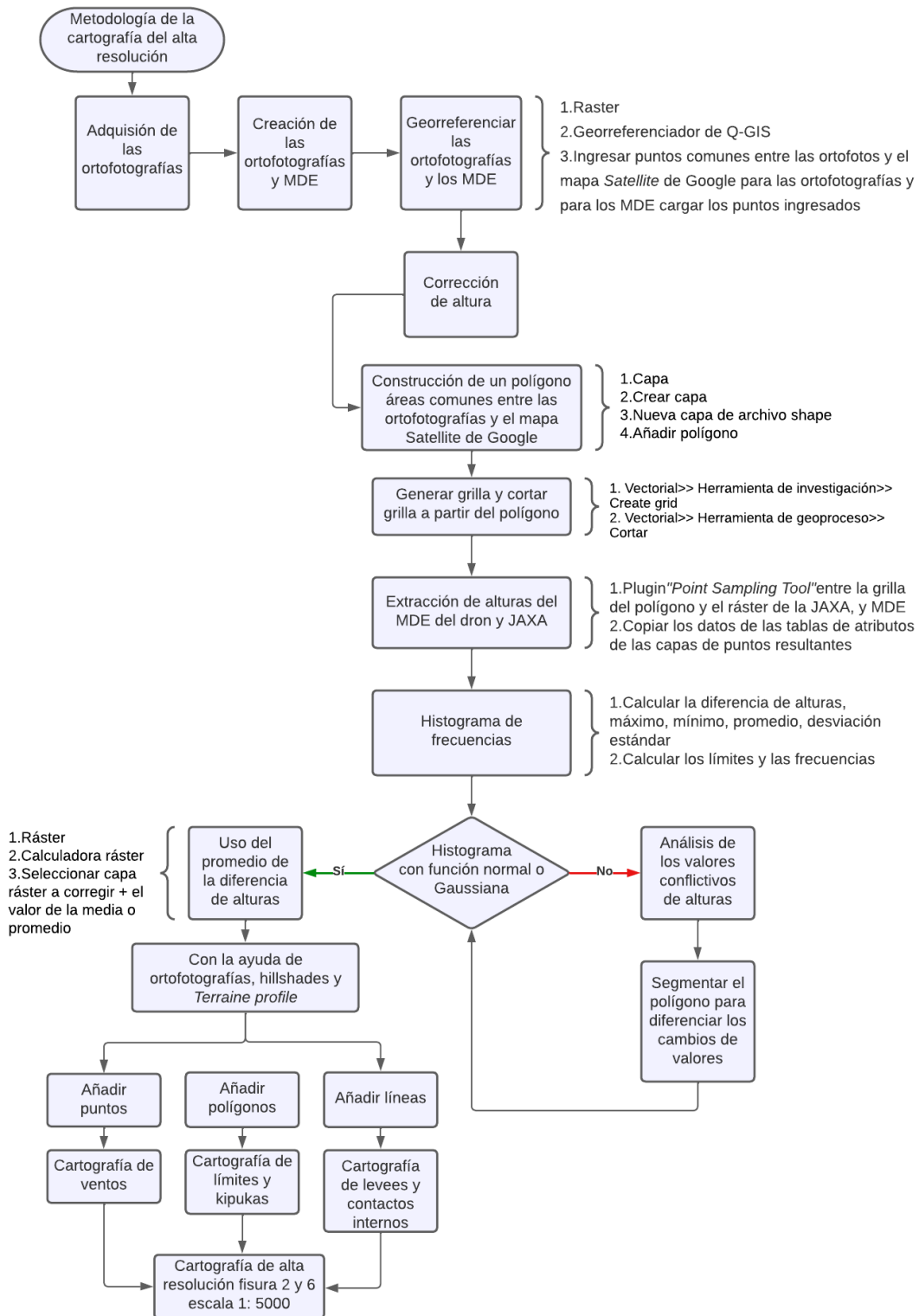


Figura 2.4. Metodología general para la cartografía de alta resolución.

2.2 Estimación del volumen del campo de lava de la fisura 2

El cálculo del volumen total del campo de lava se realizó solamente para la fisura 2, debido a que hubo una falta de cobertura de vuelo que impidió obtener más información que permita estimar el volumen total del campo de lava de la fisura 6.

Para estimar el volumen de un sector se requiere tener sus valores de área y espesor, que en este caso se obtiene mediante la utilización de la cartografía del campo de lava y el uso de las herramientas que brinda el software Q-GIS.

A continuación, se presenta la metodología realizada en uno de los sectores del campo de lava que se analizó:

Para el caso de la estimación del área y perímetro, estos valores se obtuvieron mediante la herramienta del Q-GIS, **Calculadora de Campos**.

Y para el caso del cálculo del espesor, que corresponde al promedio de la diferencia entre la altura del flujo y la altura de la base (se incluyen los bordes), por lo que este valor se obtuvo mediante:

1. Establecer geometrías de líneas para los perfiles tomando en cuenta zonas en las que el flujo no se encuentre canalizado.
2. Trazado de al menos 5 perfiles topográficos equidistantes y perpendiculares al eje del flujo con la ayuda de **Terrain Profile**.
3. Extraer los datos del perfil en una hoja de cálculo.
4. Identificar los puntos de los bordes del flujo.
5. Establecer una regresión lineal entre los límites de los perfiles (para simular la base del flujo).
6. Utilizar la ecuación de la recta dada en la regresión lineal para calcular los puntos de la base.
7. Restar la coordenada Y del perfil y el valor del punto calculado de la base
8. Calcular el promedio de la diferencia de alturas y la desviación estándar (error de la medición).

Para obtener la longitud del perfil se resta las coordenadas X de los límites del flujo. Y, todo el procedimiento descrito anteriormente se repite para todos los perfiles en cada una de las secciones del campo de lava.

Para el cálculo del espesor estimado en cada sección, se realiza una ponderación basada en la longitud de cada perfil, con la ayuda de la siguiente ecuación:

$$H = \frac{\sum_{i=1}^n hw_i}{\sum_{i=1}^n w_i} = \frac{h_1w_1+h_2w_2+h_3w_3+\dots+h_nw_n}{w_1+w_2+w_3+\dots+w_n}$$

Ecuación 2.1. Espesor estimado ponderado (h, espesor de cada perfil y w, es la longitud o ancho del perfil)

El cálculo del error del espesor se hace de la misma manera que para el espesor estimado, solo que h corresponde al error de espesor de cada perfil.

Una vez calculado el espesor promedio con su respectivo error para cada perfil, se toma el error de ubicación de los límites del flujo de 0.1 m determinado previamente por Calderón (2022) y para obtener el valor del error de área, se realiza el producto del error de ubicación y el perímetro.

$$Error_{\text{área}} = Error_{\text{ubicación}} * Perímetro$$

Ecuación 2.2. Error de área

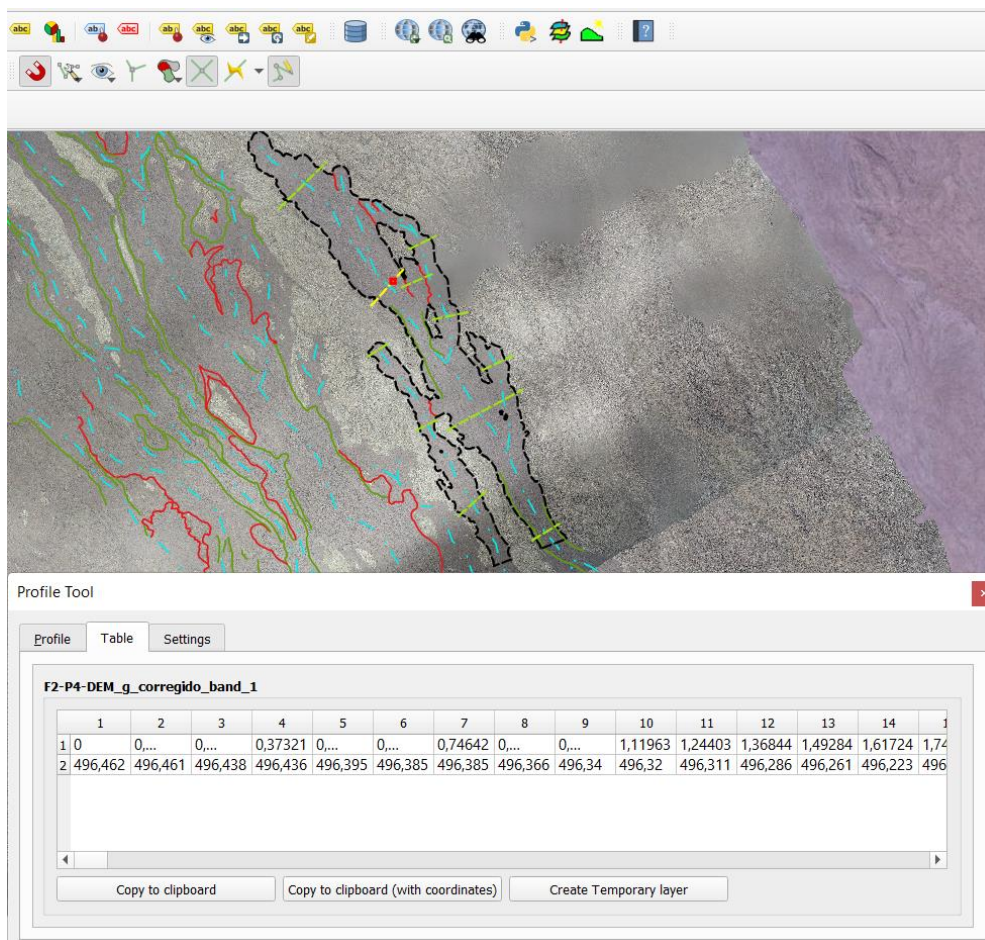


Figura 2.5. Interfaz de Terrain Profile para exportar la información de los perfiles topográficos.

		A	B	C	D	E	F	G	H
		Error ubicación (m)	Perímetro (m)	Área (m ²)	Error área (m ²)	Espesor estimado ponderado (m)	Error espesor ponderado (m)	Volumen estimado (m ³)	Propagación de error Volumen (m ³)
1									
2		0.1	2580.401	37480.7087	258.040114	B16))	0.5674182	28624.3003	21268.1491
3									
4	Datos de entrada								
5	Perfiles	Longitud	Espesor	Error promedio (m)					
6	P1	73.3809935	0.655	0.525					
7	P2	52.2971232	0.565	0.575					
8	P3	36.1065041	0.641	0.397					
9	P4	31.8567711	0.486	0.313					
10	P5	38.6481925	0.594	0.461					
11	P6	24.7547197	0.663	0.417					
12	P7	36.3498168	0.469	0.264					
13	P8	92.9797317	1.495	1.053					
14	P9	39.4454559	0.440	0.414					
15	P10	34.3074945	0.616	0.392					
16	P11	26.776837	0.809	0.671					
17									
18	Resultados								
19									
20	Perímetro	2580.401							
21	Área	37480.7087	2931.73349						
22	Espesor total	0.764	0.5674182						
23	Volumen tota	28624.3003	21268.1491						

Figura 2.6. Cálculo del espesor estimado ponderado del lóbulo utilizando la ecuación 2.1.

Para la estimación de volumen del sector, se realizó el producto del espesor estimado ponderado (0.764 m) y el área calculada anteriormente (37480.71 m²), el cual dio como resultado un volumen de 28624.30 m³ para el sector B.

El cálculo del error de volumen se calcula mediante la fórmula general para la propagación de errores, en el que el volumen se encuentra en función del área y el espesor, definida por la siguiente ecuación:

$$EV = \sqrt{(A * EH)^2 + (H * EA)^2}$$

Ecuación 2.3. Propagación de errores (EV: error en el volumen, A: área del sector, H: espesor estimado del sector, EA: error de área, EH: error del espesor estimado).

Todas las mediciones y resultados obtenidos se muestran en el Anexo II.

	A	B	C	D	E	F	G	H
	Error ubicación (m)	Perímetro (m)	Área (m ²)	Error área (m ²)	Espesor estimado ponderado (m)	Error espesor ponderado (m)	Volumen estimado (m ³)	Propagación de error Volumen (m ³)
1								
2	0.1	2580.401	37480.7087	258.040114	0.76370755	0.5674182	28624.3003	=RAIZ((C2*
3								
4	Datos de entrada							
5	Perfiles	Longitud	Espesor	Error promedio (m)				
6	P1	73.3809935	0.655	0.525				
7	P2	52.2971232	0.565	0.575				
8	P3	36.1065041	0.641	0.397				
9	P4	31.8567711	0.486	0.313				
10	P5	38.6481925	0.594	0.461				
11	P6	24.7547197	0.663	0.417				
12	P7	36.3498168	0.469	0.264				
13	P8	92.9797317	1.495	1.053				
14	P9	39.4454559	0.440	0.414				
15	P10	34.3074945	0.616	0.392				
16	P11	26.776837	0.809	0.671				
17								
18	Resultados							
19								
20	Perímetro	2580.401						
21	Área	37480.7087	2931.73349					
22	Espesor total	0.764	0.5674182					
23	Volumen tota	28624.3003	21268.1491					

Figura 2.7. Cálculo de la propagación de errores en el volumen utilizando la ecuación.

2.3 Estimación de los parámetros reológicos

La tasa de efusión, viscosidad, velocidad y límite elástico corresponden a los parámetros reológicos y dinámicos que se calcularán en este trabajo. En la mayoría de estos parámetros se necesita usar parámetros como el espesor y el ancho del flujo. La metodología es distinta a la usada para calcular estos parámetros en el volumen.

Para el cálculo del espesor y ancho del flujo se hace referencia a la ecuación de Jeffreys (1925), que funciona en flujos cuyo espesor es mayor que su ancho. Para ello, se necesita trazar 10 perfiles topográficos equidistantes a lo largo de todo el flujo completo del campo de lava, luego, trazar 5 perfiles auxiliares en cada uno de los 10 perfiles con una separación de 1 m entre sí (Calderón, 2022). Se extraen los valores de X y Y de todos estos perfiles. A continuación, se identifican los valores de las bases de cada lado.

Posterior, se calcula el espesor del flujo, donde, si el flujo se encuentra con un lóbulo bien formado, se toma todos los valores de altura a lo largo del flujo, excepto por los bordes (ya que estos valores bajos disminuyen el valor del espesor promedio), o, si el flujo se encuentra canalizado (*levee*), se toma solamente el promedio de los dos valores más altos de cada *levee*, debido a que se pretende reconstruir el espesor o la profundidad del flujo de lava mientras estaba activo.

Para la estimación del error de las mediciones se usó la desviación estándar.

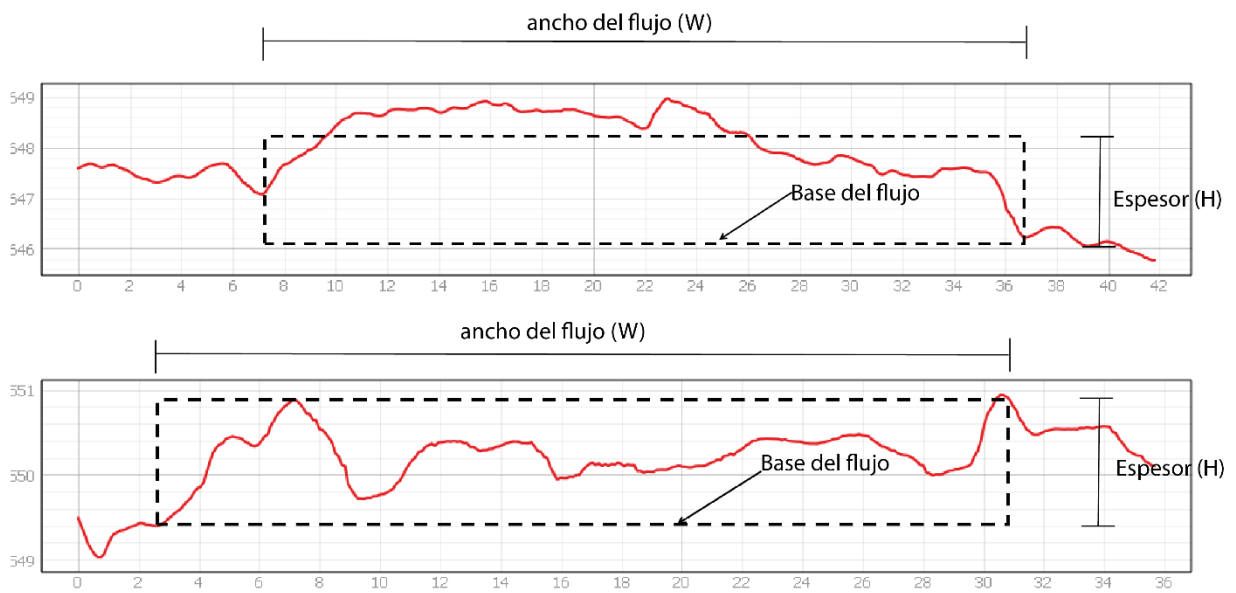


Figura 2.8. Esquema donde se muestran las mediciones realizadas en cada perfil topográfico. Arriba: lóbulo bien formado; Abajo: *levee*.

Una vez, calculada la estimación del espesor (H) y ancho del flujo (W), se pueden usar estos valores para calcular los parámetros reológicos y dinámicos del flujo. Además, la longitud del flujo (1372 ± 2.9 m) fue medida desde donde el flujo se vuelve visible. Para obtener su valor, esta medición se realizó 5 veces para estimar su error.

Para la tasa de efusión volumétrica (Q) se calcula con la ecuación propuesta en Chevrel et al. (2013) que se presenta a continuación:

$$Q = \frac{G_z k L W}{H}$$

Ecuación 2.4. Tasa de efusión volumétrica (G_z es el número de Grätz (Pinkerton y Wilson, 1994; concluyeron un valor adimensional de 300 para el límite de enfriamiento de flujos basálticos), k es la difusividad térmica ($4.2E-7$ $m^2 \cdot s^{-1}$) para lavas basálticas; Kilburn y Lopes, 1991).

El valor de la pendiente (α) se obtiene mediante la herramienta **Terrain Profile** del software QGIS, donde se construye un triángulo rectángulo y se obtiene los valores de los catetos, lo que permite calcular el ángulo de la pendiente mediante la fórmula trigonométrica:

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{ab}{L}\right)$$

Ecuación 2.5. Ángulo de la pendiente en radianes. (ab: diferencia de alturas entre los extremos de la sección; L: distancia en el eje x entre los extremos de la sección).

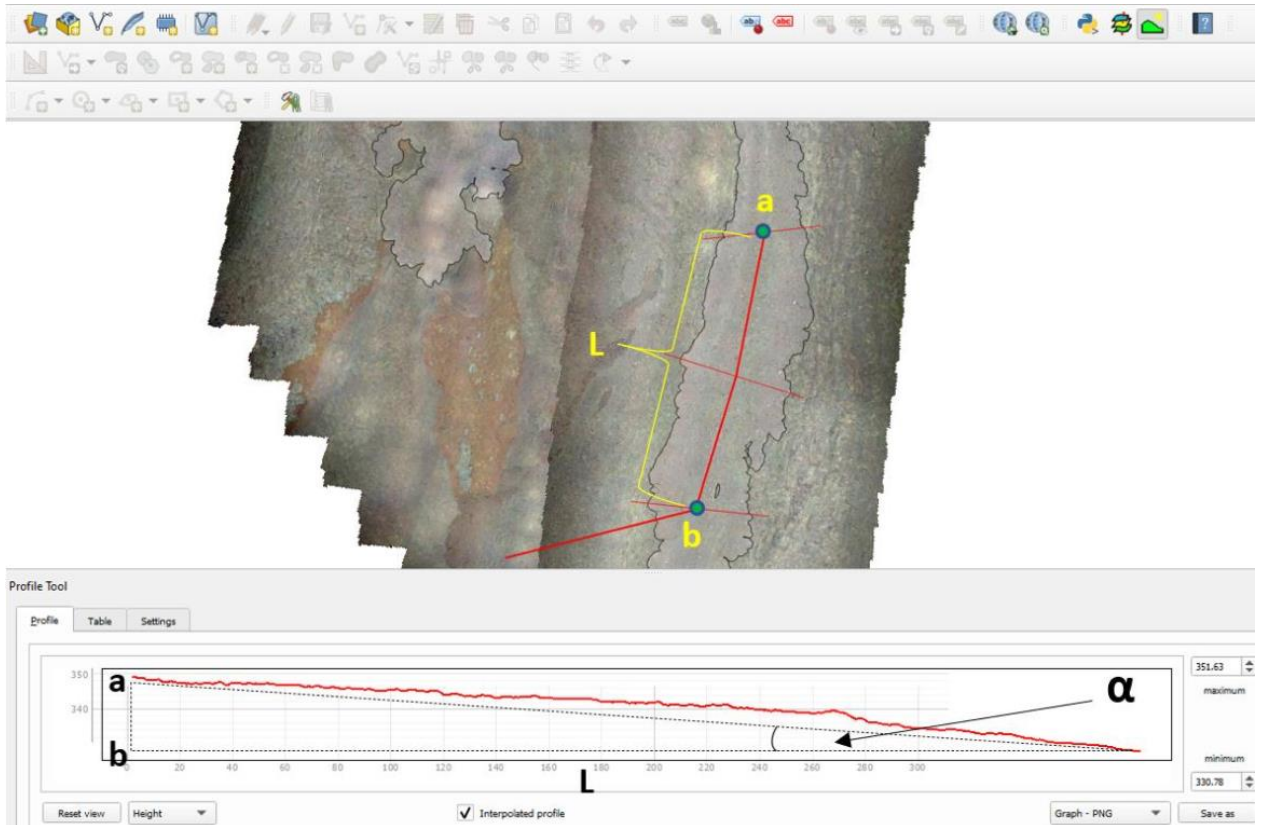


Figura 2.9. Ilustración de la metodología seguida para el cálculo de la pendiente del lóbulo (Calderón, 2022).

Para la estimación de la viscosidad (η) de las lavas de la fisura 2, se asumió un comportamiento newtoniano y se calculó a partir de la ecuación tomada por Jeffreys (1925) y modificada por Nichols (1939) que se presenta a continuación:

$$\eta = \frac{\rho g H^3 W \sin \alpha}{3 Q}$$

Ecuación 2.6. Viscosidad (ρ : densidad de la lava (2600 kg.m⁻³ para un basalto de Galápagos según Murase y McBirney (1973)); g : fuerza de la gravedad (9.8 m.s⁻²), α : pendiente (medida en cada perfil y todo el flujo), 3: constante empírica para flujos cuyo ancho excede su profundidad).

El cálculo de la velocidad del flujo (v) se estimó a partir de la ecuación de Jeffreys (1925):

$$v = \frac{\rho g H^2 \sin \alpha}{3 \eta}$$

Ecuación 2.7. Velocidad del flujo (v) (Jeffreys, 1925).

La estimación del límite elástico se calculó a partir de la ecuación de Hulme (1974) asumiendo una viscosidad de tipo Bingham:

$$\tau = \rho g H \sin \alpha$$

Ecuación 2.8. Límite elástico (Hulme, 1974).

2.4 Descripción de la petrografía

Se recolectaron 48 muestras de roca de las fisuras eruptivas 1, 2, 3, 4, 5 y 6, en la misión de campo de 2020. En este estudio, se realizó el análisis petrológico de las muestras obtenidas en los flujos de las fisuras 2 y 6 de la erupción de 2018 del volcán Sierra Negra.

Las muestras analizadas petrográficamente para la fisura eruptiva 2 son: SN2018-F2-01a, SN2018-F2-02 y SN2018-F2-03; y para la fisura eruptiva 6 es la muestra SN2018-F6-01.

La preparación de las muestras se la realizó en el Laboratorio de Láminas Delgadas de la Facultad de Geología y Petróleos de la Escuela Politécnica Nacional, con los siguientes pasos:

1. Selección de la muestra de roca.
2. Cortar la muestra con dimensiones de 27x46 mm.
3. Después de haber cortado la muestra del tamaño indicado se procede a pegar una de las caras con epoxy sobre un portaobjetos.
4. Procedemos a pulir una de las caras con la máquina pulidora.
5. Una vez eliminadas las huellas del disco de la cara pulida continuamos puliendo con la máquina desbastadora con las lijas de carburo de silicio de 400 grits, 600 grits, 1200 grits y 2500 grits. Esta cara pulida debe presentar un acabado brillante uniforme para evitar las burbujas.
6. Se procede a pegar la cara pulida con epoxy en una lámina petrográfica pulida.
7. Una vez endurecida la muestra se procede a cortar la parte de la cara pulida con un espesor de aproximadamente de 1 mm.

8. Una vez cortada la muestra se procede a rebajar la muestra hasta un aproximado de 30 micras en la máquina pulidora.
9. Una vez lijada la muestra hasta este espesor se procede a rebajar a mano para brindarle un acabado final a la lámina delgada con los pulimentos de carburo de silicio de 400 grits, 800 grits y 1200 grits.
10. Una vez alcanzado el espesor deseado cubrir la lámina delgada con bálsamo de Canadá.



Figura 2.10. Instrumentos utilizados para el análisis petrográfico. Izquierda: Máquina de impregnación. Derecha: Microscopio petrográfico del Laboratorio del Instituto Geofísico EPN.

En total se elaboraron 4 láminas delgadas que sirvieron para el análisis, el cual se realizó petrográfico con un microscopio petrográfico con cámara incorporada en el laboratorio de las instalaciones del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional, donde se efectuó un conteo modal de los elementos de cada una de las láminas delgadas con la ayuda de la regla milimétrica vertical y horizontal que posee el microscopio. Para el caso de la lámina de la muestra F2-01A, el conteo modal se realizó cada 1 mm, mientras que para el caso de las láminas delgadas de las muestras F2-02, F2-03 y F6-01, el conteo modal se realizó cada 2 mm. Esta distinción se debe a que se necesitan al menos 150 puntos para realizar un conteo modal confiable, y en el caso de la lámina delgada de la muestra F2-01A, cumplía este requisito con un conteo modal cada 1 mm.

También se realizó el análisis de minerales, texturas y características de las rocas mediante el uso del microscopio petrográfico, y con la ayuda de fotografías de las láminas delgadas.

2.5 Análisis geoquímicos

La preparación de las muestras se la realizó en las instalaciones del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional, donde primero se trituró manualmente las muestras utilizando un mortero de titanio hasta obtener tamaños de grano <3 mm, posteriormente se redujo el tamaño de grano hasta ~ 17 μm con la ayuda del molino de ágata Retsch RM 200 (Calderón, 2022).

Las fracciones de polvo de roca fueron enviadas para el análisis de elementos mayores y trazas a los laboratorios de la Universidad de Brest (Francia) donde se utilizó ICP-AES siguiendo los protocolos definidos en Cotten et al. (1995). Las desviaciones estándar relativas son del 1% para el SiO_2 y del 2% para el resto de óxidos, excepto para concentraciones bajas ($<0.5\%$) para los cuales la desviación estándar absoluta es del 0.01%. Para los elementos traza la desviación estándar relativa es $\sim 5\%$ excepto para el Er ($\sim 20\%$).



Figura 2.11. Trituración de muestras de roca. Izquierda: mortero de titanio. Derecha: Molino de ágata Retsch RM 200 (Calderón, 2022).

En este estudio se analizaron e interpretaron únicamente las siete muestras de la fisura eruptiva 2 y una muestra de la fisura eruptiva 6. El resultado de los análisis químicos de roca total para las muestras de la fisura 2 y 6 se muestran en el Anexo VI.

3 RESULTADOS, DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Resultados

Cartografía de alta resolución de la fisura 2 y 6 de la erupción del volcán Sierra Negra 1: 5000 y estimación de volumen del campo de lava de la fisura 2

La cartografía de alta resolución se ha realizado parcialmente en la zona proximal de la fisura 6 (Fig. 3.1), que presenta 2 segmentos cuya orientación del segmento F6a es $\sim N32^\circ E$ y el segmento F6b es $\sim N8^\circ E$.

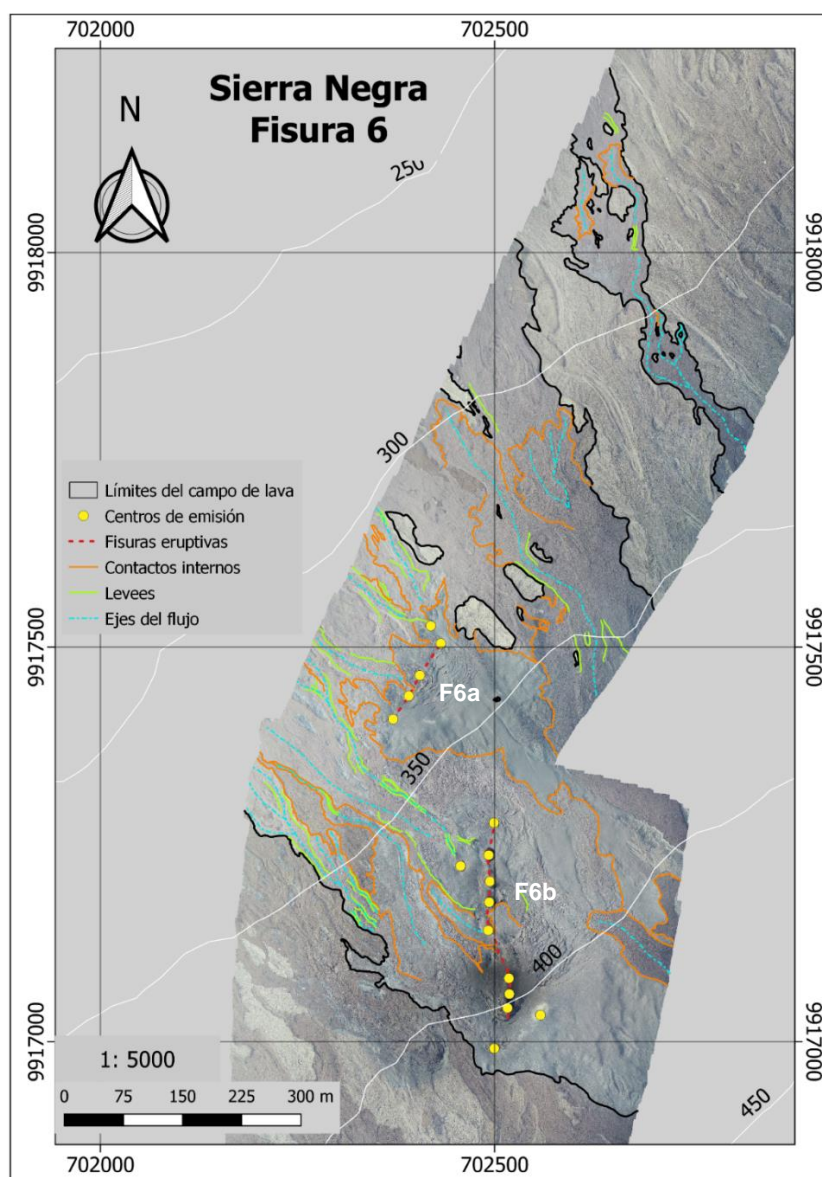


Figura 3.1. Cartografía a detalle (1: 5000) del campo de lava emitido en la fisura 6, Sierra Negra- 2018. WGS 84/UTM zona 15S.

Para este estudio, se ha obtenido la cartografía de alta resolución de la fisura 2 a escala 1:5000 (Anexo I), en el que se ha cartografiado los diversos elementos del campo de lava como: los contactos internos, *levees* y ejes de flujo. Para los límites del campo de lava, se han cartografiado los bordes externos y las *kipukas*.

El área del campo de lava de la fisura 2 es $8.32 \pm 0.004 \times 10^5 \text{ m}^2$, que, en comparación al valor de $2.30 \times 10^6 \text{ m}^2$ estimado por Vasconez et al. (2018) varía significativamente. Esta discrepancia, se debe a que la fisura 6 no se ha discriminado de la fisura 2 en el estudio de Vasconez et al. (2018) que toman el área como una sola fisura. Además, en este estudio no se ha analizado la zona que abarcan los flujos más distales del campo de lava debido a la falta de información de ortofotografías y MDE. Estas dos razones son principalmente el por qué el valor del área estimado en este trabajo deberá variar necesariamente del valor estimado en el trabajo previo.

El campo de lava de la fisura 2 ha sido dividido en 9 sectores (Fig. 3.2), donde el sector A y B constan de lóbulos de lava distales que se individualizan. El sector C corresponde a un lóbulo individualizado medio. El sector D corresponde a la zona donde los flujos de lava más distales comienzan a individualizarse. Los sectores G e I corresponden a zonas con canales de lava y los depósitos proximales. El sector E corresponde a depósitos proximales de escoria de bajo espesor. El sector F corresponde a la zona donde se encuentran lavas tipo *Sheet Flows*. El sector H corresponde a la zona donde se encuentran todas las fisuras eruptivas y 23 centros de emisión asociados a la fisura.

La metodología para la estimación del volumen total (bulk) de lava y de los depósitos piroclásticos emitidos por la fisura 2 en esta erupción se describe en la sección 2.2 donde se utilizaron un total de 116 perfiles topográficos distribuidos en las 9 zonas divididas en el campo de lava, dando como resultado un valor de volumen de $6.76 \pm 0.65 \times 10^5 \text{ m}^3$ y de espesor promedio para todo el campo de lava de $0.76 \pm 0.71 \text{ m}$ (Tabla 3.1).

El volumen DRE del campo de lava da como resultado un valor de $5.07 \pm 0.49 \times 10^5 \text{ m}^3$ asumiendo un porcentaje de espacios vacíos del 25% (Rowland et al., 2003).

Además, para el Sector E, que corresponde a una zona de depósitos de escoria con espesores bastante pequeños, por lo que se asume un espesor promedio ponderado $0.20 \pm 0.10 \text{ m}$ (Tabla 3.1).

La fisura eruptiva 2 tiene una orientación NW/SE con un segmento de ~415 m de largo (diferente de la estimación de 250 m reportada por Vasconez et al. (2018), y con 3 segmentos paralelos menores de ~56, ~13 y ~30 m de largo, que están separados por ~25, ~47 y ~34 m respectivamente (Fig. 3.3).

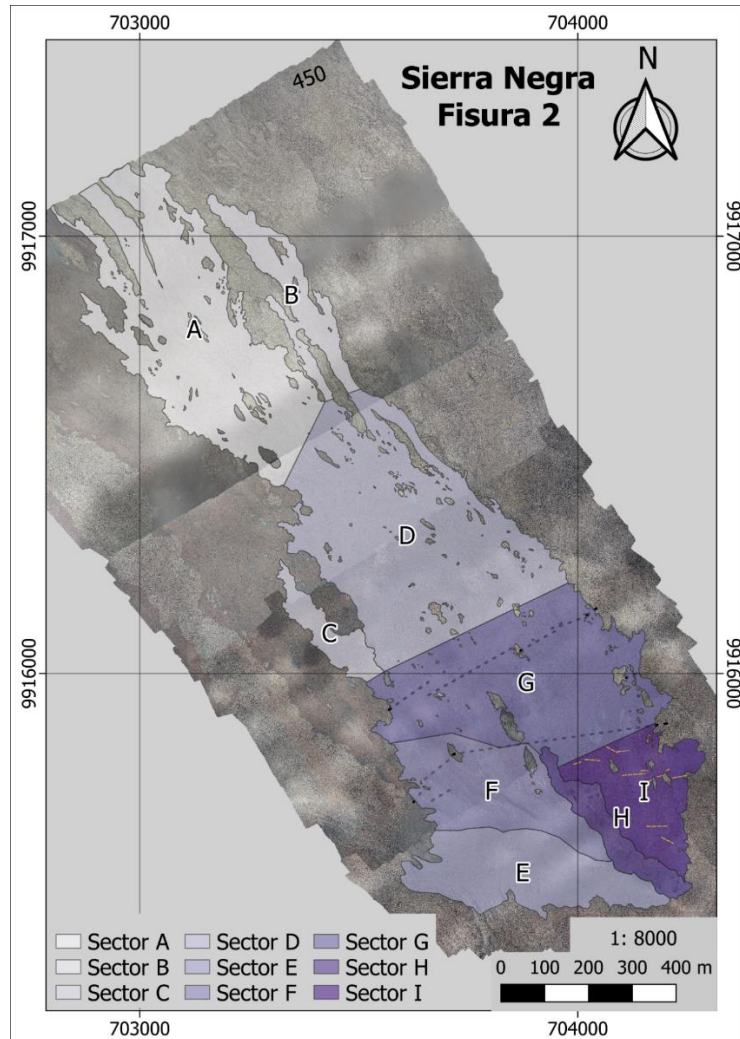


Figura 3.2. Campo de lava de la fisura eruptiva 2 dividido en sectores.

Tabla 3.1. Mediciones y estimación del volumen (*bulk*) de los sectores y el campo de lava.

VOLUMEN SECTORES Y CAMPO DE LAVA (BULK)				
Sectores	Perímetro (m)	Área (m ²)	Volumen (bulk) (m ³)	Espesor promedio ponderado (m)
Sector A	7782.08	$1.77 \pm 0.007 \times 10^5$	$1.51 \pm 1.3 \times 10^5$	0.85 ± 0.73
Sector B	2580.40	$3.75 \pm 0.026 \times 10^4$	$2.86 \pm 2.13 \times 10^4$	0.76 ± 0.57
Sector C	1063.00	$1.92 \pm 0.011 \times 10^4$	$1.15 \pm 0.92 \times 10^4$	0.60 ± 0.48
Sector D	6751.81	$2.11 \pm 0.006 \times 10^5$	$1.74 \pm 1.39 \times 10^4$	0.82 ± 0.66
Sector E	1785.10	$7.56 \pm 0.018 \times 10^4$	$1.51 \pm 0.76 \times 10^4$	0.20 ± 0.10
Sector F	2048.98	$7.17 \pm 0.020 \times 10^4$	$3.12 \pm 2.84 \times 10^4$	0.43 ± 0.40
Sector G	4665.40	$1.60 \pm 0.006 \times 10^5$	$2.14 \pm 1.78 \times 10^5$	1.34 ± 1.11
Sector H	1189.54	$2.36 \pm 0.012 \times 10^4$	$3.65 \pm 6.52 \times 10^4$	1.54 ± 1.49
Sector I	2069.64	$5.49 \pm 0.006 \times 10^5$	$2.18 \pm 3.97 \times 10^4$	0.40 ± 0.72
Campo de lava	23889.49	$8.32 \pm 0.004 \times 10^5$	$6.76 \pm 0.65 \times 10^5$	0.76 ± 0.71
		Volumen DRE (m³)	$5.07 \pm 0.49 \times 10^5$	

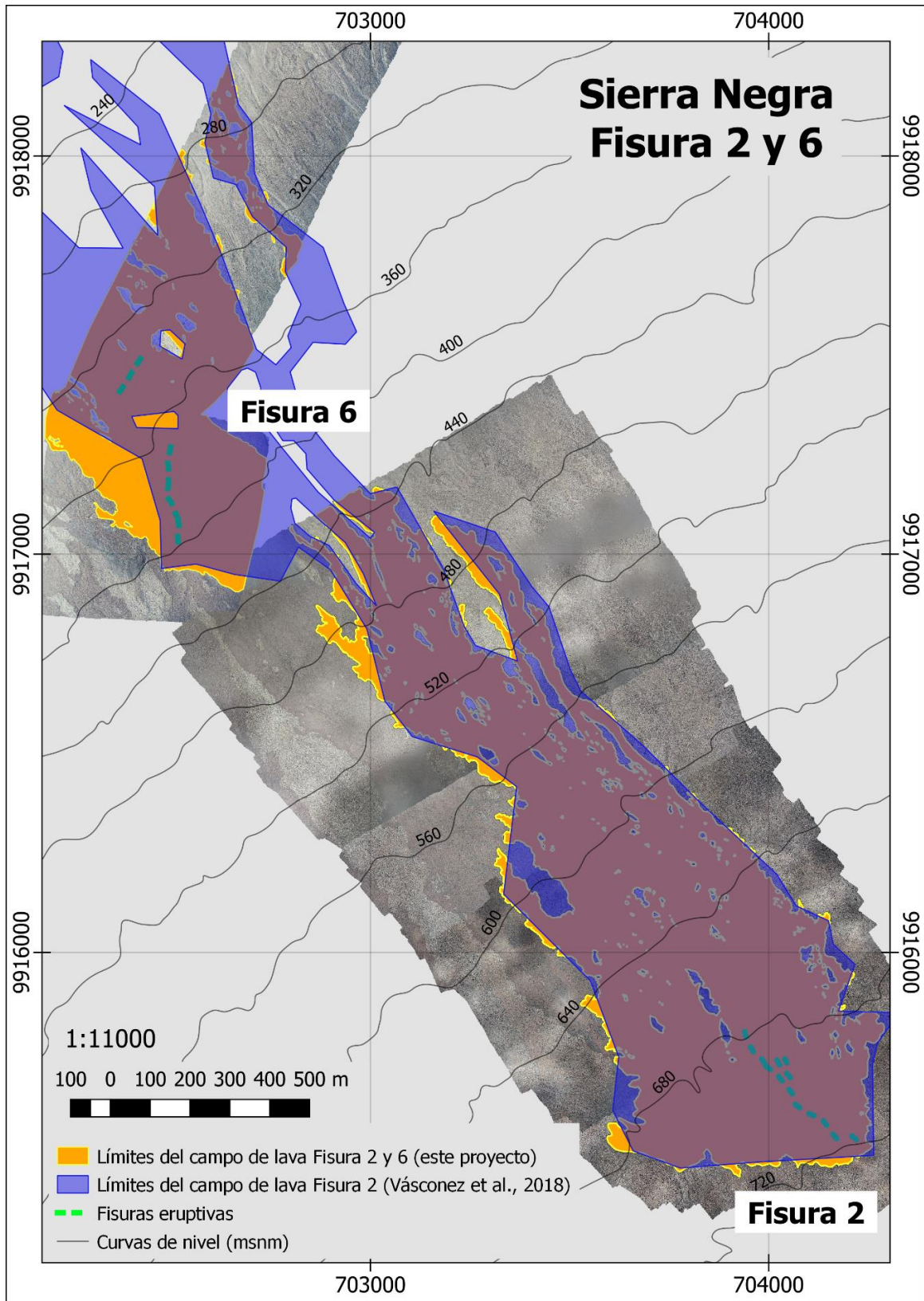


Figura 3.3. Cartografía del campo de lava de la fisura 2 y 6 de la erupción de 2018 Sierra Negra. Este proyecto (campo anaranjado). Vásquez et al. (2018) (campo azul).

Estimación de los parámetros físicos y reológicos

Fisura eruptiva 2

La estimación de la tasa de efusión, viscosidad, velocidad y límite elástico han sido calculados a partir de la metodología descrita en la sección 2.3. El flujo de lava que se ha escogido para la estimación de estos parámetros corresponde al flujo de lava que se encuentra al oriente de todo el campo de lava de la fisura eruptiva 2, que corresponde a un flujo de lava distal completo (se observa el frente del flujo), con una longitud de 1372 ± 2.9 m (Fig. 3.4). Este flujo, se ha analizado desde la zona donde se observa a mejor detalle, es decir, desde donde el flujo casi se individualiza, debido a que, en la zona cercana al centro de emisión, existen otros flujos adyacentes que podrían influir en el resultado del cálculo de parámetros reológicos.

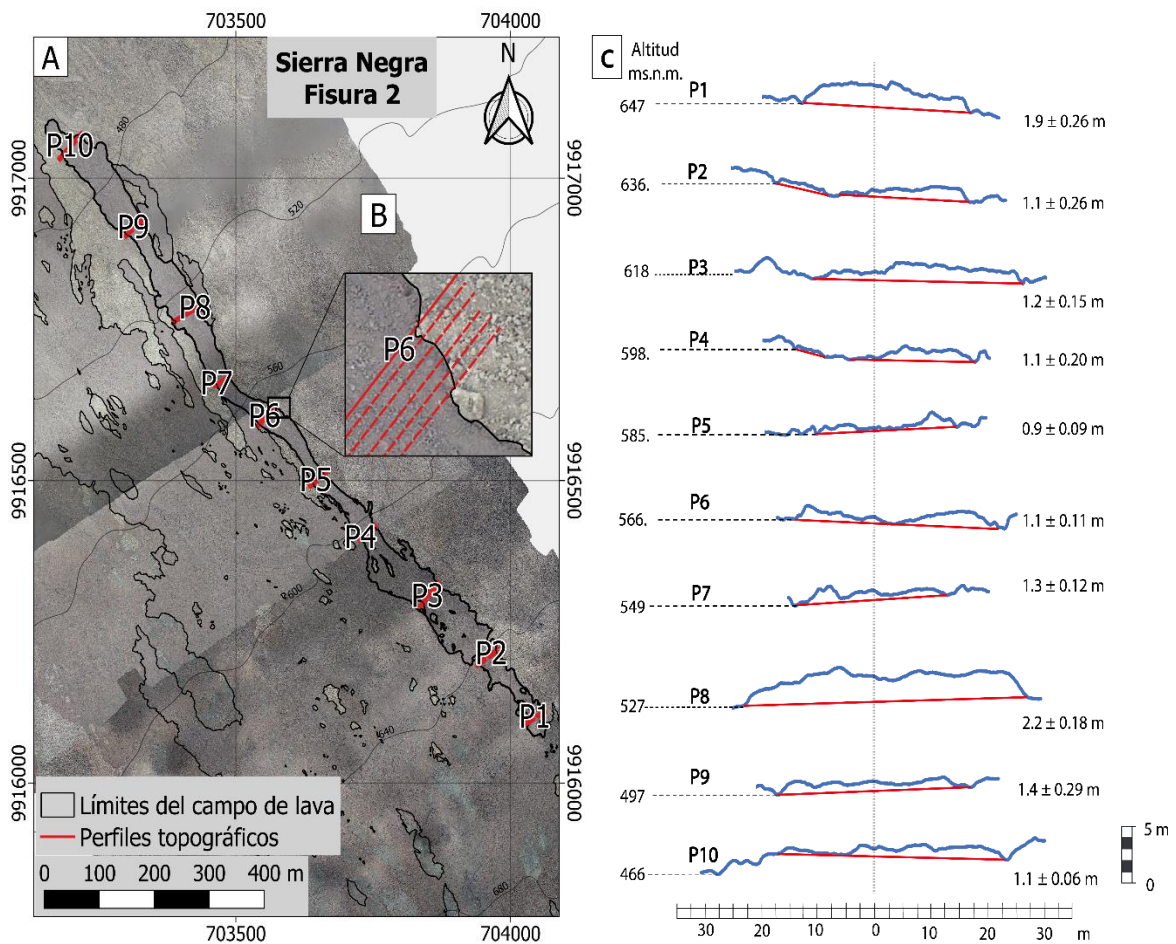


Figura 3.4. A) Cartografía del campo de lava con el flujo de lava estudiado junto con los perfiles topográficos realizados (líneas rojas). B) Ampliación de una sección del flujo de lava del perfil 6 principal con sus respectivos perfiles auxiliares. C) Representación de los perfiles topográficos, a la derecha de cada perfil se muestra el espesor promedio calculado, la línea roja representa la base del flujo de lava de 2018.

A continuación, se muestra la Tabla 3.2 con los parámetros reológicos, constantes físicas y dimensiones utilizadas en las ecuaciones para este estudio. Las mediciones y los perfiles utilizados en la estimación se exponen en el Anexo III.

Tabla 3.2. Constantes físicas, parámetros morfológicos y reológicos del flujo de lava analizado de la fisura eruptiva 2.

CONSTANTES FÍSICAS	
Número de Grätz Gz	300
Difusividad térmica k [m ² .s ⁻¹]	4.20 × 10 ⁻⁷
Densidad de la lava ρ [kg.m ⁻³]	2.60 × 10 ³
Gravedad g [m.s ⁻²]	9.8

PERFILES							
	Ancho del flujo W [m]	Espesor H [m]	Pendiente α [°]	Viscosidad η [Pa.s]	Velocidad v [m/s]	Límite elástico τ [Pa]	Distancia a la fisura [m]
P1	29 ± 0.98	1.9 ± 0.26	5.04 ± 0.42	3.29 ± 0.19 × 10 ⁴	0.08 ± 0.005	4.21 ± 0.68 × 10 ³	496
P2	34 ± 0.52	1.1 ± 0.26	5.96 ± 0.33	1.02 ± 0.06 × 10 ⁴	0.11 ± 0.07	3.03 ± 0.71 × 10 ³	621
P3	40 ± 0.46	1.2 ± 0.15	7.33 ± 0.17	1.86 ± 0.11 × 10 ⁴	0.09 ± 0.005	4.00 ± 0.49 × 10 ³	753
P4	32 ± 0.84	1.1 ± 0.20	8.17 ± 0.25	1.30 ± 0.08 × 10 ⁴	0.12 ± 0.007	4.12 ± 0.72 × 10 ³	861
P5	25 ± 0.73	0.9 ± 0.09	8.28 ± 0.23	5.64 ± 0.33 × 10 ³	0.19 ± 0.011	3.40 ± 0.39 × 10 ³	1004
P6	34 ± 0.32	1.1 ± 0.11	8.40 ± 0.17	1.29 ± 0.07 × 10 ⁴	0.12 ± 0.007	4.11 ± 0.42 × 10 ³	1181
P7	26 ± 0.56	1.3 ± 0.12	9.99 ± 0.64	1.99 ± 0.12 × 10 ⁴	0.13 ± 0.007	5.79 ± 0.65 × 10 ³	1264
P8	50 ± 1.32	2.2 ± 0.18	9.99 ± 0.27	1.84 ± 0.11 × 10 ⁵	0.04 ± 0.002	9.78 ± 0.83 × 10 ³	1373
P9	35 ± 0.38	1.4 ± 0.29	9.76 ± 0.47	3.28 ± 0.19 × 10 ⁴	0.09 ± 0.005	6.15 ± 1.31 × 10 ³	1573
P10	46 ± 1.17	1.1 ± 0.06	9.14 ± 0.80	2.12 ± 0.12 × 10 ⁴	0.08 ± 0.005	4.63 ± 0.48 × 10 ³	1741

FLUJO DE LAVAS		CAMPO DE LAVAS	
Ancho del flujo W [m]	35 ± 0.34	Duración de la erupción [h] (máx)	30
Espesor H [m]	1.4 ± 0.1	Duración de la erupción [h] (min)	19
Pendiente α [°]	8 ± 0.3	*Tasa de efusión Q [m ³ /s]	10-16
Longitud L [m]	1372 ± 2.9	Área A [m ²]	8.32 ± 0.004 × 10 ⁵
Tasa de efusión Q [m ³ /s]	4.4 ± 0.3	Volumen (BULK) V [m ³]	6.76 ± 0.65 × 10 ⁵
Viscosidad η [Pa.s]	3.52 ± 0.2 × 10 ⁴	Volumen (DRE) V [m ³]	5.07 ± 0.49 × 10 ⁵
Velocidad v [m/s]	0.10 ± 0.01		
Límite elástico τ [Pa]	4923 ± 328		
Tiempo emplazamiento [h]	4 ± 0.2		

*La tasa de efusión volumétrica estimada para todo el campo de lava fue calculada utilizando el volumen total y, la duración máxima y mínima de la erupción.

El espesor y el ancho del flujo de lava se estimó con el promedio de los valores entre el perfil principal (10 en total) y sus perfiles auxiliares (5 por cada perfil principal). El espesor promedio ponderado de todo el flujo de lava es de 1.4 ± 0.1 m, este valor fue calculado considerando el ancho de cada perfil. El ancho promedio para todo el flujo es 35 ± 0.3 m

y el valor de la pendiente es $8 \pm 0.3^\circ$, contemplando que se emplearon datos sobre el flujo y adyacente al flujo de lava.

La tasa de efusión para el flujo estudiado es de $4.4 \pm 0.3 \text{ m}^3/\text{s}$. La viscosidad máxima calculada fue de $1.84 \pm 0.11 \times 10^5 \text{ Pa s}$ situado cercano al perfil 8 a $\sim 1373 \text{ m}$ de la fisura, y una viscosidad mínima de $5.64 \pm 0.33 \times 10^3 \text{ Pa s}$ situado en las cercanías al perfil 5 a $\sim 1004 \text{ m}$ de la fisura. La viscosidad promedio para todo el flujo de lava analizado es de $3.52 \pm 0.2 \times 10^4 \text{ Pa s}$ y una velocidad promedio de $0.10 \pm 0.01 \text{ m/s}$, lo cual indica que el emplazamiento de este flujo de lava pudo tardar mínimo 4 ± 0.2 horas.

Todos estos valores hallados se tomaron en cuenta asumiendo un comportamiento newtoniano en una lava canalizada con pendiente inclinada, como lo requiere la ecuación de Jeffreys (1925) y modificada por Nichols (1939). Así como, la aproximación del número de Gratz (Pinkerton y Wilson, 1994) que considera que el avance del flujo depende del enfriamiento de la lava.

Además, se asumió que la duración máxima de la erupción en la fisura 2 alcanzó 30 horas y la duración mínima 19 horas, esto a partir del análisis realizado en el trabajo de (Calderón, 2022), donde se examinó para la fisura eruptiva 3.

Fisura eruptiva 6

La estimación del espesor promedio para la fisura eruptiva 6 ha sido calculado de manera similar a la metodología descrita en la sección 2.3. La diferencia se encuentra en que se han realizado 18 perfiles en total en la zona de los segmentos de la fisura y en el frente del campo de lava, en el que se han obtenido los valores de espesores máximos tomando en cuenta la altura de solo una base en el caso de los perfiles del frente de campo de lava, debido a la falta de información sobre el campo de lava de la fisura eruptiva 6 (Anexo IV).

Por el contrario, para los perfiles de las zonas proximales a los segmentos de la fisura eruptiva 6 se ha calculado los espesores máximos tomando las alturas de las bases de los dos lados del lóbulo de lava.

La estimación del espesor máximo ponderado de la fisura eruptiva 6 es $3.61 \pm 2.29 \text{ m}$. Los espesores máximos calculados en zonas del frente del campo de lava son mayores a 3 m, mientras que los espesores máximos calculados en zonas proximales a los segmentos de la fisura eruptiva 6 son menores a 3 m.

Tabla 3.3. Espesores máximos de los perfiles analizados sobre el campo de lava de la fisura eruptiva 6.

FISURA 6			
Perfiles	Espesor máximo [m*]	Espesor máximo ponderado [m]	Error espesor ponderado [m]
Frente del campo de lava		3.61	2.29
P1	3.75		
P2	3.44		
P3	4.90		
P4	6.35		
P5	5.55		
P6	7.84		
P7	6.44		
P8	7.89		
Zonas proximales a la fisura			
P9	2.24		
P10	1.51		
P11	1.87		
P12	1.74		
P13	1.25		
P14	1.27		
P15	2.04		
P16	2.28		
P17	2.03		
P18	2.51		

Descripción petrográfica de las lavas de la fisura 2 y 6

Para la caracterización petrográfica de muestras analizadas en este estudio que han sido recolectadas en la misión de campo de 2020, se han considerado tres muestras de la fisura 2 (F2-01A, F2-02 y F2-03), y una muestra de la fisura 6 (F6-01).

F2-01A

Esta roca presenta una textura hipocristalina con matriz vítrea microlítica. La fracción de fenocristales alcanza tan solo un 4%. Mineralógicamente está constituido por plagioclasa (3.5%), subhedrales a anhedrales. En un solo fenocristal se puede observar una macla polisintética característico de este mineral con una zona fracturada y absorbida; clinopiroxeno (0.5%), cristales anhedrales fracturados de aprox. 110-215 μm , que presenta textura de absorción. La matriz representa el 42 % de la roca y está constituida

por plagioclasa (20%), subhedrales tabulares; vidrio (22%), que corresponde a una masa grisácea negruzca (isótropa) rodeando los cristales de plagioclasa. Las vesículas representan el 54% del total de la roca. Se encuentran de distintos tamaños, pero muy grandes y redondeados en su mayoría con bordes irregulares, lo que clasifica a esta roca como una escoria basáltica.

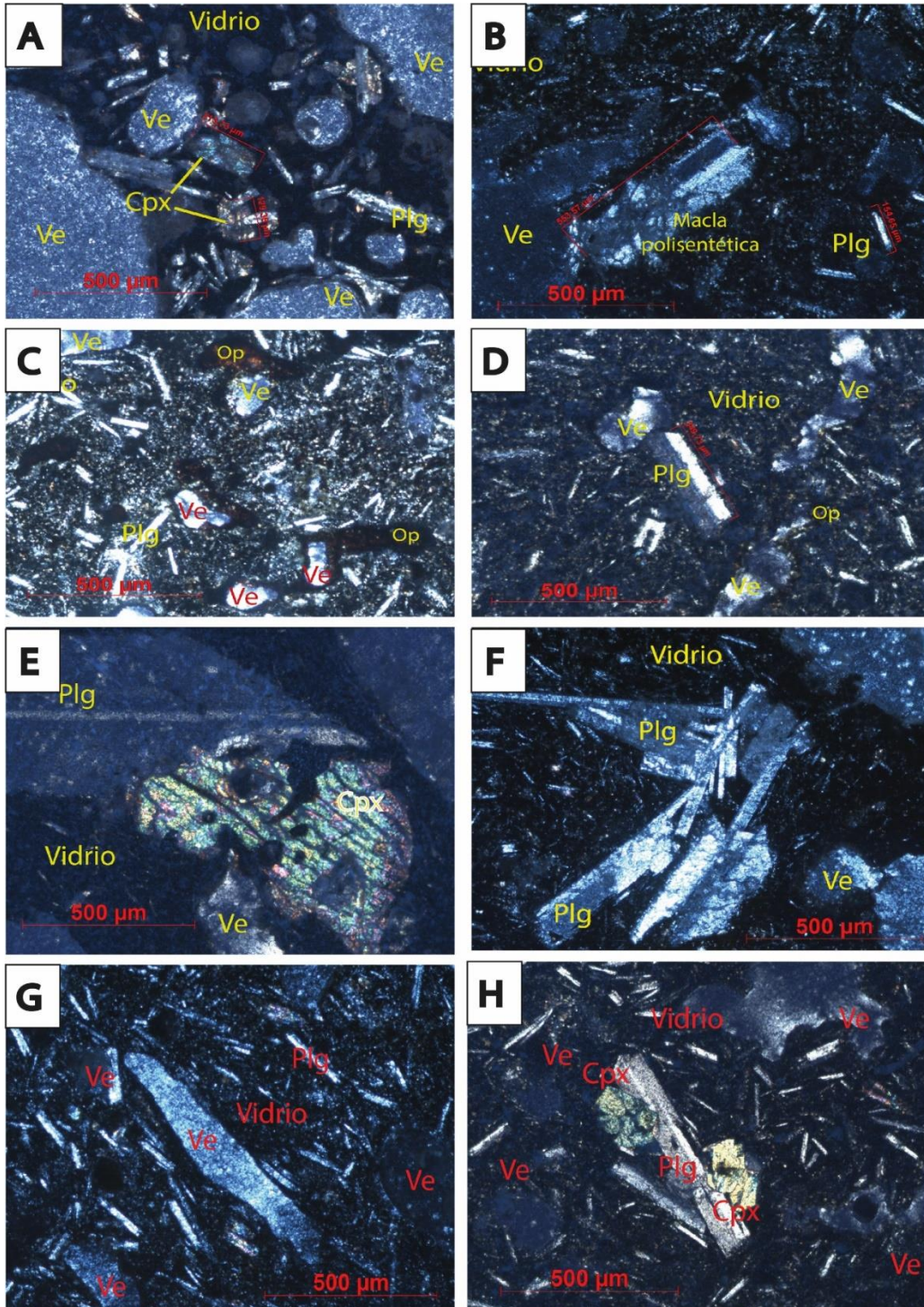


Figura 3.5. A) Vesículas, fenocristales de clinopiroxeno (F2-01A). B) Macla polisintética de un fenocristal de plagioclasa en una matriz microlítica de plagioclasa (F2-01A). C)

Matriz microlítica de plagioclasa con vesículas con bordes de opacos(F2-02). D) Macla polisintética de plagioclasa en una matriz de vidrio (F2-02). E) Fenocristal del clinopiroxeno corroído con opacos y fenocristal de plagioclasa (F2-03). F) Cúmulo de plagioclasa en una matriz vítrea (F2-03). G) Vesícula ovalada con matriz vítrea y microlitos de plagioclasa (F6-01). H) Fenocristal de plagioclasa con macla polisintética y fenocristales de clinopiroxeno (F6-01).

F2-02

Esta roca presenta una textura hipocristalina con matriz vítrea microlítica. La fracción de fenocristales alcanza tan solo un 1.31%. Mineralógicamente está constituido por plagioclasa (1.31 %), de forma euhedral con una macla polisintética. La matriz representa el 79.01% de la roca y está constituida por plagioclasa (50.49%), que corresponden a cristales subhedrales tabulares, a veces se hallan en cúmulos; vidrio (21.69%); opacos (6.83%), que se observan como manchas de color negro, y otros opacos que seguramente pueden ser óxidos de Fe que se observan de un color rojizo en Luz Polarizada Plana (LPP), y de color negro en Luz Polarizada Cruzada (XLP), además, se encuentran como bordes de oxidación en las vesículas. Las vesículas de la roca representan el 19.68% del total de la roca. Se encuentran de distintos tamaños, pero muy grandes y redondeados en su mayoría con bordes irregulares. Además, la relación matriz vítrea/ (total – vesículas) es de 0.1, lo que clasifica a esta roca como una lava basáltica tipo Pāhoehoe.

F2-03

Esta roca presenta una textura hipocristalina vesicular con matriz vítrea microlítica. La fracción de fenocristales alcanza tan solo un 2.83%. Mineralógicamente está constituido por plagioclasa (2.08%), euhedrales a subhedrales en cúmulos en cierta zona mayores a 450 μm o fenocristal subhedral acompañado de cristal de cpx mayor a 1050 μm y, clinopiroxeno (0.75%), que se observa un solo cristal anhedral con bordes y estructura corroída de aproximadamente de 820 μm , presenta textura de absorción, y dentro del mineral presenta opacos y quizá dos cristales de ortopiroxeno. La matriz representa el 65.57 % de la roca y está constituida por plagioclasa (44.8 %), cristales subhedrales tabulares; vidrio (19.53 %), y óxidos de Fe (1.24 %), que se observan de un color rojizo en LPP, y de color negro en XL. Además, se encuentran como bordes de oxidación en las vesículas. Las vesículas representan el 31.6 % del total de la roca. Por tanto, la relación entre matriz vítrea y vesículas es de 0.21. Esta roca se clasifica como una lava basáltica tipo 'a'ā.

F6-01

Esta roca presenta una textura hipocristalina vesicular con matriz vítrea microlítica. La fracción de fenocristales alcanza tan solo un 0.5 %. Mineralógicamente está constituido

por plagioclasa (0.3 %), que se observa solamente 2 fenocristales subhedrales en la roca de aproximadamente 325 y 640 μm , y en el cristal de mayor tamaño se puede observar una macla polisintética característico de este mineral; y, clinopiroxeno (0.2 %), que presenta 2 cristales subhedrales fracturados de aproximadamente 200 μm , con textura de absorción.

La matriz representa el 77.5% de la roca y está constituida por plagioclasa (37.49 %), subhedrales tabulares con tamaños entre 90 y 170 μm y presentan una textura microlítica, cumulada; vidrio (40.01%), y opacos (0.1 %), que son casi indistinguibles respecto al vidrio, pero se observan como pequeños puntos isotrópicos. Las vesículas representan el 22 % del total de la roca, se encuentran grandes y aplanadas en su mayoría con bordes irregulares y poco redondeados, algunas siguen una tendencia. Presenta una relación matriz vítrea/ (total – vesículas) igual a 0.51 lo que clasifica a esta roca como una lava basáltica tipo 'a'ã.

Análisis geoquímico

Todas las muestras de rocas analizadas se sitúan dentro del campo de la serie toleítica (Fig 3.6). Se observa que tanto las muestras de la fisura 2 como de la de la fisura 6 se encuentran bastante restringidas a una composición.

El diagrama de clasificación de roca que se usó para el análisis de las muestras de la fisura 2 y 6 fue el de Le Maitre- IUGS (1989) normalizado al 100% libre de agua. En la figura 3.7 se observa que todas las muestras analizadas se encuentran dentro del campo de los basaltos con un valor de SiO_2 entre 47.45-48.28% y un valor de álcalis ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) entre 3.70-3.86%.

Los elementos mayores y traza se han analizado a partir de diagramas Harker. Los elementos mayores que presentan correlaciones ligeramente negativas (tendencia descendente) son Fe_2O_3 , TiO_2 y MgO , mientras que el Na_2O y K_2O , muestran correlaciones positivas incipientes (tendencia ascendente), todos los óxidos respecto al sílice. El CaO , Al_2O_3 y P_2O_5 , presentan una tendencia con una composición casi constante conforme aumenta levemente el contenido de SiO_2 .

La composición química de las rocas de la fisura 2 y 6 es bastante restringida, que se puede evidenciar en todos los óxidos como: TiO_2 , 3.91-4.07%; de Al_2O_3 , 13-13.13%; Fe_2O_3 , 15.36-15.80%; MgO , 5.17-5.28%; CaO , 9.77-9.96%; Na_2O , 3.10-3.16%; K_2O , 0.58-0.60% y, P_2O_5 , 0.38-0.40% (Fig. 3.8).

Los elementos trazas que presentan correlaciones ligeramente negativas son Ba, Cr y Ni, mientras que el Rb, muestra una correlación positiva (tendencia ascendente) respecto al sílice.

La muestra de la fisura 6 tiene una composición similar a las muestras de la fisura 2, tanto en elementos mayores como en elementos traza. Sin embargo, se puede denotar que para el caso del SiO_2 vs. Rb la muestra de la fisura 6 presenta un contenido más alto de Rb respecto a las muestras de la fisura 2 (Fig. 3.9).

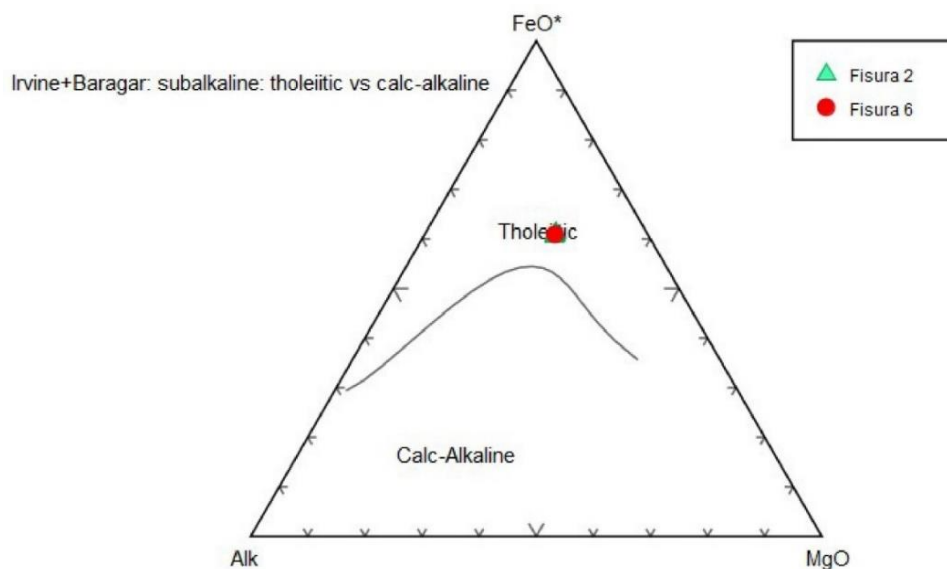


Figura 3.6. Diagrama AFM (Álcalis: $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$; F: $\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3$; M: MgO) para las rocas de la fisura 2 y 6 de la erupción del volcán Sierra Negra de 2018. La línea divisoria fue determinada por Irvine y Baragar (1971).

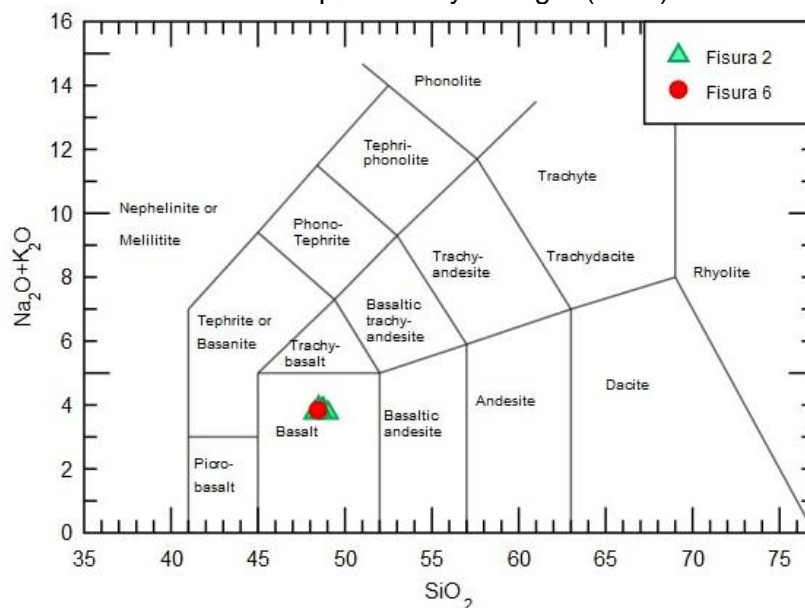


Figura 3.7. Diagrama álcalis total – sílice (TAS) de las muestras para la fisura 2 y 6. (Le Maitre- IUGS, 1989).

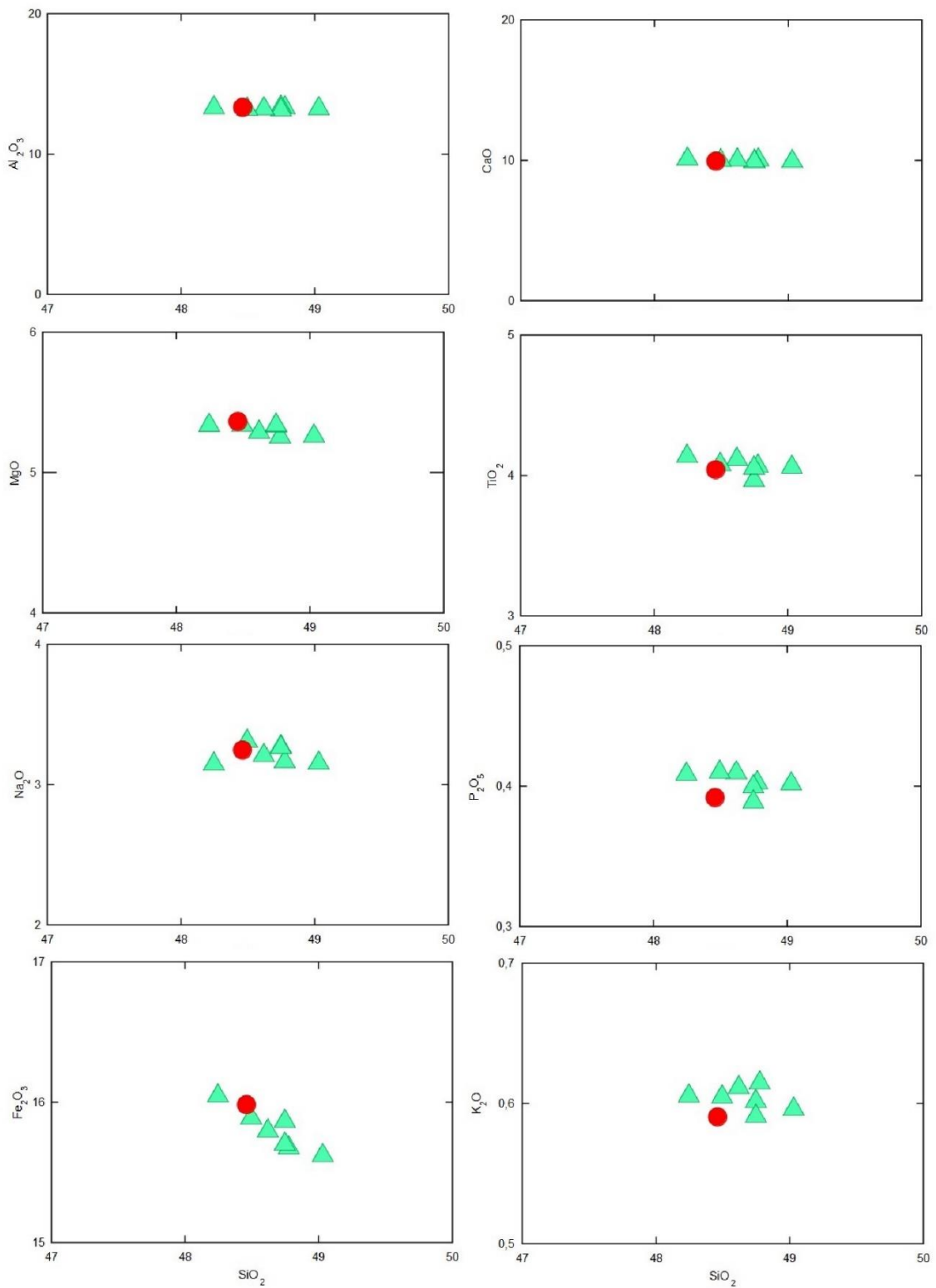


Figura 3.8. Diagramas Harker: Elementos mayores vs SiO₂. Expresados en porcentaje en peso (Simbología en la Figura 3.6 y 3.7).

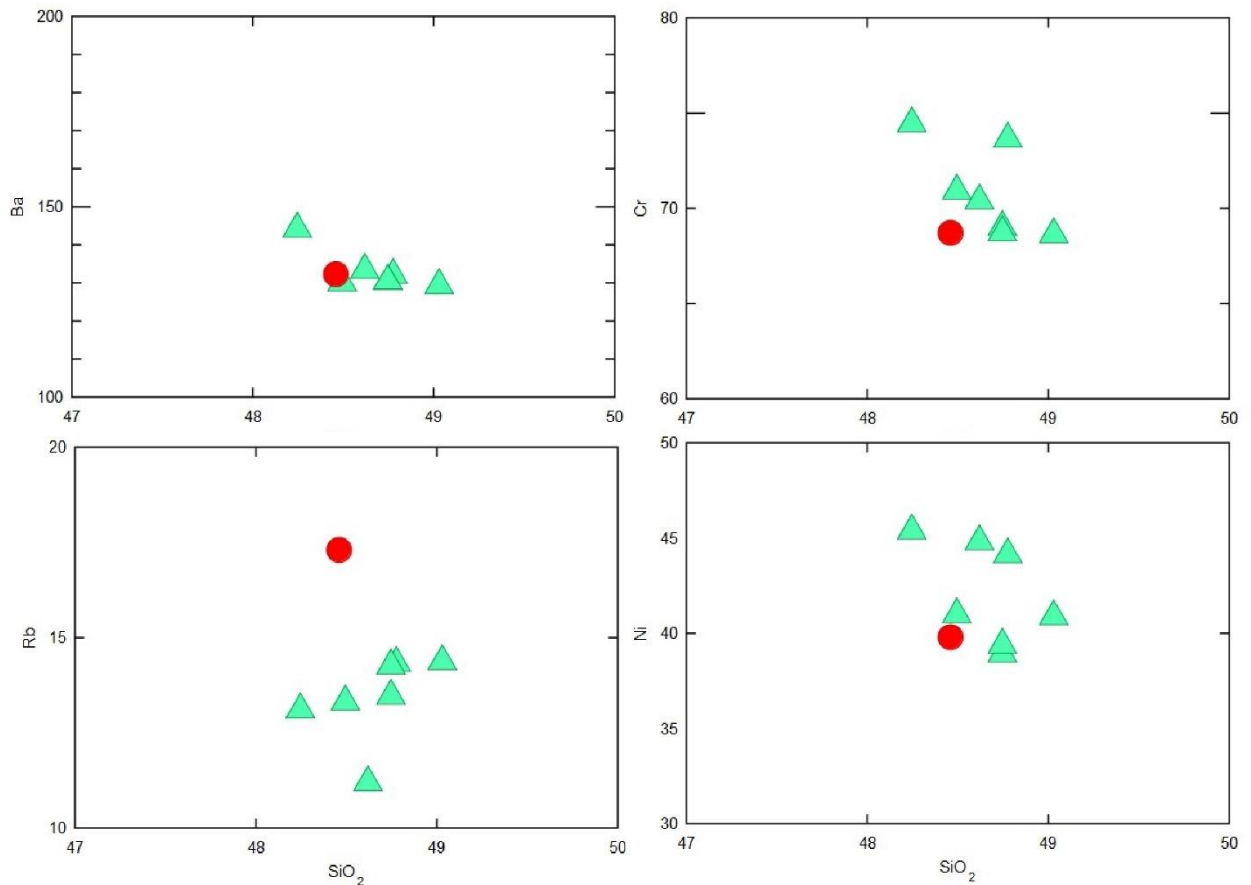


Figura 3.9. Diagramas Harker: Elementos traza vs SiO_2 . Expresados en porcentaje en peso (Simbología en la Figura 3.6 y 3.7).

3.2 Discusión

Orientación de las fisuras eruptivas

Los regímenes de esfuerzos que inducen la orientación de las fisuras eruptivas en el volcán Sierra Negra reportadas por Reynolds & Geist (1995) son tres: (1) el entorno tectónico regional que afecta la litosfera profunda, y controla la posición y lineación de los volcanes al oeste de Galápagos, (2) los esfuerzos impartidos por los volcanes vecinos, (3) el efecto del propio volcán y sus accidentes geográficos.

Todas las fisuras con tendencia E-NE han sido influenciadas mayoritariamente por los tres regímenes de esfuerzo propuestos por Reynolds et al. (1995), como fue el caso de la fisura eruptiva 3 reportada por Calderón (2022).

Sin embargo, en el caso de la orientación de la fisura eruptiva 2 que contiene tres segmentos casi paralelos a la fisura principal presenta una orientación $\sim\text{N}42^\circ\text{W}$, es decir, corresponde a una fisura radial ubicada a ~ 3 km al N-W de la caldera. Al igual que la

figura 6 que contiene dos segmentos cuya orientación de F6a es $\sim N32^{\circ}E$ y de F6b es $\sim N8^{\circ}E$, una fisura radial situado en el flanco noroccidental cercana a la fisura eruptiva 2 (Figura 3.11).

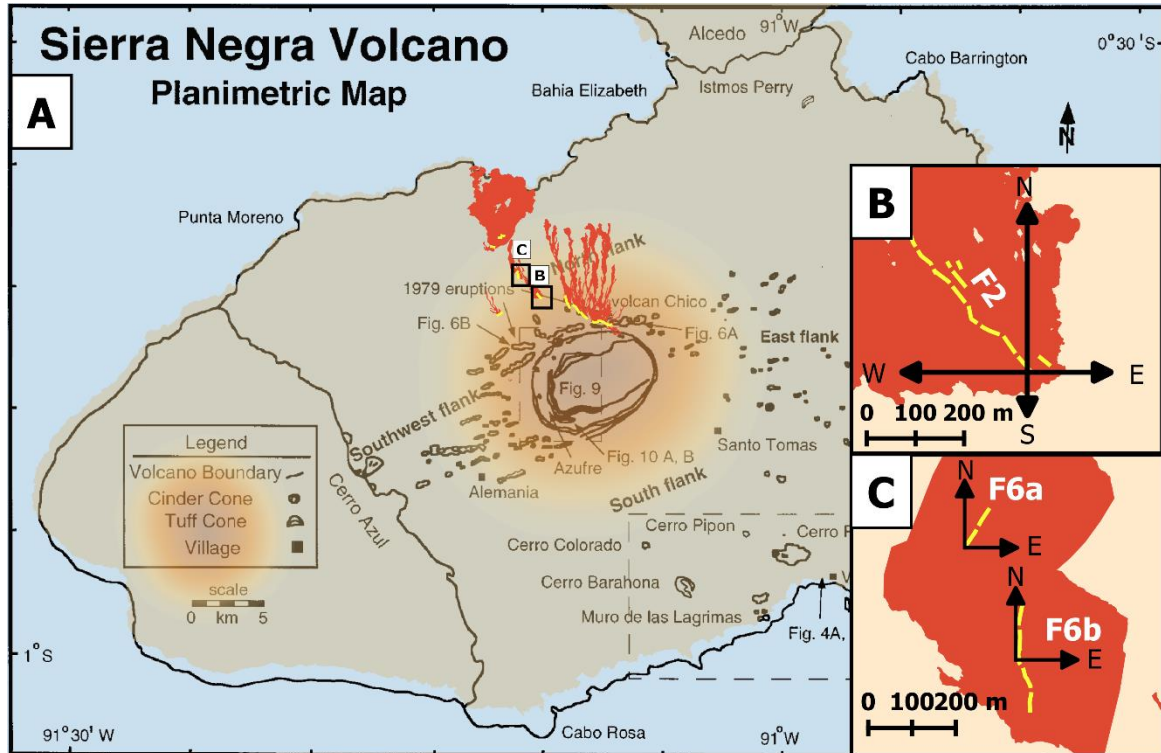


Figura 3.10. A) Mapa planimétrico del volcán Sierra Negra mostrando zonas eruptivas donde se puede observar con tendencia E-NE (fisuras circunferenciales y radiales) y fisuras radiales en el flanco norte similar a la fisura 2 y 6. B) Acercamiento a la zona de fisuras de la fisura eruptiva 2, donde se observa la orientación de los segmentos de fisura. C) Acercamiento a la zona de fisuras de la fisura eruptiva 6, donde se observa la orientación de los segmentos de fisura. Tomada y modificado de Reynolds et al. (1995), los límites rojizos representan los campos de lava de la erupción de 2018, para la fisura 2 fueron obtenidos en este trabajo y para el resto de fisuras los datos fueron tomados de (Vasconez et al., 2018).

Demuestran que el régimen de esfuerzos que mayoritariamente dominaría es el efecto propio del volcán, debido a que este factor domina el desarrollo de campo de esfuerzos de la cumbre y genera mayor concentración de fisuras circunferenciales cercanas a la cima de la caldera principalmente en el flanco norte y, en los flancos este y suroeste hay mayor concentración de fisuras radiales tal como lo reporta (Reynolds et al., 1995).

Por tanto, el modelo del campo de esfuerzos con tendencia E-NE propuesto por Reynolds et al. (1995), se acoge en mayor medida a la cumbre del volcán Sierra Negra donde dominan fisuras eruptivas circunferenciales (Fig. 3.11), y en el caso de la fisura 2 y 6, estas se ubican en el flanco NW del volcán, consistente con el patrón característico de las fisuras radiales en los volcanes activos de Galápagos (Banfield et al. 1956; McBirney y

Williams 1969; Simkin 1972; Nordlie 1973; Simkin 1984). Y conjuntamente a esto, la fisura 2 parece ser de similar orientación que las fisuras radiales reportadas entre 100 y 200 años en el flanco norte por (Reynolds et al., 1995).

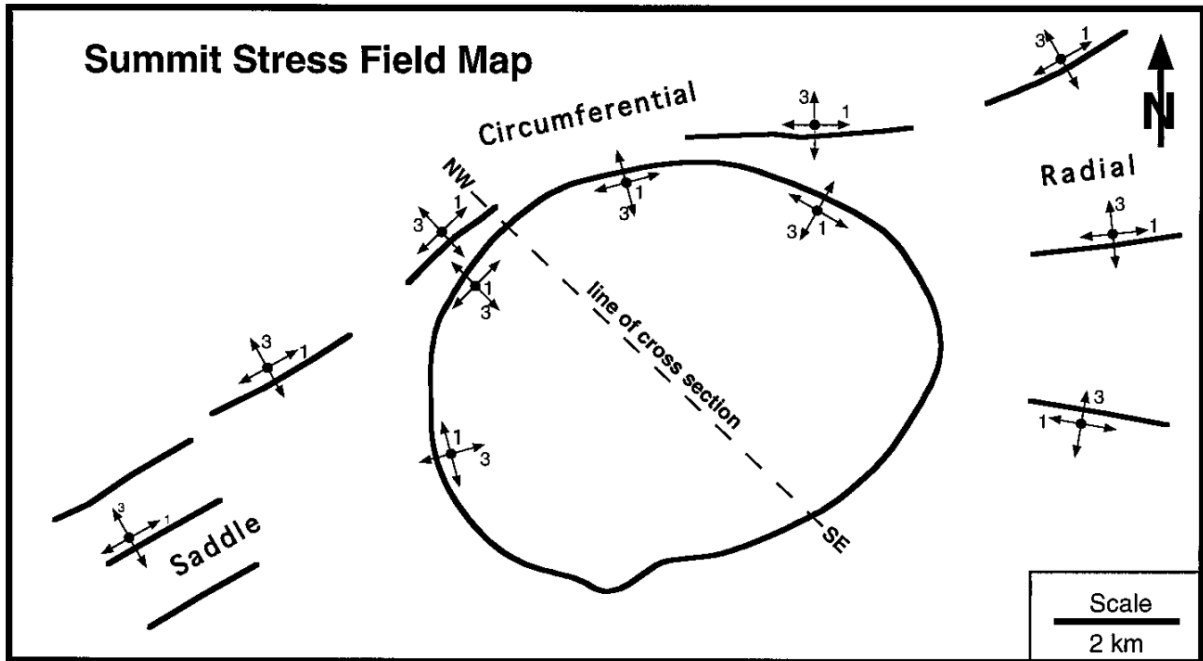


Figura 3.11. Campo de esfuerzos en la cumbre del volcán Sierra Negra. Las flechas y los círculos sólidos indican una orientación de esfuerzo. 1: esfuerzo máximo; 2: esfuerzo intermedio; 3: esfuerzo mínimo (Reynolds et al. 1995).

Cronología de eventos

La fisura eruptiva 2 presentó una erupción con al menos 2 pulsos eruptivos consecutivos (Figura 3.12). El primer pulso generó actividad en todos los centros de emisión formando los primeros canales de lava en las zonas más proximales a la fisura. Además, los depósitos principales del primer pulso corresponden a flujos de lava tipo pāhoehoe relacionados a tasas de efusión muy bajas según Harris & Rowland (2015), *spatter* y depósitos de escoria de espesores menores a 30 cm que se observan al oeste de la fisura eruptiva. La extensión de estos depósitos se ha inferido a ~1 km pendiente abajo y lateralmente ~450 m que se observan zonas en este perímetro del campo de lava donde se observan estos depósitos subyacentes a los depósitos del segundo pulso. En general, las zonas por las cuales se encuentra distribuido los depósitos presentan un espesor menor a 1 m.

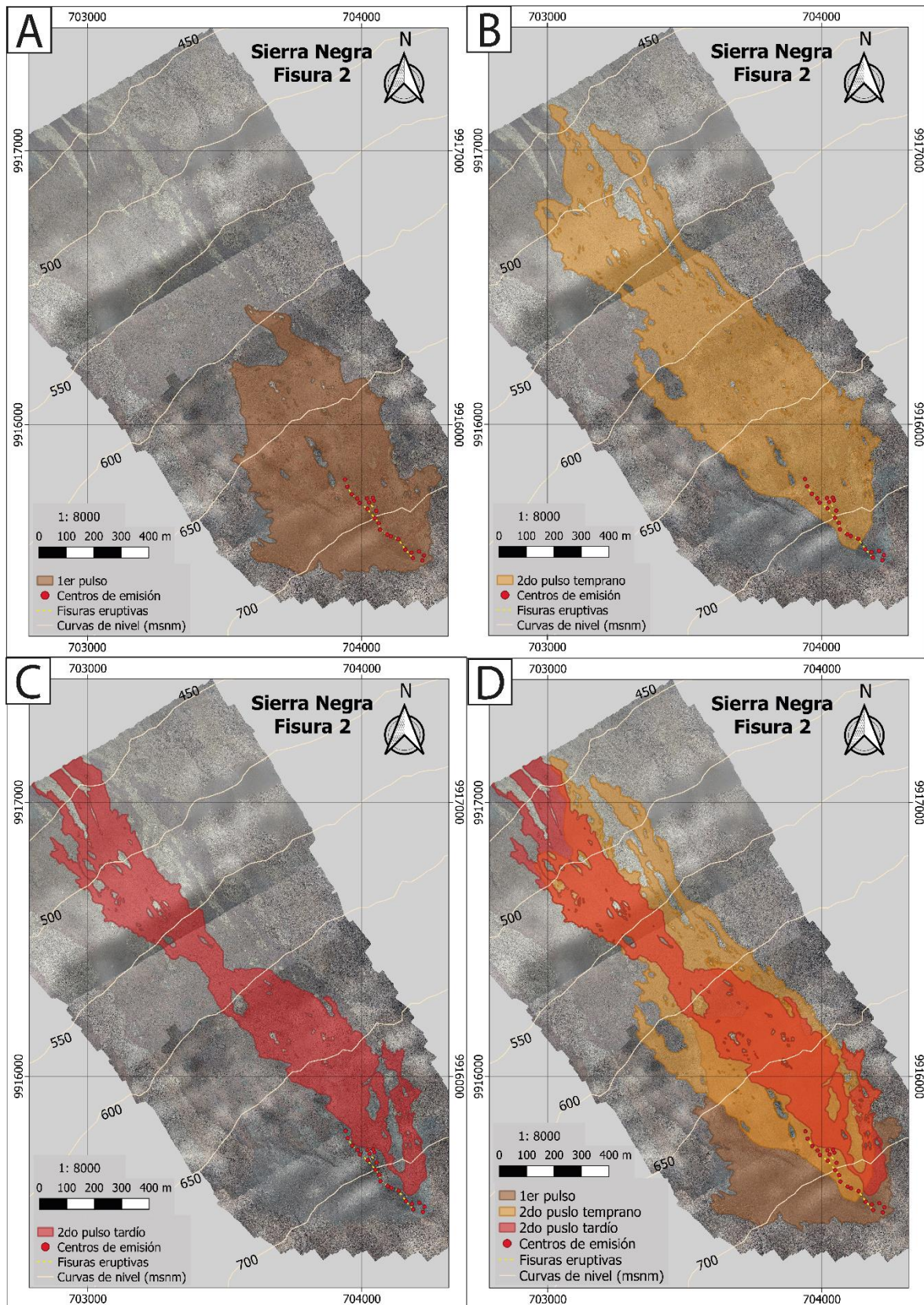


Figura 3.12. Depósitos de la fisura eruptiva 2. A) Primer pulso. B) Segundo pulso temprano. C) Segundo pulso tardío. D) Distribución de los depósitos de lava de la fisura eruptiva 2.

Para el segundo pulso de actividad en la erupción, se observan al menos 2 fases marcadas por un incremento en la tasa de efusión que es concordante con la longitud de flujos de lava basálticos (Pinkerton, 1987; Pinkerton y Wilson, 1994). Durante este pulso posiblemente se activaron en el transcurso de una primera fase desde C4-15 en la fisura principal y en los segmentos paralelos C19-23, los cuales generaron grandes flujos de lava ~2 km de longitud y lateralmente ~475 m que dejaron a su paso canales de lava.

Los flujos de lava de la segunda fase del segundo pulso expuestos desde los centros de emisión centrales de la fisura (C8-12 y C19-C23) se canalizaron y avanzaron hasta las zonas más distales con una longitud mayor a 2 km pendiente abajo y una longitud lateral ~260 m. Los depósitos de este pulso de emisión son flujos de lava tipo 'a'ā con un espesor entre ~1-2 m.

Estos dos pulsos descritos anteriormente, revela que la actividad eruptiva al inicio es un tanto caótica debido a la convección sub superficial de magma (Bruce y Huppert, 1989; Wylie et al., 1999), y por ello la actividad en todos los centros de emisión, y después, la actividad se puntualiza únicamente en un sector de la fisura debido a los cambios térmicos y reológicos en el dique sub volcánico generando que aumente la viscosidad a medida que avance el tiempo (mediante el enfriamiento, la cristalización y/o la disminución del ancho del dique) (Bruce y Huppert, 1989; Wylie et al., 1999), como en este caso, se situó en la zona central de la fisura.

La tasa de efusión volumétrica promedio ha sido estimada en $4.4 \pm 0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ para el flujo de lava estudiado, mientras que la tasa de efusión volumétrica para todo el campo de lava ha sido estimada entre $10\text{-}16 \text{ m}^3/\text{s}$ (considerando una duración máxima de la erupción de 30 horas y una duración mínima de 19 horas).

3.3 Conclusiones

1. La cartografía a alta resolución de la fisura eruptiva 2 realizada en este estudio permitió estimar el volumen y los parámetros reológicos del campo de lava. El área que cubren los depósitos analizados en este estudio es de 0.83 km^2 con un espesor de $0.76 \pm 0.71 \text{ m}$, que es similar al área que ocupan los límites de la fisura 2 con un valor de 0.9 km^2 asumiendo un espesor de $3 \pm 1.5 \text{ m}$ (sin tomar en cuenta el área de la fisura 6 y las zonas en las hubo falta de cobertura de vuelos), obtenido por imágenes satelitales en el estudio de Vasconez et al. (2018). Es decir, el área concuerda bastante bien con un error de tan solo 0.07 km^2 , siendo

que el valor obtenido en este estudio es más exacto debido al nivel de detalle. De todas formas, los estudios realizados con imágenes satelitales siguen siendo confiables. En cuanto al espesor, este si varía significativamente con el espesor reportado en el estudio de Vasconez et al. (2018).

2. El volumen total (Bulk) de los depósitos del campo de lava de la fisura 2 ha sido estimado con el valor de $6.76 \pm 0.65 \times 10^5 \text{ m}^3$. El valor del volumen (DRE) estimado fue de $5.07 \pm 0.49 \times 10^5 \text{ m}^3$, asumiendo un porcentaje de 25% que corresponden a los espacios vacíos, valor que se afina mucho más realizando un promedio de los valores de vesicularidad obtenidos en las distintas muestras de roca de la fisura 2 ya que se puede utilizar para modificar el volumen denso de material emitido.
3. El espesor promedio calculado en este estudio para el flujo de lava estudiado de la fisura eruptiva 2 es de $1.4 \pm 0.1 \text{ m}$, el ancho promedio es de $35 \pm 0.34 \text{ m}$ y el valor de la pendiente es de $8 \pm 0.3^\circ$. Los valores de la pendiente calculados en cada uno de los perfiles muestran una tendencia a aumentar conforme se aleja de la fisura eruptiva, lo cual es atípico, debido a que los volcanes escudos presentan pendientes cada vez más baja conforme se distancia de la caldera.
4. La estimación del espesor promedio del flujo es mucho mayor que el espesor promedio del campo de lava. Probablemente se debe a que, en el cálculo del espesor del campo de lava, se tomaron en cuenta zonas proximales (sector E, F e I) a la fisura donde los espesores tienen un promedio menor a 0.4 m y en este estudio no se consideró los frentes del flujo, donde el espesor puede aumentar significativamente. Por lo que estas dos causas pueden influir en el valor promedio del espesor de todo el campo de lava.
5. La tasa de efusión estimado del flujo de lava fue de $4.4 \pm 0.3 \text{ m}^3/\text{s}$, la viscosidad promedio para todo el flujo de lava analizado es de $3.52 \pm 0.2 \times 10^4 \text{ Pa s}$ y una velocidad promedio de $0.10 \pm 0.01 \text{ m/s}$, lo que se infiere que el emplazamiento de este flujo de lava pudo tardar mínimo a $4 \pm 0.2 \text{ horas}$. Estos valores son concordantes con estudios reportados por otros autores en volcanes de similares características y en los de Galápagos.
6. La estimación del espesor máximo ponderado de la fisura eruptiva 6 es $3.61 \pm 2.29 \text{ m}$. Este valor puede ayudar como una primera aproximación al espesor promedio de todo el campo de lava de la fisura eruptiva 6.
7. El análisis geoquímico permitió confirmar la confiabilidad del análisis petrográfico, especialmente en los diagramas de clasificación donde las muestras estudiadas se situaron en el campo de basaltos toleíticos. Además, al analizar los elementos

mayores y traza, se pudo evidenciar que no existe una diversidad en las composiciones química de las rocas estudiadas, por lo que no intervendría la química de las rocas en los análisis de estimaciones reológicas y dinámicas a partir de la morfología.

8. La orientación de la fisura 2 y sus segmentos paralelos son de $\sim N42^{\circ}W$ que corresponde a una fisura radial situado en el flanco noroccidental, que es consistente al modelo característico de las fisuras radiales en los volcanes activos de Galápagos, los cuales mayoritariamente se sitúan en los flancos, contrario a las fisuras circunferenciales que por lo general se sitúan en o cercano a las cumbres.
9. La fisura 6 presenta 2 segmentos cuya orientación es $\sim N32^{\circ}E$ para el segmento F6a y $\sim N8^{\circ}E$ para el segmento F6b que corresponde a una fisura radial situado en el flanco noroccidental cercana a la fisura eruptiva 2.
10. La fisura eruptiva 2 presentó una erupción con al menos 2 pulsos eruptivos consecutivos: (1) generó actividad en todos los centros de emisión con tasas de efusión bajas, depósitos de flujos de lava tipo pāhoehoe, *spatter* y depósitos de escoria. La extensión de estos depósitos se ha inferido a ~ 1 km pendiente abajo y lateralmente ~ 450 m. (2) se observan al menos 2 fases marcadas, la fase 1 se caracterizó por un incremento en la tasa de fusión C4-15 en la fisura principal y en los segmentos paralelos C19-23, los cuales generaron grandes flujos de lava ~ 2 km de longitud y lateralmente ~ 475 m y la fase 2 se caracterizó por actividad en los centros de emisión centrales de la fisura (C8-12 y C19-C23) que generaron flujos de lava con una longitud mayor a 2 km pendiente abajo y una longitud lateral ~ 260 m.

3.4 Recomendaciones

1. Realizar una nueva misión de campo para completar el flujo de la fisura 2 debido a que las ortofotografías y MDE no abarca en su totalidad la parte más distal del campo de la lava.
2. Estimar el valor del espesor y volumen de la fisura 2 que abarque toda el área que ocupa el campo de lava para afinar los resultados de estos valores.
3. Efectuar una nueva misión de campo para completar la zona donde se encuentra el flujo de la fisura 6 ya que se encuentra incompleta, por lo que no es posible realizar una cartografía de alta resolución final de esta fisura.

4. Realizar la estimación de parámetros reológicos y dinámicos, y el cálculo de volumen en la fisura 6 para determinar las semejanzas y diferencias que existen entre las fisuras estudiadas previamente.
5. Recolectar muestras de la fisura 6 en la parte proximal a la fisura debido a que solo se tiene una muestra de la parte distal del flujo.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allaby, M. (Ed.). (2013). *A dictionary of geology and earth sciences* (Fourth edition). Oxford University Press.
- Barckhausen, U., Ranero, C. R., von Huene, R., Cande, S. C., & Roeser, H. A. (2001). Revised tectonic boundaries in the Cocos Plate off Costa Rica: Implications for the segmentation of the convergent margin and for plate tectonic models. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *106*(B9), 19207-19220. <https://doi.org/10.1029/2001JB000238>
- Bernard, B. (2017). *Resumen geológico Volcán Sierra Negra*. 10.
- Bernard, B., Stock, M. J., Coppola, D., Hidalgo, S., Bagnardi, M., Gibson, S., Hernandez, S., Ramón, P., & Gleeson, M. (2019). Chronology and phenomenology of the 1982 and 2015 Wolf volcano eruptions, Galápagos Archipelago. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, *374*, 26-38. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.02.013>
- Calderón, H. R. C. (2022). *CARTOGRAFÍA DE ALTA RESOLUCIÓN Y CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE LOS PRODUCTOS DE LA ERUPCIÓN DE 2018 DEL VOLCÁN SIERRA NEGRA, ARCHIPIÉLAGO DE GALÁPAGOS*. Escuela Politécnica Nacional.
- Duncan, R. A., & Hargraves, R. B. (1984). Plate tectonic evolution of the Caribbean region in the mantle reference frame. En *Geological Society of America Memoirs* (Vol. 162, pp. 81-94). Geological Society of America. <https://doi.org/10.1130/MEM162-p81>
- Geist, D. (1997). *Sobre el surgimiento y hundimiento de las Islas Galapagos*. 8.
- Geist, D., Chadwick, W., & Johnson, D. (2006). Results from new GPS and gravity monitoring networks at Fernandina and Sierra Negra Volcanoes, Galápagos, 2000–2002. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, *150*(1-3), 79-97. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2005.07.003>
- Geist, D. J., Harpp, K. S., Naumann, T. R., Poland, M., Chadwick, W. W., Hall, M., & Rader, E. (2008). The 2005 eruption of Sierra Negra volcano, Galápagos, Ecuador. *Bulletin of Volcanology*, *70*(6), 655-673. <https://doi.org/10.1007/s00445-007-0160-3>
- Geist, D., White, W. M., Albarede, F., Harpp, K., Reynolds, R., Blichert-Toft, J., & Kurz, M. D. (2002). Volcanic evolution in the Galápagos: The dissected shield of Volcan Ecuador: EVOLUTION OF VOLCAN ECUADOR, GALÁPAGOS. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, *3*(10), 1 of 32-32 32. <https://doi.org/10.1029/2002GC000355>

- Gibson, S. A., & Geist, D. (2010). Geochemical and geophysical estimates of lithospheric thickness variation beneath Galápagos. *Earth and Planetary Science Letters*, 300(3-4), 275-286. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.10.002>
- Harpp, K. S., Fornari, D. J., Geist, D. J., & Kurz, M. D. (2003). Genovesa Submarine Ridge: A manifestation of plume-ridge interaction in the northern Galápagos Islands: GENOVESA SUBMARINE RIDGE. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 4(9), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2003GC000531>
- Harpp, K. S., & Geist, D. J. (2018). The Evolution of Galápagos Volcanoes: An Alternative Perspective. *Frontiers in Earth Science*, 6, 50. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00050>
- Harpp, K. S., & Geist, D. J. (2019). The Galápagos Islands. En *Encyclopedia of Geology* (pp. 659-673). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.12084-6>
- Harpp, K. S., & White, W. M. (2001). Tracing a mantle plume: Isotopic and trace element variations of Galápagos seamounts: TRACING A MANTLE PLUME. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2(6), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2000GC000137>
- Hey, R. (1977). Tectonic evolution of the Cocos-Nazca spreading center. *Geological Society of America Bulletin*, 88(10), 1404. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1977\)88<1404:TEOTCS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1977)88<1404:TEOTCS>2.0.CO;2)
- Hidalgo, S., & Samaniego, P. (2009). *Caracterización geoquímica de las rocas basálticas de la Cordillera de Carnegie y su relación con las rocas de la Placa Nazca e Islas Galapagos*. 17.
- Kellogg, J. N., & Vega, V. (1995). Tectonic development of Panama, Costa Rica, and the Colombian Andes: Constraints from Global Positioning System geodetic studies and gravity. En *Geological Society of America Special Papers* (Vol. 295, pp. 75-90). Geological Society of America. <https://doi.org/10.1130/SPE295-p75>
- Lonsdale, P. (1988). Structural Pattern of the Galapagos Microplate and Evolution of the Galapagos Triple Junctions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 93(B11), 13551-13574. <https://doi.org/10.1029/JB093iB11p13551>
- Lonsdale, P., & Klitgord, K. D. (1978). Structure and tectonic history of the eastern Panama Basin. *Geological Society of America Bulletin*, 89(7), 981. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1978\)89<981:SATHOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1978)89<981:SATHOT>2.0.CO;2)
- McBirney, A. R., & Williams, H. (1969). *Geology and petrology of the Galapagos Islands*.
- Perez, G. (2019). *Caracterización de las fisuras eruptivas y morfologías de los volcanes Wolf y Alcedo del Archipiélago de Galápagos: Aporte a la evaluación de amenaza volcánica*.
- Reynolds, R. W. (1997). *Riesgos volcánicos en Sierra Negra*. 10.
- Reynolds, R. W., & Geist, D. J. (1995). Petrology of lavas from Sierra Negra volcano, Isabela Island, Galápagos archipelago. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100(B12), 24537-24553. <https://doi.org/10.1029/95JB02809>
- Reynolds, R. W., Geist, D., & Kurz, M. D. (1995). Physical volcanology and structural development of Sierra Negra volcano, Isabela Island, Galápagos archipelago.

- Geological Society of America Bulletin*, 107(12), 1398-1410.
[https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1995\)107<1398:PVASDO>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1995)107<1398:PVASDO>2.3.CO;2)
- Sallarès, V., & Charvis, P. (2003). Crustal thickness constraints on the geodynamic evolution of the Galapagos Volcanic Province. *Earth and Planetary Science Letters*, 214(3-4), 545-559. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(03\)00373-X](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00373-X)
- Sallares, V., Charvis, P., & Calahorrano, A. (2009). *Naturaleza y formacion de la provincia volcanica de Galapagos*. 17.
- Santamaría, S., & Bernard, B. (2018). *Hierarchization of the volcanoes of continental and insular Ecuador based on their threatpotential. Abstract volume of the international meeting Cities on Volcanoes 10*, 906.
<http://editoria.rm.ingv.it/miscellanea/2018/miscellanea43/#>
- Sinton, C. W., Christie, D. M., & Duncan, R. A. (1996). Geochronology of Galápagos seamounts. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 101(B6), 13689-13700.
<https://doi.org/10.1029/96JB00642>
- Tilling, R. (1989). *VOLCANIC HAZARDS AND THEIR MITIGATION- PROGRESS AND PROBLEMS*. 33.
- Trenkamp, R., Kellogg, J. N., Freymueller, J. T., & Mora, H. P. (2002). Wide plate margin deformation, southern Central America and northwestern South America, CASA GPS observations. *Journal of South American Earth Sciences*, 15(2), 157-171.
[https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(02\)00018-4](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(02)00018-4)
- Vasconez, F., Ramón, P., Hernandez, S., Hidalgo, S., Bernard, B., Ruiz, M., Alvarado, A., La Femina, P., & Ruiz, G. (2018). The different characteristics of the recent eruptions of Fernandina and Sierra Negra volcanoes (Galápagos, Ecuador). *Volcanica*, 1(2), 127-133. <https://doi.org/10.30909/vol.01.02.127133>
- Vidito, C., Herzberg, C., Gazel, E., Geist, D., & Harpp, K. (2013). Lithological structure of the Galápagos Plume: Lithological Structure Galpagos Plume. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 14(10), 4214-4240. <https://doi.org/10.1002/ggge.20270>
- Werner, R., Hoernle, K., Barckhausen, U., & Hauff, F. (2003). Geodynamic evolution of the Galápagos hot spot system (Central East Pacific) over the past 20 m.y.: Constraints from morphology, geochemistry, and magnetic anomalies: EVOLUTION OF THE GALÁPAGOS HOT SPOT SYSTEM. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 4(12). <https://doi.org/10.1029/2003GC000576>
- White, W. M., McBirney, A. R., & Duncan, R. A. (1993). Petrology and geochemistry of the Galápagos Islands: Portrait of a pathological mantle plume. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 98(B11), 19533-19563. <https://doi.org/10.1029/93JB02018>

5 ANEXOS

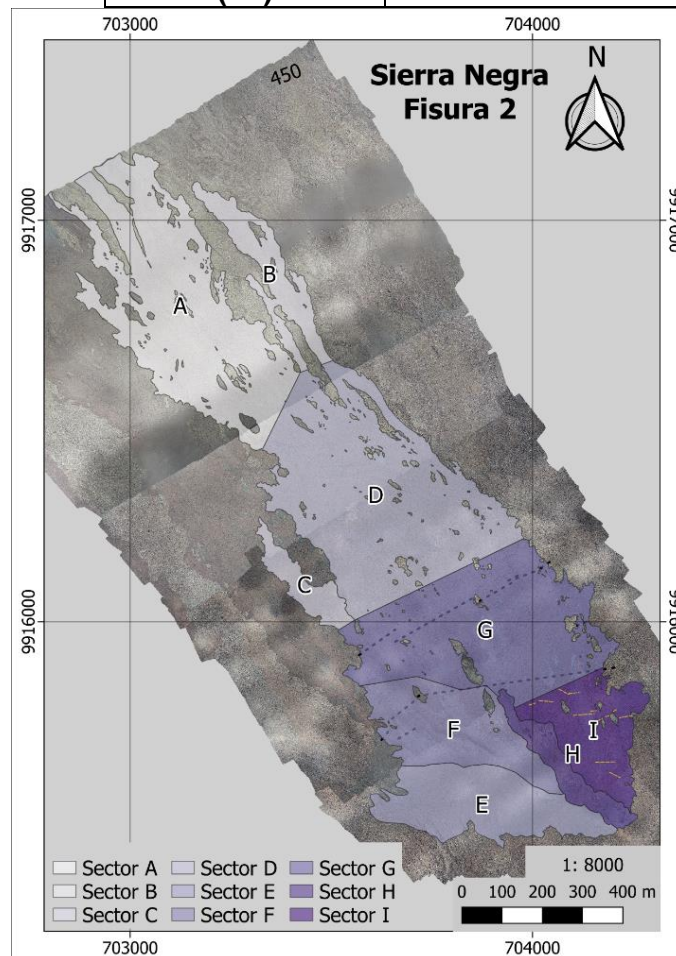
ANEXO I

**CARTOGRAFÍA DE ALTA RESOLUCIÓN DEL CAMPO DE LAVA DE LA
FISURA ERUPTIVA 2. VOLCÁN SIERRA NEGRA 2018, GALÁPAGOS**

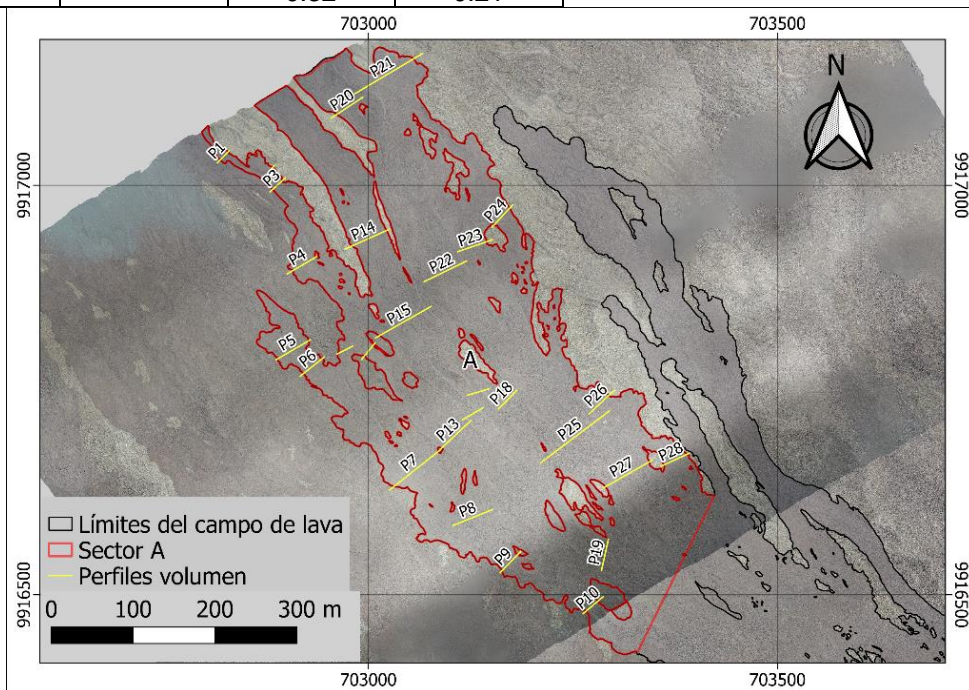
ANEXO II

ESTIMACIÓN DE VOLÚMENES DE LA FISURA ERUPTIVA 2

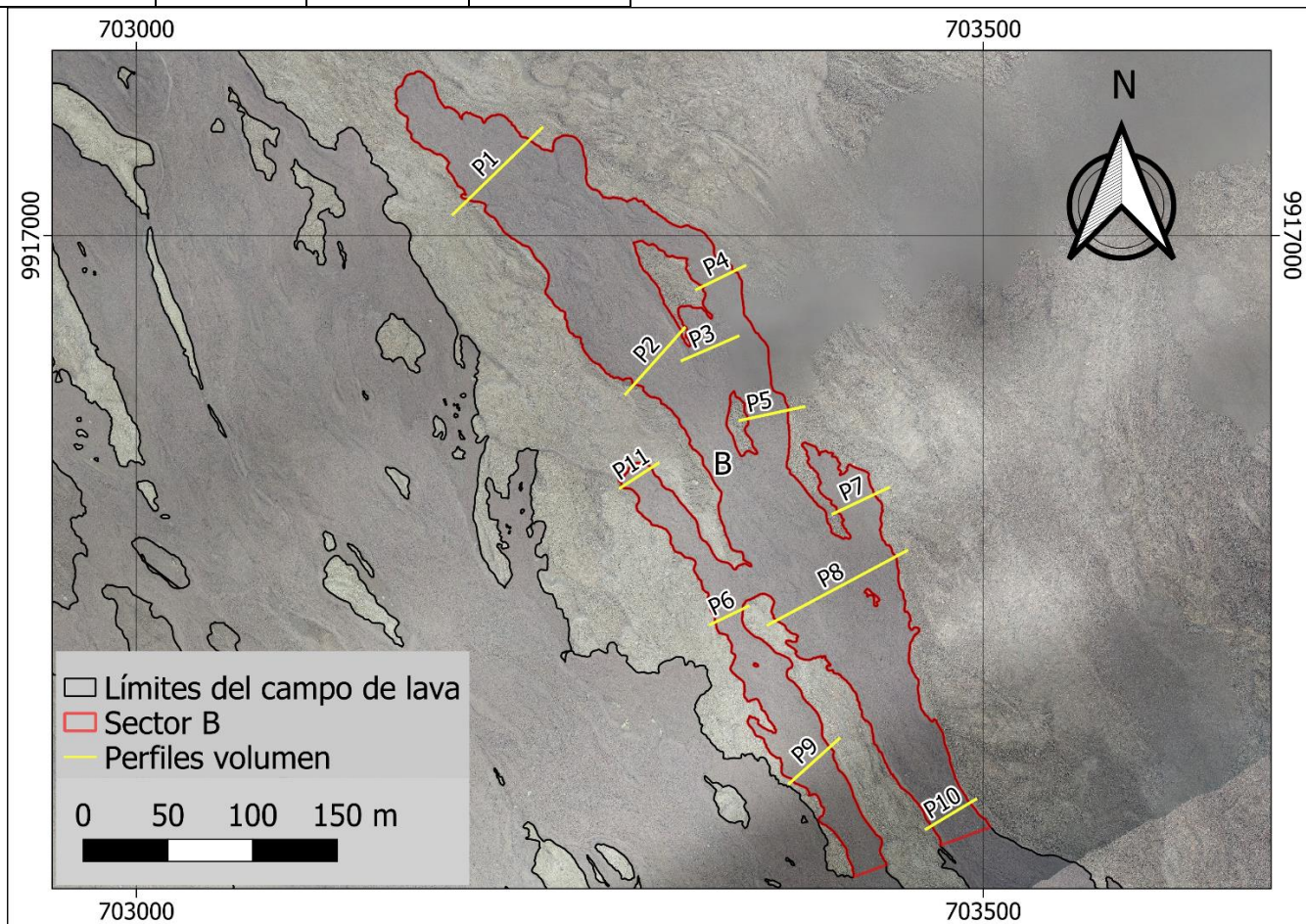
VOLUMEN SECTORES Y CAMPO DE LAVA (BULK)				
Sectores	Perímetro (m)	Área (m ²)	Volumen (bulk) (m ³)	Espesor promedio ponderado (m)
Sector A	7782.08	$1.77 \pm 0.007 \times 10^5$	$1.51 \pm 1.3 \times 10^5$	0.85 ± 0.73
Sector B	2580.40	$3.75 \pm 0.026 \times 10^4$	$2.86 \pm 2.13 \times 10^4$	0.76 ± 0.57
Sector C	1063.00	$1.92 \pm 0.011 \times 10^4$	$1.15 \pm 0.92 \times 10^4$	0.60 ± 0.48
Sector D	6751.81	$2.11 \pm 0.006 \times 10^5$	$1.74 \pm 1.39 \times 10^4$	0.82 ± 0.66
Sector E	1785.10	$7.56 \pm 0.018 \times 10^4$	$1.51 \pm 0.76 \times 10^4$	0.20 ± 0.10
Sector F	2048.98	$7.17 \pm 0.020 \times 10^4$	$3.12 \pm 2.84 \times 10^4$	0.43 ± 0.40
Sector G	4665.40	$1.60 \pm 0.006 \times 10^5$	$2.14 \pm 1.78 \times 10^5$	1.34 ± 1.11
Sector H	1189.54	$2.36 \pm 0.012 \times 10^4$	$3.65 \pm 6.52 \times 10^4$	1.54 ± 1.49
Sector I	2069.64	$5.49 \pm 0.006 \times 10^5$	$2.18 \pm 3.97 \times 10^4$	0.40 ± 0.72
Campo de lava	23889.49	$8.32 \pm 0.004 \times 10^5$	$6.76 \pm 0.65 \times 10^5$	0.76 ± 0.71
Volumen DRE (m³)			$5.07 \pm 0.49 \times 10^5$	



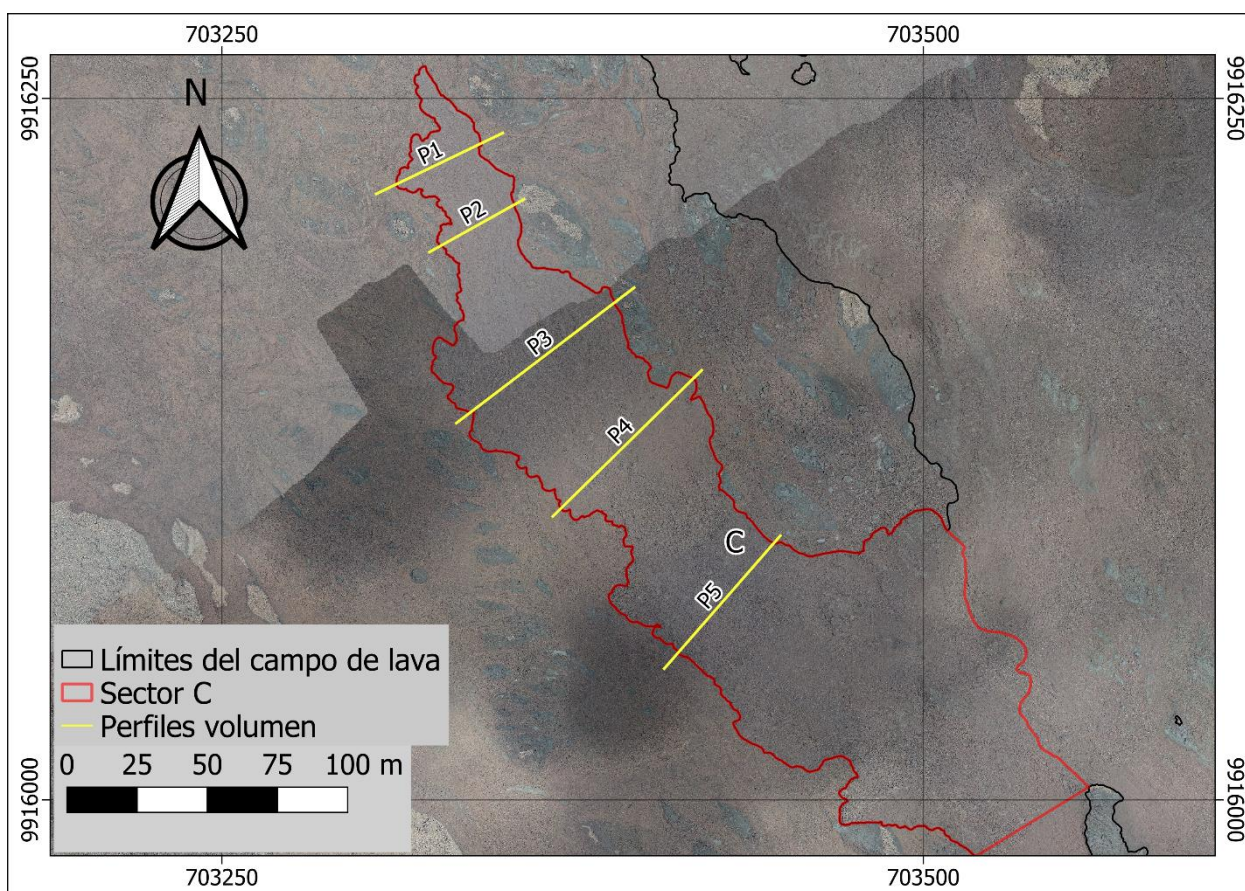
SECTOR A					
Perfiles	Longitud [m]	Espesor [m]	Error promedio [m]	Espesor estimado ponderado [m]	Error espesor ponderado [m]
P1	20.78	0.41	0.40	0.85	0.73
P2	16.76	0.35	0.39		
P3	25.50	0.60	0.55		
P4	41.95	0.57	0.41		
P5	48.06	0.80	0.52		
P6	37.58	0.51	0.42		
P7	79.82	0.95	1.12		
P8	52.16	0.44	0.34		
P9	36.27	0.62	0.45		
P10	32.17	0.48	0.32		
P11	21.20	0.30	0.45		
P12	25.78	0.50	0.34		
P13	53.32	0.41	0.22		
P14	58.62	0.75	0.58		
P15	77.94	1.70	1.38		
P16	29.08	0.51	0.58		
P17	26.98	0.32	0.33		
P18	31.37	0.35	0.52		
P19	39.10	0.69	0.64		
P20	46.45	0.56	0.74		
P21	96.16	2.10	1.60		
P22	57.75	1.38	1.09		
P23	44.41	0.93	0.57		
P24	36.96	0.30	0.43		
P25	105.28	1.24	1.20		
P26	42.08	0.66	0.51		
P27	68.69	0.53	0.50		
P28	37.23	0.32	0.21		



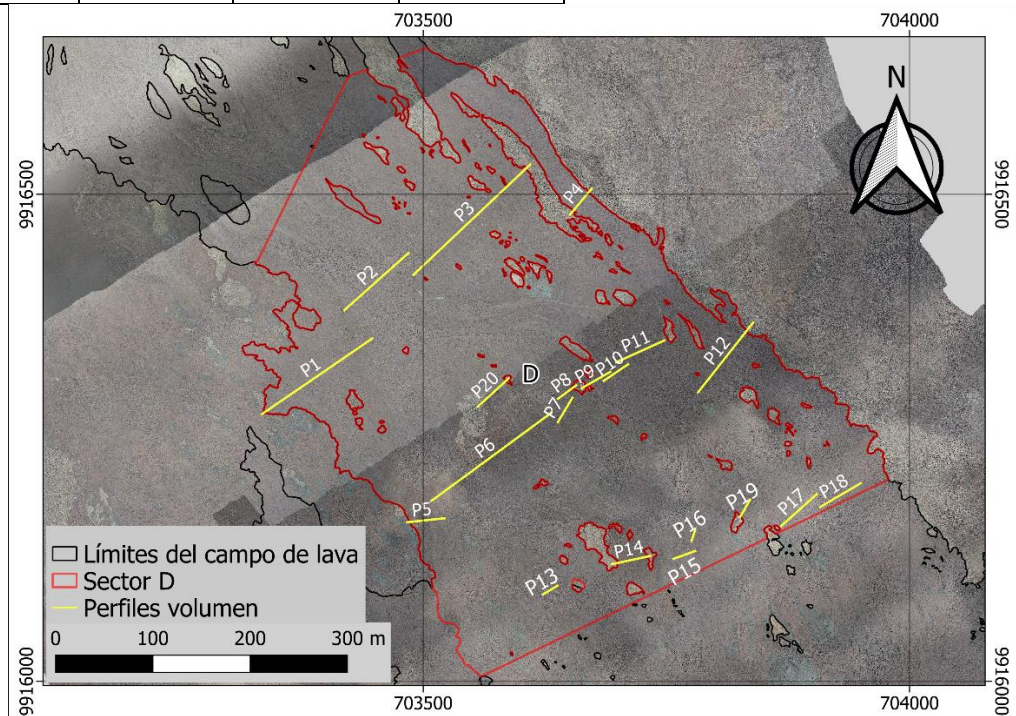
SECTOR B					
Perfiles	Longitud [m]	Espesor [m*]	Error promedio [m]	Espesor estimado ponderado [m]	Error espesor ponderado [m]
P1	73.38	0.65	0.52	0.76	0.57
P2	52.30	0.57	0.58		
P3	36.11	0.64	0.40		
P4	31.86	0.49	0.31		
P5	38.65	0.59	0.46		
P6	24.75	0.66	0.42		
P7	36.35	0.47	0.26		
P8	92.98	1.50	1.05		
P9	39.45	0.44	0.41		
P10	34.31	0.62	0.39		
P11	26.78	0.81	0.67		



SECTOR C					
Perfiles	Longitud [m]	Espesor [m*]	Error promedio [m]	Espesor estimado ponderado [m]	Error espesor ponderado [m]
P1	73.38	0.65	0.52	0.60	0.48
P2	52.30	0.57	0.58		
P3	36.11	0.64	0.40		
P4	31.86	0.49	0.31		
P5	38.65	0.59	0.46		

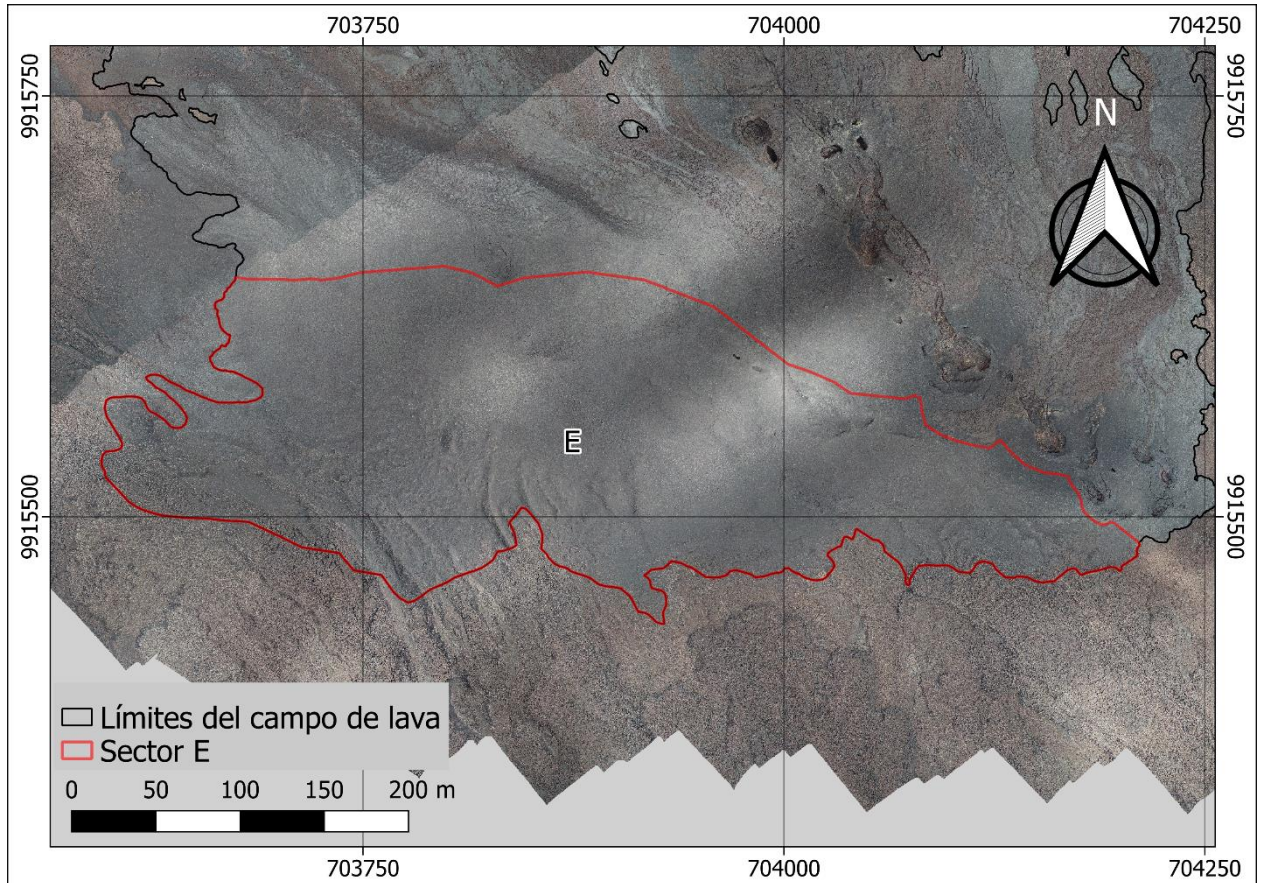


SECTOR D					
Perfiles	Longitud [m]	Espesor [m*]	Error promedio [m]	Espesor estimado ponderado [m]	Error espesor ponderado [m]
P1	137.32	1.09	0.54	0.82	0.66
P2	88.32	1.40	0.80		
P3	165.17	0.85	0.52		
P4	34.63	0.52	0.28		
P5	38.81	0.48	0.59		
P6	152.83	1.34	1.30		
P7	29.12	0.59	0.43		
P8	23.18	0.40	0.48		
P9	33.53	0.56	0.64		
P10	30.32	0.38	0.36		
P11	54.37	0.48	0.60		
P12	91.39	0.54	0.54		
P13	17.50	0.50	0.37		
P14	40.14	0.50	0.57		
P15	23.86	0.31	0.52		
P16	11.83	0.42	0.21		
P17	49.54	1.10	0.75		
P18	48.57	0.78	0.81		
P19	20.45	0.24	0.29		
P20	48.01	0.30	0.46		

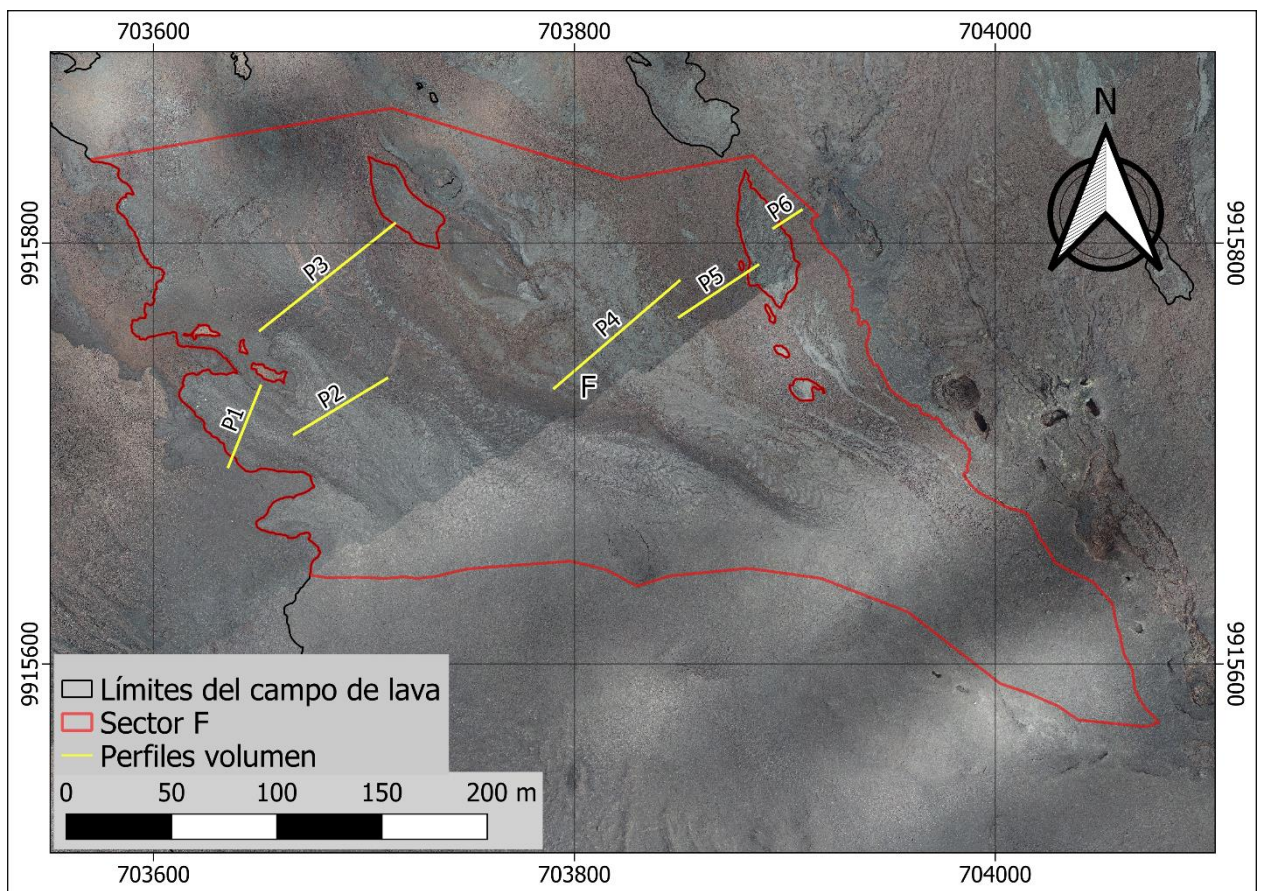


SECTOR E

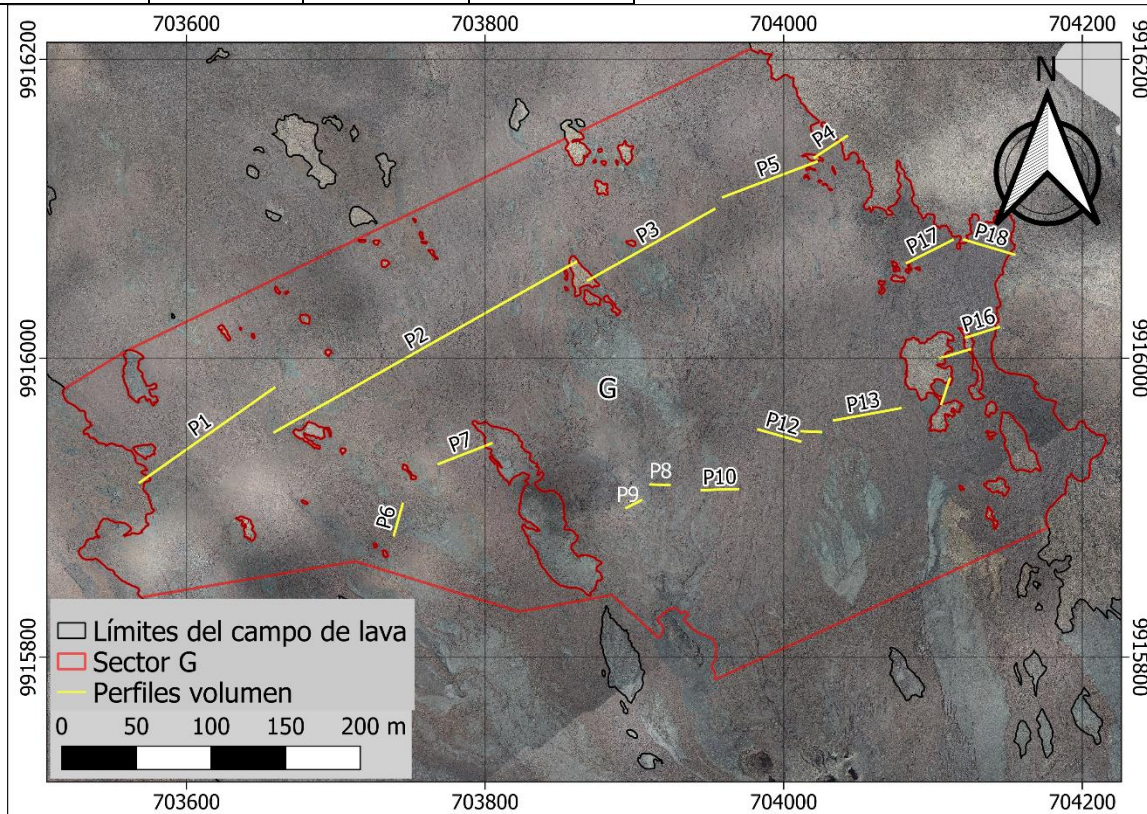
Corresponde a una zona de depósitos de escoria con espesores bastante pequeños, por lo que se asumió un espesor promedio ponderado 0.20 ± 0.10 m.



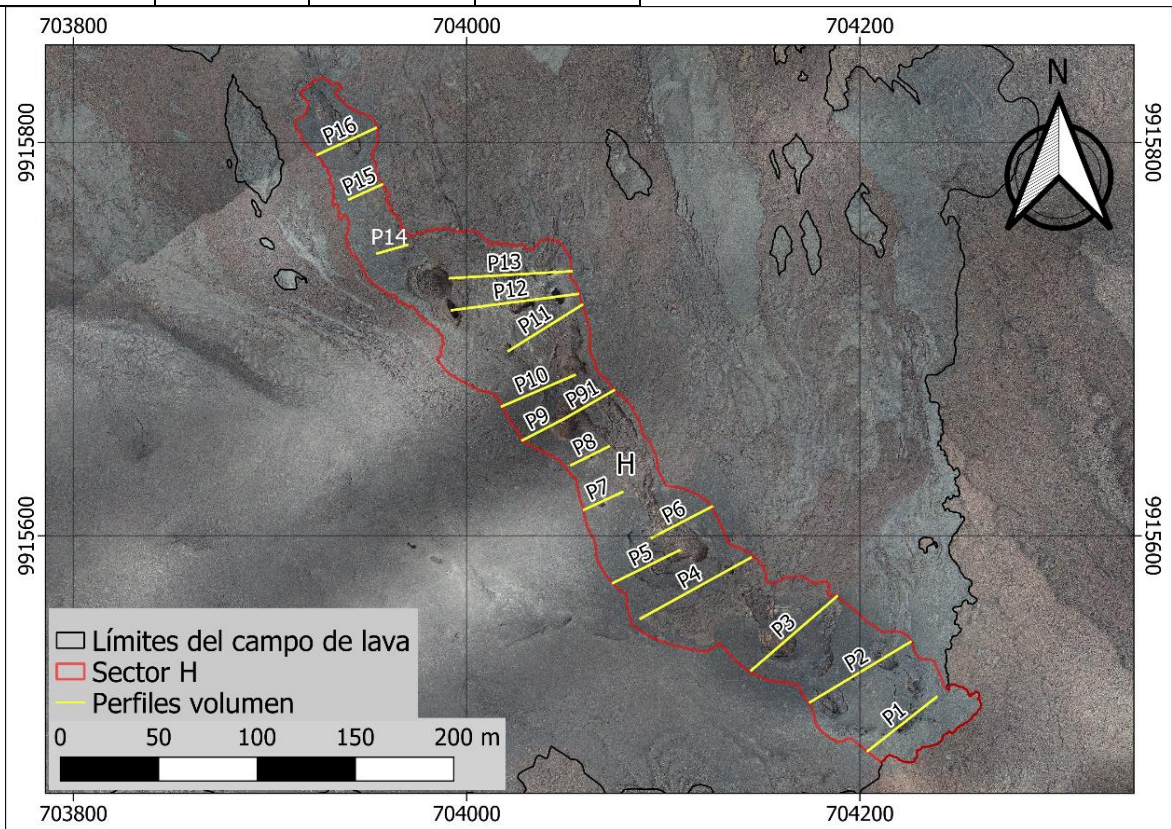
SECTOR F					
Perfiles	Longitud [m]	Espesor [m*]	Error promedio [m]	Espesor estimado ponderado [m]	Error espesor ponderado [m]
P1	41.41	0.19	0.17	0.43	0.40
P2	51.52	0.52	0.58		
P3	81.77	0.64	0.45		
P4	78.35	0.43	0.46		
P5	44.95	0.23	0.22		
P6	15.67	0.32	0.28		



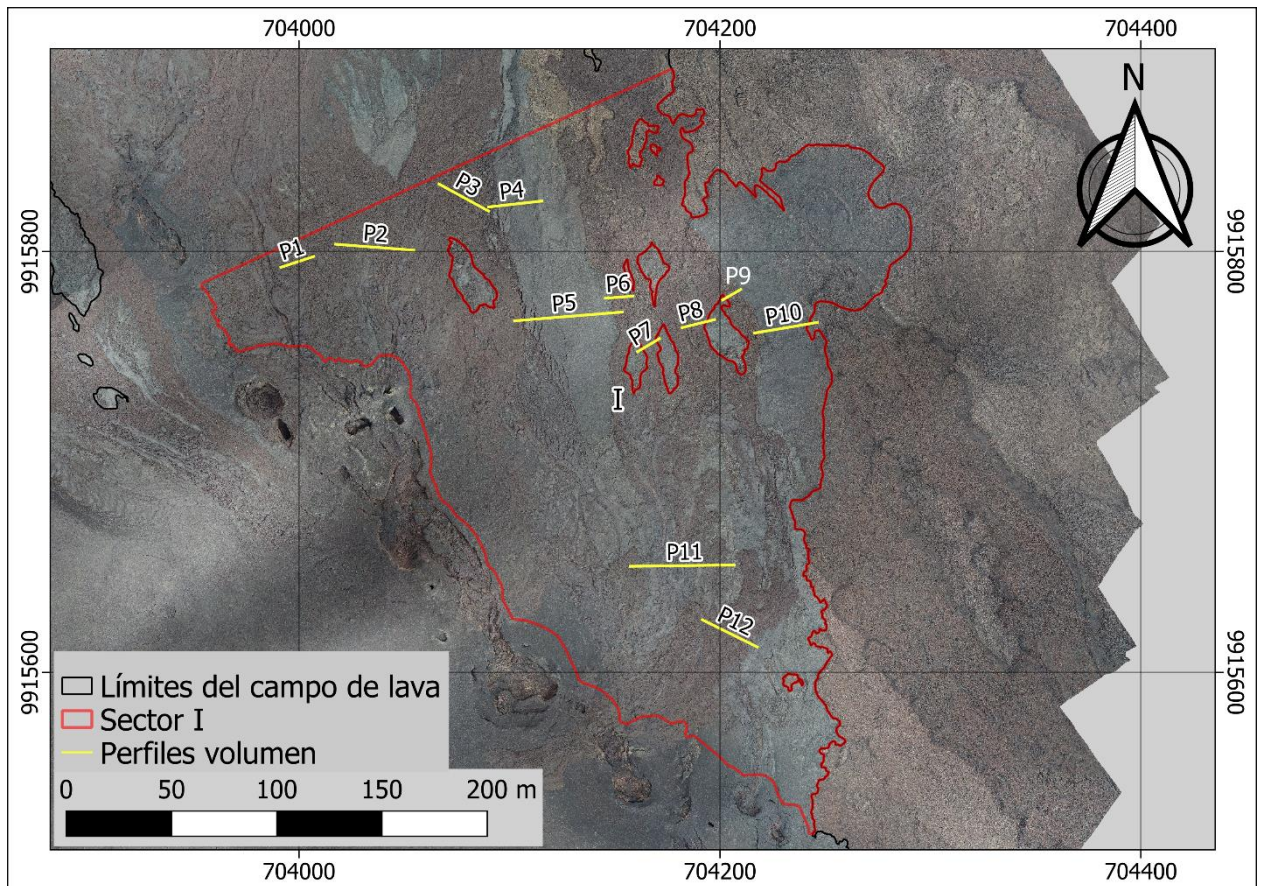
SECTOR G					
Perfiles	Longitud [m]	Espesor [m*]	Error promedio [m]	Espesor estimado ponderado [m]	Error espesor ponderado [m]
P1	110.13	0.71	0.46	1.34	1.11
P2	231.72	3.05	2.74		
P3	97.08	1.42	0.82		
P4	26.02	0.27	0.51		
P5	66.90	0.76	0.47		
P6	21.74	0.32	0.32		
P7	37.86	0.64	0.70		
P8	12.80	0.28	0.25		
P9	11.15	0.29	0.28		
P10	24.27	0.78	0.59		
P11	13.00	0.29	0.28		
P12	29.30	0.59	0.34		
P13	45.29	0.63	0.46		
P14	17.36	0.34	0.31		
P15	21.21	0.27	0.38		
P16	23.14	0.28	0.27		
P17	34.18	0.45	0.27		
P18	34.94	0.80	0.72		



SECTOR H					
Perfiles	Longitud [m]	Espesor [m*]	Error promedio [m]	Espesor estimado ponderado [m]	Error espesor ponderado [m]
P1	44.34	0.54	0.64	1.54	1.49
P2	59.55	0.96	1.06		
P3	57.50	2.16	2.51		
P4	63.95	1.34	1.47		
P5	37.54	1.72	1.47		
P6	34.34	1.60	1.42		
P7	21.39	0.59	0.89		
P8	21.47	1.46	2.18		
P9	23.47	2.38	3.08		
P9b	29.48	1.02	1.76		
P10	40.28	1.05	0.97		
P11	44.13	1.12	1.22		
P12	64.70	1.63	1.23		
P13	62.00	3.46	1.72		
P14	15.80	0.57	1.39		
P15	18.38	0.48	0.85		
P16	32.61	1.98	1.84		



SECTOR I					
Perfiles	Longitud [m]	Espesor [m*]	Error promedio [m]	Espesor estimado ponderado [m]	Error espesor ponderado [m]
P1	16.40	0.20	0.46	0.40	0.72
P2	37.29	0.28	2.74		
P3	26.89	0.46	0.82		
P4	25.46	0.39	0.51		
P5	51.35	0.60	0.47		
P6	13.16	0.20	0.32		
P7	12.08	0.16	0.70		
P8	15.91	0.18	0.25		
P9	9.88	0.07	0.28		
P10	30.32	0.45	0.59		
P11	49.32	0.50	0.28		
P12	29.15	0.45	0.34		



ANEXO III

MEDICIONES MORFOLÓGICAS Y PARÁMETROS REOLÓGICOS DE LA FISURA ERUPTIVA 2

CONSTANTES FÍSICAS	
Número de Grätz Gz	300
Difusividad térmica k [m ² .s ⁻¹]	4.20 × 10 ⁻⁷
Densidad de la lava ρ [kg.m ⁻³]	2.60 × 10 ³
Gravedad g [m.s ⁻²]	9.8

LONGITUD DEL FLUJO	
Nº de mediciones	Longitud (m)
1	1371.599
2	1372.972
3	1367.263
4	1374.959
5	1373.559
Promedio (m)	1372
Error (m)	2.9

PERFILES							
	Ancho del flujo W [m]	Espesor H [m]	Pendiente α [°]	Viscosidad η [Pa.s]	Velocidad v [m/s]	Límite elástico τ [Pa]	Distancia a la fisura [m]
P1	29 ± 0.98	1.9 ± 0.26	5.04 ± 0.42	3.29 ± 0.19 × 10 ⁴	0.08 ± 0.005	4.21 ± 0.68 × 10 ³	496
P2	34 ± 0.52	1.1 ± 0.26	5.96 ± 0.33	1.02 ± 0.06 × 10 ⁴	0.11 ± 0.07	3.03 ± 0.71 × 10 ³	621
P3	40 ± 0.46	1.2 ± 0.15	7.33 ± 0.17	1.86 ± 0.11 × 10 ⁴	0.09 ± 0.005	4.00 ± 0.49 × 10 ³	753
P4	32 ± 0.84	1.1 ± 0.20	8.17 ± 0.25	1.30 ± 0.08 × 10 ⁴	0.12 ± 0.007	4.12 ± 0.72 × 10 ³	861
P5	25 ± 0.73	0.9 ± 0.09	8.28 ± 0.23	5.64 ± 0.33 × 10 ⁴	0.19 ± 0.011	3.40 ± 0.39 × 10 ³	1004
P6	34 ± 0.32	1.1 ± 0.11	8.40 ± 0.17	1.29 ± 0.07 × 10 ⁴	0.12 ± 0.007	4.11 ± 0.42 × 10 ³	1181
P7	26 ± 0.56	1.3 ± 0.12	9.99 ± 0.64	1.99 ± 0.12 × 10 ⁴	0.13 ± 0.007	5.79 ± 0.65 × 10 ³	1264
P8	50 ± 1.32	2.2 ± 0.18	9.99 ± 0.27	1.84 ± 0.11 × 10 ⁵	0.04 ± 0.002	9.78 ± 0.83 × 10 ³	1373
P9	35 ± 0.38	1.4 ± 0.29	9.76 ± 0.47	3.28 ± 0.19 × 10 ⁴	0.09 ± 0.005	6.15 ± 1.31 × 10 ³	1573
P10	46 ± 1.17	1.1 ± 0.06	9.14 ± 0.80	2.12 ± 0.12 × 10 ⁴	0.08 ± 0.005	4.63 ± 0.48 × 10 ³	1741

FLUJO DE LAVA		CAMPO DE LAVA	
Ancho del flujo W [m]	35 ± 0.34	Duración de la erupción [h] (máx)	30
Espesor H [m]	1.4 ± 0.1	Duración de la erupción [h] (min)	19
Pendiente α [°]	8 ± 0.3	*Tasa de efusión Q [m ³ /s]	10-16
Longitud L [m]	1372 ± 2.9	Área A [m ²]	8.32 ± 0.004 × 10 ⁵
Tasa de efusión Q [m ³ /s]	4.4 ± 0.3	Volumen (BULK) V [m ³]	6.76 ± 0.65 × 10 ⁵
Viscosidad η [Pa.s]	3.52 ± 0.2 × 10 ⁴	Volumen (DRE) V [m ³]	5.07 ± 0.49 × 10 ⁵
Velocidad v [m/s]	0.10 ± 0.01		
Límite elástico τ [Pa]	4923 ± 328		
Tiempo emplazamiento [h]	4 ± 0.2		

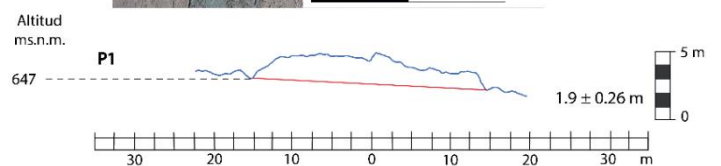
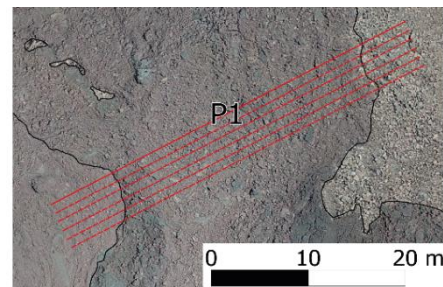
*La tasa de efusión volumétrica estimada para todo el campo de lava fue calculada utilizando el volumen total y, la duración máxima y mínima de la erupción.

PERFIL 1

Morfología Perfil 1				
Mediciones	Altura techo del flujo (msnm)	Altura base 1 del flujo (msnm)	Altura base 2 del flujo (msnm)	Ancho W (m)
1	648.29	647.08	646.23	29.59
a	648.59	647.11	646.38	29.97
b	648.70	647.14	646.88	28.29
c	648.84	647.11	647.38	27.68
d	648.83	647.42	647.06	28.44
e	648.89	647.31	646.95	29.97
Promedio (m)	648.69	647.20	646.81	28.99
Error (m)	0.22	0.14	0.43	0.98
Promedio B1-B2(m)	647.00			
Error (m)	0.27			
Espesor H (m)	1.9			
Error (m)	0.3			

Pendiente Perfil 1							
N° de mediciones	L	A	B	Cat Op	sin α (rad)	α (rad)	α (°)
1a	120.1	651.9	639.9	12.0	0.10	0.10	5.8
1b	132.7	651.1	639.8	11.4	0.09	0.09	4.9
1c	131.2	650.7	640.0	10.8	0.08	0.08	4.7
1d	133.0	651.3	640.0	11.2	0.08	0.08	4.8
1e	128.2	652.6	641.5	10.9	0.09	0.09	5.0
Promedio					0.09	0.09	5.0
Error					0.01	0.01	0.4

Reología perfil 1	
Tasa de efusión volumétrica Q (m ³ /s)	4.4
Error Q (m ³ /s)	0.3
Viscosidad η (Pa.s)	32890
Error η (Pa.s)	1903
Velocidad v (m/s)	0.080
Error v (m/s)	0.005
Límite elástico τ (Pa)	4206
Error τ (Pa)	675

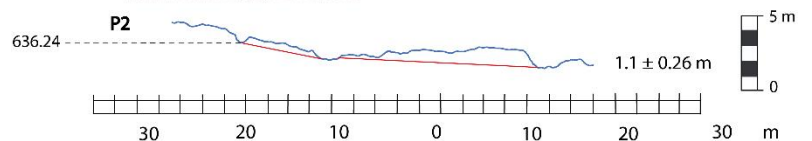
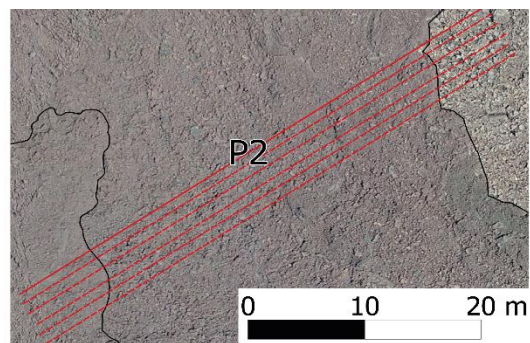


PERFIL 2

Morfología Perfil 2				
Mediciones	Altura techo del flujo (msnm)	Altura base 1 del flujo (msnm)	Altura base 2 del flujo (msnm)	Ancho W (m)
2	636.15	636.24	634.54	34.27
a	636.23	636.32	635.17	32.83
b	636.39	636.55	635.15	33.71
c	636.54	636.65	635.41	33.47
d	636.45	636.66	635.57	34.03
e	636.55	636.52	635.59	33.31
Promedio (m)	636.39	636.49	635.24	33.60
Error (m)	0.17	0.17	0.39	0.52
Promedio B1-B2(m)	635.87			
Error (m)	0.89			
Espesor H (m)	1.1			
Error (m)	0.3			

Pendiente Perfil 2							
N° de mediciones	L	A	B	Cat Op	sin α (rad)	α (rad)	α (°)
2a	280.7	645.0	618.6	26.4	0.09	0.09	5.4
2b	283.9	647.4	617.8	29.6	0.10	0.10	6.0
2c	281.9	648.4	618.3	30.1	0.11	0.11	6.1
2d	279.8	648.7	618.7	30.1	0.11	0.11	6.2
2e	274.0	647.1	617.9	29.2	0.11	0.11	6.1
Promedio					0.10	0.10	6.0
Error					0.01	0.01	0.3

Reología Perfil 2	
Tasa de efusión volumétrica Q (m ³ /s)	4.4
Error Q (m ³ /s)	0.3
Viscosidad η (Pa.s)	10217
Error η (Pa.s)	591
Velocidad v (m/s)	0.113
Error v (m/s)	0.007
Límite elástico τ (Pa)	3032
Error τ (Pa)	706

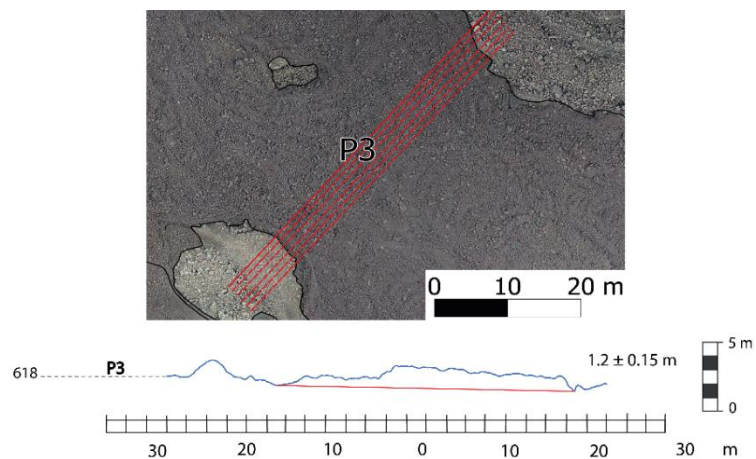


PERFIL 3

Morfología Perfil 3				
Mediciones	Altura techo del flujo (msnm)	Altura base 1 del flujo (msnm)	Altura base 2 del flujo (msnm)	Ancho W (m)
3	618.20	617.74	616.79	41.06
a	618.23	617.85	617.13	40.19
b	618.36	617.99	617.33	39.93
c	618.49	618.18	617.25	39.93
d	618.53	618.41	617.18	39.93
e	618.61	618.73	617.35	40.54
Promedio (m)	618.40	618.15	617.17	40.26
Error (m)	0.17	0.37	0.21	0.46
Promedio B1-B2(m)	617.66			
Error (m)	0.69			
Espesor H (m)	1.2			
Error (m)	0.1			

Pendiente Perfil 3							
N° de mediciones	L	A	B	Cat Op	sin α (rad)	α (rad)	α (°)
3a	299.1	636.1	597.4	38.7	0.13	0.13	7.4
3b	301.5	634.8	597.5	37.3	0.12	0.12	7.1
3c	301.0	635.4	597.7	37.7	0.13	0.13	7.2
3d	295.4	636.0	597.5	38.5	0.13	0.13	7.5
3e	298.6	637.6	598.9	38.7	0.13	0.13	7.4
Promedio					0.13	0.13	7.3
Error					0.00	0.00	0.2

Reología Perfil 3	
Tasa de efusión volumétrica Q (m ³ /s)	4.4
Error Q (m ³ /s)	0.3
Viscosidad η (Pa.s)	18587
Error η (Pa.s)	1076
Velocidad v (m/s)	0.088
Error v (m/s)	0.005
Límite elástico τ (Pa)	4000
Error τ (Pa)	483

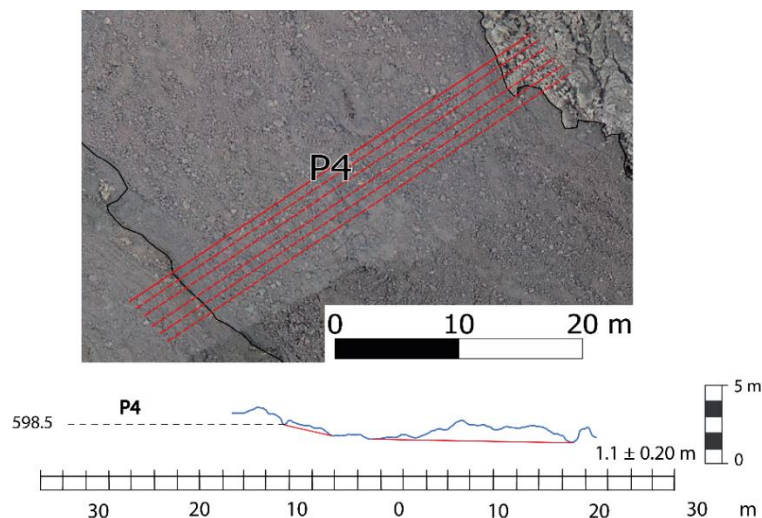


PERFIL 4

Morfología Perfil 4				
Mediciones	Altura techo del flujo (msnm)	Altura base 1 del flujo (msnm)	Altura base 2 del flujo (msnm)	Ancho W (m)
4	598.31	599.09	597.40	32.86
a	598.45	599.00	597.57	32.44
b	598.56	598.57	597.31	31.61
c	598.77	598.84	597.43	31.61
d	598.90	598.91	597.66	31.03
e	599.01	599.03	597.80	33.19
Promedio (m)	598.67	598.91	597.53	32.12
Error (m)	0.27	0.19	0.18	0.84
Promedio B1-B2(m)	598.22			
Error (m)	0.97			
Espesor H (m)	1.1			
Error (m)	0.2			

Pendiente Perfil 4							
Nº de mediciones	L	A	B	Cat Op	sin α (rad)	α (rad)	α (°)
4a	268.0	618.0	578.0	40.0	0.15	0.15	8.6
4b	265.3	618.0	580.5	37.6	0.14	0.14	8.1
4c	278.3	618.7	579.0	39.7	0.14	0.14	8.2
4d	283.4	618.1	578.6	39.5	0.14	0.14	8.0
4e	285.0	617.1	577.7	39.4	0.14	0.14	7.9
Promedio					0.14	0.14	8.2
Error					0.00	0.00	0.2

Reología Perfil 4	
Tasa de efusión volumétrica Q (m ³ /s)	4.4
Error Q (m ³ /s)	0.3
Viscosidad η (Pa.s)	13034
Error η (Pa.s)	754
Velocidad v (m/s)	0.120
Error v (m/s)	0.007
Límite elástico τ (Pa)	4117
Error τ (Pa)	720

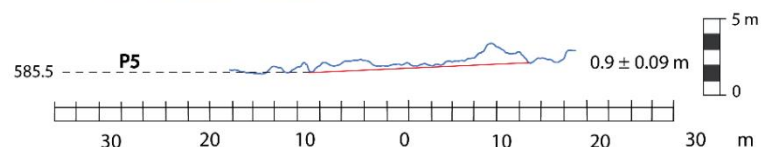
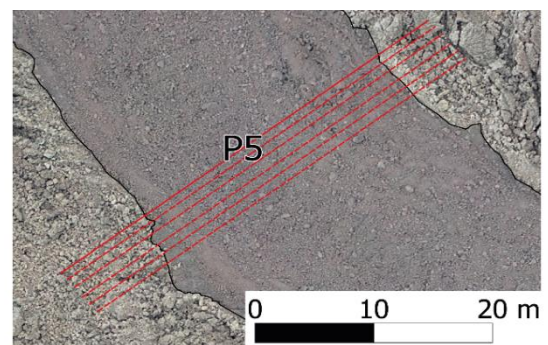


PERFIL 5

Morfología Perfil 5				
Mediciones	Altura techo del flujo (msnm)	Altura base 1 del flujo (msnm)	Altura base 2 del flujo (msnm)	Ancho W (m)
5	586.66	585.83	585.85	24.64
a	586.77	585.83	585.88	24.05
b	586.80	586.00	585.90	25.65
c	587.05	586.13	585.88	25.65
d	587.06	586.22	586.08	25.23
e	587.23	586.26	586.14	25.98
Promedio (m)	586.93	586.05	585.95	25.20
Error (m)	0.22	0.19	0.12	0.73
Promedio B1-B2(m)	586.00			
Error (m)	0.06			
Espesor H (m)	0.9			
Error (m)	0.1			

Pendiente Perfil 5							
Nº de mediciones	L	A	B	Cat Op	sin α (rad)	α (rad)	α (°)
5a	272.5	604.3	565.8	38.5	0.14	0.14	8.1
5b	267.7	604.5	567.0	37.5	0.14	0.14	8.1
5c	267.0	604.7	566.0	38.7	0.14	0.15	8.3
5d	262.8	604.8	567.2	37.6	0.14	0.14	8.2
5e	266.4	606.0	565.9	40.0	0.15	0.15	8.6
Promedio					0.14	0.14	8.3
Error					0.00	0.00	0.2

Reología Perfil 5	
Tasa de efusión volumétrica Q (m ³ /s)	4.4
Error Q (m ³ /s)	0.3
Viscosidad η (Pa.s)	5639
Error η (Pa.s)	326
Velocidad v (m/s)	0.187
Error v (m/s)	0.011
Límite elástico τ (Pa)	3404
Error τ (Pa)	347

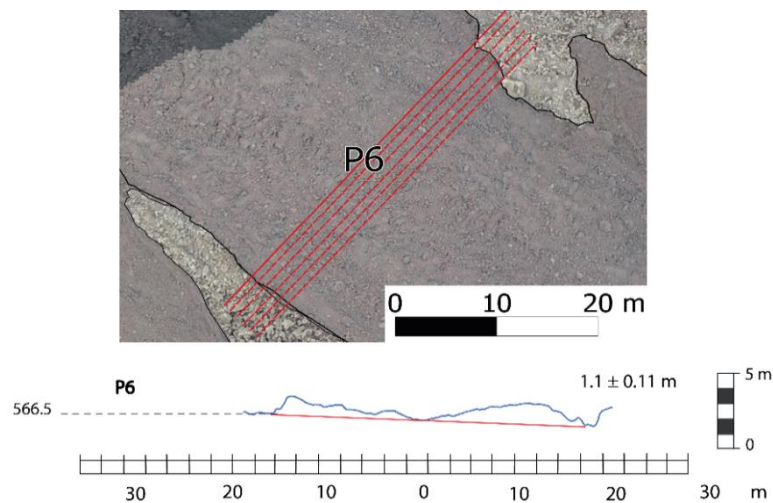


PERFIL 6

Morfología Perfil 6				
Mediciones	Altura techo del flujo (msnm)	Altura base 1 del flujo (msnm)	Altura base 2 del flujo (msnm)	Ancho W (m)
6	567.35	566.35	565.95	33.88
a	567.48	566.42	566.34	33.27
b	567.59	566.50	566.30	34.22
c	567.64	566.70	566.77	33.70
d	567.69	566.77	566.25	33.53
e	567.67	566.77	566.43	33.79
Promedio (m)	567.57	566.58	566.34	33.73
Error (m)	0.13	0.18	0.27	0.32
Promedio B1-B2(m)	566.46			
Error (m)	0.17			
Espesor H (m)	1.1			
Error (m)	0.1			

Pendiente Perfil 6							
Nº de mediciones	L	A	B	Cat Op	sin α (rad)	α (rad)	α (°)
6a	229.7	586.2	551.7	34.6	0.15	0.15	8.7
6b	229.4	585.4	552.1	33.4	0.15	0.15	8.4
6c	239.1	585.9	550.9	35.0	0.15	0.15	8.4
6d	240.9	585.4	551.2	34.3	0.14	0.14	8.2
6e	237.7	585.8	551.3	34.6	0.15	0.15	8.4
Promedio					0.15	0.15	8.4
Error					0.00	0.00	0.2

Reología Perfil 6	
Tasa de efusión volumétrica Q (m ³ /s)	4.4
Error Q (m ³ /s)	0.3
Viscosidad η (Pa.s)	12949
Error η (Pa.s)	749
Velocidad v (m/s)	0.117
Error v (m/s)	0.007
Límite elástico τ (Pa)	4114
Error τ (Pa)	426

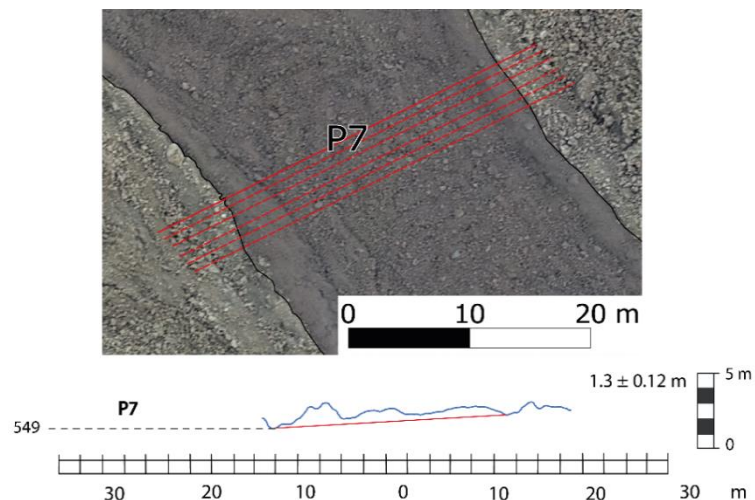


PERFIL 7

Morfología Perfil 7				
Mediciones	Altura techo del flujo (msnm)	Altura base 1 del flujo (msnm)	Altura base 2 del flujo (msnm)	Ancho W (m)
7	550.69	549.27	549.89	25.56
a	550.91	549.41	550.00	25.87
b	551.08	549.31	550.12	25.98
c	551.24	549.50	550.20	26.19
d	551.32	549.88	550.04	26.51
e	551.41	549.78	550.18	27.15
Promedio (m)	551.11	549.52	550.07	26.21
Error (m)	0.27	0.25	0.12	0.56
Promedio B1-B2(m)	549.80			
Error (m)	0.39			
Espesor H (m)	1.3			
Error (m)	0.1			

Pendiente Perfil 7							
Nº de mediciones	L	A	B	Cat Op	sin α (rad)	α (rad)	α (°)
7a	209.1	567.1	527.7	39.4	0.19	0.19	10.9
7b	216.2	566.0	529.2	36.8	0.17	0.17	9.8
7c	226.3	566.0	529.2	36.8	0.16	0.16	9.4
7d	231.8	566.3	528.1	38.2	0.16	0.17	9.5
7e	232.4	567.3	525.2	42.1	0.18	0.18	10.4
Promedio					0.17	0.17	10.0
Error					0.01	0.01	0.6

Reología Perfil 7	
Tasa de efusión volumétrica Q (m ³ /s)	4.4
Error Q (m ³ /s)	0.3
Viscosidad η (Pa.s)	19859
Error η (Pa.s)	1149
Velocidad v (m/s)	0.127
Error v (m/s)	0.007
Límite elástico τ (Pa)	5787
Error τ (Pa)	645

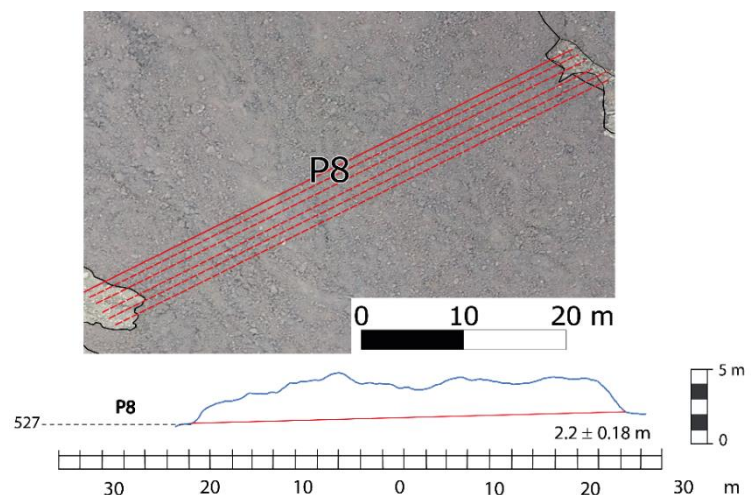


PERFIL 8

Morfología Perfil 8				
Mediciones	Altura techo del flujo (msnm)	Altura base 1 del flujo (msnm)	Altura base 2 del flujo (msnm)	Ancho W (m)
8	529.57	526.95	527.65	50.16
a	529.81	527.42	527.86	49.42
b	530.05	527.88	528.14	48.57
c	530.33	527.24	528.37	51.86
d	530.53	528.61	528.36	50.71
e	530.72	528.24	528.74	51.86
Promedio (m)	530.17	527.72	528.19	50.43
Error (m)	0.44	0.63	0.39	1.32
Promedio B1-B2(m)	527.95			
Error (m)	0.33			
Espesor H (m)	2.2			
Error (m)	0.2			

Pendiente Perfil 8							
Nº de mediciones	L	A	B	Cat Op	sin α (rad)	α (rad)	α (°)
8a	300.5	552.2	497.9	54.2	0.18	0.18	10.4
8b	309.0	551.7	497.9	53.8	0.17	0.18	10.0
8c	302.5	549.9	498.7	51.1	0.17	0.17	9.7
8d	294.5	548.8	497.5	51.3	0.17	0.18	10.0
8e	291.5	546.9	497.6	49.3	0.17	0.17	9.7
Promedio					0.17	0.17	10.0
Error					0.00	0.00	0.3

Reología Perfil 8	
Tasa de efusión volumétrica Q (m ³ /s)	4.4
Error Q (m ³ /s)	0.3
Viscosidad η (Pa.s)	184494
Error η (Pa.s)	10677
Velocidad v (m/s)	0.039
Error v (m/s)	0.002
Límite elástico τ (Pa)	9782
Error τ (Pa)	834

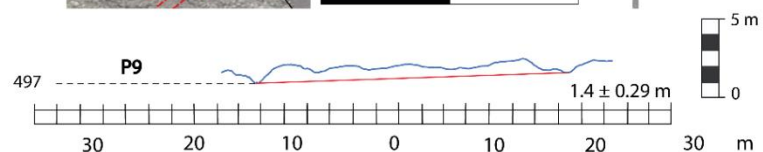
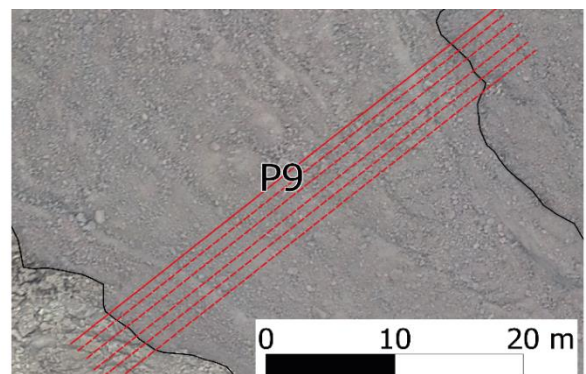


PERFIL 9

Morfología Perfil 9				
Mediciones	Altura techo del flujo (msnm)	Altura base 1 del flujo (msnm)	Altura base 2 del flujo (msnm)	Ancho W (m)
g	499.51	497.71	498.58	34.53
a	499.61	498.53	498.61	34.41
b	499.74	498.52	498.93	35.27
c	499.96	498.73	498.91	34.41
d	500.07	498.57	498.79	34.41
e	500.20	498.48	498.60	34.16
Promedio (m)	499.85	498.42	498.74	34.53
Error (m)	0.27	0.36	0.16	0.38
Promedio B1-B2(m)	498.58			
Error (m)	0.22			
Espesor H (m)	1.4			
Error (m)	0.3			

Pendiente Perfil 9							
Nº de mediciones	L	A	B	Cat Op	sin α (rad)	α (rad)	α (°)
9a	367.4	532.6	472.1	60.5	0.16	0.17	9.5
9b	364.8	527.4	469.5	58.0	0.16	0.16	9.1
9c	348.4	529.0	468.2	60.8	0.17	0.18	10.0
9d	346.4	529.6	467.5	62.1	0.18	0.18	10.3
9e	336.3	525.1	467.7	57.4	0.17	0.17	9.8
Promedio					0.17	0.17	9.8
Error					0.01	0.01	0.5

Reología Perfil 9	
Tasa de efusión volumétrica Q (m ³ /s)	4.4
Error Q (m ³ /s)	0.3
Viscosidad η (Pa.s)	32807
Error η (Pa.s)	1899
Velocidad v (m/s)	0.089
Error v (m/s)	0.005
Límite elástico τ (Pa)	6149
Error τ (Pa)	1306

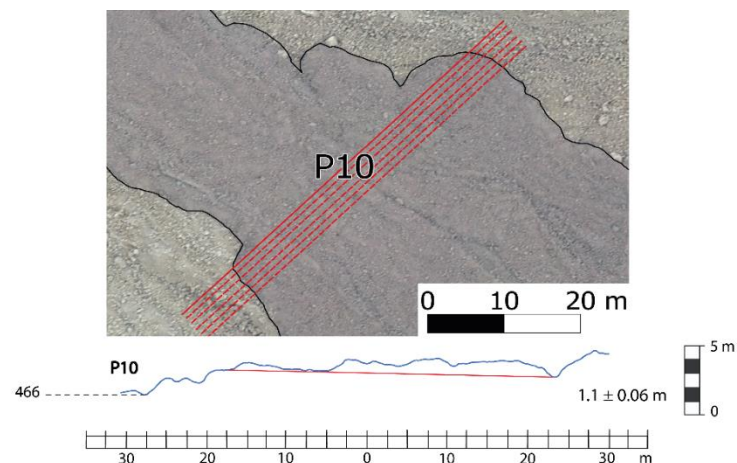


PERFIL 10

Morfología Perfil 10				
Mediciones	Altura techo del flujo (msnm)	Altura base 1 del flujo (msnm)	Altura base 2 del flujo (msnm)	Ancho W (m)
10	468.03	466.75	467.09	43.86
a	468.08	466.81	467.17	45.02
b	468.14	466.85	467.29	45.92
c	468.26	466.99	467.20	46.57
d	468.37	467.14	467.17	46.83
e	468.45	467.32	467.15	46.70
Promedio (m)	468.22	466.98	467.18	45.82
Error (m)	0.17	0.22	0.06	1.17
Promedio B1-B2(m)	467.08			
Error (m)	0.14			
Espesor H (m)	1.1			
Error (m)	0.1			

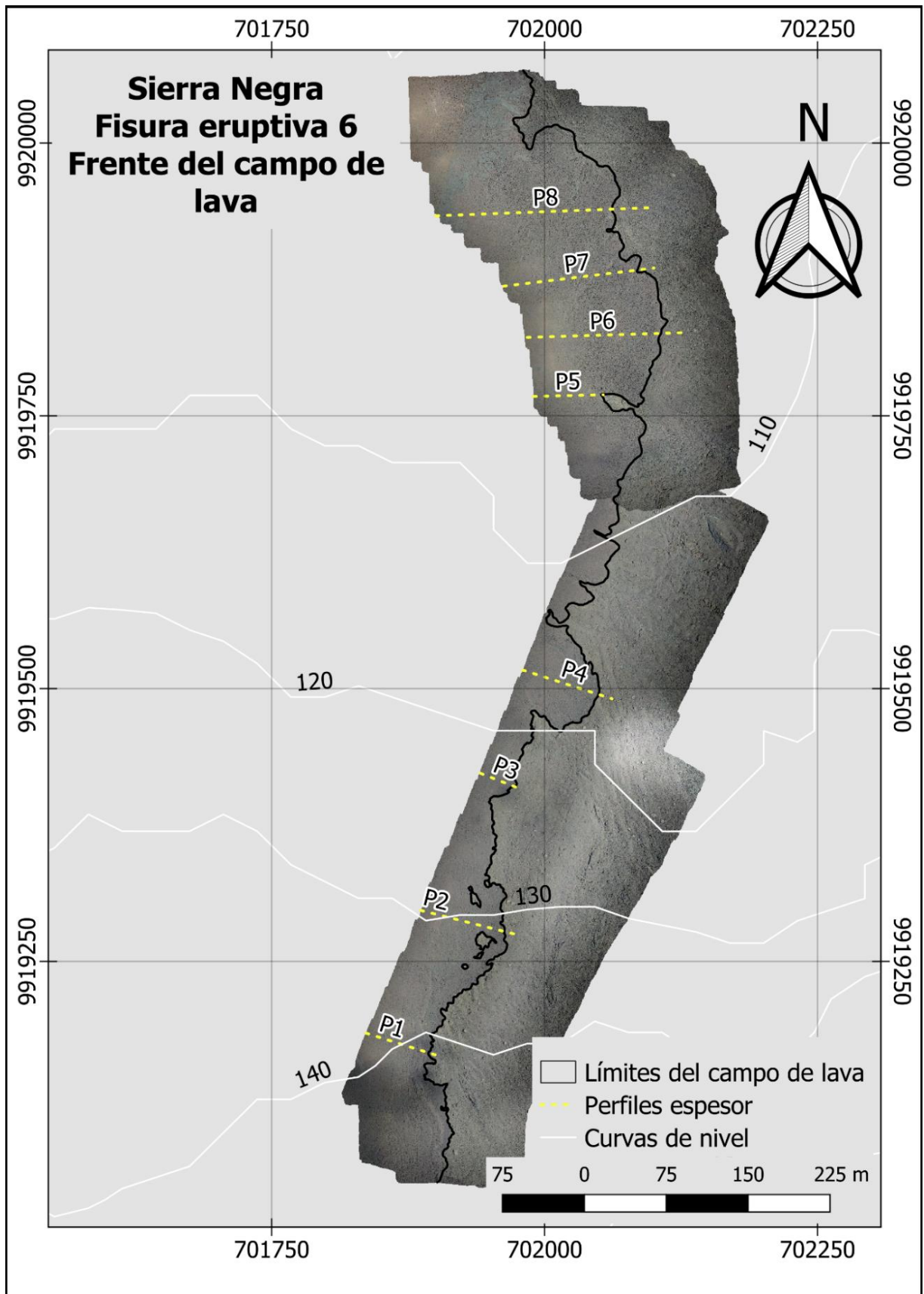
Pendiente Perfil 10							
N° de mediciones	L	A	B	Cat Op	sin α (rad)	α (rad)	α (°)
10a	335.8	492.3	445.2	47.1	0.14	0.14	8.1
10b	306.7	491.1	445.0	46.2	0.15	0.15	8.7
10c	292.5	491.2	444.6	46.6	0.16	0.16	9.2
10d	304.6	495.7	442.7	52.9	0.17	0.17	10.0
10e	272.1	491.0	444.6	46.3	0.17	0.17	9.8
				Promedio	0.16	0.16	9.1
				Error	0.01	0.01	0.8

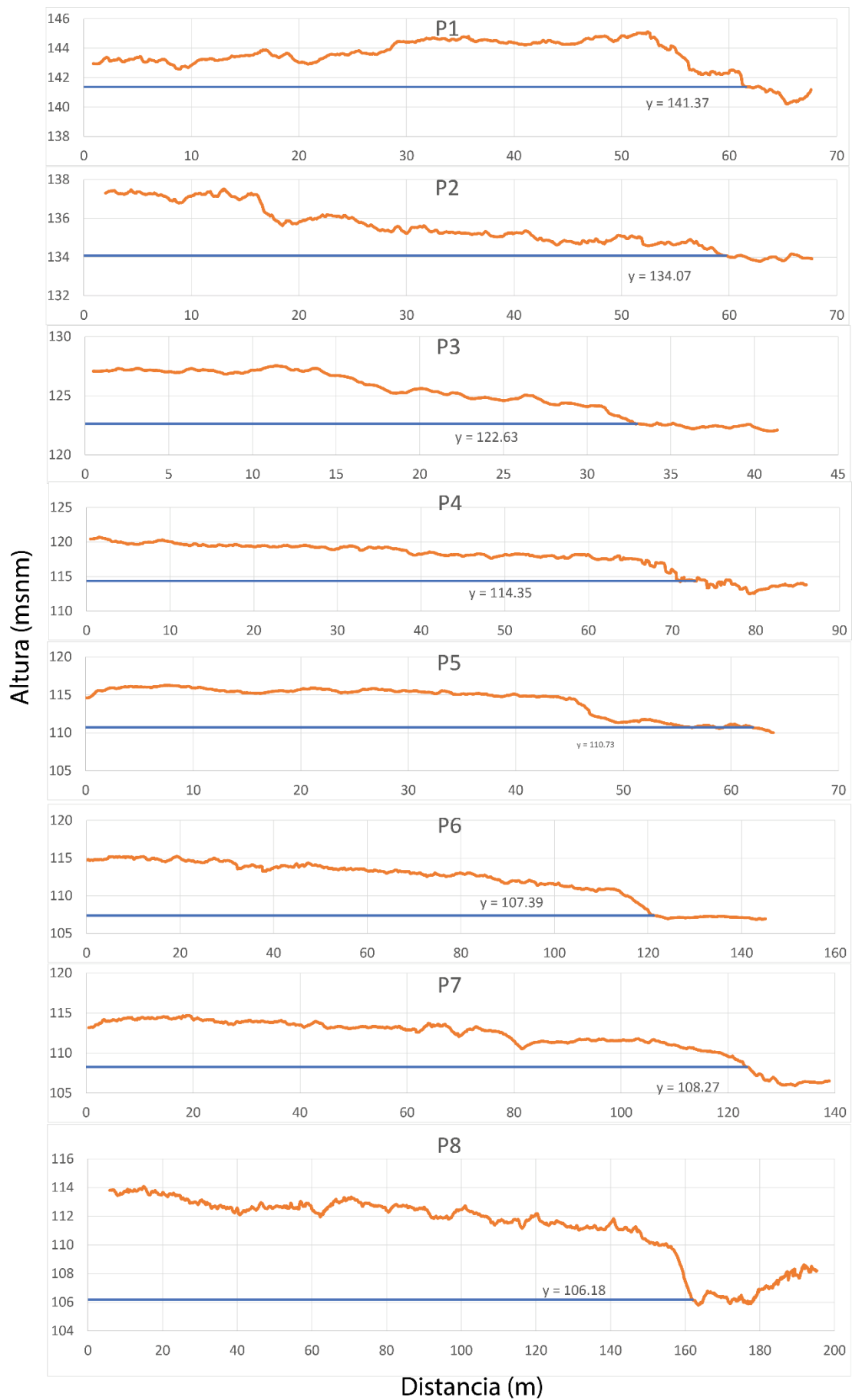
Reología Perfil 10	
Tasa de efusión volumétrica Q (m ³ /s)	4.4
Error Q (m ³ /s)	0.3
Viscosidad η (Pa.s)	21245
Error η (Pa.s)	1230
Velocidad v (m/s)	0.083
Error v (m/s)	0.005
Límite elástico τ (Pa)	4635
Error τ (Pa)	475

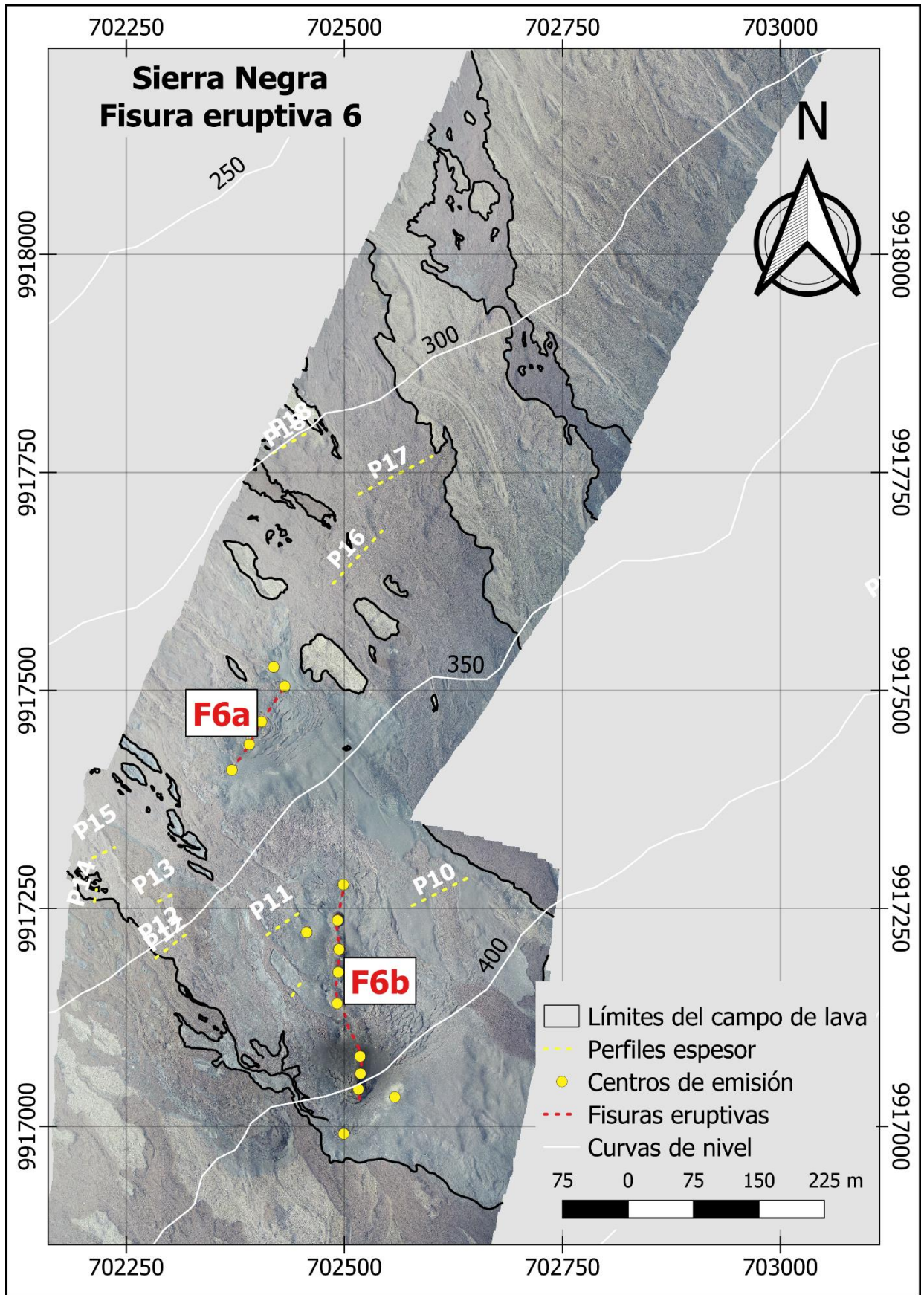


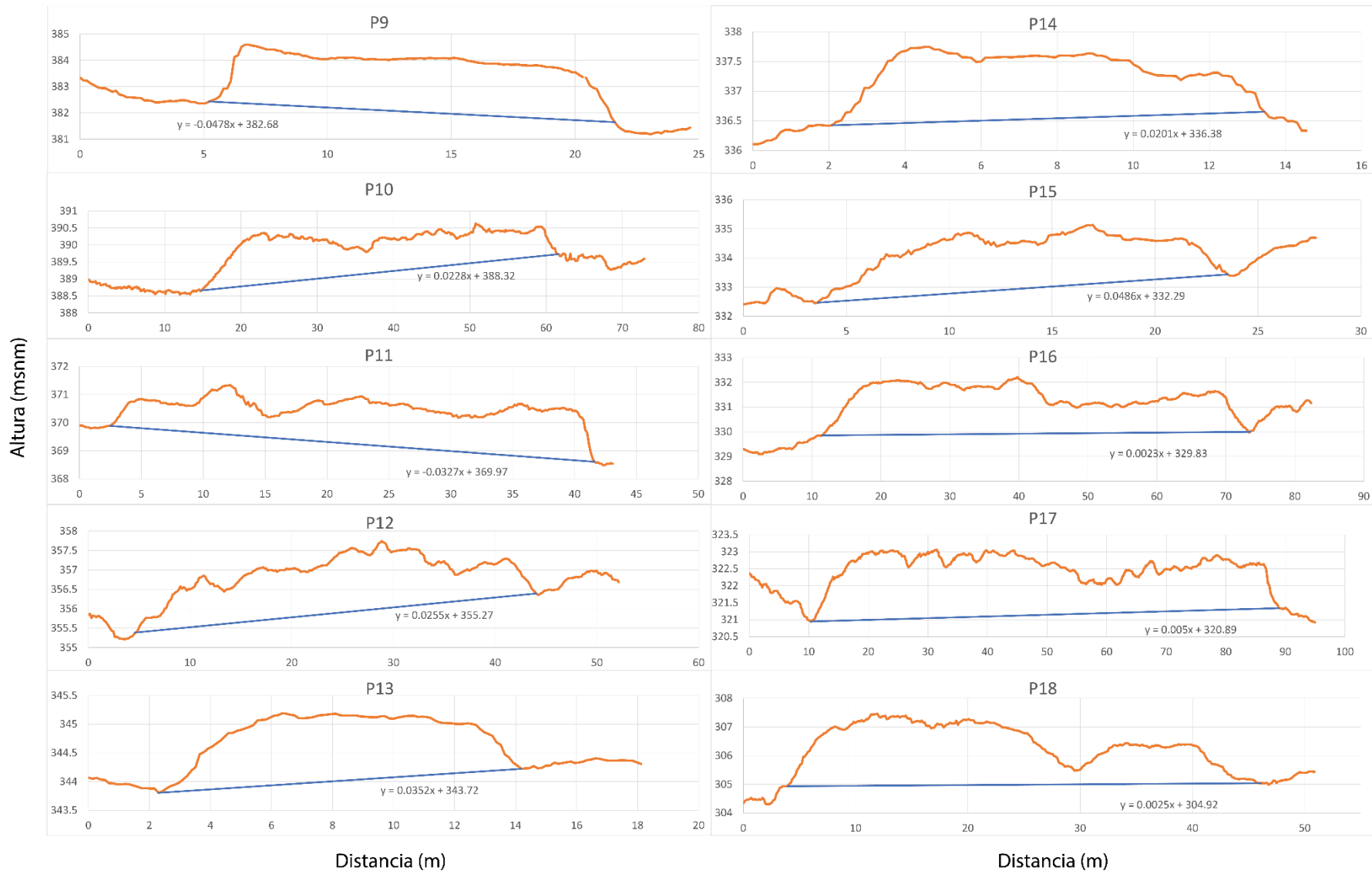
ANEXO IV

ESTIMACIÓN DE ESPESES MÁXIMOS DE LA FISURA ERUPTIVA 6





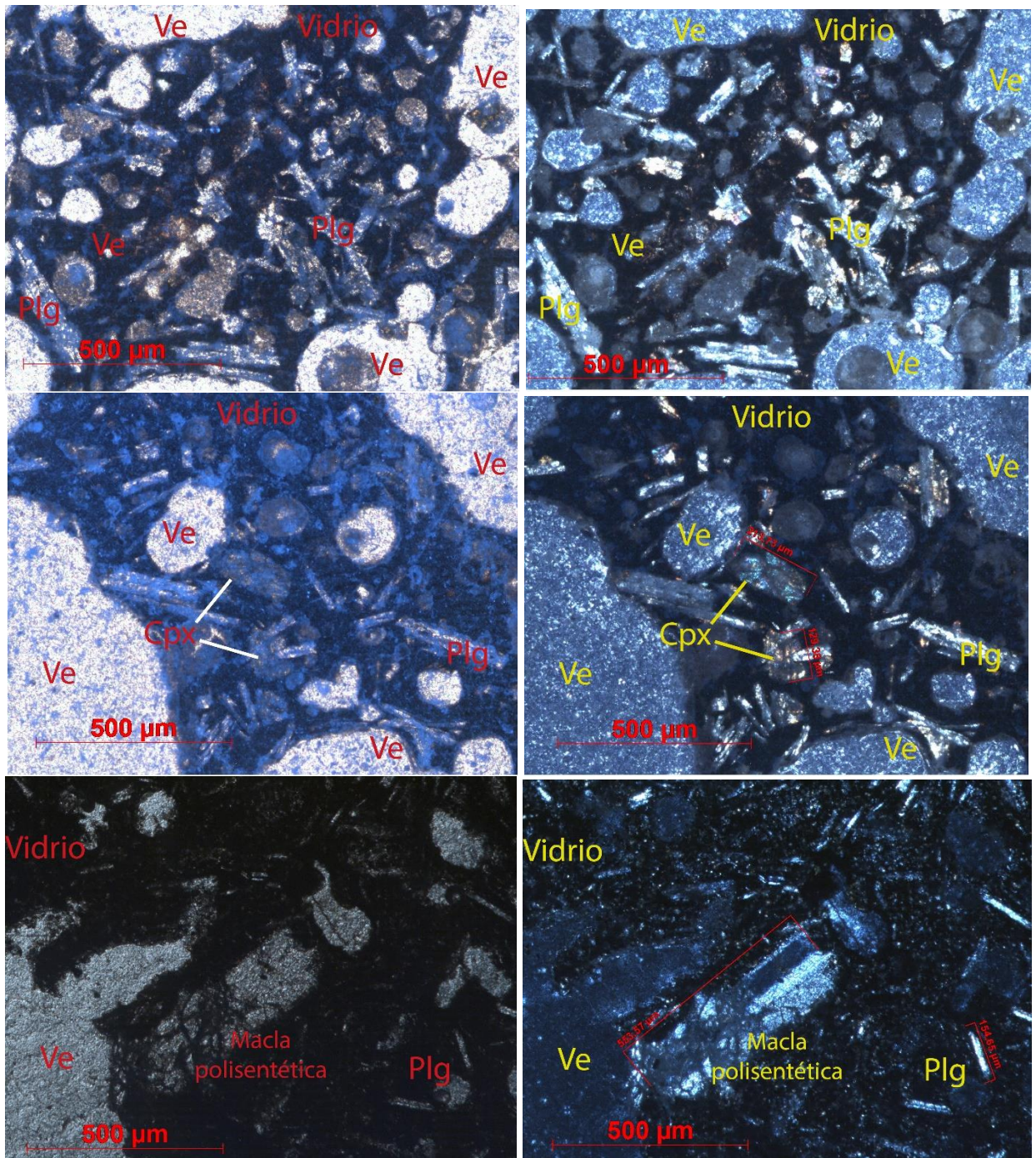




ANEXO V

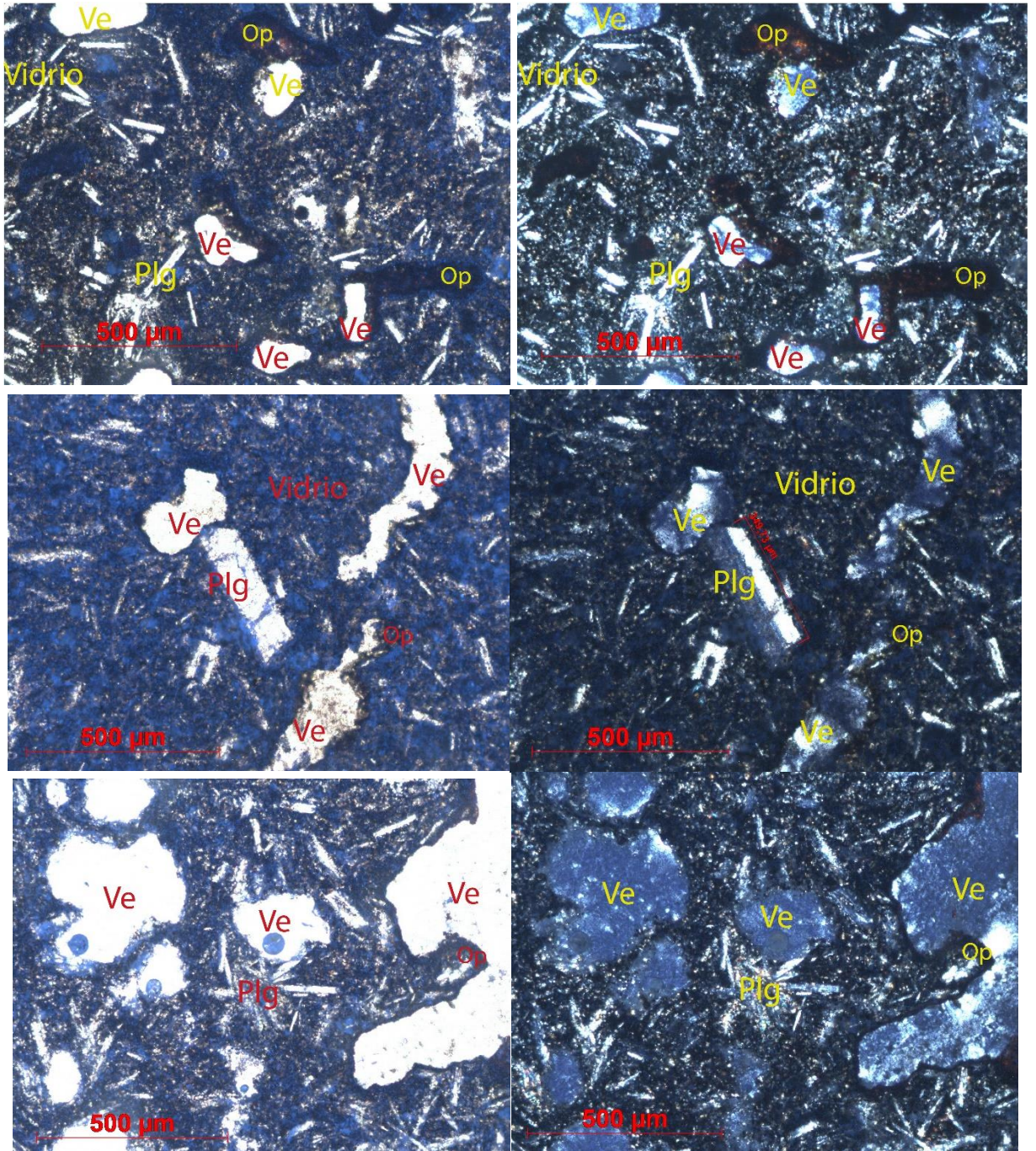
ANÁLISIS PETROGRÁFICO EN LÁMINA DELGADA, FISURA 2 y 6

ANÁLISIS MICROSCÓPICO DE MUESTRAS SIERRA NEGRA ERUPCIÓN 2018						
Código de Lámina:	SN-F2-01A	Localización: Fisura 2, flanco NE volcán Sierra Negra, Isla Isabela Galápagos				
UTM:	X: -91.16	Y: -0.7636	Z: 725	Fecha:	ene-20	Descripción General: Escoria basáltica
Texturas:	Hipocristalina, microlítica, vítrea, traquítica					
Estructura:	Vesicular					
Tamaño de grano:	Fino					
Tipo de matriz:	Vítrea microlítica					
COMPOSICIÓN MINERALÓGICA						
FENOCRISTALES	CARACTERÍSTICAS					PORCENTAJE (%)
Plagioclasa	Existen pocos fenocristales subhedrales a anhedrales observados en la roca. En un solo cristal de mayor tamaño se puede observar una macla polisintética característico de este mineral con una zona fracturada y absorbida.					3.50
Clinopiroxeno	Presentan cristales anhedrales fracturados de aprox. 110-215 µm, puede presentar textura de absorción					0.50
MATRIZ	CARACTERÍSTICAS					PORCENTAJE (%)
Plagioclasa	Cristales subhedrales tabulares que se ven en la matriz. Textura microlítica, acicular o radial y traquítica					20.00
Vidrio	Masa grisácea negruzca rodeando los cristales de plagioclasa					22.00
VESÍCULAS	CARACTERÍSTICAS					PORCENTAJE (%)
Vesículas irregulares y aplanadas	De distintos tamaños, pero muy grandes y redondeados en su mayoría con bordes irregulares, algunas vesículas se encuentran unidas a la otra formando una sola vesícula en forma de 8					54.00
TOTAL DE COMPONENTES						
TOTAL DE CRISTALES	4.00%					
TOTAL DE MATRIZ	42.00%					
TOTAL DE VESÍCULAS	54.00%					
ESQUEMAS EXPLICATIVOS						



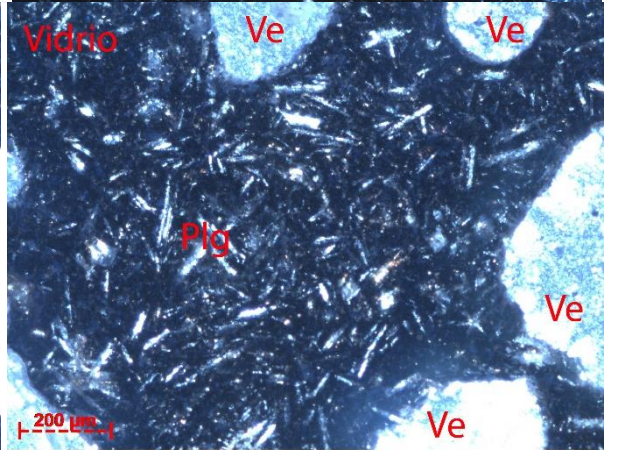
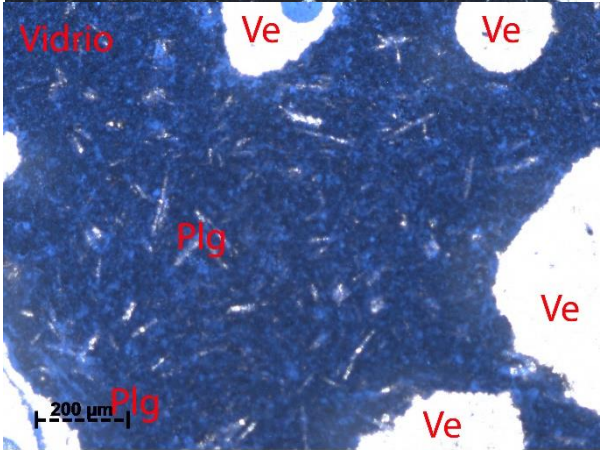
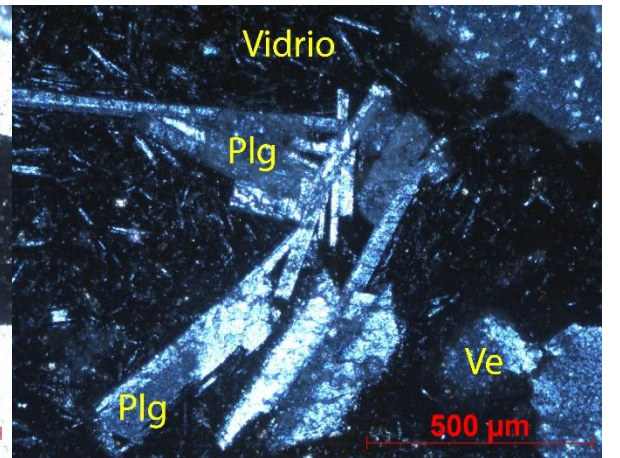
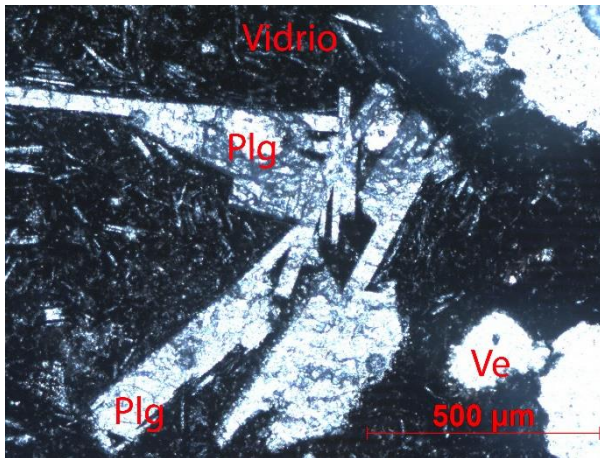
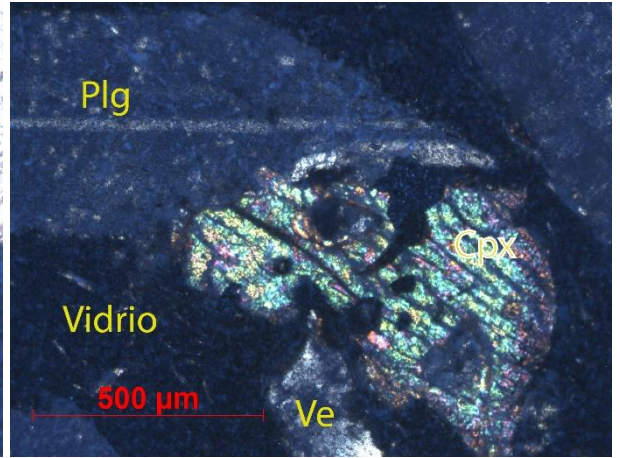
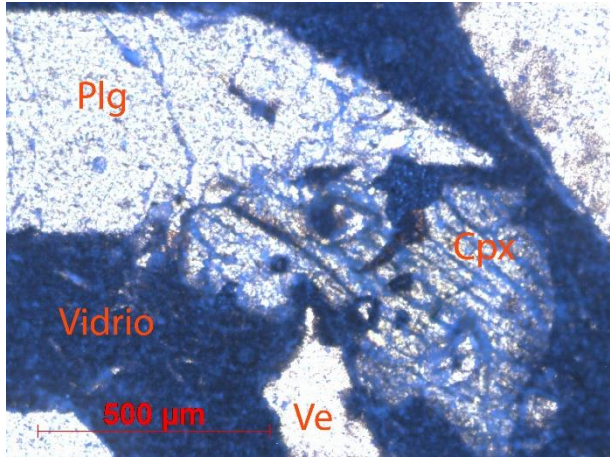
Nombre de la Roca: Escoria basáltica

ANÁLISIS MICROSCÓPICO DE MUESTRAS SIERRA NEGRA ERUPCIÓN 2018							
Código de Lámina:	SN-F2-02	Localización: Fisura 2, flanco NE volcán Sierra Negra, Isla Isabela Galápagos					
UTM:	X: -91.17	Y: -0.762	Z:670	Fecha:	ene-20	Descripción General:	Lava Pāhoehoe
Texturas:	Hipocristalina, microlítica						
Estructura:	Vesicular						
Tamaño de grano:	Fino						
Tipo de matriz:	Vítrea microlítica						
COMPOSICIÓN MINERALÓGICA							
FENOCRISTALES	CARACTERÍSTICAS						PORCENTAJE (%)
Plagioclasa	Fenocristal euhedral con una macla polisintética						1.31
MATRIZ	CARACTERÍSTICAS						PORCENTAJE (%)
Plagioclasa	Cristales subhedrales tabulares que se ven en la matriz. En cúmulos en ciertas zonas						50.49
Vidrio	Masa grisácea negruzca rodeando los microcristales de plagioclasa						21.69
Opacos	Se observan como manchas de color negro debido a las características isotrópicas. Hay óxidos de Fe de color rojo en LPP, y de color negro en XLP que se encuentran como bordes de oxidación en las vesículas						6.83
VESÍCULAS	CARACTERÍSTICAS						PORCENTAJE (%)
Vesículas irregulares	De distintos tamaños, pero grandes, redondeados, pero poco esféricos, algunas vesículas se encuentran unidas a la otra formando una sola vesícula en forma de 8. En una zona, la mayoría de las vesículas se encuentran con bordes de oxidación						13.73
TOTAL DE COMPONENTES							
TOTAL DE CRISTALES	1.31%						
TOTAL DE MATRIZ	79.01%						
TOTAL DE VESÍCULAS	19.68%						
ESQUEMAS EXPLICATIVOS							



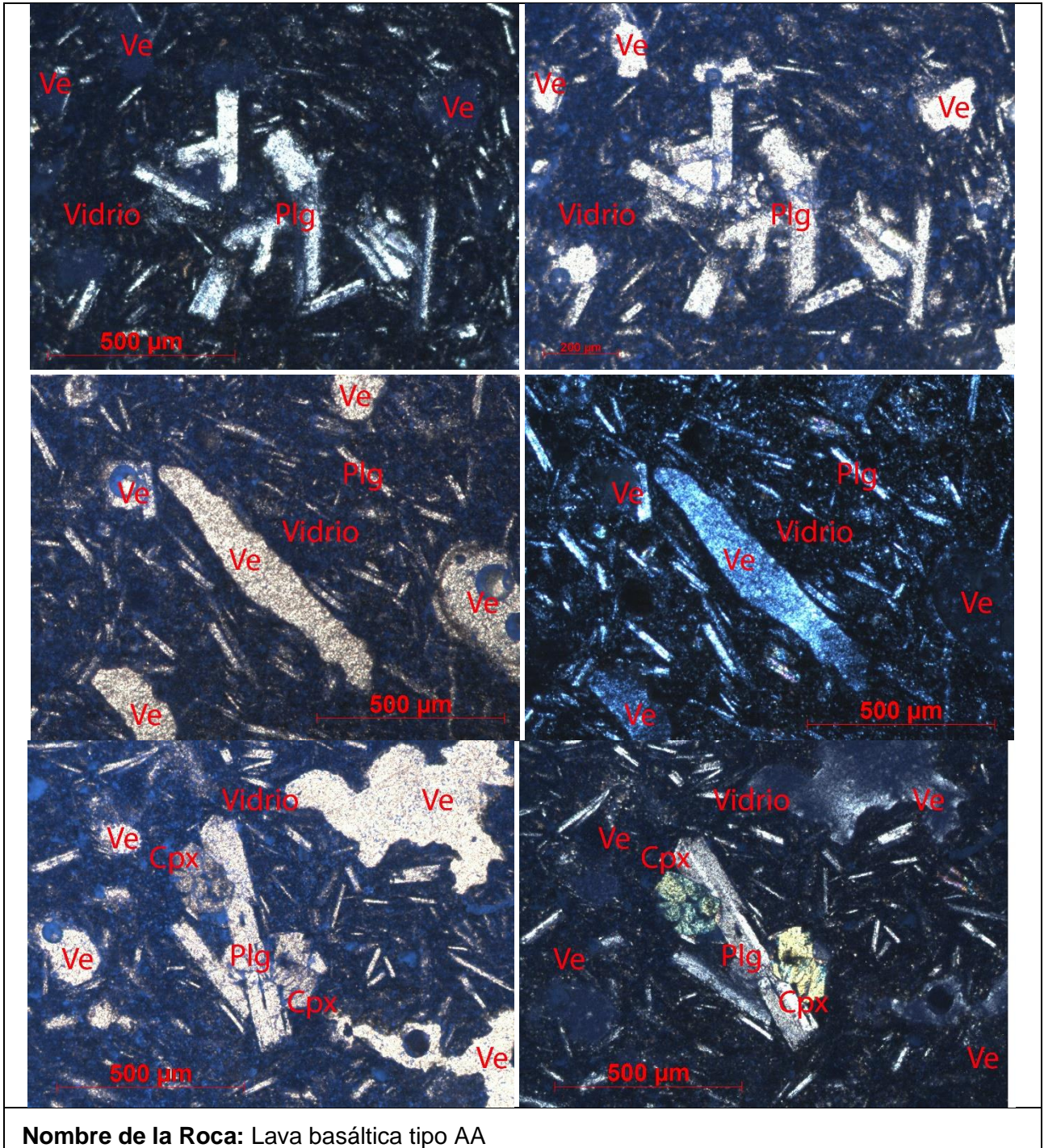
Nombre de la Roca: Lava basáltica tipo Pāhoehoe

ANÁLISIS MICROSCÓPICO DE MUESTRAS SIERRA NEGRA ERUPCIÓN 2018							
Código de Lámina:	SN-F2-03	Localización: Fisura 2, flanco NE volcán Sierra Negra, Isla Isabela Galápagos					
UTM:	X: -91.1723	Y: -0.756	Z: 581	Fecha:	ene-20	Descripción General:	Lava basáltica
Texturas:	Hipocristalina, microlítica, vítrea, traquítica, cúmulo						
Estructura:	Vesicular						
Tamaño de grano:	Fino						
Tipo de matriz:	Vítrea microlítica						
COMPOSICIÓN MINERALÓGICA							
FENOCRISTALES	CARACTERÍSTICAS						PORCENTAJE (%)
Clinopiroxeno	Presenta un cristal anhedral con bordes y estructura corroída de aprox. 820 µm, presenta textura de absorción. Dentro del mineral presenta opacos y quizá dos cristales de opx						0.75
Plagioclasa	Fenocristales euhedrales a subhedrales en cúmulos en cierta zona mayores a 450 µm o fenocristal subhedral acompañado de cristal de cpx mayor a 1050 µm						2.08
MATRIZ	CARACTERÍSTICAS						PORCENTAJE (%)
Plagioclasa	Cristales subhedrales tabulares que se ven en la matriz. Textura microlítica, acicular o radial y traquítica en ciertas partes						44.80
Vidrio	Masa grisácea negruzca rodeando los microcristales de plagioclasa						19.53
Óxidos de Fe	De color rojo en LPP, y de color negro en XLP debido a las características isotrópicas. Se encuentran como bordes de oxidación en unas pocas vesículas						1.24
VESÍCULAS	CARACTERÍSTICAS						PORCENTAJE (%)
Vesículas irregulares	De distintos tamaños muy grandes, redondeados, pero poco esféricos, algunas vesículas se encuentran unidas a la otra formando una sola vesícula en forma de 8. En una zona, la mayoría de las vesículas se encuentran con bordes de oxidación						31.60
TOTAL DE COMPONENTES							
TOTAL DE CRISTALES	2.83%						
TOTAL DE MATRIZ	65.57%						
TOTAL DE VESÍCULAS	31.60%						
ESQUEMAS EXPLICATIVOS							



Nombre de la Roca: Lava basáltica tipo AA

ANÁLISIS MICROSCÓPICO DE MUESTRAS SIERRA NEGRA ERUPCIÓN 2018							
Código de Lámina:	SN-F6-01	Localización: Fisura 6, flanco NE volcán Sierra Negra, Isla Isabela Galápagos					
UTM:	X: -91.188	Y: -0.7238	Z: 97.3	Fecha:	ene-20	Descripción General:	Lava basáltica
Texturas:	Hipocristalina, microlítica, vítrea						
Estructura:	Vesicular						
Tamaño de grano:	Fino						
Tipo de matriz:	Vítrea microlítica						
COMPOSICIÓN MINERALÓGICA							
FENOCRISTALES	CARACTERÍSTICAS						PORCENTAJE (%)
Plagioclasa	Existen solamente 2 fenocristales subhedrales observados en la roca de aprox. 325 y 640 µm. En el cristal de mayor tamaño se puede observar una macla polisintética característico de este mineral.						0.30
Clinopiroxeno	Presentan 2 cristales subhedrales fracturados de aprox. 200 µm, puede presentar textura de absorción.						0.20
MATRIZ	CARACTERÍSTICAS						PORCENTAJE (%)
Plagioclasa	Cristales subhedrales tabulares que se ven en la matriz, con tamaños entre 90 y 170 µm. Textura microlítica, cumulada o acicular						37.49
Opacos	Casi indistinguibles respecto al vidrio, pero se observan como pequeños puntos isotrópicos						0.01
Vidrio	Masa grisácea negruzca rodeando los cristales de plagioclasa.						40.00
VESÍCULAS	CARACTERÍSTICAS						PORCENTAJE (%)
Vesículas irregulares y aplanadas	De distintos tamaños, pero grandes y aplanadas en su mayoría con bordes irregulares y poco redondeados, algunas siguen una tendencia.						22.00%
TOTAL DE COMPONENTES							
TOTAL DE CRISTALES	0.50%						
TOTAL DE MATRIZ	77.50%						
TOTAL DE VESÍCULAS	22.00%						
ESQUEMAS EXPLICATIVOS							



Nombre de la Roca: Lava basáltica tipo AA

ANEXO VI

ANÁLISIS QUÍMICOS EN ROCA TOTAL, FISURA 2 y 6

Muestra	SiO2	TiO2	Al2O3	Fe2O3	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	P2O5	LOI	Total
SN-2018-F2-01a	47.8	4.10	13.2	15.9	0.230	5.29	10.03	3.12	0.60	0.405	-1.10	99.64
SN-2018-F2-01b	47.6	3.97	13.0	15.3	0.225	5.13	9.82	3.09	0.60	0.393	-1.01	98.11
SN-2018-F2-02	47.8	3.89	13.1	15.4	0.225	5.23	9.77	3.21	0.59	0.392	-1.07	98.49
SN-2018-F2-03a	47.0	3.91	12.7	15.3	0.221	5.15	9.58	3.15	0.57	0.375	-1.13	96.85
SN-2018-F2-03b	47.7	3.95	12.9	15.2	0.225	5.12	9.68	3.07	0.58	0.391	-0.74	98.01
SN-2018-F2-04	47.7	4.04	13.0	15.5	0.226	5.19	9.86	3.15	0.60	0.402	-1.10	98.48
SN-2018-F2-05	47.3	3.98	12.9	15.5	0.226	5.21	9.76	3.23	0.59	0.400	-1.10	98.02
SN-2018-F6-01	47.6	3.97	13.1	15.7	0.225	5.27	9.78	3.19	0.58	0.385	-0.86	98.86

Muestra	Rb	Sr	Ba	Sc	V	Cr	Co	Ni	Y	Zr
SN-2018-F2-01a	13	301	143	34.0	445	73.8	44.0	45.0	38.6	224
SN-2018-F2-01b	14	292	129	33.4	450	71.9	44.3	43.1	39.9	224
SN-2018-F2-02	14	290	128	33.4	434	67.7	42.8	38.2	40.6	223
SN-2018-F2-03a	13	281	126	32.2	420	66.3	41.9	38.0	39.5	220
SN-2018-F2-03b	14	281	126	32.2	430	66.8	42.9	39.8	38.5	217
SN-2018-F2-04	11	290	131	33.2	438	69.1	42.8	44.0	40.0	226
SN-2018-F2-05	13	286	127	32.8	429	69.2	42.4	40.0	39.1	224
SN-2018-F6-01	17	287	130	33.4	431	67.5	43.0	39.1	38.7	228

Muestra	Nb	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Gd	Dy	Er	Yb	Th
SN-2018-F2-01a	30.9	21.7	51.2	32.7	7.8	2.42	7.5	7.3	3.7	3.31	1.8
SN-2018-F2-01b	31.6	18.6	44.2	30.0	7.4	2.49	7.6	7.6	1.7	3.28	0.3
SN-2018-F2-02	29.8	19.9	43.0	32.1	7.2	2.37	7.0	7.3	2.6	3.37	1.2
SN-2018-F2-03a	28.9	19.0	46.5	31.2	7.5	2.16	7.3	7.2	1.8	3.27	0.9
SN-2018-F2-03b	29.8	18.1	44.5	29.3	7.2	2.26	7.6	7.1	0.8	3.30	0.8
SN-2018-F2-04	31.4	18.8	45.5	29.8	7.6	2.34	7.8	7.4	1.8	3.36	0.9
SN-2018-F2-05	29.5	19.2	44.1	29.6	7.9	2.43	7.2	7.2	1.9	3.34	0.9
SN-2018-F6-01	29.8	19.0	48.1	30.0	7.8	2.37	7.6	7.3	1.1	3.37	0.3