

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA EN GEOLOGÍA Y
PETROLEOS

REOLOGÍA DE LOS FLUJOS DE LAVA DE CADA FASE ERUPTIVA
DEL VOLCÁN EL REVENTADOR DESDE EL 2002 HASTA EL 2018

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERA GEÓLOGA

IVONNE EMILIA MARÍN TAPIA

ivonemilia@hotmail.com

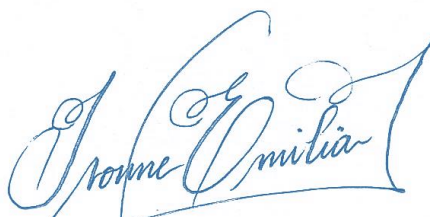
DIRECTORA: PhD. SILVIA XIMENA VALLEJO VARGAS

svallejo@igepn.edu.ec

Quito, enero 2023

DELARACIÓN

Yo, IVONNE EMILIA MARÍN TAPIA, declaro que el trabajo aquí presentado 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. La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

A handwritten signature in blue ink, reading "Ivonne Emilia Marín", written in a cursive style.

IVONNE EMILIA MARÍN

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por IVONNE EMILIA MARÍN TAPIA, bajo mi supervisión.

A handwritten signature in blue ink that reads "Silvia Vallejo Vargas". The signature is written in a cursive style and is positioned above a horizontal line.

MSc. SILVIA XIMENA VALLEJO VARGAS
DIRECTORA

AGRADECIMIENTO

El presente proyecto se lo agradezco primero a Dios, por protegerme y guiarme, dándome fuerza en los momentos que más necesitaba.

A mi familia; mis padres, gracias a ellos y a pesar de todas las adversidades me permitieron estudiar en otra ciudad, con todo su esfuerzo me ayudaron para que pueda culminar esta etapa en mi vida. A mis hermanos, por guiarme y apoyarme en los favores que les pedía y a mi sobrinita querida por ser la mejor siempre.

A la Dra. Silvia Vallejo, que aparte de ser una gran docente es una gran persona y una de las mujeres más fuertes en Geología que conozco. Le agradezco por confiar en mí, por ayudarme a realizar este proyecto de la mejor manera. De enseñarme cómo verdaderamente es el trabajo geológico en campo y con ello, a mejorar y desarrollar un mayor potencial en mí. Así también, en permitirme entrar como ayudante de investigación al proyecto PIM-20-01, que fue de gran aprendizaje. Al igual, expreso mi agradecimiento al director del proyecto Dr. Sergio, a Myrian y María Belén por ayudarme en todo el proceso.

A mis maestros, que cada uno ha forjado en mí una parte de amor a esta carrera y por esta razón, les guardo cariño y mucho respeto. En especial al Ing. Bernardo Beate y al Dr. Mario Ruiz de quienes he aprendido bastante. Además, a los Dres. Patricio Ramón y Marco Rivadeneira, que aparte de ser muy buenos docentes, han reafirmado lo importante que es para mí la puntualidad en la vida. A la Dra. Silvana Hidalgo y al Dr. Benjamin Bernard por invertir su tiempo en revisar mi trabajo, su gran ayuda fue muy valiosa. Y al Dr. Pablo Samaniego por llevar mis muestras de roca para los respectivos análisis.

A mis queridos amigos, quienes fueron mi compañía a lo largo de la carrera, les agradezco por brindarme su amistad y ayudarme a dejar parte de mi timidez. A mi mejor amigo Julián H., eres el más chévere. A Steven C. y Marco Y. gracias por su amistad incondicional. Al todo el grupo de los "Amiguitos" y también al grupo "Farrón", especialmente a Gaby P. y Ale L. Por último, a las nuevas personas que pude conocer de la facu y en el Instituto Geofísico; a Henry C. y Marco C. por auxiliar en cosas importantes para mi tesis.

DEDICATORIA

*A las mujeres que hacen ciencia, quienes fueron un impulso
y gran ejemplo para que muchas chicas nos involucremos en la investigación.*

*A mi papá Luis, a mi mamá Cecy, a mi única abuelita Ma.
Elena, a mis hermanos María y Luis, a mi sobrina Ma. Emilia y a mi perrita Guina.*

Se los dedico con todo mi amor.

*A las personas que formaron parte de mi vida y la hicieron
muy feliz.*

Ivonne E.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN.....	I
CERTIFICACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTO.....	III
DEDICATORIA.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO	V
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
ÍNDICE DE TABLAS	XVIII
RESUMEN.....	XXI
ABSTRACT.....	XXII
GLOSARIO	XXIII
CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. ANTECEDENTES	1
1.2. JUSTIFICACIÓN	3
1.3. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	5
1.3.1. Ubicación del volcán El Reventador	5
1.3.1.1. Acceso a la zona de estudio	6
1.3.2. Clima.....	7
1.4. OBJETIVOS	8
1.4.1. Objetivo general	8
1.4.2. Objetivos específicos	9
1.5. ALCANCE	9
1.6. TRABAJOS ANTERIORES	10
CAPÍTULO II	12
2. MARCO GEOLÓGICO	12
2.1. VOLCANISMO PLIO-CUATERNARIO DE LOS ANDES DEL ECUADOR.....	12
2.1.1. Volcanismo de la Cordillera Occidental	15
2.1.2. Volcanismo de la Cordillera Oriental.....	15

2.1.3. Volcanismo del Valle interandino	16
2.1.4. Volcanismo del Tras arco	16
2.2. GEOLOGÍA Y MORFOLOGÍA DEL VOLCÁN EL REVENTADOR	16
2.2.1. El complejo volcánico Basal (CVB).....	17
2.2.2. Volcán Paleoreventador (PR)	19
2.2.3. Volcán El Reventador, cono actual (VER)	19
2.3. FASES ERUPTIVAS	20
2.3.1. Fase A - 2002.....	23
2.3.2. Fase B 2004 – 2005	23
2.3.3. Fase C – 2007	24
2.3.4. Fase D 2008 - 2009.....	24
2.3.5. Domo de lava 2010- 2011.....	25
2.3.6. Fase E 2012 – 2017	25
2.3.7. Fase F 2018 – 2020	26
CAPÍTULO III	27
3. REOLOGÍA DE LAS LAVAS	27
3.1. PROPIEDADES REOLÓGICAS EN BASE A SUS CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS	29
3.2. PROPIEDADES REOLÓGICAS EN BASE A SU COMPOSICIÓN	33
3.2.1. Viscosidad total.....	33
3.2.2. Viscosidad dinámica (η_f).....	33
3.2.3. Viscosidad relativa (η_r).....	36
3.2.4. Límite elástico τ	40
CAPITULO IV	43
4. METODOLOGÍA	43
4.1. INFORMACIÓN DE MUESTRAS	43
4.1.1. Recopilación de información bibliográfica	43
4.1.2. Trabajo de campo	44
4.2. ANÁLISIS DE LABORATORIO	46
4.2.1. Preparación de muestras	46
4.2.2. Análisis geoquímico.....	47
4.2.3. Análisis Petrográfico macro y microscópico.....	48

4.3. ANÁLISIS REOLÓGICO	48
4.3.1. Parámetros reológicos en base a las dimensiones morfológicas	48
4.3.1.1 Estimación del error de los polígonos	49
4.3.2. Parámetros reológicos en base a la composición	55
4.3.2.1. Viscosidad total	55
4.3.2.2. Límite elástico (τ)	59
CAPÍTULO V	60
5. RESULTADOS	60
5.1. ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS REOLÓGICOS EN BASE A LA MORFOLOGÍA	60
5.1.1. Parámetros reológicos lava LF5	60
5.1.2. Parámetros reológicos lava LF9	62
5.2. PETROGRAFÍA Y GEOQUÍMICA DE LAS LAVAS DE EL REVENTADOR	65
5.2.1. Petrografía y mineralogía	65
5.2.1.1. Petrografía de LF5	67
5.2.1.2. Petrografía de LF9	71
5.2.1.3. Dinámica y evolución de lavas (variación de componentes)	75
5.2.2. Geoquímica de elementos mayores	78
5.3. ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS REOLÓGICOS EN BASE A LA COMPOSICIÓN	84
5.3.1. Reología LF5	84
5.3.1.1. Viscosidad del flujo de lava LF5	84
5.3.1.2. Límite elástico de LF5	88
5.3.2. Reología LF9	90
5.3.2.1. Viscosidad del flujo de lava LF9	90
5.3.2.2. Límite elástico de LF9	93
5.3.3. Reología de cada fase eruptiva	94
5.3.3.1. Viscosidad total de cada fase eruptiva	94
5.3.3.2. Límite elástico total de cada fase eruptiva	98
5.4. COMPARACIÓN DE METODOLOGÍAS	99
CAPÍTULO VI	102
6. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN	102
6.1. CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA DE LAVAS ANDESÍTICAS DE EL REVENTADOR	102

6.2. COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE LAS LAVAS DE EL REVENTADOR	106
CAPÍTULO VII.....	113
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	113
7.1. CONCLUSIONES	113
7.2. RECOMENDACIONES	115
7.2.1. Recomendaciones para la toma de muestras	115
7.2.2. Recomendaciones para un continuo análisis.....	116
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	117
ANEXOS.....	135

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Vista frontal del volcán El Reventador. Fotografía de Marín I. del 08 de octubre del 2022, tomada desde la base Azuela, ubicada en la parte norte del anfiteatro del volcán. Se observa un flujo de lava activo el cual presenta dos lóbulos (gris claro).	1
Figura 2: Mapa de ubicación del volcán El Reventador. a) Mapa de actividad de los volcanes del continente del Ecuador (Dic-2022) en UTM WGS84 18 S. Los polígonos rojos Reventador (1), Sangay (2) y Cotopaxi (3) actualmente se encuentran en etapa de erupción. Basemap obtenido de National Center for Environmental Information b) Localización regional del volcán El Reventador. c) Cono de anfiteatro del volcán El Reventador con un área de ~17Km ² . La Ortofoto en UTM realizado por Diefenbach en el 2013, indica el área de estudio, donde se localizan los flujos de lava, señalando el cráter del volcán.	5
Figura 3: Track utilizado en el GPS para la salida de campo a los flujos de lava del flanco Norte de El Reventador. Desde la carretera Teniente Hugo Ortiz hasta el frente de la lava LF82. El círculo rojo representa el punto base de Azuela. Mapa desarrollado en la aplicación GPX Viewer en el año 2022.....	7
Figura 4: Mapas del clima de la zona del volcán El Reventador. a) Mapa de isotermas de la zona amazónica del Ecuador. Recuadro rojo indica la ubicación del volcán, señalando que su temperatura se encuentra entre la más alta del sector. b) Mapa de isoyetas media anual de la zona amazónica del Ecuador. Recuadro rojo indica la zona del volcán, señalando que presenta precipitaciones hasta de 600 mm anuales. Recuperado y modificado de Torres et al. (2018).....	8
Figura 5: Entorno tectónico de los Andes, se localiza las 4 zonas volcánicas: NVZ (Zona Volcánica Norte); CVZ (Zona Volcánica Central); SVZ (Zona Volcánica Sur); AVZ (Zona Volcánica Austral). Modificado de Llambías et al. (2010).	13
Figura 6: Mapa de distribución de los volcanes y su actividad eruptiva del Ecuador. Recuadro amarillo representa el volcán El Reventador. A) volcanes situados en el continente, y B) volcanes situados en las Islas Galápagos. Modificado de Ramón et al. (2021)	14
Figura 7: Edificios volcánicos del volcán El Reventador. Se observa las crestas de Basal Reventador, Paleo Reventador y el nuevo estratocono. Recuperado de Estrella (2021), modificado de Almeida et al. (2019).....	17

Figura 8: Esquema de las tres etapas de evolución del complejo volcánico El Reventador. a) El complejo volcánico Basal CVB. b) Volcán Paleo Reventador (VPR). c) Volcán El Reventador, cono actual (VER). Recuperado de INECCEL (1988).	18
Figura 9: Cráter después de la reactivación del 2002. a) Morfología del cráter del volcán en el 2002 (negro), 2017 (rojo) y 2018 (verde). b) Vista superior del volcán donde señalan los ventos Norte y Sur separados y el flujo de lava que se extruye desde el vento Norte el 28 de enero de 2016. c) Vista lateral de los ventos del volcán. Recuperado de Almeida et al. (2019).	20
Figura 10: Composición geoquímica de elementos mayores del 2002 al 2018 del volcán El Reventador mediante la clasificación de Le Bas et al., 1986. Triángulos azules de muestras del 2002 Fase A; Cuadrados verdes de muestras del 2004-2005 Fase B; Círculos negros de muestras del 2007- 2008. Recuperado de Estrella (2021).	21
Figura 11: Mapa de los flujos de lava de la Fase A del volcán El Reventador	23
Figura 12: Mapa de los flujos de lava de la Fase B del volcán El Reventador.	23
Figura 13: Mapa de los flujos de lava de la Fase C del volcán El Reventador.	24
Figura 14: Mapa de los flujos de lava de la Fase D del volcán El Reventador	24
Figura 15: Imágenes térmicas aéreas que muestran la evolución del crecimiento del domo de lava dentro del cono de tefra. a) Imagen térmica 2011-05-23. b) Imagen térmica 2011-07-14. c) Imagen térmica 2011-08-19. d) Imagen térmica 2011-10-13. Recuperado de: Vallejo, in prep.	25
Figura 16: Mapa de los flujos de lava de la Fase E del volcán El Reventador	26
Figura 17: Mapa de los flujos de lava de la Fase F del volcán El Reventador.	26
Figura 18: Regímenes que controlan el comportamiento del flujo de lava. Caso lineal: viscosidad dominada, Caso Herschel-Buckley: límite elástico de la corteza dominado, Caso Bingham: el límite elástico (τ) del núcleo dominado. Recuperado de Magnall et al. (2017)	27
Figura 19: Gráfica de la tasa de deformación vs el esfuerzo de cizalla. Tipos de flujos: (a) Flujo newtoniano, (b) Fluido pseudoplástico, (c) Fluido dilatante, (d) Bingham, (e) Herschel-Bulkley; τ_0 Límite elástico. Viscosidad aparente (Línea discontinua) corresponde a la pendiente. Recuperado de Mader et al. (2013)	28
Figura 20: Ejemplo de análisis reológico mediante la morfología. Perfiles trazados a lo largo del flujo de lava del volcán Rancho Seco-México. A) Vista general de los flujos de lava mejor	

expuestos de las zonas de estudio. B) Perfiles topográficos (perpendiculares a la dirección del flujo) de lavas del volcán Rancho Seco (F5 y F6) a partir de los cuales se estimaron el ancho, el espesor y el ancho del canal como se muestra en C. Recuperado de Ramírez, 2020.....	30
Figura 21: Viscosidad fluida en función de la temperatura desde composiciones riolíticas hasta komatiitas. Las composiciones andesíticas pueden disminuir entre 1×10^4 a 100 (Pa.s) en un rango de Temperatura de 1000°C a 1400°C. Recuperado de Lesher y Spera (2015).....	34
Figura 22: Diagrama de diferentes modelos de viscosidad relativa. E: Einstein; GG: Guth & Gold (1938); ER: Einstein-Roscoe; KD: Krieger y Dougherty; C: Costa. Recuperado de: Mader et al. (2013).....	36
Figura 23: Límite elástico aparente de la lava cristalizante en función de la temperatura y la cristalinidad correspondiente modelada por MELTS. Varios métodos utilizados para el cálculo de este parámetro. Recuperado de Chevrel et al. (2013).....	40
Figura 24: Mapa de ubicación en UTM WGS84/18S de las muestras proporcionadas por el IGEPN. Puntos rojos marcan la ubicación de las muestras de los flujos de lava. Letras negras indican el Nro. del flujo de lava señalado en la Tabla 2.	43
Figura 25: Localización de las muestras extraídas en la campaña de campo de noviembre 2021 (Sección norte). a) Mapa de las muestras de roca obtenidas en la salida de campo, sección norte de LF9 y LF82, etiquetadas con el Nro. de flujo de lava. b) Fotografía tomada desde la posición del frente del flujo LF82 al flanco sur del flujo LF9. c) Fotografía de noviembre del 2021 de la posición de 3 flujos de lava emitidos por el volcán (LF82 azul, Lava 2017 rojo y Pf amarillo).	45
Figura 26: Equipo necesario para la pulverización de las muestras para la realización de análisis geoquímicos. a) Moledora de acero templado. b) Moledora de ágata IG-EPN.	47
Figura 27: Equipo necesario para el conteo modal de las muestras en lamina delgada. Microscopio ZEISS Scope A1.	48
Figura 28: Flujos de lava FL5 y FL9 del volcán El Reventador. Mapa desarrollado en ArcMap en el año 2021 con los polígonos proporcionados por Vallejo (2017).	49
Figura 29: Error de ubicación campo de lava LF5. Polígonos trazados a lo largo de LF5 por 12 participantes para el cálculo del error de ubicación. Las líneas rojas marcan 10 trazos con mayor similitud. Línea amarilla y negra, representan los trazos de 2 participantes que presentan la mayor variación en comparación con los otros participantes.....	50

Figura 30: Error de ubicación campo de lava LF9. Polígonos trazados a lo largo de LF9 por 12 participantes para el cálculo del error de ubicación. Las líneas rojas marcan 10 trazos con mayor similitud. Línea amarilla y negra, representan los trazos de 2 participantes que presentan la mayor variación en comparación con los otros participantes.....	52
Figura 31: Mediciones morfológicas mediante el Modelo de Elevación digital del volcán. a) Medidas de Ancho W, base B y espesor H, de cada perfil trazado a lo largo del flujo (Perfil correspondiente P7-LF9) b) Herramienta Terrain profile en QGis, el cual, permite realizar perfiles perpendiculares a lo largo del eje del flujo de lava. Perfil 1 principal (Corresponde P1-LF5) c) 5 perfiles secundarios para el promedio del resultado final. Perfiles desarrollados en Qgis 3.0.	53
Figura 32: Perfiles a lo largo de la sección expuesta del flujo de lava LF5. Se consideró los perfiles que conservan su morfología cóncava correspondiente a la forma del flujo de lava. En total se tomó la información de ancho, espesor y pendiente de 8 perfiles.....	60
Figura 33: Perfiles a lo largo de la sección expuesta del flujo de lava LF9. Se consideró los perfiles que conservan su morfología cóncava correspondiente a la forma del flujo de lava. En total se tomó la información de ancho, espesor y pendiente de 10 perfiles.....	62
Figura 34: Parámetros reológicos vs la distancia de cada perfil respecto al cráter del volcán. Las gráficas indican el comportamiento de la viscosidad, límite elástico y tasa de deformación a lo largo del flujo de lava LF5 y LF9. La línea amarilla y línea gris representan la tendencia de los valores.....	64
Figura 35: Fotografías de noviembre 2021. Vista macro de los depósitos lávicos emitidos por El Reventador. a) Flujo de lava tipo bloque LF82a. b) Flujo de lava tipo bloque LF9b zona central. c) Frente de lava LF82b con estructura masiva. La posición de estas muestras de lava está presente en la Fig. 26.....	65
Figura 36: Ejemplo de la división de componentes y clasificación mineralógica. Cristal de piroxeno euahedral con macla lamelar entre cristales de piroxeno distribuidos de forma pilotaxítica de la muestra de lava LF5e. a) Aumento 10x en nicols cruzados. b) Aumento 10x en luz natural. c) Imagen de lámina delgada con resplandor de neón que indica coneto de cristales, matriz y vesículas.....	67
Figura 37: Flujo de lava LF5 vista en microscopio. a) Muestra LF5d - aumento 2.5x, donde se observa cristales de plagioclasa distribuidos de forma pilotaxítica, junto con cristales de piroxeno y anfíbol en menor cantidad de formas subhaciales a euahedrales, envueltos en una matriz criptocristalina compuesta por vidrio, piroxenos y plagioclasas. La textura principal de la muestra	

corresponde a porfirítica y en menor cantidad se observa texturas glomeroporfíricas. La muestra posee vesicularidad alta de forma y tamaño irregular. b) Muestra LF5e - aumento 10x, se observa cristales de plagioclasa sobrepuestos con cristales de piroxenos indicando una textura glomeroporfírica en la muestra. Los cristales de piroxenos presentan formas anhedrales a subhedrales y las plagioclasas de forma subhedral a euhedral..... 68

Figura 38: Muestras de flujo de lava LF5 vista en microscopio con aumento 10x nicoles cruzados y luz natural..... 69

Figura 39: Muestras del flujo de lava LF5 en vista nicoles cruzados del microscopio. a) Muestra LF5a, cristales de plagioclasa, piroxeno, anfíboles, óxidos de Fe y vesículas dentro de una matriz criptocristalina color marrón terroso de vidrio, piroxeno y anfíbol. Se observa bordes de oxidación en los cristales anfíbol. b) Muestra LF5b, cristal de anfíbol con borde de oxidación y cristales de plagioclasa tabular de forma subhedral a euhedral. 70

Figura 40: Muestras del flujo LF5 en luz natural del microscopio. a) Muestra LF5c, se observa óxidos de Fe, cristales de piroxenos euhedrales, plagioclasas tabulares en una matriz de color marrón. b) Muestra LF5b, vesículas que alcanzan tamaños de hasta 1300 um..... 70

Figura 41: Flujo de lava LF9 vista en microscopio. a) Muestra LF9a - aumento 10x, se observa cristales de plagioclasa distribuidos de forma pilotaxítica, junto con cristales de piroxeno y anfíbol en menor cantidad de formas subhedrales a euhedrales, envueltos en una matriz criptocristalina compuesta por vidrio, piroxenos y plagioclasas. La textura principal de la muestra corresponde a porfirítica. La muestra posee vesicularidad alta de forma y tamaño irregular. Se puede observar una vesícula entre un cristal tabular de plagioclasa. b) Muestra LF9a - aumento 10x, en luz natural. Los cristales de piroxenos presentan formas anhedrales a subhedrales y las plagioclasas de forma subhedral. 72

Figura 42: Muestra LF9a en nicoles cruzados y luz natural, se observa cristal euhedral de plagioclasa. a) Muestra LF9a, cristal de plagioclasa euhedral con macla de Carlsbad de forma cúbica, en nicoles cruzados. b) Muestra LF9a en luz natural, se observa vesicularidad redondeada. 72

Figura 43: Flujo de lava LF9 vista en microscopio. a) Muestra LF9b - aumento 10x, se observa cristales de plagioclasa distribuidos de forma pilotaxítica, junto con cristales de piroxeno y anfíbol en menor cantidad de formas subhedrales a euhedrales, envueltos en una matriz criptocristalina compuesta por vidrio, piroxenos y plagioclasas. Los cristales de plagioclasa se encuentran en su mayoría con macla polisintética. b) Muestra LF9b en luz natural. 73

Figura 44: Muestra LF9d, alta vesicularidad. a) Muestra LF9d - aumento 10x, en luz natural. La muestra presenta gran cantidad de vesicularidad interconectada y cristales de plagioclasa de forma subhedral a anhedral distribuidos de manera caótica. b) Muestra LF9d -aumento 10x en luz natural.	74
Figura 45: Diagrama de componentes (Cristales, Matriz y Vesículas) de las muestras de lava analizadas en este trabajo, proporcionadas por el IG-EPN y obtenidas en la campaña de campo noviembre 2021.....	75
Figura 46: Variación de componentes de 2 muestras de roca del flujo de lava LF11. Se observan imágenes donde en la muestra LF11a hay un mayor porcentaje de vesículas y un mínimo contenido de cristales, mientras que en la muestra LF11b el porcentaje de vesículas es mucho menor y el contenido de cristales se incrementa.	76
Figura 47: Variación total de componentes de las diferentes muestras de roca obtenidas a lo largo del flujo LF5.....	77
Figura 48: Variación total de componentes a lo largo del flujo LF9. a) Variación de componentes entre la muestra LF9a y LF9d, muestras de roca ubicadas en el leve sur a una cierta distancia. b) Variación de componentes de las muestras tomadas perpendicularmente a la dirección del flujo LF9.....	77
Figura 49: Diagrama TAS de los valores químicos de las muestras de lava LF4 hasta la LF25 realizado en el software IGPET. En esta gráfica se observa que las muestras extrañas presentan una secuencia dentro de la composición de basalto traquiandesítico para las lavas del volcán El Reventador.	78
Figura 50: Diagramas Harker de muestras de roca de los flujos de lava de El volcán El Reventador realizados en el software IGPET. Los valores geoquímicos para este análisis fueron Recuperados de: Vallejo, (2017).	79
Figura 51: Puntos de coordenadas de las muestras obtenidas del flujo de lava LF5.....	80
Figura 52: Diagramas Harker de muestras de roca del flujo de lava LF5 (Fig. 51) de El volcán El Reventador realizados en el software IGPET. Los valores geoquímicos para este análisis fueron Recuperados de: Vallejo, (2017) y Samaniego et al. (2008).....	81
Figura 53: Posición de coordenadas de las muestras de roca obtenidas del flujo LF9.....	82

Figura 54: Diagramas Harker de muestras de roca del flujo de lava LF9 (Fig. 53) de El volcán El Reventador realizados en el software IGPET. Los valores geoquímicos para este análisis fueron Recuperados en la campaña de campo de noviembre del 2021.	83
Figura 55: Distancia de muestras del leve Sur, desde el cráter respecto al porcentaje de sílice. a) LF5. b) LF9.	84
Figura 56: Log de viscosidad relativa respecto a la fracción cristalina. Se aprecia que el modelo de Einstein y Roscoe, 1952; y Krieger y Dougherty, 1959 tienden a valores infinitos y el modelo de Costa et al., 2009 se apega más a valores reales cuando la fracción cristalina tiende al empaquetamiento máximo. Zona morada representa los valores de las muestras de los flujos de lava analizados en este trabajo.	85
Figura 57: Log de viscosidad fluida respecto a la Temperatura de LF5. Se observa una variación continua de las muestras a medida que la temperatura aumenta.	87
Figura 58: Esquema de variación de viscosidad fluida y porcentaje de Sílice a lo largo del flujo LF5.	87
Figura 59: Log de límite elástico en función de la fracción cristalina de LF5 utilizando los modelos de: Ryerson et al. (1988); Mueller et al. (2010); Sehlke et al. 2014.	89
Figura 60: Log de viscosidad relativa de LF9 respecto a la fracción cristalina. Se aprecia que el modelo de Einstein y Roscoe, 1952; y Krieger y Dougherty, 1959 tienden a valores infinitos y el modelo de Costa et al., 2009 se apega a valores reales para andesitas. Zona marcada representa los valores de las muestras de los flujos de lava analizados.	91
Figura 61: Log de viscosidad fluida respecto a la temperatura de LF9. Se observa una variación continua de las muestras a medida que la temperatura aumenta.	92
Figura 62: Log de límite elástico de LF9 en función de la fracción cristalina utilizando Ryerson et al. (1988); Mueller et al. (2010); Sehlke et al. 2014.	93
Figura 63: Posición de las muestras correspondiente a cada Fase eruptiva. Se seleccionó 6 muestras significativas que representen a cada fase eruptiva y con ello calcular la reología a lo largo de la actividad.	94
Figura 64: Viscosidad relativa de una muestra significativa de cada fase eruptiva del volcán El Reventador desde el 2002 hasta la actualidad utilizando los 4 métodos para el cálculo de la	

viscosidad relativa: Einstein, 1906; Einstein y Roscoe, 1952; Krieger y Dougherty, 1959; Costa et al., 2009.....	96
Figura 65: Variación de la viscosidad fluida de cada fase eruptiva en un rango de Temperatura de 737°C a 775.5°C.	97
Figura 66: Variación de la viscosidad total a lo largo de la actividad eruptiva de El Reventador desde el 2002 hasta la actualidad. (Línea roja representa la viscosidad a temperaturas de 757°C, línea azul representa la viscosidad a 737°C y línea gris representa la viscosidad a temperatura de 775.5°C).....	98
Figura 67: Variación del límite elástico a lo largo de la actividad eruptiva de El Reventador desde el 2002 hasta la actualidad.	99
Figura 68: Localización de perfiles trazados para el cálculo morfológico de la reología y de los puntos correspondientes a las muestras para el cálculo de la reología en base a su composición del flujo LF5.....	100
Figura 69: Localización de perfiles trazados para el cálculo morfológico de la reología y de los puntos correspondientes a las muestras para el cálculo de la reología en base a su composición del flujo LF9.....	100
Figura 70: a) Diagrama de puntos de viscosidad respecto a la Temperatura de diferentes muestras de roca extraídas de volcanes del mundo (Anexo IV), los valores obtenidos en el presente proyecto se encuentran dentro del rango de las andesitas. b) Log de límite elástico de flujos de lava de diferentes volcanes incluyendo los de este volcán (estrella roja) que señalan una composición basalto andesítico y traquiandesítico. Así también, una variación de ~0,5 a ~4 del Log de límite elástico (Anexo V).	105
Figura 71: Log de la viscosidad total a lo largo de los flujos de lava LF5 y LF9. a) Log de Viscosidad Total respecto a la distancia de la muestra respecto al cráter del volcán. Se observa la variación de la viscosidad a lo largo de la lava LF5. b) Log de Viscosidad Total respecto a la distancia de la muestra respecto al cráter del volcán. Se observa la variación de la viscosidad a lo largo de la lava LF9.....	107
Figura 72: Log del límite elástico a lo largo de los flujos LF5 y LF9. a) Log del límite elástico respecto a la distancia de la muestra respecto al cráter del volcán. Se observa la variación del límite elástico a lo largo de la lava LF5 b) Log del límite elástico respecto a la distancia de la muestra respecto al cráter del volcán. Se observa la variación del límite elástico a lo largo de la lava LF9.	108

Figura 73: Variación de la viscosidad relativa a lo largo del tiempo desde el 2002 hasta la actualidad, utilizando los cuatro métodos aplicados en todo el proyecto. A, B, C, D, E, F significan las Fases eruptivas..... 108

Figura 74: Variación de la viscosidad fluida a lo largo del tiempo desde el 2002 hasta la actualidad a una temperatura de 737°C y 775.5 °C. A, B, C, D, E, F significan las Fases eruptivas. La viscosidad fluida a diferente temperatura indica valores paralelos con una diferencia de 0.5 Pa. . 110

Figura 75: Variación de la viscosidad total a lo largo de la actividad eruptiva del volcán El Reventador. Se observa que la composición de los flujos de lava de las fases más recientes ha presentado viscosidades altas. A, B, C, D, E, F significa las Fases eruptivas. a) viscosidad total en 737°C. b) viscosidad total en 757°C. c) viscosidad total en 775.5°C. 111

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Actividad de cada fase eruptiva del volcán El Reventador. Información obtenida de Vallejo et al. (2016)	22
Tabla 2 Información de muestras de flujos de lava del volcán El Reventador recolectadas bibliográficamente de diferentes autores.....	44
Tabla 3 Nuevas muestras extraídas de los flujos de lava y analizadas en el presente proyecto.....	46
Tabla 4 Cálculo del Error del área (E), Error Absoluto (EA) y Error Relativo (ER) de LF5 (Fig. 29)	51
Tabla 5 Cálculo del Error del área (E), Error Absoluto (EA) y Error Relativo (ER) de LF9 (Fig. 30)	52
Tabla 6 Simbología de las variables aplicadas en las ecuaciones para análisis morfológico.....	54
Tabla 7 Ecuaciones utilizadas para el análisis reológico en base a la morfología	55
Tabla 8 Simbología de las variables aplicadas en las ecuaciones para análisis reológico en base a la geoquímica y cristales	56
Tabla 9 Ecuaciones utilizadas para el análisis de viscosidad en base a la geoquímica y fracción cristalina	57
Tabla 10 Ecuaciones utilizadas para la obtención de parámetros de la viscosidad propuestos por Caricchi et al., 2007. TanH representa la tangente hiperbólica.....	57
Tabla 11 Ecuaciones utilizadas para el análisis del límite elástico en base a la geoquímica y fracción cristalina	59
Tabla 12 Resultados de la reología en base a los parámetros morfológicos de los perfiles trazados del flujo LF5 (Fig. 32). Se consideró 8 perfiles que conservan la forma cóncava necesaria para este análisis.....	61
Tabla 13 Resultados de los parámetros reológicos en base a las mediciones morfológicas de los perfiles trazados del flujo LF9 (Fig.33). Se consideró el total de 10 perfiles que aún conservan su morfología cóncava.	63

Tabla 14 Resultados del conteo modal de las muestras obtenidas de los flujos de lava del volcán El Reventador desde el 2002 hasta la actualidad. Se indica el porcentaje total de Cristales, Matriz y vesículas analizadas.	66
Tabla 15 Resultados del conteo modal de las 6 muestras de roca extraídos a lo largo de la lava LF5.	71
Tabla 16 Resultados del conteo modal de las 4 muestras de roca extraídos a lo largo de la lava LF9.	74
Tabla 17 Resultado de la viscosidad relativa de la lava LF5, mediante los 4 modelos aplicados: Einstein, 1906; Einstein y Roscoe, 1952; Krieger y Dougherty, 1959; Costa et al., 2009. Para el modelo de Costa et al., 2009 se utilizó 4 valores de tasa de deformación del flujo según Caricchi et al., 2007.	85
Tabla 18 Resultados de la viscosidad fluida de la lava LF5, mediante el modelo de Giordano et al., 2008. El rango de temperatura varía desde los 737 a 775.5 °C	86
Tabla 19 Resultados de la viscosidad total de la lava LF5 mediante la combinación de los 4 modelo para la viscosidad relativa con el modelo de Giordano et al. (2008) para la viscosidad fluida. Se enfatizó en el resultado de la viscosidad total con el modelo de Costa et al. (2009)	88
Tabla 20 Resultados del límite elástico de la lava LF5 utilizando 3 modelos dependientes de la fracción cristalina: Ryerson et al. (1988); Mueller et al. (2010); Sehlke et al. (2014).	89
Tabla 21 Resultados de la viscosidad relativa de la lava LF9, mediante los 4 modelos aplicados: Einstein, 1906; Einstein y Roscoe, 1952; Krieger y Dougherty, 1959; Costa et al., 2009. Para el modelo de Costa et al., 2009 se utilizó 4 valores de tasa de deformación del flujo según Caricchi et al., 2007.	90
Tabla 22 Resultados de la viscosidad fluida de la lava LF9, mediante el modelo de Giordano et al., 2008. El rango de temperatura varía desde los 737 a 775.5 °C	91
Tabla 23 Resultados de la viscosidad total de la lava LF9 mediante la combinación de los 4 modelo para la viscosidad relativa con el modelo de Giordano et al., 2008 para la viscosidad fluida. Se enfatizó en el resultado de la viscosidad total de Costa et al. (2009)	92
Tabla 24 Resultados del límite elástico de la lava LF9 utilizando 3 modelos dependientes de la fracción cristalina: Ryerson et al. (1988); Mueller et al. (2010); Sehlke et al. (2014).	93

Tabla 25 Viscosidad relativa de una muestra significativa de cada fase eruptiva del volcán El Reventador desde el 2002 hasta la actualidad.....	95
Tabla 26 Viscosidad fluida en un rango de Temperatura de 737°C a 775.5°C, de cada fase eruptiva del volcán El Reventador desde el 2002 hasta la actualidad utilizando el cálculo de Giordano et al. (2008).....	96
Tabla 27 Resultados de la viscosidad total de cada fase eruptiva mediante el producto de los 4 modelo para la viscosidad relativa con el modelo de Giordano et al., 2008 para la viscosidad fluida.	97
Tabla 28 Resultados de límite elástico de cada fase eruptiva del volcán El Reventador utilizando los métodos de Ryerson et al. (1988); Mueller et al. (2010); Sehlke et al. (2014).....	98
Tabla 29: Parámetros reológicos resultantes en diferentes flujos de lava de volcanes del mundo	103

RESUMEN

El volcán El Reventador ubicado en la zona subandina de la Amazonía ecuatoriana actualmente representa uno de los tres volcanes con actividad eruptiva del continente del Ecuador. Ha generado diversos productos volcánicos desde su reactivación en el año 2002, tales como: columnas de gas o ceniza, flujos y domos de lava, lahares y corrientes de densidad piroclásticas. El presente trabajo se enfoca principalmente en el análisis de los flujos de lava emitidos por este volcán, que corresponden a la fecha 81 flujos ya emplazados y 1 en continuo avance, de composiciones entre andesitas basálticas y traquiandesitas. El proyecto se orientó en determinar el valor reológico de fluidos de composiciones más andesíticas, no newtonianos a lo largo de dos lavas LF5 y LF9 emitidas en 2005 y 2007 respectivamente, para comprender su dinamismo y heterogeneidad. Asimismo, la reología de las fases eruptivas utilizando una muestra representativa de las seis fases existentes (A, B, C, D, E, F), para observar su variación reológica en toda la actividad eruptiva del volcán. El cálculo de los parámetros reológicos correspondientes a la viscosidad y límite elástico se realizó mediante dos metodologías diferentes: en base a su morfología y en base a su composición. Para obtener la reología basada en la morfología, al flujo de lava se lo trató como un fluido newtoniano a Bingham donde se aplicó ecuaciones que permiten calcular la viscosidad y límite elástico del flujo de lava completo mediante las mediciones geométricas. Así también, se utilizó la cuantificación modal y geoquímica para el cálculo de los dos parámetros reológicos en base a su composición. Donde se empleó cuatro modelos diferentes dependientes de la fracción cristalina para obtener la viscosidad relativa (η_r) y un modelo dependiente de la composición química para el cálculo de viscosidad fluida (η_f). En un rango de temperatura de 737°C a 775.5°C perteneciente a la temperatura de fusión de LF5, obtenida de imágenes térmicas. El producto entre la viscosidad relativa y fluida genera la viscosidad total (η) de todo el flujo de lava. Para el límite elástico (τ) se aplicaron 3 métodos dependientes de la fracción cristalina. Los resultados reológicos de las muestras indican la existencia de una variación a lo largo del flujo, infiriendo que hay un valor ligeramente mayor a medida que la muestra está más cerca al frente de lava. Así también, analizando la reología a lo largo del tiempo, se observa la presencia de una leve evolución; a partir de la fase C los parámetros de la viscosidad aumentan progresivamente hasta la fase más actual (fase F). Se puede contrastar con el alcance de los flujos de lava en ese período, los cuales presentan un menor desplazamiento con respecto a las fases iniciales desde el año 2002. Se observó que el límite elástico aumenta a medida que se acerca al frente de lava y entre las fases eruptivas se caracteriza por altibajos.

KEYWORDS: reología, viscosidad, límite elástico.

ABSTRACT

El Reventador volcano located in the sub-Andean zone of the Ecuadorian Amazon currently represents one of the three volcanoes with eruptive activity on the continent of Ecuador. It has generated various volcanic products since its reactivation in 2002, such as: gas or ash columns, lava flows and domes, lahars and pyroclastic density currents. The present work focuses mainly on the analysis of the lava flows emitted by this volcano, which correspond to 81 flows already emplaced and 1 in continuous advance, of compositions between basaltic andesites and trachyandesites. The project focused on determining the rheological value of fluids with more andesitic compositions, not Newtonian along two lavas LF5 and LF9 emitted in 2005 and 2007 respectively, to understand their dynamism and heterogeneity. Also, the rheology of the eruptive phases using a representative sample of the six existing phases (A, B, C, D, E, F), to observe their rheological variation throughout the eruptive activity of the volcano. The calculation of the rheological parameters corresponding to the viscosity and yield strength was carried out using two different methodologies: based on its morphology and based on its composition. To obtain the rheology based on morphology, the lava flow was treated as a Newtonian fluid to Bingham where equations were applied that allow the calculation of the viscosity and yield strength of the complete lava flow through geometric measurements. Likewise, modal and geochemical quantification were used to calculate the two rheological parameters based on their composition. Where four different models dependent on the crystalline fraction were used to obtain the relative viscosity (η_r) and one model dependent on the chemical composition for the calculation of fluid viscosity (η_f). In a temperature range of 737°C to 775.5°C for LF5, obtained from thermal imaging. The product between the relative and fluid viscosity generates the total viscosity (η) of the entire lava flow. For the yield strength (τ) three methods depending on the crystalline fraction were applied. Rheological results from the samples indicate variation along the flow, inferring that there is a slightly higher value as the sample is closer to the lava front. Also, analyzing the rheology over time, the presence of a slight evolution is observed; from phase C the viscosity parameters increase progressively to the most current phase (phase F). It can be contrasted with the extent of lava flows in that period, which have a smaller displacement with respect to the initial phases since 2002. It was observed that the yield strength increases as it approaches the lava front and between eruptive phases is characterized by ups and downs.

KEYWORDS: rheology, viscosity, yield strength

GLOSARIO

1. **Domo exógeno:** domo que crece por la acumulación sucesiva de lava en su parte externa.
2. **Fenocristal:** cristal de gran tamaño, desarrollado como consecuencia de un enfriamiento lento del magma.
3. **Flujo de lava:** cuerpo de lava emplazado sobre una pendiente dinámicamente en un solo pulso.
4. **GRD:** siglas utilizadas para nombrar a la metodología de Giordano et al., 2008.
5. **Índice de Explosividad Volcánica (VEI siglas en inglés):** parámetro cuantificador de la intensidad de una erupción en función del depósito emitido y la altura alcanzada por la columna explosiva.
6. **Lecho:** parte generalmente situada en el fondo de los valles y en la que fluye una corriente de agua por efecto de la gravedad.
7. **Lóbulo:** porción de un flujo de lava desviada del cauce principal por la topografía o por el mismo flujo. Generalmente son ovalados en una sección perpendicular a la dirección del flujo.
8. **Máfico:** compuestos de minerales ricos en contenido de hierro y magnesio, densos, y habitualmente oscuros. Los más comunes representan el olivino y piroxeno.
9. **Shp:** abreviatura de Shapefile el cual, es un formato de archivo informático de datos espaciales desarrollado por ESRI.
10. **Subpliniana:** erupción moderada a grande y caracterizada por la formación de una columna eruptiva menor a ~20 km de altura, la que inyecta piroclastos a la atmósfera y se dispersa por el viento.
11. **TAS:** de Total Alkali Silica, es una clasificación que se utiliza para definir los nombres de una roca volcánica en función de la relación entre el contenido de álcali combinado y el contenido de sílice.
12. **Viscosidad:** medida de consistencia de una sustancia. Representa la expresión de la resistencia interna a fluir de una sustancia cuando se le aplica un estrés tangencial.
13. **Límite elástico:** también llamado límite de fluencia. Representa la cantidad mínima de esfuerzo que se aplica sobre una sustancia para que ésta comience a fluir.
14. **VolcFlow:** programa diseñado para modelar el comportamiento de productos volcánicos, basado en las características reológicas.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El Reventador (Fig. 1), un estrato volcán compuesto, de altura aproximada a 3560 msnm, corresponde a uno de los tres volcanes que actualmente se encuentra en erupción, junto con los volcanes Sangay y Cotopaxi en el Ecuador continental (IG-EPN, 2022). Geográficamente está situado en la zona subandina de la Amazonía ecuatoriana, entre la provincia de Napo y Sucumbíos, al este del volcán Cayambe y al norte de los volcanes Yanaurcu, Pan de Azúcar y Sumaco. El 3 de noviembre del 2002, después de casi tres décadas de inactividad, inició un nuevo proceso eruptivo, con una erupción subpliniana que alcanzó un Índice de Explosividad Volcánica (VEI, por sus siglas en inglés) de 4 (Hall et al., 2004). Posterior a ello, se estima que el volcán ha tenido al menos 6 fases eruptivas hasta la actualidad (Vallejo et al., 2016; Vallejo et al., in prep.), y un total de 16 erupciones históricas desde 1541.



Figura 1: Vista frontal del volcán El Reventador. Fotografía de Marín I. del 08 de octubre del 2022, tomada desde la base Azuela, ubicada en la parte norte del anfiteatro del volcán. Se observa un flujo de lava activo el cual presenta dos lóbulos (gris claro).

Los trabajos investigativos previos de este volcán indican relevancia en cuanto a su conocimiento científico, por la variabilidad de estilo eruptivo en base a la generación de

columnas de gas o ceniza (Hall et al., 2004; Chakraborti et al., 2006; Delpi et al., 2008), flujos y domos de lava, (Samaniego et al., 2008; Ramón y Vallejo, 2012; Naranjo, 2013; Vallejo et al., 2015, Vallejo et al., 2016; Vallejo y Kelfoun, 2016; Naranjo, 2016; Vallejo, 2017; Arnold et al., 2017; Vallejo et al., 2018; Arnold et al., 2019), lahares, avalanchas de escombros (Hall et al., 2004) y corrientes de densidad piroclástica (Vallejo, 2017), emitidos hasta la fecha. Donde denotan en su mayoría, que sus emisiones pueden representar una amenaza volcánica hacia los poblados e infraestructura aledaña, como el caso de las obras ingenieriles de transporte de crudo pesado (OCP y SOTE) situados en la zona local del volcán.

Enfatizando en los depósitos efusivos, lo largo de 20 años de actividad, el volcán ha generado 82 flujos de lava de tipo bloque, de composición correspondiente a andesitas basálticas y traquiandesitas en base a la clasificación de Peccerillo y Taylor (1976), constituidos mineralógicamente de fenocristales de plagioclasa, piroxenos, anfíboles y óxidos de magnesio (Naranjo, 2013; Estrella, 2021) y divididos en 6 fases eruptivas A, B, C, D, E y F (Vallejo y Kelfoun, 2016, Arnorld et al., 2019; Vallejo et al., in prep.). Según los reportes del IG-EPN, éstos conforman una cantidad mayor de flujos en comparación con los depósitos efusivos de otros volcanes del país.

El volcán ha generado al menos una erupción con un VEI moderado en su actual proceso eruptivo, y al continuar en actividad eruptiva, no se descarta la posibilidad de que se desarrolle una fase eruptiva más fuerte con la generación de flujos de lava más voluminosos. En las 6 fases del volcán, su alcance y composición han sido diferentes con niveles de actividad altos (Almeida et al., 2019; Vallejo et al., in prep.). A su vez, los reportes diarios del IG-EPN indican la presencia de 2 flujos de lava que se encuentran recientemente emplazados (IG-EPN, 2021) y uno en continuo avance (IG-EPN, 2022).

Actualmente los estudios e información acerca de la dinámica de estos flujos son limitados, por la variabilidad de composición en cada fase. Esto conlleva a una difícil estimación del comportamiento del flujo a futuro y da relevancia al desarrollo de un estudio reológico de los depósitos efusivos del volcán que ayudaría a entender la dinámica y evolución de los mismos. De tal manera que, si la información científica existente de los flujos de lavas (estudios geoquímicos, térmicos, etc.) desarrollada con el fin de conocer características profundas del depósito volcánico, se complementen con análisis reológicos (viscosidad y el límite elástico), se podría conocer la evolución y el comportamiento más preciso de los flujos de lava ya emplazados.

Existen pocos estudios sobre la dinámica de flujos de composición andesítica o similar, y en su mayoría se debe a que las condiciones de llegada que presentan son menos

susceptibles al acceso en campo y por ende, a un complejo monitoreo a lo largo de los mismos (Reyes Guzmán 2019). Por consiguiente, este análisis reológico aportará con nueva información de lavas andesíticas emplazadas y con ello, a la posible generación de simulaciones numéricas que indique el comportamiento de las erupciones futuras de El Reventador u otros volcanes de composición similar. Un estudio que por ahora no existe, pero si se lo realiza, ayudaría a entender de mejor manera la dinámica de los productos volcánicos que presenta El Reventador.

1.2. Justificación

Los fluidos trifásicos formados por la mezcla de gases, cristales y líquidos correspondientes a depósitos efusivos volcánicos se asemejan a los fluidos no newtonianos, también llamados complejos. Éstos alcanzan distancias variables dependiendo principalmente de sus propiedades reológicas como es el caso de la viscosidad (Carracedo y Pérez, 2015). Si la viscosidad es baja, el fluido, en este caso un flujo de lava, se desplaza grandes distancias y estaría propenso a alcanzar poblados e infraestructura aledaña. Por esto, es necesario comprender el comportamiento del flujo para así, analizar su evolución y poder anticipar posibles desastres (Gho, 2013). Uno de los estudios pioneros sobre flujos de lava es de Walker (1973) donde propone que la longitud de los flujos está controlada principalmente por la tasa de efusión. Luego, en Pinkerton y Wilson (1994) se infirió que su longitud, aparte de la tasa de efusión, está controlada por la pendiente, la reología y el enfriamiento. La reología corresponde a uno de los factores más importantes del cual depende el emplazamiento del flujo de lava, y está definida por el contenido de cristales y volátiles presentes, la composición de la fase fluida y su temperatura (Gho, 2013).

Hasta el momento, del presente volcán no existen estudios específicos sobre la reología de sus productos volcánicos y en especial de los flujos de lava. Para conocer las propiedades del flujo, únicamente se han realizado asunciones sobre el comportamiento en base al análisis morfológico de imágenes satelitales (Arnold et al., 2019), generando resultados no precisos, debido que, para estimar un flujo de lava realista a partir de las dimensiones del fluido se requiere comprender la reología del material en base a su composición (Arnold et al., 2019). Al desarrollar análisis de laboratorio, químicos y de lámina delgada para cuantificar la variación composicional y cristalina, parámetros importantes para entender la reología en las lavas, se puede generar datos que brinden un mejor conocimiento de la evolución de estos flujos emitidos desde la reactivación del 2002, con el fin de entender la dinámica a lo largo de su emplazamiento. La reología se puede calcular a partir de sus dimensiones morfológicas utilizando las ecuaciones de Jeffreys y Nichols (1939) y Hulme (1974) y mediante la

composición química, en conjunto con el contenido de cristales (Bottinga y Weill, 1972; Shaw, 1972; Urbain et al., 1982).

Para el estudio de la viscosidad en laboratorio se debe tomar en cuenta 2 criterios (Gho, 2013). (1) La fase líquida del flujo de lava para interpretar la viscosidad fluida o también llamada viscosidad dinámica (η_f), en base a los resultados previamente obtenidos de la temperatura y la composición química. Para la composición química se toma en cuenta los análisis geoquímicos de elementos mayores y a su vez, la temperatura del vidrio de la muestra. (2) La sección sólida de las lavas para el cálculo de la viscosidad relativa (η_r) el cual, depende de la concentración de cristales presentes en la muestra, del empaquetamiento máximo cristalino respectivo y del contenido de burbujas. Esto se obtiene mediante el conteo modal en lámina delgada para conocer exactamente los componentes de la muestra (Castruccio et al., 2013).

El límite elástico, mínimo esfuerzo necesario para generar deformación en el flujo (Hulme, 1974) es el factor principal que determinaría las dimensiones del flujo. Éste depende únicamente de la fracción cristalina, el empaquetamiento máximo y en algunas ocasiones la variación de temperatura. Con estos valores en conjunto con los datos morfológicos, se podrá definir la reología de cada flujo de lava (Castruccio et al., 2013).

Mediante los resultados de análisis de laboratorio y morfológicos se calculará la reología para cada fase eruptiva de los flujos emplazados. Además, se analizará la evolución y dinámica que se presentaron en las erupciones anteriormente. Para comprobar la validez de los modelos teóricos utilizados, se comparará los resultados obtenidos mediante los datos publicados bibliográficamente y los simulados, sobre el avance de los flujos y sus condiciones eruptivas (Castruccio et al., 2013).

Con el desarrollo de este proyecto, se espera aportar nuevo conocimiento sobre el comportamiento de los flujos de lava de composición andesítica basáltica a traquiandesita, emitidos desde el 2002 en las diferentes fases de este volcán. Esto se obtendrá en base al muestreo de campo a lo largo de flujos de lava y de las muestras tomadas previamente por el personal del IG-EPN. Así también, el trabajo tiene la finalidad de contribuir con la información reológica de los datos de entrada para la simulación numérica con el código "VolcFlow", un modelo que toma en cuenta la variación reológica a lo largo de su emplazamiento. El cual, será implementado en PIM-20-01, proyecto que busca la optimización de simulación con VolcFlow para la estimación de parámetros y modelización computacional de flujos de lava de volcanes ecuatorianos. Las simulaciones generadas ayudarán a encontrar el mejor modelo reológico para reproducir flujos de lava de El Reventador y presentar información realista para los mapas de amenazas (Vallejo y Kelfoun, 2016).

1.3. Descripción del Área de estudio

1.3.1. Ubicación del volcán El Reventador

El volcán El Reventador se sitúa en el límite superior de la Provincia de Napo y límite inferior de la provincia de Sucumbios, cantón El Chaco. en la parte alta de la Reserva Cayambe-Coca, aproximadamente a 90 km al este de la ciudad de Quito y a 53 km al noreste de Baeza (Fig. 2a, b).

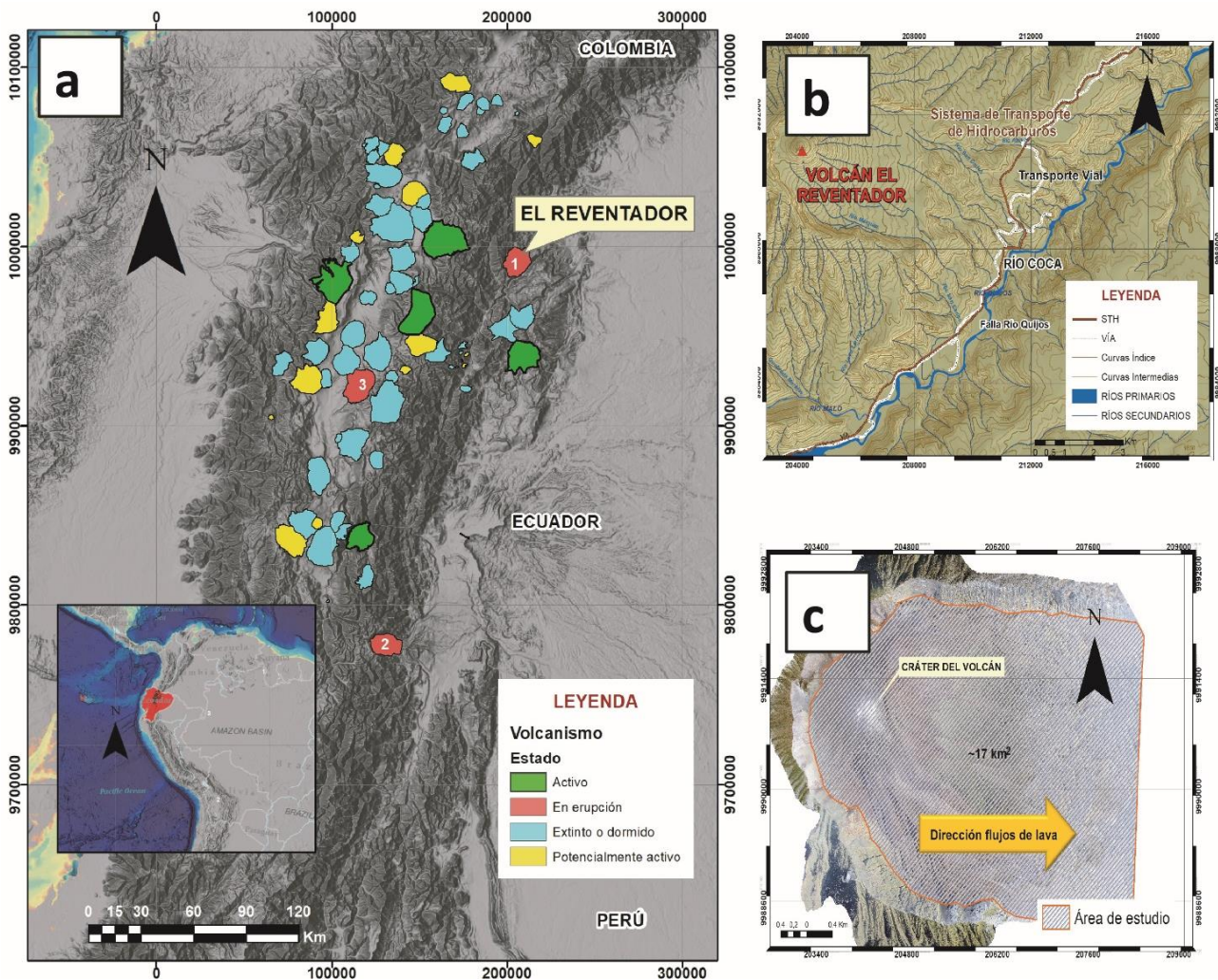


Figura 2: Mapa de ubicación del volcán El Reventador. a) Mapa de actividad de los volcanes del continente del Ecuador (Dic-2022) en UTM WGS84 18 S. Los polígonos rojos Reventador (1), Sangay (2) y Cotopaxi (3) actualmente se encuentran en etapa de erupción. Basemap obtenido de National Center for Environmental Information b) Localización regional del volcán El Reventador. c) Cono de anfiteatro del volcán El Reventador con un área de ~17Km². La Ortofoto en UTM realizado por Diefenbach en el 2013, indica el área de estudio, donde se localizan los flujos de lava, señalando el cráter del volcán.

El Reventador es parte de una fila de volcanes junto con Pan de Azúcar, Sumaco y los Conos de Puyo en la región Amazónica del Ecuador (Fig. 2a) y está localizado sobre los ríos: Reventador, Marker, Quijos, San Carlos y Coca. Geológicamente se encuentra ubicado en la

parte norte de la formación Mesozoica Napo en el levantamiento Sub-andino ecuatoriano (zona de arco posterior) (Ridolfi et al, 2008) y a corta distancia de la franja de cabalgamientos de la Cordillera Real (INECEL, 1988). Su cono actual, se localiza en las coordenadas X: [204000] m Y: [9991000000] m sistema UTM WGS84 zona 18 Sur, dentro de un anfiteatro, con una elevación de 3560 msnm (Fig. 2c) (Aguilera et al., 1988).

En el área, aledaña al volcán, se sitúan infraestructuras económicamente importantes, las cuales son: el Oleoducto de Crudos Pesados (OCP), el cual, ha transportado aproximadamente 950 millones de barriles de petróleo en el país (OCP Ecuador, 2020); el Sistema de Oleoducto Trans-Ecuatoriano (SOTE), con un aproximado de 5000 millones de barriles de crudo hasta el año 2018 (Petro Ecuador, 2018); la Represa de la Central Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair, que aprovecha el potencial del río Coca para transformar la energía potencial del río a energía eléctrica. Adicionalmente, el volcán está rodeado de más de 6 caseríos (Schuster, 2004), correspondientes a los más cercanos, los cuales, han recibido depósitos piroclásticos de El Reventador a lo largo de su actividad.

El trabajo de investigación se limita al cono de anfiteatro del volcán con apertura hacia el este de aproximadamente 17 km² (Fig. 2c), donde se localizan los flujos de lava que han sido emitidos desde el 2002 hasta la actualidad.

1.3.1.1. Acceso a la zona de estudio

Para llegar desde Quito al área de los depósitos efusivos del volcán el Reventador, se viaja en dirección Noreste, ascendiendo desde el Valle Interandino hasta la Cordillera Real y posteriormente el descenso a la Zona Subandina del Ecuador, pasando por el lago Papallacta y el río Quijos. La primera parada corresponde en la Hostería el Reventador, lugar donde se prepara el equipamiento necesario para el ascenso a la base del volcán. Existen 2 caminos para entrar al área de depósitos, por el sureste y por el noreste. Si se toma el camino del sureste, la ruta comienza desde la Hostería, donde se llega a la base denominada "Lava 4" en un tiempo de 4-5 horas. Para el acceso a los flujos del norte, se toma la ruta hacia el noreste, donde primero se debe llegar a la carretera Teniente Hugo Ortiz y realizar un ascenso a la base norte denominada "Azuela" en un tiempo de aproximadamente 4 horas.

Para la realización de este proyecto fue necesario tomar la ruta del noreste, para contar con las muestras a lo largo del flujo LF9, ubicados al norte del volcán. Donde, primero se llega a la base de Azuela (Fig. 3) en las coordenadas x: [210478,3] m y: [9991806,6] m WGS 84 /18S. Desde ese punto se continua el track (ruta) con el GPS, donde se pasa por vegetación abrupta 1 hora, se camina por el lecho seco del río hasta el cierre del camino por la vegetación. Se cruza otro tramo de vegetación abrupta y se camina sobre el leve sur del flujo

de lava LF9. Es importante mencionar que este track es posible solo si se tiene precipitaciones bajas a nulas (Fig. 3), debido a que, al cruzar el río, éste tiende a llenarse cuando precipita en la zona y es imposible cruzar.



Figura 3: Track utilizado en el GPS para la salida de campo a los flujos de lava del flanco Norte de El Reventador. Desde la carretera Teniente Hugo Ortiz hasta el frente de la lava LF82. El círculo rojo representa el punto base de Azuela. Mapa desarrollado en la aplicación GPX Viewer en el año 2022.

1.3.2. Clima

El volcán se encuentra asentado en la región Sub-Andina del Ecuador, la cual presenta pendientes escarpadas y un clima en base a la clasificación de Köppen categorizado como “Af-Tropical húmedo con ausencia de época seca” (Lozano et al, 2020), las temperaturas oscilan entre los 7,12° y los 15,32°C (Torres et al., 2018) al sur del volcán (Fig. 4a). Según el informe “Economía de los Ecosistemas y la Biodiversidad-Cuenca del Río Coca (Amazonia Ecuatoriana)”, el cual, representa el estudio del clima más cercano realizado en la zona local de El Reventador, por su localización en la cordillera, el área presenta abundantes precipitaciones con promedios mensuales de 450 mm en la base y máximos de hasta 600 mm

en las cercanías del volcán (Torres et al., 2018) (Fig 4b). Los mapas de isoyetas e isotermas indican la sección sur del volcán, asumiendo que es equivalente en todo su edificio volcánico. La vegetación dominante natural del volcán corresponde a un bosque siempreverde montano del Norte de la Cordillera Oriental de los Andes entre los 2000 – 2900 msnm (MAE, 2013; Lozano et al, 2020).

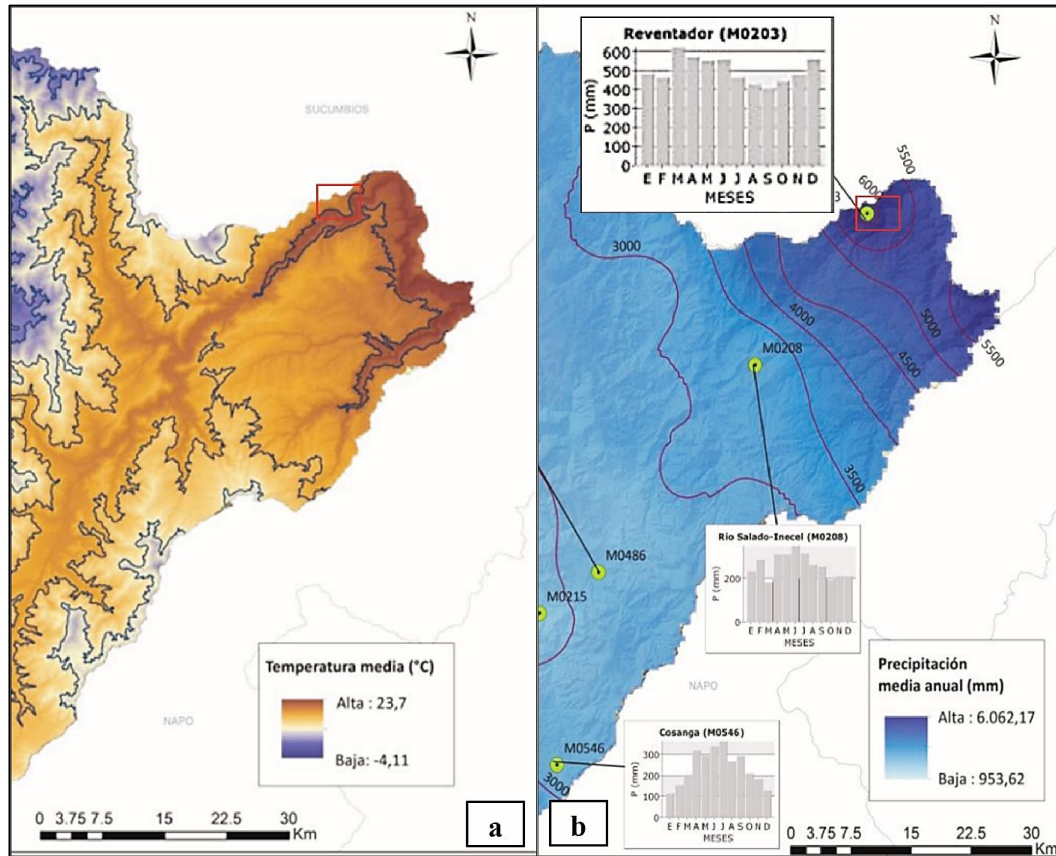


Figura 4: Mapas del clima de la zona del volcán El Reventador. *a) Mapa de isotermas de la zona amazónica del Ecuador. Recuadro rojo indica la ubicación del volcán, señalando que su temperatura se encuentra entre la más alta del sector. b) Mapa de isoyetas media anual de la zona amazónica del Ecuador. Recuadro rojo indica la zona del volcán, señalando que presenta precipitaciones hasta de 600 mm anuales. Recuperado y modificado de Torres et al. (2018).*

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Caracterizar la reología de los flujos de lava andesíticos del volcán El Reventador en sus diferentes fases eruptivas desde el 2002 hasta el 2018.

1.4.2. Objetivos específicos

- i Determinar la evolución reológica de los flujos de lava LF5 y LF9 correspondientes a las Fases eruptivas B y C respectivamente, basados en las muestras colectadas a lo largo de cada flujo.
- ii Inferir el comportamiento reológico de lavas representativas de cada fase eruptiva desde la reactivación del volcán El Reventador.

1.5. Alcance

El presente proyecto tiene como finalidad obtener la reología de lavas emplazadas significativas de cada fase eruptiva del volcán El Reventador desde la reactivación del 2002 hasta la actualidad. Así también, analizar la evolución de los flujos LF5 y LF9 para entender su dinámica a lo largo del tiempo.

El proyecto será factible mediante la realización de los siguientes puntos:

- ✚ Obtención de la viscosidad, límite elástico, velocidad y difusividad térmica de cada fase eruptiva, en base a las propiedades morfológicas. Esto se logra a partir de la medición del ancho, longitud y espesor los polígonos de las lavas sobre un Modelo de Elevación Digital (DEM) de la zona y consiguientemente los cálculos requeridos para cada parámetro.
- ✚ Caracterización petrográfica y geoquímica de las lavas de El Reventador desde el 2002 hasta la actualidad. Para ello, es necesario la recolección de muestras a lo largo de los flujos LF9 y LF5, en conjunto con las proporcionadas por el IG-EPN.
- ✚ Análisis del comportamiento reológico de cada muestra recolectada de los flujos LF5 y LF9, así también, de las muestras obtenidas de cada fase eruptiva del volcán, mediante los cálculos realizados en base a los análisis geoquímicos, y de conteo modal de los cristales obtenidos previamente.
- ✚ Interpretación de resultados y comparación en base a cálculos reológicos desarrollados por otros autores en volcanes andesíticos.

1.6. Trabajos anteriores

Por su actividad volcánica y su diversidad de depósitos, actualmente El Reventador es uno de los volcanes más estudiados, con el fin, de entender a fondo su comportamiento eruptivo y así prevenir posibles desastres a futuro. El Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IG- EPN) es el encargado del monitoreo constante de este volcán, y en base a eso, obtiene información sísmica, térmica y geoquímica del mismo a través de una red de monitoreo. Por ello, la mayor parte de información actual referente al volcán diario y anual es proporcionada a través de la página web www.igepon.edu.ec y de artículos científicos de la misma institución.

Actualmente, algunos de los flujos de lava emitidos desde el 2002 tienen información petrográfica, geoquímica, morfológica (ej. Naranjo et al., 2016; Vallejo et al., 2018; Arnold et al., 2019) sin embargo, escasa información reológica. De esta manera en este proyecto se profundizará en la reología de los flujos de lava, enfatizando en la información de los siguientes autores:

Ramírez Uribe (2020). Tiempos de emplazamiento en flujos de lava: casos de estudio de los volcanes Rancho Seco (Michoacán) y Popocatepetl (Puebla). Este trabajo busca aprovechar los datos de elevación topográfica de alta resolución vertidos en imágenes LiDAR con el fin de estimar las viscosidades y tiempos de emplazamiento de lavas por un método de análisis morfológico y cotejarlos con resultados obtenidos por un método petrológico basado en las características químicas y mineralógicas de las lavas y estimaciones de sus temperaturas, contenidos de agua disuelta, porcentaje de cristales, etc.

Arnold et al. (2019). Mediante el uso de radar y satélites ópticos se mapeó el emplazamiento del flujo de lava en El Reventador entre 2012 y 2016. Con ello, tener conocimiento de la morfología de los flujos correspondientes a ese periodo.

Vallejo Vargas (2017). Generación de modelos numéricos de flujos volcánicos para una estimación y delimitación de peligros volcánicos del Volcán Reventador (Ecuador). En base a la información de volumen, tiempo de derrame, velocidad, espesor, morfología, duración, distribución, composición química y medidas de temperatura superficial, lograr simular los diferentes flujos. Y con ello, proponer escenarios de diferentes casos para la simulación de flujos de lava utilizando diferentes reologías con 3 enfoques mediante el uso del código Volcflow.

Naranjo (2016). Mapeo y medición de volúmenes de lava del 2002 a 2009 en el volcán El Reventador, a partir de mediciones de campo y teledetección satelital. En el que se infiere que el radar satelital brinda una medición más precisa del volumen de flujo. Y por lo tanto los mapas derivados por radar son útiles para evaluar la precisión de los métodos planimétricos

de frecuencia temporal más alta empleados durante una erupción, y brindan información adicional precisa sobre el espesor de la lava y la deformación del campo de flujo.

Naranjo (2013). Estudio petro-geoquímico y cronológico de los flujos de lava emitidos por el volcán Reventador entre el 2002 a 2009. Este trabajo describe la actividad eruptiva durante el periodo 2002 -2009. La cronología, a través de varios parámetros de monitoreo volcánico.

Chevrel et al. (2013). Reología del flujo de la lava basáltica terrestre de la Zona Volcánica Occidental en Islandia: una comparación de métodos morfológicos y petrológicos. Es un trabajo que tiene como objetivo restringir un modelo detallado de la reología transitoria en función del enfriamiento, la cristalización y la evolución de la composición de la masa fundida residual durante el emplazamiento. En base a su metodología, se realizará el presente trabajo.

Samaniego et al. (2008). Condiciones físicas pre-eruptivas del volcán El Reventador (Ecuador) inferidas de la petrología de las erupciones de 2002 y 2004-05. Donde se sintetizó un modelo dinámico del sistema magmático El Reventador basado en datos petrológicos.

CAPÍTULO II

2. MARCO GEOLÓGICO

El presente capítulo hace referencia al volcanismo andino del Ecuador, la geología y morfología en la ubicación del volcán y los principales depósitos efusivos emitidos por El Reventador desde el 2002 hasta la actualidad, dividiendo el capítulo en 3 secciones importantes.

2.1. Volcanismo Plio-Cuaternario de los Andes del Ecuador

La Cordillera de los Andes es una cadena morfológicamente continua de más de 7000 km de largo, ubicada en el margen pacífico de América del Sur (Barberi et al., 1988). Representan un tipo de orógeno no colisional resultado de la subducción de la placa oceánica bajo la placa continental Sudamericana y asociado a la apertura del Océano Atlántico Sur (Stern, 2004). Actualmente se divide en 3 secciones importantes: (1) Andes del Norte (también llamado Bloque Norandino) (12°N - 5°S) entre Colombia y Ecuador con una tendencia °NE-°SW, (Alemán y Ramos, 2000); (2) Andes Centrales (5-33°S) incluyen, norte y sur de la curva de Arica, con tendencia °NW-°SW; (3) Andes del Sur (33-56°S) constituido sobre una corteza ensiálica paleozoica, dominada actualmente por un acortamiento casi orógeno-ortogonal (Hervé et al., 2000).

El volcanismo de los Andes ocurre en cuatro regiones, Zonas Volcánicas: Norte (NVZ), Central (CVZ), Sur (SVZ) y Austral (AVZ) (Fig. 5). Cada una se subdivide en tramos de arco volcánico más pequeños que reflejan la segmentación geológica y tectónica de la Cordillera de los Andes (Stern, 2004).

El margen continental ecuatoriano representa un segmento del volcanismo Norte NVZ (Baby et al., 2004) que ha estado activo desde finales del Jurásico Medio (Spikings et al, 2000). Una de las características de esta zona volcánica es la gran cantidad de centros volcánicos Cuaternarios que posee (Samaniego et al, 2019), siendo el producto de hace 12–20 Ma, empezando con la subducción oblicua de la placa de Nazca debajo de la Sudamericana a una tasa promedio de 58 mm/año (Hidalgo et al., 2012; Siravo et al., 2021) en dirección N83E (Nocquet et al., 2014), incluyendo también la cresta asísmica de Carnegie y la zona de fractura de Grijalva (Samaniego et al., 2019).

Los volcanes de la NVZ en el Ecuador están distribuidos en cinturones que se extienden de norte a sur a lo largo de todo el país en dos cadenas montañosas, la Cordillera Occidental, y Cordillera Real, así también irregularmente a lo largo del Valle Interandino, con un ancho promedio de unos 80 km (Barberi et al., 1988), y en el levantamiento Subandino (Llambías et al., 2010).



Figura 5: Entorno tectónico de los Andes, se localiza las 4 zonas volcánicas: NVZ (Zona Volcánica Norte); CVZ (Zona Volcánica Central); SVZ (Zona Volcánica Sur); AVZ (Zona Volcánica Austral). Modificado de Llambías et al. (2010).

En base al conocimiento de la actividad más reciente, se han identificado 76 centros volcánicos (Fig. 6), 52 de ellos están extintos o dormidos, 23 son activos y 3 de ellos están actualmente en erupción hasta abril 2023 (El Reventador, Sangay y Cotopaxi) (Ramón et al., 2021, Página web IG-EPN). La actividad se caracteriza por la formación de un gran número de estratovolcanes, formando los picos más altos de los Andes del norte. Como ejemplo, algunos de los edificios más occidentales son Quilotoa, Guagua Pichincha, Almas Santas y Pilavo; en el borde oriental de la Depresión Interandina, Cotopaxi; en la Cordillera Real, Antisana, Tungurahua, Sangay y en la zona Sub-andina, Reventador y Sumaco (Ramón et al., 2021; Pagina web IG-EPN) (Fig.6).

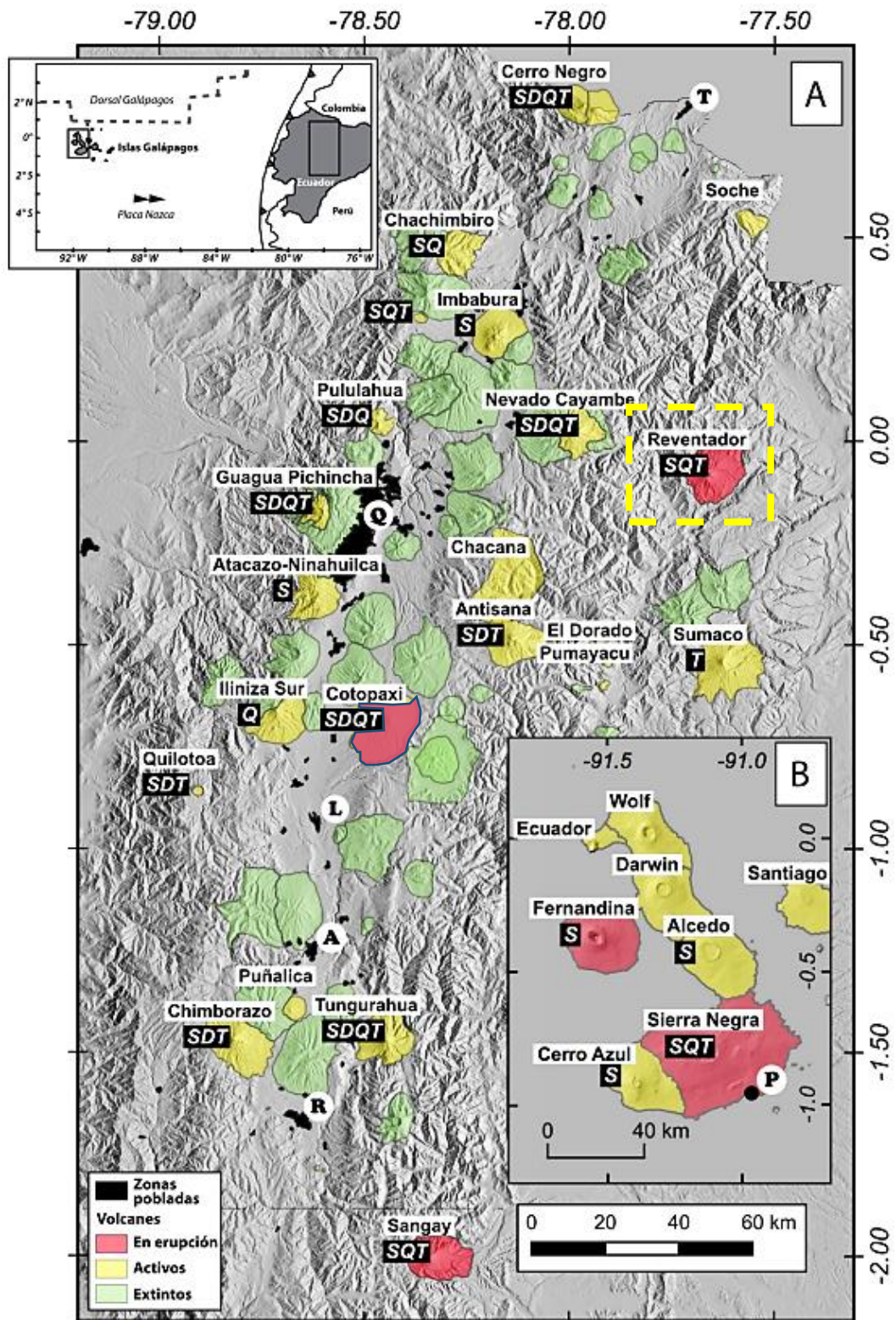


Figura 6: Mapa de distribución de los volcanes y su actividad eruptiva del Ecuador. Recuadro amarillo representa el volcán El Reventador. A) volcanes situados en el continente, y B) volcanes situados en las Islas Galápagos. Modificado de Ramón et al. (2021)

A continuación, se presenta una breve descripción del volcanismo en cada región continental del Ecuador.

2.1.1. Volcanismo de la Cordillera Occidental

La Cordillera Occidental corresponde al frente volcánico del Ecuador. Se asienta sobre el basamento del Cretácico Superior y está compuesto por sedimentos, rocas máficas y ultramáficas posiblemente derivado del Plateau oceánico (Jaillard et al., 2004) (Fig. 7). La actividad de esta sección está ejemplificada por las erupciones del: Quilotoa de 800 14C año AP, Pululahua y Ninahuilca de 2300–2400 14C año AP, y las de Cuicocha de 2900–3000 14C año AP (Hall et al., 2008).

La actividad del Pleistoceno tardío y del Holoceno de los centros eruptivos son en su mayoría de composición andesítica a dacítica, siguiendo una fase de estratovolcanes con edificios de ~10 a 20 km de ancho principalmente de andesitas con bajo contenido de sílice (Hall et al., 2008). Morfológicamente, la mayoría de los centros representan conos compuestos, contruidos por ventos y migración de conductos (Hall et al., 2008).

2.1.2. Volcanismo de la Cordillera Oriental

Los centros volcánicos de la Cordillera Oriental se encuentran subyacidos principalmente por rocas metamórficas Paleozoicas y Mesozoicas (Aspden y Litherland, 1992) y volcanes del Terciario Tardío, que representan estratovolcanes andesíticos de 15 a 20 km de ancho y de 5700 a 5900 m de alto. A diferencia de los de la Cordillera Occidental, estos volcanes se caracterizan por numerosos flujos de lava andesíticos situados en sus flancos inferiores. Los flujos piroclásticos con frecuencia generaban grandes flujos de escombros y hasta la fecha los depósitos de la erupción del Cotopaxi de 1877 aún se conservan (Mothes et al., 2004). Estos volcanes han sido sistemáticamente más activos durante el Holoceno que los de la Cordillera Occidental. Los volcanes Cotopaxi y Tungurahua han tenido erupciones periódicas a intervalos de 100 ± 50 años, mientras que Cayambe y Antisana tienen erupciones menos frecuentes; Sangay ha tenido varias erupciones durante el mismo intervalo (Hall et al., 2008; IG-EPN, 2022).

2.1.3. Volcanismo del Valle interandino

Las edades radiométricas de sus depósitos indican una historia volcánica similar a la de la Cordillera Occidental (Barberi et al., 1988). Existen 12 centros volcánicos posicionados irregularmente a lo largo del eje del Valle de composición andesítica. Cerca de Quito se encuentran tres centros (Ilaló, Pasochoa y Rumiñahui), del Pleistoceno Medio. Cerca de Otavalo se han agrupado en forma de curva axial volcanes como Cusín, Mojanda-Fuya Fuya e Imbabura) (Hall et al., 2008; Ramón et al., 2021). La mayoría son grandes estratovolcanes de 10 a 20 km de ancho con elevaciones de 3800 a 4700 m; tienden a tener calderas remanentes con domos de lava, y la mayoría están extintos. Imbabura ha mostrado evidencia de actividad eruptiva del Holoceno, y se han identificado depósitos de flujo de ceniza y avalancha de escombros con edades del Pleistoceno tardío. Representan un volcanismo andesítico anterior que aparentemente migró hacia la Cordillera Oriental, consecuente de una posible zona de subducción menos inclinada debido a la subducción de Carnegie Ridge.

2.1.4. Volcanismo del Tras arco

Las principales rocas del Tras arco son basanitas y tefritas (42-53% SiO₂; 1-5% K₂O). Corresponde a un pequeño grupo de volcanes alcalinos situados en el lado amazónico de la Cordillera Oriental, al este del volcán Antisana, con altura entre 2000 a 4000 msnm, han sido erosionados por las intensas lluvias (Hall et al., 2008). El volcán Sumaco experimentó al menos seis pulsos eruptivos separados durante los últimos siglos y, puede considerarse potencialmente activo (Salgado Loza et al., 2021). Cerca de Puyo, al este del volcán Tungurahua, afloran remanentes de conos de escoria muy erosionados de afinidad alcalina del Pleistoceno Medio (Hoffer et al., 2008).

2.2. Geología y morfología del volcán El Reventador

Por estar en una zona geológicamente compleja de los Andes, está sujeto a varios movimientos compresivos y representa uno de los volcanes más activos de la Zona Volcánica Andina Norte (NVZ) (Hall et al., 2004). Estos movimientos han generado estructuras geológicas, como la falla de río Quijos que atraviesa la zona volcánica de El Reventador. Así también, el volcán está construido sobre una corteza continental de 50 km de espesor en un cinturón compresivo de altitud relativamente baja (Barberi et al., 1988, Guillier et al., 2001). La tectónica del Cuaternario Tardío alrededor del volcán se caracteriza por fallas laterales

inversas distribuidas de N-S y fallas strike slipe laterales derechas en dirección N-NE (Tibaldi et al., 2005).

La información morfológica del volcán se encuentra detallada en el documento publicado en 1988 del Proyecto Hidroeléctrico Coca (INECEL, 1988), donde se describe 3 edificios volcánicos formados en El Reventador a lo largo de su actividad (Fig. 7). Sin embargo, hasta la fecha no existe otro estudio como éste, que respalde o aumente los datos morfológicos. Por ello, en esta sección se tomará énfasis al trabajo de INECEL (1988), en conjunto con la información geológica reciente del volcán.

El complejo volcánico de El Reventador está constituido por una secuencia de productos efusivos (flujos de lavas) y explosivos (avalanchas de escombros y flujos piroclásticos) (Baby et al., 2004). Se han distinguido tres grandes unidades correspondientes a edificios volcánicos que representan las principales etapas de evolución del complejo volcánico El Reventador (Fig.7) (INECEL,1988): 1) El complejo volcánico Basal CVB (edad K/Ar de 348 ka); 2) Volcán Paleoreventador (VPR) y 3) Volcán El Reventador, cono actual (VER) (Fig.7, 8).



Figura 7: Edificios volcánicos del volcán El Reventador. Se observa las crestas de Basal Reventador, Paleo Reventador y el nuevo estratocono. Recuperado de Estrella (2021), modificado de Almeida et al. (2019)

2.2.1. El complejo volcánico Basal (CVB)

Aflora en la parte occidental y septentrional del cono activo. Al este se encuentra limitado por 3 fallas arqueadas en dirección N-S y litológicamente está constituido por: ignimbritas, situadas en la parte basal de la secuencia; lavas; e intercalaciones de brechas volcánicas

primarias y retrabajadas. Al SE del cono actual se encuentra el Cerro Copete que representa una masa lávica compacta de composición andesítica, menos evolucionada en comparación a los otros domos antiguos (Mirador y Líder). Una importante porción de este edificio está instalada como un potente depósito de avalancha de escombros constituida por bloques de tamaño variable con un buen grado de redondez en el sector oriental y central, de aproximadamente 20 km³ (INECEL, 1988), la cual representa una paleosuperficie sobre sedimentos cretácicos (Fig. 8a).

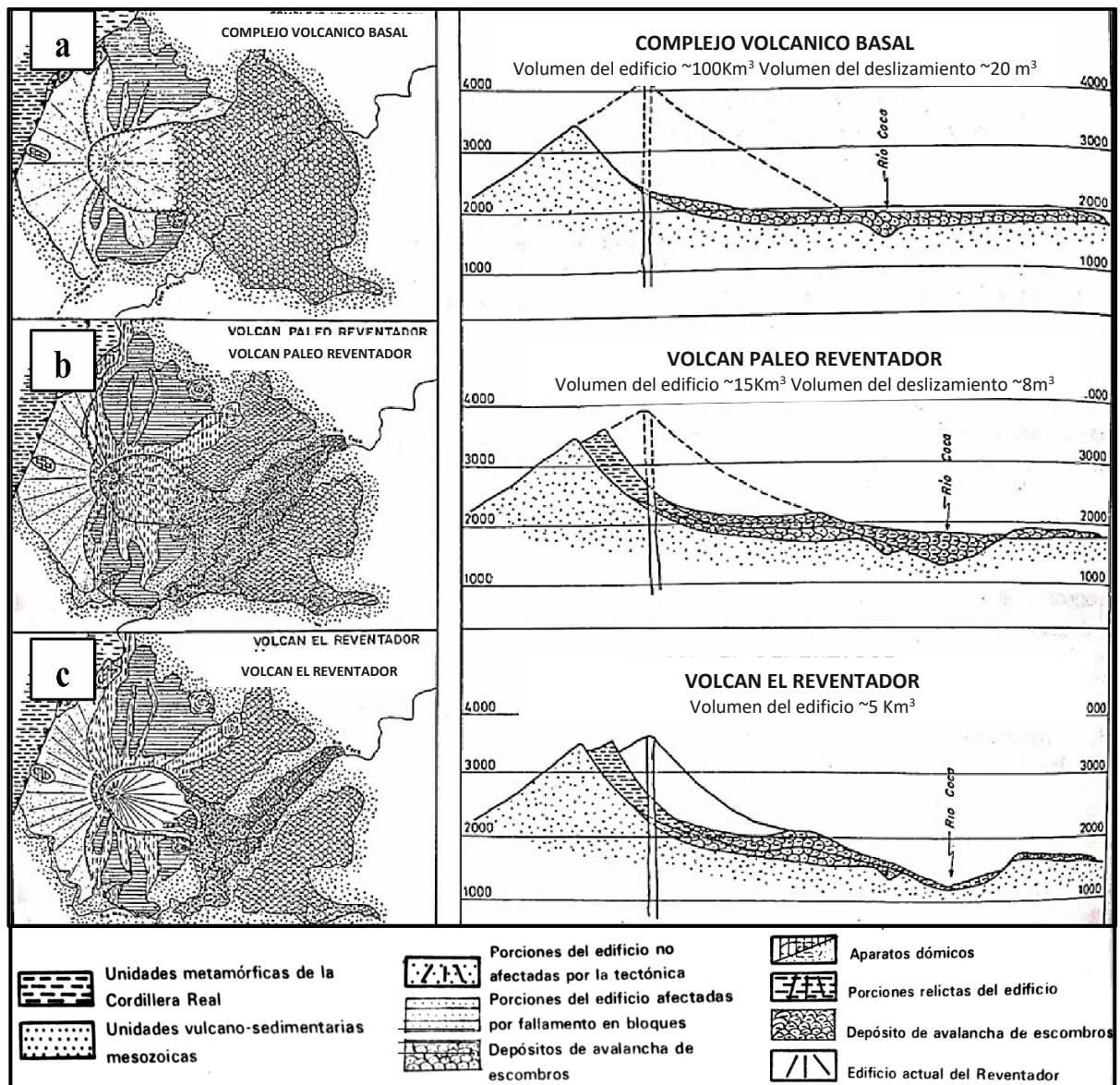


Figura 8: Esquema de las tres etapas de evolución del complejo volcánico El Reventador. a) El complejo volcánico Basal CVB. b) Volcán Paleo Reventador (VPR). c) Volcán El Reventador, como actual (VER).

Recuperado de INECEL (1988).

2.2.2. Volcán Paleoreventador (PR)

Está conformado por una secuencia mixta de productos explosivos y efusivos cuyo cono se situaba cerca del cono actual. Constituye un estrato volcán asimétrico y alargado en dirección N-S y NE-SW (INECEL, 1988). Composicionalmente la base es básica; hacia las partes más altas afloran productos con una composición variable entre andesitas basálticas y andesitas, intercaladas con niveles piroclásticos. La secuencia más importante de los productos explosivos se encuentra al occidente del anfiteatro, el cual, se divide en 2 fases: la primera representa depósitos de caída con pequeños fragmentos de pómez y lapilli de color blanquecino. La segunda se caracteriza por un potente depósito completamente de pómez de tipo pliniano con gradación (Fig. 8b).

Entre los productos está una masa lávica en forma de domo (domo Cuchilla) al borde occidental del anfiteatro de composición andesítica ácida. El edificio se destruyó por colapso y deslizamiento en masa, siendo su principal causa la inestabilidad provocada por la erosión del río Coca. La parte terminal del anfiteatro se caracteriza por depósitos de avalancha obstruyendo en parte la depresión en la cual se ha levantado el cono actual (INECEL, 1988).

2.2.3. Volcán El Reventador, cono actual (VER)

El cono actual se ha formado por actividad moderadamente explosiva estromboliana, posee una altura de 3562 m y un volumen estimado de 5 km³ (INECEL, 1988). En la cima se encuentra dos cráteres de los cuales, permanece activo el más oriental. Considerando que la morfología de la cumbre es muy variable, hasta el 2004 se presentaba valores de diámetro de 100 m y profundidad de 40 m con varios cráteres de explosión freática (Hall, 2004) (Fig.8c).

Antes de la erupción de 2002, la altura del cono era de 3560 m, un cráter alargado, de aproximadamente 200 m de largo, con una actividad fumarólica leve pero persistente durante los últimos 26 años (Hall, 2004). La gran explosión del 03 de noviembre del 2002 destruyó la parte superior del cono dejando un nuevo cráter mucho más grande que el original, de unos 100 m de profundidad y unos 200 m de ancho, la cumbre del cono perdió unos 100 m de altitud (Fig. 9a). Posteriormente el volcán ha presentado varios períodos de actividad efusiva en los últimos años. Esta actividad ha producido además el relleno paulatino del cráter dejado por la erupción de 2002 y la formación de un nuevo cono o domo de lavas. Desde el año 2010 la actividad ha sido más explosiva, en la que continuó creciendo el cono interno. A partir de marzo de 2011 se observó la aparición de un domo de lava al interior del cráter interno y cuyo crecimiento se mantiene hasta el momento (Tríptico El Reventador, IGEPN). Desde 2002, el cráter se ha ido relleno paulatinamente, haciendo que la morfología de su cráter permita

cada vez más la distribución de flujos de lava a casi todos los flancos del volcán (Vallejo, 2017; Arnold et al., 2019).

Uno de los aspectos de la actividad reciente en El Reventador es la configuración de ventos eruptivos activos. El trabajo realizado por Almeida et al. (2019) confirma la presencia de dos ventos, llamados viento norte (NV) y viento sur (SV) (Fig. 9b, c).

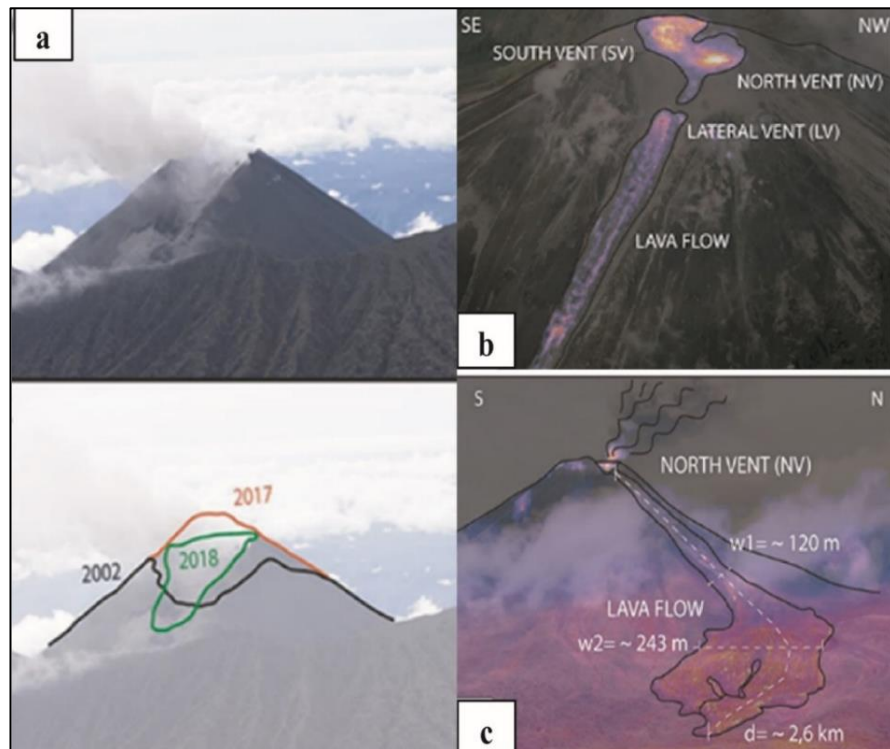


Figura 9: Cráter después de la reactivación del 2002. a) Morfología del cráter del volcán en el 2002 (negro), 2017 (rojo) y 2018 (verde). b) Vista superior del volcán donde señalan los ventos Norte y Sur separados y el flujo de lava que se extruye desde el viento Norte el 28 de enero de 2016. c) Vista lateral de los ventos del volcán. Recuperado de Almeida et al. (2019).

La actividad en el viento Sur fue predominantemente explosiva, mientras que el viento Norte fue principalmente efusiva (Almeida et al., 2019). Se cree que los ventos son independientes, sin embargo, se han desarrollado explosiones simultáneamente en ambos ventos por lo que se sugiere que, en algún nivel del conducto, el sistema de alimentación de los 2 ventos está conectado, pero también pueden comportarse de forma independiente (Almeida et al., 2019).

2.3. Fases eruptivas

Los flujos de lava de El Reventador son de tipo bloque de composición andesita basáltica a traquiandesita, con concentraciones de SiO_2 entre 53% y 63% medidos para depósitos

emitidos entre 2002 y 2018 (Fig. 10) (Baby et al., 2004; Samaniego et al., 2008; Naranjo, 2013; Estrella, 2021). Las lavas solidificadas de 2002 a 2018 tienen texturas porfíricas, entre 20% y 35% de fenocristales por volumen, en su mayoría plagioclasa, ortopiroxeno y clinopiroxeno con menor cantidad de anfíboles, olivinos y óxidos de Fe (Naranjo, 2013; Estrella, 2021). Las muestras de lava también contienen entre 10% y 40% de vesículas por volumen, con una vesicularidad promedio de aproximadamente 20% (Naranjo, 2013; Estrella, 2021).

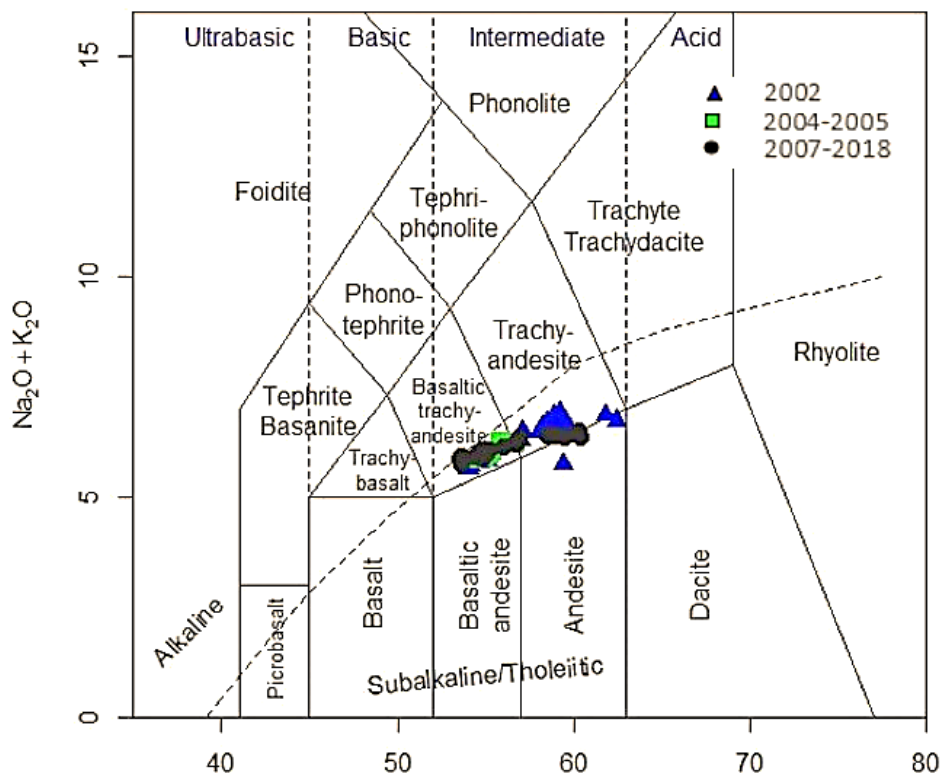


Figura 10: Composición geoquímica de elementos mayores del 2002 al 2018 del volcán El Reventador mediante la clasificación de Le Bas et al., 1986. Triángulos azules de muestras del 2002 Fase A; Cuadrados verdes de muestras del 2004-2005 Fase B; Círculos negros de muestras del 2007- 2008. Recuperado de Estrella (2021).

El Reventador representa actualmente uno de los dos volcanes más activos del Ecuador junto con el volcán Sangay. Éste ha generado 82 flujos de lava desde la actividad posterior a 2002 hasta la actualidad (diciembre 2022); todos ellos emplazados en la parte interior de la caldera de avalancha, divididos en 6 fases (A–F), que duran entre un mes hasta más de 5 años (Naranjo et al., 2016, Wright, 2016). Durante el 2002 se generó 2 flujos de lava con un volumen acumulado de $30,4 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Naranjo et al., 2016), pertenecientes a la fase A. Del 2004 a septiembre del 2005 se generaron 5 flujos menos voluminosos, con un volumen total de $23,4 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Naranjo et al., 2016) correspondiente a la fase B. En el 2007 se emitieron 3 flujos pertenecientes a la fase C de $8,3 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Naranjo et al., 2016). Para la fase D periodo

2008 al 2009 se generaron 7 flujos con un volumen total de $29,3 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Naranjo et al., 2016). Después de una pausa en la emisión efusiva entre 2009 y 2012, la actividad se reactivó y produjo 59 flujos más cortos entre el 2012 al 2017, menos voluminosos de las 4 fases anteriores (Vallejo et al., 2016). Se tiene el valor del volumen hasta el flujo LF60 correspondiente a agosto del 2016 con un promedio de $74,9 \times 10^6 \text{ m}^3 \pm 0,27$ (Arnold et al., 2019). El volumen de los 16 últimos flujos de la fase E actualmente no han sido medidos. Del 2018 al 2022 el volcán emitió 6 flujos de lava y al igual que la anterior fase eruptiva se desconoce su volumen, considerando que último flujo LF82 sigue activo (Tabla 1).

Tabla 1

Actividad de cada fase eruptiva del volcán El Reventador. Información obtenida de Vallejo et al. (2016)

FASE	FECHA	ACTIVIDAD	FLUJOS
Fase A	Nov 2002	Explosiva y efusiva. Generación de PDC's por destrucción del cono y 2 flujos de lava	LF1 y LF2
Fase B	Nov 2004 - Dic 2005	Efusiva y explosiva. Formación de 5 flujos de lava.	LF3, LF4, LF5, LF6, LF7
Fase C	Mar 2007 - Ago 2007	Efusivo al principio y finalizando con actividad explosiva. Formación de 3 flujos de lava.	LF8, LF9, LF10
Fase D	Jul 2008- Oct 2009	Efusiva y explosiva. Cono piroclástico debido a la actividad explosiva. Formación de flujos de lava.	LF11, LF2, LF13, LF14, LF15, LF16, LF17,
Cono de tefra	Finales del 2009 - Finales de 2010	Explosiva. Formación de un cono piroclástico en el cráter.	Reconstrucción cráter
Domo de lava	Principios 2011 – Ene de 2012	Efusiva con la formación de un domo de lava dentro del cono.	Reconstrucción cráter
Fase E	Principios de 2012 - 2017	Efusiva y explosiva. Se reconocieron 59 flujos de lava y numerosos PDC.	LF18-LF76
Fase F	Junio 2018-2022	Efusiva y explosiva. Se reconocieron 6 flujos de lava y numerosos PDC.	LF77-LF82

La actividad nombrada (Tabla 1) se describirá a continuación dando énfasis al trabajo de Vallejo (2017), donde indica la información de los flujos de lava hasta el 2014, y Vallejo et al. (in prep), donde señala la información de cada fase efusiva hasta la actualidad.

2.3.1. Fase A - 2002

El 3 de noviembre del 2002 el volcán El Reventador se reactivó con un evento de Índice de Explosividad Volcánica 4 (Hall et al., 2004). La erupción generó una columna que ascendió los 17 km y con cinco flujos piroclásticos que se desplazaron 9 km al este (Hall et al., 2004). Seguido, el volcán emitió 2 flujos de lava (LF1 y LF2) de composición andesita basáltica y de volumen acumulado de $3.6 \times 10^7 \text{ m}^3$. El primero fue emitido desde la parte sur y viajó hacia el flanco sureste al lado este del piso de la caldera y el segundo, desde un ventó lateral en el flanco SE a aproximadamente 1 km de distancia del nuevo cráter y emplazado sobre el mismo flanco (Fig. 11) (Hall et al., 2004).

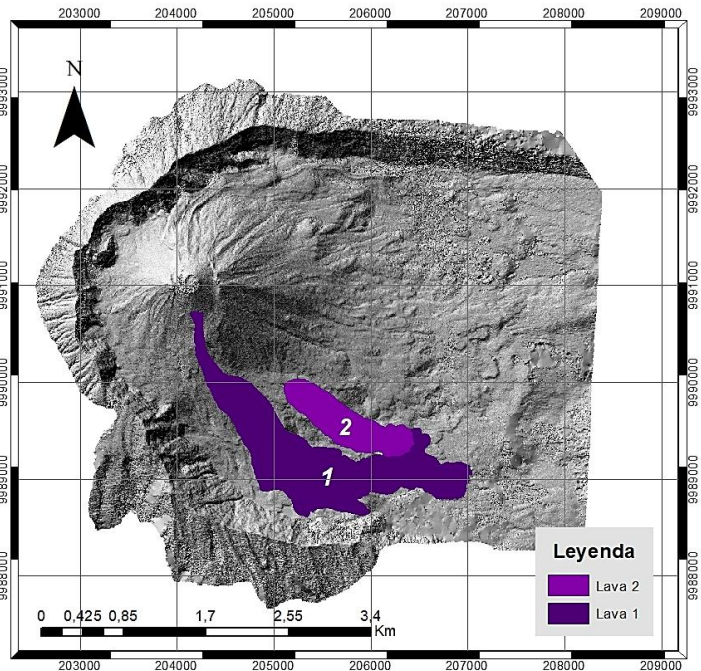


Figura 11: Mapa de los flujos de lava de la Fase A del volcán El Reventador

2.3.2. Fase B 2004 – 2005

En noviembre del 2004, se desarrolló un nuevo episodio efusivo con la emisión del flujo LF3 precedida por un aumento de la sismicidad en agosto de 2004. Posterior a ello, en el 2005, 2 flujos de lava (LF4 y LF5) de composición andesita basáltica se emitieron en dirección al flanco sur (Samaniego et al., 2008) al igual que las lavas del 2002. En julio del 2005 se genera la emisión de otro flujo de lava (LF6), consiguiente de un incremento

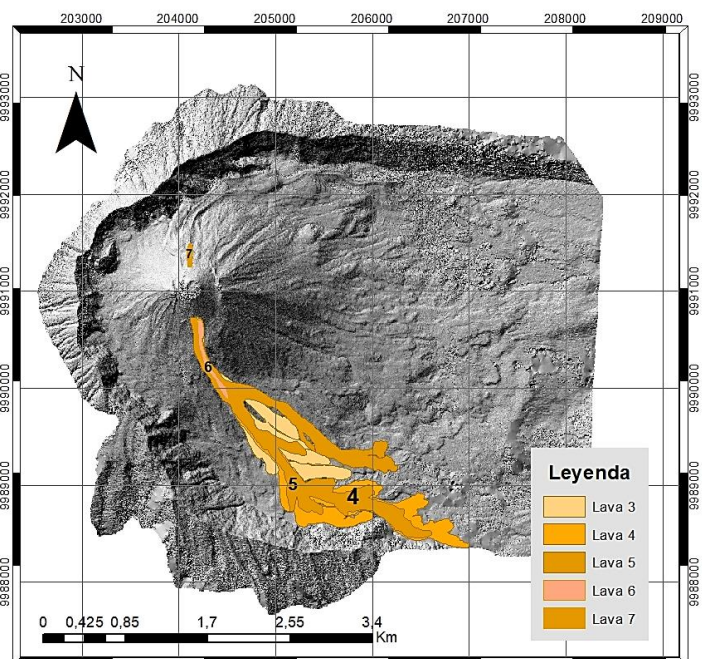


Figura 12: Mapa de los flujos de lava de la Fase B del volcán El Reventador.

de sismicidad (Naranjo, 2013). En noviembre del mismo año se emite la lava (LF7) alcanzando un volumen aproximado de $20 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Fig. 12) (Naranjo, 2016).

2.3.3. Fase C – 2007

Después de un pequeño periodo de inactividad efusiva, en el 2007 se genera un nuevo periodo eruptivo, ocasionando otro flujo de lava en el flanco sur (LF8), seguido de un flujo de lava de gran longitud en el flanco norte (LF9); y tras la detección de un olor a azufre muy intenso, en agosto del mismo año descendió un nuevo flujo de lava en el flanco norte (LF10). Después de LF10, y durante casi un año, no se observó actividad superficial, por lo que se considera que, entre octubre 2007 y abril 2008, corresponde a una etapa no eruptiva (Fig. 13) (Naranjo, 2013).

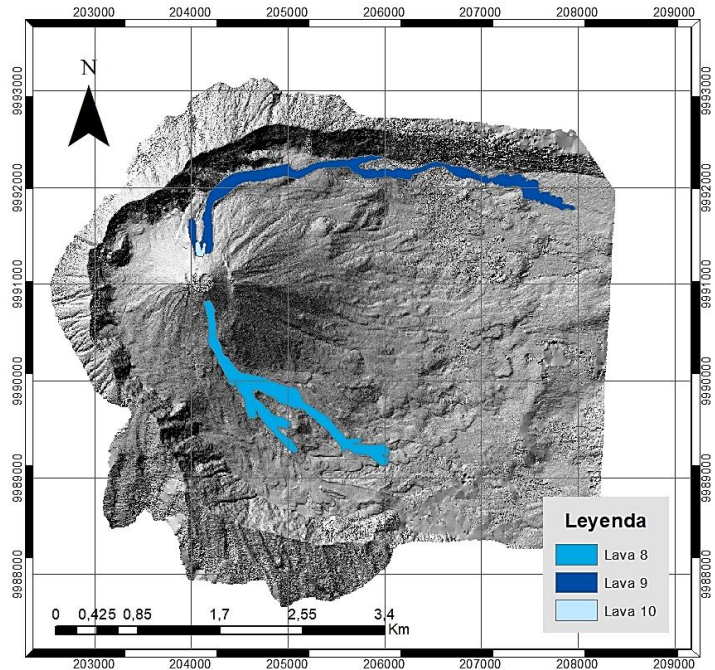


Figura 13: Mapa de los flujos de lava de la Fase C del volcán El Reventador.

2.3.4. Fase D 2008 - 2009

En julio del 2008 una nueva actividad efusiva se registra, con el inicio del descenso de la lava LF11 y en noviembre del mismo año con la emisión de otro flujo de lava LF12 en el flanco sureste. Posteriormente en el flanco descendió la lava LF13. En el 2009 su actividad efusiva aumenta con la emisión de 3 flujos de lava contiguos (LF14, LF15 y LF16), 2 dirigidos hacia el sureste y el LF5 dirigido hacia el noreste. En octubre el flujo LF17 desciende hacia el sureste, terminando así la primera etapa efusiva del volcán desde su reactivación (Vallejo et al., in prep.) (Fig. 14).

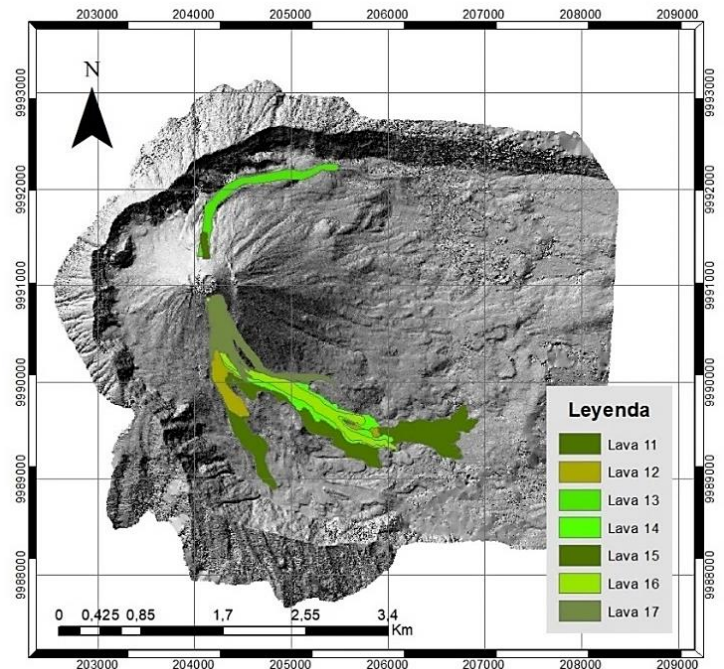


Figura 14: Mapa de los flujos de lava de la Fase D del volcán El Reventador

2.3.5. Domo de lava 2010- 2011

A finales del 2009, el dinamismo eruptivo del volcán cambia a netamente explosivo, el cual, se mantuvo constante hasta finales del 2010 (Ramón y Vallejo, 2012). En marzo del 2011 la actividad efusiva se identificó con la formación de un domo exógeno de lava dentro del cono de tefra, con un volumen estimado de $6.3 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Vallejo et al., 2016) cubriendo la superficie del cono de tefra. El 10 de noviembre de 2011, se identificó un pequeño flujo de lava extruido hacia el sur. A lo largo del crecimiento del domo de lava, se registró máximo 100 eventos eruptivos explosivos y efusivos, con una duración de 12 meses (Fig. 15) (Vallejo, in prep.).

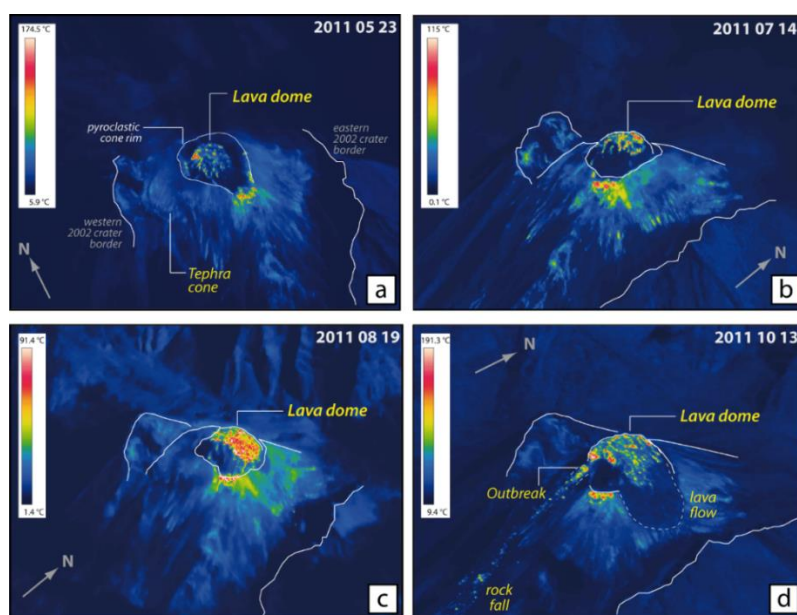


Figura 15: Imágenes térmicas aéreas que muestran la evolución del crecimiento del domo de lava dentro del cono de tefra. a) Imagen térmica 2011-05-23. b) Imagen térmica 2011-07-14. c) Imagen térmica 2011-08-19. d) Imagen térmica 2011-10-13. Recuperado de: Vallejo, in prep.

2.3.6. Fase E 2012 – 2017

Entre 2012 y 2015, la actividad superficial se concentró en un ventó, ubicado en el centro del cráter del pequeño cono que se formó como continuación de la extrusión del domo de lava en 2011. La actividad efusiva y explosiva fue simultánea desde 2012, el material volcánico emitido lidera el crecimiento continuo del estratocono, casi llenando el cráter dejado en 2002.

Del 4 de junio del 2012 al 2 de diciembre del 2014 se generaron 19 flujos de lava continuos a lo largo del tiempo (LF18–LF37) (Vallejo, 2017). Éstos en su mayoría tuvieron una concentración en el flanco norte del volcán, y presentaban un menor alcance y tiempo de emplazamiento en comparación a las anteriores fases efusivas.

Del 2015 hasta el 2017 se identificaron 20 flujos de lava (LF38-LF75) emitidos y emplazados en la parte superior del cono a través de los flancos norte, sur, noreste, sureste y este, 11 en 2015, 8 en 2016, 12 en 2017, con un volumen acumulado total desde el 2012 aprox. $78,3 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Vallejo et al., 2016; Vallejo, 2017; Arnold et al., 2017, 2019; Vallejo, in prep.).

Después del colapso del borde y el emplazamiento del PDC el 22 de junio de 2016, un flujo de lava comenzó a salir (LF76) de un nuevo vento en el flanco norte, Este flujo de lava se emplazó rápidamente durante ~5 días y es la unidad más grande desde 2008, con una longitud de 2,6 km y un volumen de $6,6 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Naranjo et al., 2018; Vallejo, in prep.) (Fig. 16).

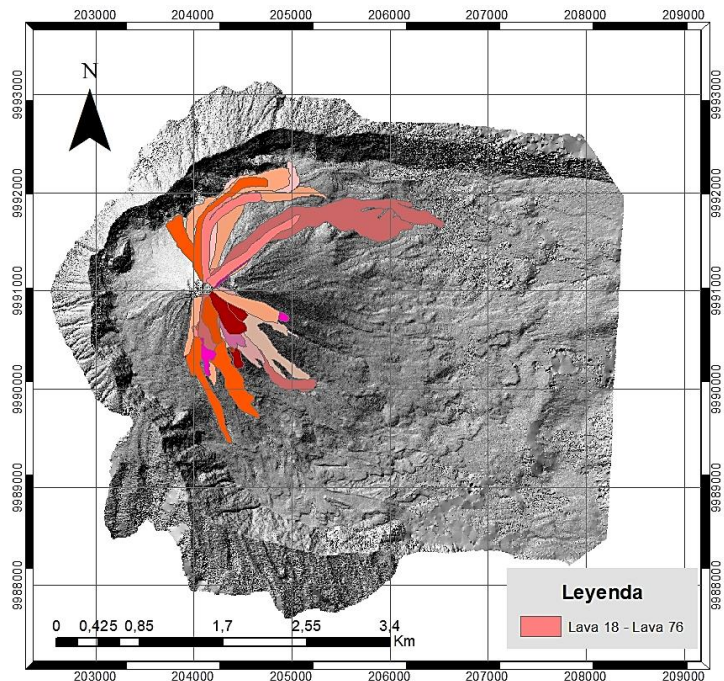


Figura 16: Mapa de los flujos de lava de la Fase E del volcán El Reventador

2.3.7. Fase F 2018 – 2020

La actividad efusiva de esta fase comienza en abril del 2018 con la emisión de un flujo de lava LF77 proveniente del vento Oeste, donde posteriormente se extruyeron dos más (LF78-LF79) en junio de 2018 y en mayo de 2019. El emplazamiento de estas tres lavas estuvo controlado por la morfología inferior entre los flancos del volcán y la pared interior de la caldera (Vallejo et al., in prep.) (Fig. 17). La actividad de esta Fase aún persiste con la generación y continuo avance del flujo LF82. Dando un total hasta la fecha, de 6 flujos de lava emitidos en esta fase eruptiva.

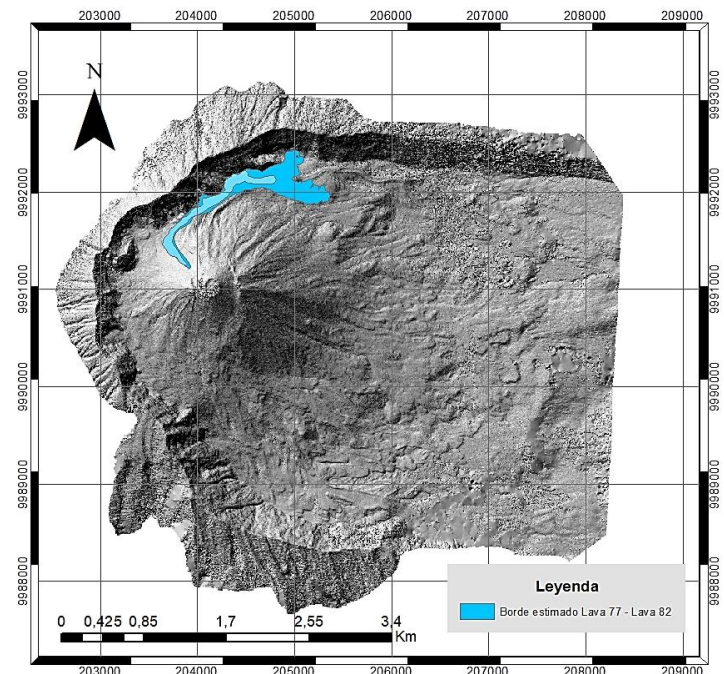


Figura 17: Mapa de los flujos de lava de la Fase F del volcán El Reventador.

CAPÍTULO III

3. REOLOGÍA DE LAS LAVAS

Las lavas representan fluidos trifásicos y no homogéneos a lo largo de todo el eje. En este capítulo se describe los diferentes comportamientos reológicos que pueden presentar los fluidos, dando énfasis a la de los flujos de lava. Así también, se plantea ecuaciones para inferir en los diferentes valores reológicos mediante la geometría y cuantificación de componentes.

La reología es el estudio de la deformación y el flujo de la materia, su finalidad es entender el comportamiento de fluidos complejos (Morrison, 2001), considerando su efecto en el tiempo (Kim y Park, 2000), como es el caso de los flujos de lava. Los flujos complejos definidos como flujos no newtonianos no siguen la ley de viscosidad de Newton; la cual, conceptualiza la relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de corte de un fluido sometido a un esfuerzo mecánico (George y Qureshi, 2013). Por lo tanto, la viscosidad de estos fluidos (relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de corte) no es constante y depende de la velocidad de corte. Así también, los flujos complejos no siguen la Ley de elasticidad de Hooke, relación entre el Esfuerzo y Deformación (Stress y Strain) que se utiliza para metales y otros materiales elásticos (Morrison, 2001).

La reología, siendo el nexo entre fuerzas que actúan sobre un material y su deformación, es una parte vital de la descripción de cualquier flujo, como son los flujos de lava (Lev et al., 2012).

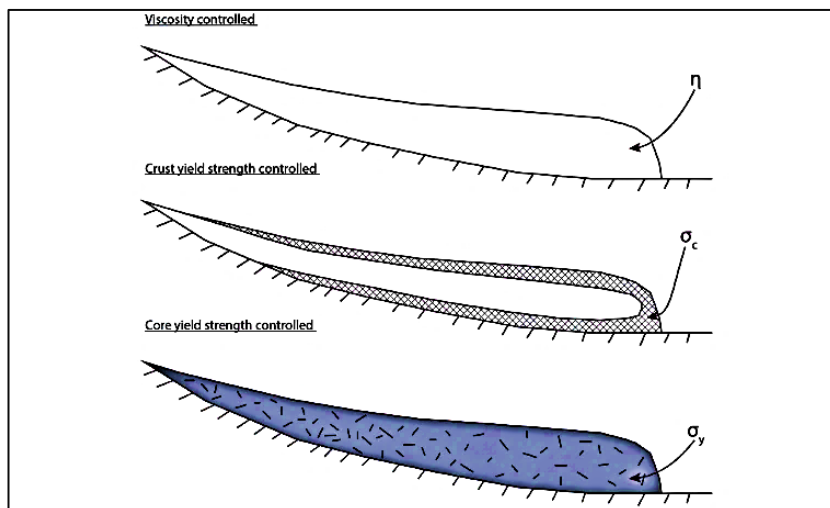


Figura 18: Regímenes que controlan el comportamiento del flujo de lava. Caso lineal: viscosidad dominada, Caso Herschel-Buckley: límite elástico de la corteza dominado, Caso Bingham: el límite elástico (τ) del núcleo dominado. Recuperado de Magnall et al. (2017)

Interviene en modelos analíticos que pronostican la longitud del flujo, y suponen un avance del flujo controlado por una viscosidad newtoniana aparente, un núcleo de flujo no newtoniano o una corteza superficial de resistencia definida (Fig. 18) (Magnall et al., 2017), donde el comportamiento puede transicionar a medida que avanza el flujo.

La naturaleza transitoria de los flujos de lava ha sido determinada por cambios experimentales en la composición, textura y temperatura debido a los procesos de pérdida de gas, cristalización y enfriamiento (Lev y James, 2014; Kolzenburg et al., 2017). Las lavas se consideran flujos complejos debido a que sus propiedades evolucionan continuamente durante la emisión y emplazamiento, y su composición puede generar condiciones de flujo, morfologías y texturas fuertemente heterogéneas (Cashman et al., 1999; Kolzenburg et al., 2017; Vallejo, 2017). Así también, se consideran fluidos multifásicos por constituirse de líquidos, burbujas de gas y cristales sólidos (Stein y Spera, 1992, Manga et al., 1998). La temperatura, la cristalinidad y la composición química de la lava son necesarias para calcular la reología (Crisp y Baloga, 1994). Además, ayuda en modelar la dinámica del flujo de lava en base a la viscosidad y límite elástico (Dragoni, 1989; Harris y Rowland, 2001), mediante la relación del esfuerzo cortante τ , con la tasa de deformación cortante $\dot{\gamma}$ (Fig. 19). Esta viene dada por una ecuación reducida unidimensional de $\tau = f(\dot{\gamma})$ encargada de producir la curvatura de cada flujo (Fig. 19) (Mader et al., 2013).

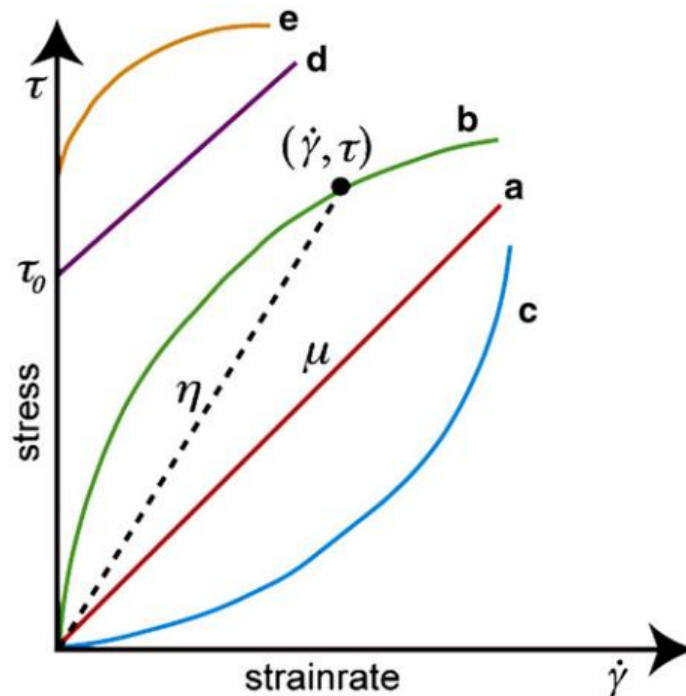


Figura 19: Gráfica de la tasa de deformación vs el esfuerzo de cizalla. Tipos de flujos: (a) Flujo newtoniano, (b) Fluido pseudoplástico, (c) Fluido dilatante, (d) Bingham, (e) Herschel-Bulkley; τ_0 Límite elástico. Viscosidad aparente (Línea discontinua) corresponde a la pendiente. Recuperado de Mader et al. (2013)

Algunos de los flujos de lava pueden considerarse newtonianos dependiendo si se encuentran en estado líquido; por ejemplo, en Pinkerton y Stevenson (1992) y en Lev et al. (2012), se señala que solo los fundidos basálticos no vesiculares se comportan como fluidos Newtonianos a temperaturas superiores de su liquidus. Sin embargo, la lava ya no puede comportarse como un fluido newtoniano cuando se enfría y solidifica, solo sigue una ley de Bingham (Chevrel et al., 2013).

La ley de Bingham representa el comportamiento no newtoniano más simple (Fig.19), a un tiempo con carácter plástico y newtoniano (Soler Manuel, 1976). Su ley considera que un fluido solo fluirá una vez que se haya alcanzado un umbral de esfuerzo cortante aplicado (Sehlke et al. 2014). Una sustancia ideal no se deforma a menos que el esfuerzo cortante aplicado exceda su resistencia al corte (Dixon y Summer, 1986). Un material de Bingham exhibe un límite elástico (Fig. 19), así como una resistencia viscosa al flujo en tensiones que exceden el límite elástico (Dixon y Summer, 1986). En el líquido de Bingham, la tensión frente a la velocidad de deformación es lineal, y tiene un efecto positivo de intersección en el eje, que equivale al límite elástico (Sehlke et al., 2014) en el que la relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación define la viscosidad del fluido (Harris, 2013).

Por ello, los factores principales para entender la reología de un flujo de lava son la viscosidad y límite elástico. La viscosidad es el parámetro reológico más comúnmente buscado para entender el desplazamiento y alcance del flujo (Morrison, 2001) y se refiere a la fricción interna, o resistencia a fluir. Todos los fluidos reales tienen una resistencia interna al flujo la cual puede verse como fricción entre las moléculas del fluido (Jiménez, 2018). Y en este trabajo, como en el desarrollado en Vallejo (2017) seguirá a Harris et al., (2015b), donde se señala que la viscosidad global de los flujos de lava se define como el producto entre la viscosidad dinámica del fluido (η_r) y el efecto de las partículas, denominada viscosidad relativa (η_r).

Actualmente los parámetros reológicos se obtienen mediante sus mediciones morfológicas y la cuantificación de sus componentes cristalinos. A continuación, se presentarán los diferentes métodos y ecuaciones existentes para su cálculo.

3.1. Propiedades reológicas en base a sus características morfológicas

El trabajo de Nichols “Lava Viscosity” realizado en 1939 propone que, para el cálculo de la viscosidad de un flujo de lava a partir de sus mediciones morfológicas, utilizar la ecuación de Jeffreys (1925), caracterizando al fluido como newtoniano, sin embargo, se toma en cuenta que los flujos de lava por sus propiedades trifásicas se comportan como un fluido no

newtoniano apegado a un tipo Bingham. Por lo que se propuso en Hulme (1974) calcular un límite elástico utilizando las mismas mediciones morfológicas, y en conjunto con Moore et al. (1978) y Pinkerton y Wilson (1994), relacionaron las dimensiones morfológicas y las condiciones de viscosidad y límite elástico con las de un flujo emplazado (Chevrel et al., 2013; Reyes Guzmán, 2019). Estas ecuaciones son empleadas mediante varios perfiles trazados a lo largo del flujo (Fig. 20).

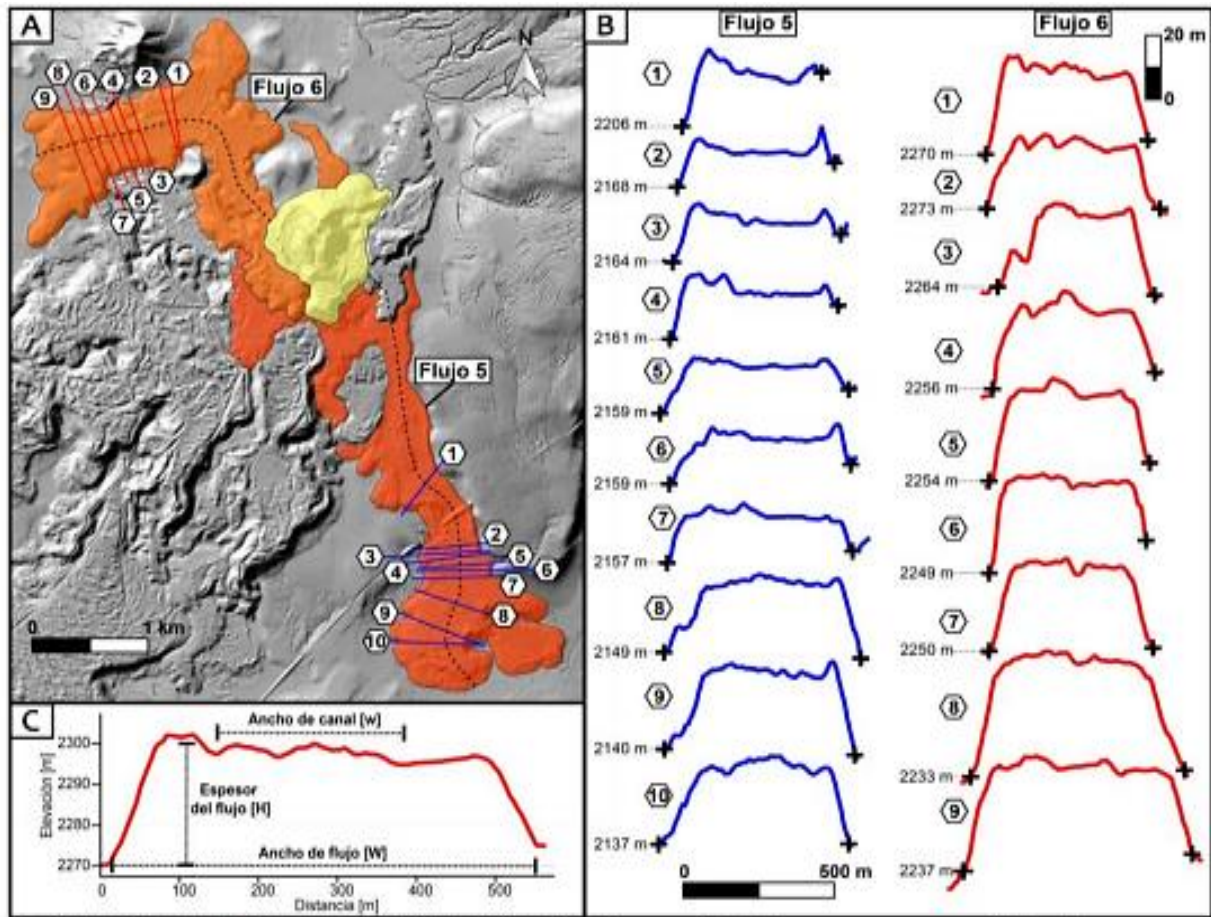


Figura 20: Ejemplo de análisis reológico mediante la morfología. Perfiles trazados a lo largo del flujo de lava del volcán Rancho Seco-México. A) Vista general de los flujos de lava mejor expuestos de las zonas de estudio. B) Perfiles topográficos (perpendiculares a la dirección del flujo) de lavas del volcán Rancho Seco (F5 y F6) a partir de los cuales se estimaron el ancho, el espesor y el ancho del canal como se muestra en C. Recuperado de Ramírez, 2020.

A continuación, se presentarán diferentes conceptos y sus respectivas ecuaciones que son necesarios para el cálculo de los parámetros reológicos en base a su morfología, como son la viscosidad (η) y límite elástico (τ).

 Numero de Gratz Gz (Adimensional)

Se considera una relación entre la advección de calor a lo largo de la longitud del flujo y las pérdidas de calor por conducción (Chevrel et al., 2013). Estudios como Walker,

1973, Pinkerton, 1987, Pinkerton y Wilson, 1994, describen la relación de las tasas de efusión y longitud del flujo (Ec. 1), concluyendo que el fluido se emplaza por enfriamiento cuando Gz cae a un valor crítico de 300 para la mayoría de los flujos basálticos y para flujos más andesíticos (Chevrel et al., 2016). Esta ecuación depende de:

u = velocidad del flujo en m/s


d_e = diámetro equivalente del flujo en m

k = difusividad térmica en m^2/s

L =Longitud del flujo de lava en m

$$Gz = \frac{ude^2}{kL}$$

Ecuación 1

 Tasa de efusión volumétrica Q (m^3/s)

Representa una variable dependiente de la velocidad (u), ancho (W) y espesor promedio del flujo (H) (Ec.2). Si esta variable no cuenta con el valor de la velocidad, este se puede descomponer en valores dependientes también del número de Gz , la difusividad térmica del material (k) en m/s^2 , y la longitud máxima (L).

$$Q = uWH = \frac{GzkLW}{H}$$

Ecuación 2

 Viscosidad η (Pa.s)

Al considerar el flujo homogéneo y regular con un comportamiento newtoniano, se aplica la ecuación de Jeffreys (1925), modificada por Nichols (1939) para ser aplicada en lavas (Ec. 3), éste permite calcular la viscosidad del flujo entero mediante la geometría del flujo de lava.

Esta ecuación depende de:

ρ = densidad en kg/m^3

g = aceleración de la gravedad en m/s^2

H = espesor promedio (altura del flujo) en m

W = ancho del flujo en m

α = pendiente del flujo


n = constante la cual tiene un valor de 3

Q = tasa de efusión volumétrica en m^3/s

$$\eta = \frac{pgH^3W\sin\alpha}{nQ} \quad \text{Ecuación 3}$$

En Warner y Gregg (2003) se propone una ecuación simplificada de la ecuación de Jeffreys y Nichols (1939) (Ec. 4) donde omite el efecto de la extensión lateral del flujo y de la pendiente (Chevrel et al., 2013). Ésta, junto con la Ec. 3 tienen el mismo valor si el flujo de lava no presenta levees y si el valor de la altura es mayor a la del ancho de flujo (Moore y Schaber, 1975).

$$\eta = \frac{pgH^3}{Q} \quad \text{Ecuación 4}$$

 Límite elástico τ (Pa)

Hulme (1974) asumiendo un comportamiento de Bingham (Ec. 5), relaciona el límite elástico del flujo con sus parámetros geométricos de acuerdo con:

$$\tau = pgH\sin\alpha \quad \text{Ecuación 5}$$

También se puede calcular utilizando la dispersión lateral del fluido de Bingham, que es independiente del gradiente topográfico en la dirección del flujo (Ec. 6) (Chevrel et al., 2013, Reyes Guzmán, 2019):

$$\tau = \frac{pgH^2}{W} \quad \text{Ecuación 6}$$

De acuerdo con Hulme (1974) (Ec. 7) los flujos canalizados tienen un límite elástico τ (Pa) se considera el espesor del flujo (W) y del canal (w) delimitado por las levées:

$$\tau = pg(W - w)\sin^2\alpha \quad \text{Ecuación 7}$$

Wilson y Head (1983), apoyándose en la teoría de Hulme, relacionaron la viscosidad aparente del flujo dentro del canal con la tasa de efusión y el límite elástico (Ec. 8):

$$\eta = \frac{w^3 \tau 3W \sin^2 \alpha}{24Q} \quad \text{Ecuación 8}$$

3.2. Propiedades reológicas en base a su composición

3.2.1. Viscosidad total

La viscosidad es una medida de consistencia de una sustancia y se considera una expresión de la resistencia interna a la deformación cuando se le aplica un estrés tangencial (Cas y Wrigth, 1988). Un flujo de lava se constituye de una parte líquida silicatada, de cristales y de burbujas (Cas y Wright, 1988; Chevrel et al., 2013; Reyes Guzmán, 2019) por ello, su viscosidad depende de la composición química y temperatura, así también del volumen de los cristales y de burbujas (Giordano et al., 2008).

Los flujos de lava por ser una mezcla de fundido, cristales y burbujas son definidos como trifásicos y para medir su viscosidad se puede considerar el modelo propuesto por Phan-Thien y Pham (1997) que fue probado por Harris et al. (2008) (Ec. 9) donde se realizó un estudio de la reología de mezclas de flujos de lava basáltica concluyendo que este tratamiento trifásico puede caracterizar por una completa mezcla de burbujas, cristales y fundido.

$$\eta = \eta_f(X, T) * \eta_r(\Phi, \beta) \quad \text{Ecuación 9}$$

La viscosidad total en este sentido se divide en viscosidad fluida η_f y viscosidad relativa η_r (Ec. 9), a continuación, una breve descripción:

3.2.2. Viscosidad dinámica (η_f)

La viscosidad dinámica o también llamada viscosidad fluida (η_f) corresponde a la razón de la viscosidad de la fase fluida y depende de la composición química y la temperatura interna del fundido. Ésta puede variar en más de 10 órdenes de magnitud dependiendo de la variación en composición y temperatura (Leshner y Spera 2015).

Los fluidos ultramáficos alcanzan viscosidades de 10^{-1} a 100 Pa.s mientras que los fundidos silíceos son muy viscosos (10^7 a 10^8 Pa.s) (Fig. 21). La viscosidad dinámica del fluido puede verse afectada por el contenido de agua, disminuyendo hasta seis órdenes de magnitud para los fundidos riolíticos y hasta 1,5 órdenes para los basálticos (Dingwell y Mysen 1985; Giordano y Dingwell 2003).

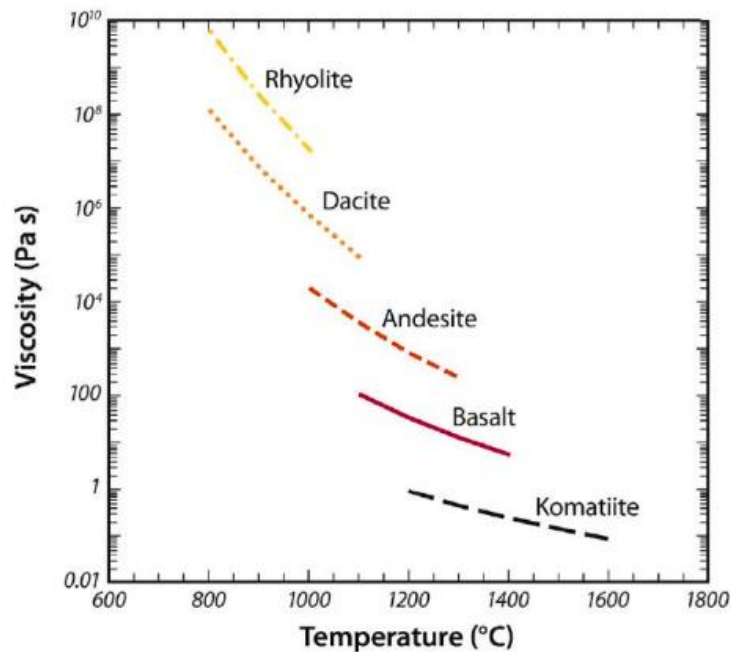


Figura 21: Viscosidad fluida en función de la temperatura desde composiciones riolíticas hasta komatiitas. Las composiciones andesíticas pueden disminuir entre 1×10^4 a 100 (Pa.s) en un rango de Temperatura de 1000°C a 1400°C . Recuperado de Leshner y Spera (2015).

Shaw (1972)

Se puede determinar la viscosidad fluida mediante la ecuación propuesta por Shaw (1972). La cual presenta una relación temperatura-viscosidad de Arrheniana, donde describen una dependencia de la temperatura para la obtención de viscosidad. Para los líquidos de sílice, se sabe que la viscosidad se aproxima mediante la relación de Arrhenius, donde, η_0 y E son constantes denominadas "constante preexponencial" y "energía de activación" respectivamente, y R es la constante de los gases (Ec. 10).

$$\ln \eta_0 = C_\eta - C_v$$


$$C_\eta = -6.40$$

$$C_v = 1.50$$

$$E^* = 104 \text{ sR} = 19.87 \text{ s (Kcal / mol)}$$

$$\eta f = \eta_0 \exp \frac{E^*}{RT}$$


Ecuación 10

 Bottinga y Weill (1972)

Se incluye el efecto del componente de agua en el fluido en el que la viscosidad fluida (ηf) se puede calcular como una función de la composición y temperatura (Ec. 11). Dónde S es la pendiente característica de la relación viscosidad-temperatura para una determinada mezcla multicomponente, ct y $c\eta$ son parámetros dependientes de la temperatura y la viscosidad.

$$\ln(\eta f) = s \frac{10^4}{T} - sct + c\eta$$

Ecuación 11

 Tammann y Hesse (1926)

Para los melts de silicatos que no siguen una relación temperatura-viscosidad de Arrheniana. La viscosidad fluida se puede calcular utilizando la relación empírica de Vogel-Fulcher-Tammann (VFT) (Tammann y Hesse 1926) (Ec. 12).

$$\text{Log}\eta f = A + \frac{B}{T(K)-C}$$

Ecuación 12

Donde $T (K)$ es la temperatura absoluta y A, B, C son parámetros ajustables en función de la composición química que representa, la energía de pseudoactivación y la temperatura VFT, respectivamente.

El modelo más representativo para calcular la viscosidad de un fluido es el desarrollado por Giordano & Dingwell (2003) y su posterior mejora por Giordano et al. (2006, 2008). El modelo de GRD se basa en más de 1770 mediciones de viscosidad en multicomponente anhidro y el silicato rico en volátiles, que se derriten e incluyen el efecto de los componentes volátiles importantes H_2O y F. Es continuo en el espacio de composición y temperatura y predice la viscosidad de fundidos de silicato que contienen volátiles naturales sobre quince unidades logarítmicas de viscosidad. Eso también predice la temperatura de transición vítrea, la fragilidad del fundido y la disminución sistemática de esta temperatura a medida que aumenta el contenido de volátiles (Giordano et al., 2008).

 Dragoni (1989)

Cuando $T_{int} < T_0$, donde T_0 es la temperatura del líquidus la composición del fluido cambia debido a la cristalización y con ello, el comportamiento del fluido reacciona como un fluido no newtoniano. De esta manera la viscosidad del fluido η_f se puede calcular en función de la temperatura según Dragoni (1989), donde η_0 es la viscosidad a la temperatura de liquidus y A es una constante (Ec. 13).

$$\eta_f(T) = \eta_0 e^{[A(T_0 - T_{int})]}$$

Ecuación 13

3.2.3. Viscosidad relativa (η_r)

La viscosidad relativa (η_r) es la viscosidad adimensional que depende de la fracción cristalina (Φ) y del contenido de burbujas en el magma. Las características de estos dos componentes son diferentes, las burbujas son deformables, tienen baja densidad, no viscosas y comprimibles mientras que los cristales son rígidos con una variada posibilidad de formas y son incompresibles (Mader et al. 2013). Así su comportamiento en la lava es diferente al igual que el tratamiento para determinar su respectiva influencia en la viscosidad de la mezcla (Vallejo, 2017). Existen algunos modelos que se pueden aplicar para calcular la viscosidad relativa de la mezcla (Fig. 22):

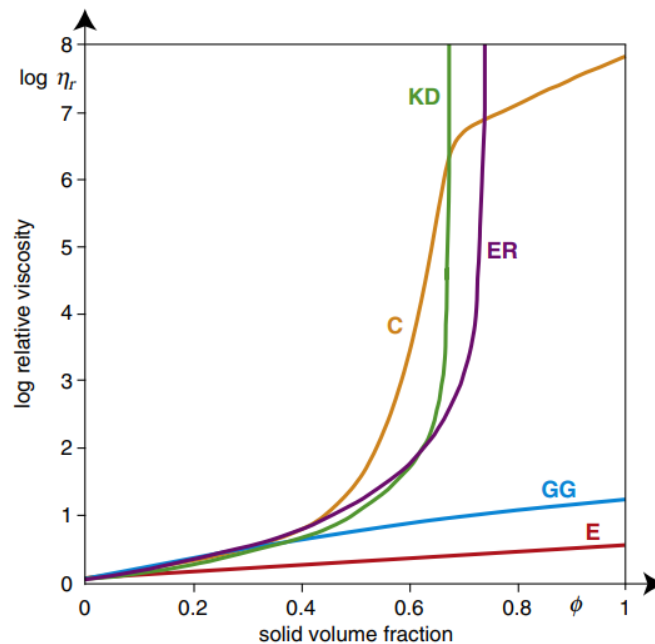


Figura 22: Diagrama de diferentes modelos de viscosidad relativa. E: Einstein; GG: Guth & Gold (1938); ER: Einstein-Roscoe; KD: Krieger y Dougherty; C: Costa. Recuperado de: Mader et al. (2013).

 Einstein (1906)

Representa a uno de los primeros intentos de calcular el efecto de los cristales en la mezcla el cual, considera un flujo alrededor de una esfera aislada, asumiendo que la esfera representa un cristal. Esta función depende únicamente de la Fracción de cristales de la muestra Φ y el Coeficiente de Einstein o viscosidad intrínseca (B) que tiene un valor constante adimensional de 2.5 (Ec. 14).

$$\eta_r = 1 + B\Phi \quad \text{Ecuación 14}$$

 Roscoe (1952)


La relación Einstein y Roscoe (1952) estableció que la viscosidad relativa se encuentra en función del contenido de cristales de la muestra Φ y su empaquetamiento máximo Φ_m , considerando que Φ no podría ser igual que Φ_m debido a que se generaría un valor infinito (Ec.15).

$$\eta_r = \left(1 - \frac{\Phi}{\Phi_m}\right)^{-2.5} \quad \text{Ecuación 15}$$

 Krieger y Dougherty (1959)

Krieger y Dougherty propusieron otro modelo, apegado al de Einstein y Roscoe (1952) considerando el efecto de agregar esferas rígidas sucesivas en suspensión. Éste al igual que la Ec. 15, depende de la fracción cristalina y el empaquetamiento máximo de todo el flujo.

$$\eta_r = \left(1 - \frac{\Phi}{\Phi_m}\right)^{-B\Phi_m} \quad \text{Ecuación 16}$$

 Costa et al. (2009)

Realizó un modelo similar al de Krieger y Dougherty (1959) pero con un bajo contenido de sólidos, así también, con la posibilidad de generar un valor cuando $\Phi = \Phi_m$ (Ec. 17). La función de F , localizada en la presente ecuación (Ec.17.1), considera que para fracciones de volumen de partículas grandes ($\Phi \rightarrow 1$), la parametrización sugerida por Costa (2005) tiende a un valor constante, debido a que el término no lineal en la función de error ("erf") se satura


rápidamente cuando Φ se acerca a la unidad. La parametrización utilizada también adopta la relación entre la viscosidad relativa y la fracción de volumen de partículas. El parámetro γ es una medida de rapidez del aumento de la viscosidad relativa con la fracción de cristal ϕ , a medida que ϕ se aproxima a ϕ_m , δ controla el aumento de la viscosidad relativa (η_r) en $\phi > \phi_m$ y se puede expresar en términos de γ como $\delta = A - \gamma$ donde $A = 13$ y representa una constante empírica (Ec. 17.2).

$$\eta_r = \frac{1 + \left(\frac{\Phi}{\Phi_m}\right)^\delta}{[1 - F]^{B\Phi_m}} \quad \text{Ecuación 17}$$

$$F = (1 - \xi) \operatorname{erf} \left[\frac{\sqrt{\pi}}{2(1 - \xi)} \frac{\Phi}{\Phi_m} \left(1 + \frac{\Phi^\gamma}{\Phi_m^\gamma}\right) \right] \quad \text{Ecuación 17.1}$$

$$\delta = A - \gamma \quad \text{Ecuación 17.2}$$

La reología propuesta en la ecuación de Costa et al. (2009) depende altamente de la velocidad de deformación, las formas de los cristales y distribución del tamaño de los cristales. Para la velocidad de deformación, Caricchi et al. (2007) mostró experimentalmente que a velocidades de deformación bajas ($\sim 10^{-6}$ a 10^{-5} s^{-1}) las suspensiones fundidas de partículas y silicatos se comportan como un líquido newtoniano. Al aumentar la velocidad de deformación, induce una transición a un comportamiento no newtoniano causado por una disminución del grado de aleatoriedad de la distribución de partículas. A velocidades de deformación altas ($\sim 10^{-3} \text{ s}^{-1}$), el comportamiento cambia a un pseudo-binghamiano (Van der Werff y de Kruif, 1989; Barnes, 1999).


 Roscoe (1952).

En cuanto al efecto de las burbujas, se estableció la siguiente relación asumiendo suspensión de esferas en un fluido. Donde Φ_b es la concentración de burbujas. Donde el aumento y la disminución de la viscosidad relativa dependerá del contenido y la forma de las burbujas (Ec.18).

$$\eta_r = nf (1 - 1.35\Phi_b)^{-2.5}$$

Ecuación 18

Por ejemplo, si las burbujas siguen siendo esféricas, la mayor parte la viscosidad aumentará y las burbujas deformadas reducirán la viscosidad (Manga et al., 1998). Como la presencia de burbujas puede aumentar o disminuir la viscosidad aparente.

 Pal (2003)

Propuso 2 maneras de determinar la viscosidad relativa en función del contenido de burbujas; para muestras en las que las burbujas son esféricas y donde las burbujas se cortan, Ecs. 19 y 20 respectivamente. Se puede considerar que el Φ_{bmax} (empaquetamiento máximo de la concentración de burbujas), tiene un valor de 1 (Llewelin & Manga 2005). Por lo que, las Ecs. 19 y 20 se pueden simplificar como Ecs. 19.1 y 19.2 respectivamente (Taylor 1932).

$$\eta_r = nf \left(1 - \frac{\Phi_b}{\Phi_{bmax}}\right)^{-\Phi_{bmax}}$$

Ecuación 19

$$\eta_r = nf(1 - \Phi_b)^{-1}$$


Ecuación 19.1

$$\eta_r = nf \left(1 - \frac{\Phi_b}{\Phi_{bmax}}\right)^{-5\Phi_{bmax}/3}$$

Ecuación 20

$$\eta_r = nf(1 - \Phi_b)^{-5/3}$$

Ecuación 20.1

 Manga 2005 & Loewenberg

Se introduce una constante f la cual depende de las propiedades de las burbujas en suspensión, dadas por el número de capilaridad. Este valor es 1 para burbujas esféricas y -1.67 para burbujas altamente cortadas.

$$\eta_r = nf(1 - f\Phi_b)$$

Ecuación 21

3.2.4. Límite elástico τ

Se define como la tensión aplicada, mediante la cual, se observa por primera vez una deformación plástica irreversible en la muestra (Banfill, 1994), también se precisa como la tensión máxima que se puede aplicar antes de que comience a cambiar de forma permanente del flujo, donde los fluidos de Bingham comienzan a tener constante deformación (Fig. 19, 23).

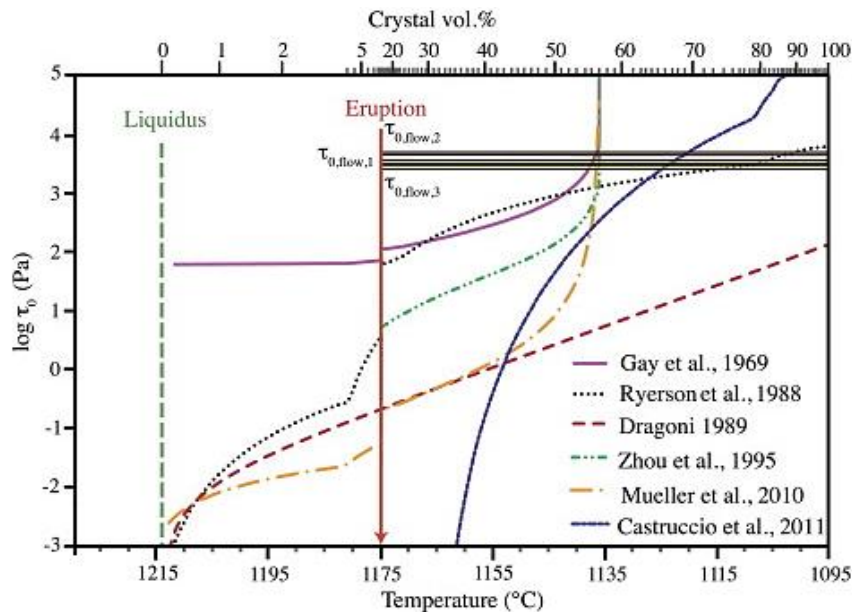



Figura 23: Límite elástico aparente de la lava cristalizante en función de la temperatura y la cristalinidad correspondiente modelada por MELTS. Varios métodos utilizados para el cálculo de este parámetro.

Recuperado de Chevrel et al. (2013).

Al igual que la viscosidad, el límite elástico depende de la temperatura, la composición, la fracción cristalina y vesicularidad (Harris y Rowland, 2001, 2015b; Sehlke et al. 2014) y varía con la cristalinidad de manera exponencial (Sehlke et al. 2014). El límite elástico generalmente se determina ajustando las curvas de tasa de tensión con los modelos de Bingham, Casson o Herschel-Bulkley (Fig. 18) (Banfill, 1994) y tiende a cero cuando la fracción de cristal es menor que el contenido crítico de la fracción de cristal y, a su vez, mayor que cero cuando la fracción de cristal supera el valor del contenido crítico de fracción de cristal en el flujo.


El parámetro de límite elástico se ha incorporado en los modelos de flujo emplazado para permitir que el flujo se detenga incluso si no está completamente solidificado (Cordonnier et al., 2012; Kolzenburg et al., 2016). Castruccio et al. (2013) señala que la evolución (avance del frente de flujo) de las erupciones máficas con tasas de efusión más bajas o erupciones andesíticas de larga duración, están controladas por el límite elástico de una costra creciente (Fig. 23).

Existen algunos modelos para la estimación del parámetro límite elástico para flujos de lava, los mismos que pueden ser escritos en términos de temperatura y cristalinidad. La siguiente descripción se basa en la revisión de Chevrel et al. (2013) y otros modelos:

 Gay et al. (1969)


Dónde ρ es la densidad de la lava; D_p es el diámetro medio de las partículas; Φ_m corresponde al factor de forma definido como la relación entre el área superficial de una esfera de volumen equivalente y el área superficial de la partícula, es la desviación estándar geométrica que se estima a partir de una gráfica del diámetro de la partícula versus la proporción acumulada de partículas menos de un tamaño dado.

$$\tau = 1.26\rho g \left(\frac{D_p}{\Phi_m - \Phi} \right) \left(\frac{\Phi_m}{1 - \Phi_m} \right)^2 \left(\frac{1}{\xi^{1.5} - s^2} \right) \quad \text{Ecuación 22}$$

 Ryerson et al. (1988)

Se propuso calcular el límite elástico τ en función del ajuste experimental obtenido por cristalización de lava picrítica, en una expresión de ley de potencia. Esta relación es un primer paso para proporcionar un modelo para la predicción de límites elásticos en magmas toleíticos subliquidos que, puede funcionar para magmas de composición similar.

$$\tau = 6500\Phi^{2.85} \quad \text{Ecuación 23}$$

 Dragoni et al. (1989)


Se ofrece una ecuación basada en una relación lineal entre la temperatura y la cristalización, Donde T_1 es la temperatura de liquidus, a y b son parámetros de ajuste

$$\tau = a(\exp^{b(T_1 - T)} - 1) \quad \text{Ecuación 24}$$

 Pinkerton y Stevenson (1992)


Utiliza una combinación de los modelos de Ryerson et al. (1988) y Dragoni et al. (1989):

$$\tau = a(\exp^{b(T_1 - T)} - 1) + (6500 \Phi^{2.85}) \quad \text{Ecuación 25}$$

 Zhou et al. (1995) y Saar et al. (2001)


Propusieron la siguiente ecuación, donde refleja la cohesión total entre partículas resistentes a las fuerzas hidrodinámicas y puede reflejar la respuesta del estado agregado al cizallamiento; es la concentración mínima crítica de partículas a la que la suspensión puede soportar alguna tensión externa (inicio del límite elástico).

$$\tau = \tau_c \left(\frac{\frac{\Phi}{\Phi_c} - 1}{1 - \frac{\Phi}{\Phi_c}} \right)^{vp} \quad \text{Ecuación 26}$$

 Mueller et al. (2010)

Establece una relación a partir de experimentos analógicos, determinando que el límite elástico se alcanza cuando el esfuerzo aplicado es suficiente para hacer que la red de partículas se rompa, más allá del cual, la suspensión fluye viscosamente. El límite elástico incrementa al aumentar el volumen de la fracción de partículas y sus datos para $\tau(\phi)$ se describen en la relación de Maron-Pierce Ec. 27, donde τ^* es un parámetro de ajuste; físicamente es el valor del límite elástico en $\phi = \phi_m (1 - \sqrt{2}/2)$ y está relacionado con el tamaño de las esferas.

$$\tau = \tau^* \left(\left(1 - \frac{\Phi}{\Phi_m} \right)^2 - 1 \right) \quad \text{Ecuación 27}$$

 Sehlke et al. 2014

Corresponde a uno de los modelos más recientes con experimentos de laboratorio en base a lava refundida, siendo Φ la fracción cristalina en el flujo. El trabajo demuestra una sensibilidad de estimaciones del límite elástico al método utilizado, y sugiere que una relación exponencial puede ser la más apropiada. La ecuación únicamente depende del contenido de cristales en la fracción de muestra Φ y puede ser utilizado en el modelado de lavas basálticas hawaianas y de composiciones similares.

$$\tau = 1.25e^{12.93\Phi_c} \quad \text{Ecuación 28}$$

CAPITULO IV

4. METODOLOGÍA

El presente capítulo hace referencia a la metodología utilizada para entender la evolución reológica y dinámica de los flujos de lava del volcán a lo largo del tiempo, a través de muestras representativas de cada fase eruptiva y de dos flujos de lava con muestras tomadas en su trayecto y medición morfológica. Esta sección se divide en 3 partes importantes que corresponden a la información de muestras, análisis de laboratorio y análisis reológico.

4.1. Información de muestras

4.1.1. Recopilación de información bibliográfica

Bibliográficamente para este proyecto se cuenta con muestras de Samaniego et al. (2008), Vallejo (2017) y Estrella (2021), indicando muestras de roca de LF1 hasta LF25 de 82 flujos que hasta la actualidad (diciembre 2022) ha emitido el volcán, dando un total de 15 muestras proporcionadas por el IG-EPN (Fig. 24; Tabla 2).

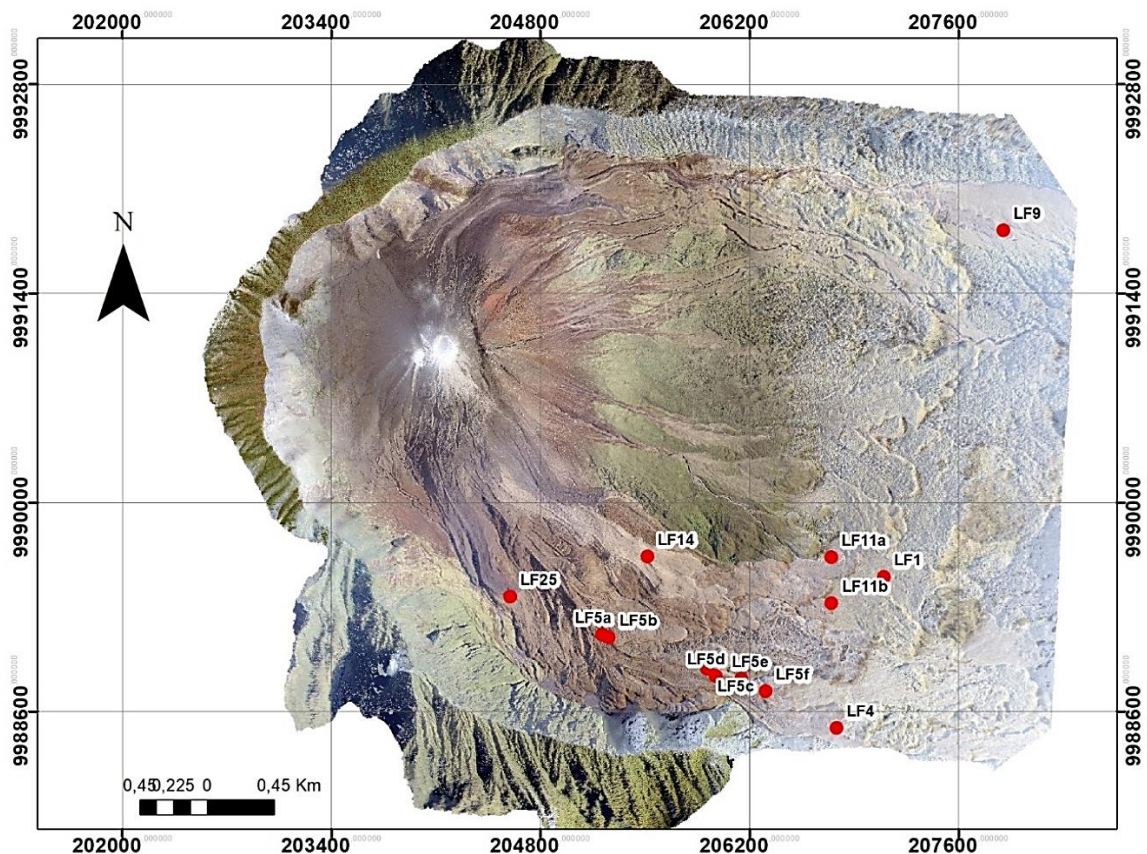


Figura 24: Mapa de ubicación en UTM WGS84/18S de las muestras proporcionadas por el IGEPN. Puntos rojos marcan la ubicación de las muestras de los flujos de lava. Letras negras indican el Nro. del flujo de lava señalado en la Tabla 2.

A continuación, se presenta la tabla de información de los recursos bibliográficos proporcionados por el IG-EPN y su respectivo análisis en el proyecto (Tabla 2). El Nro. de flujo de lava y el Código representan la numeración y nomenclatura utilizadas en el trabajo bibliográfico de donde fueron obtenidas.

Tabla 2
Información de muestras de flujos de lava del volcán El Reventador recolectadas bibliográficamente de diferentes autores.

Nro. de muestras	Fuente	Nro. de flujo de lava	Código	Recurso/Información disponible			Análisis realizado en este proyecto	
				Lámina delgada	Geoquímica elementos mayores	Petrografía	Petrográfico	Reológico
1	<i>Samaniego et al., (2008)</i> <i>Estrella (2021)</i>	LF1	REV-43	X	X	X		X
2	<i>Vallejo (2017)</i>	LF4	M1	X	X		X	X
3	<i>Vallejo (2017)</i>	LF5a	M7	X	X		X	X
4	<i>Vallejo (2017)</i>	LF5b	M8	X	X		X	X
5	<i>Vallejo (2017)</i>	LF5c-a	M2A	X	X		X	X
6	<i>Vallejo (2017)</i>	LF5c-b	M2B	X	X		X	X
7	<i>Vallejo (2017)</i>	LF5d	M10	X	X		X	X
8	<i>Vallejo (2017)</i>	LF5e	M11	X	X		X	X
9	<i>Vallejo (2017)</i>	LF5f	M12	X	X		X	X
10	<i>Samaniego et al. (2008)</i>	LF5	REV-58	X	X		X	X
11	<i>Vallejo (2017)</i>	LF9-REV	M13	X	X		X	X
12	<i>Vallejo (2017)</i>	LF11a	M4	X	X		X	X
13	<i>Vallejo (2017)</i>	LF11b	M5	X	X		X	X
14	<i>Vallejo (2017)</i>	LF14	M3	X	X		X	X
15	<i>Vallejo (2017)</i>	LF25	M6	X	X		X	X

4.1.2. Trabajo de campo

El trabajo de campo se concentró en la parte norte del volcán, precisamente en el flujo de lava LF9 cuyos límites han sido definidos con anterioridad, y por su cercanía también se optó por

orientarse al frente de lava de LF82, con el fin de tomar muestras de los flujos para posteriores análisis. La salida de campo se realizó en un total de 5 días, que comprendieron: traslado de Quito hacia el volcán, trabajos en la zona norte del volcán y retorno desde el volcán hacia Quito. Para el trabajo en la zona norte del volcán, se contempló llegar a la base de Azuela donde sería el campamento, posterior muestreo de la lava desde la cota alta (última zona expuesta del flujo de lava) hacia la cota más baja (Fig. 3; 25a, b, c). Para el flujo de lava 5 (LF5), se utilizará los insumos disponibles de trabajos anteriores (ver Tabla 2).

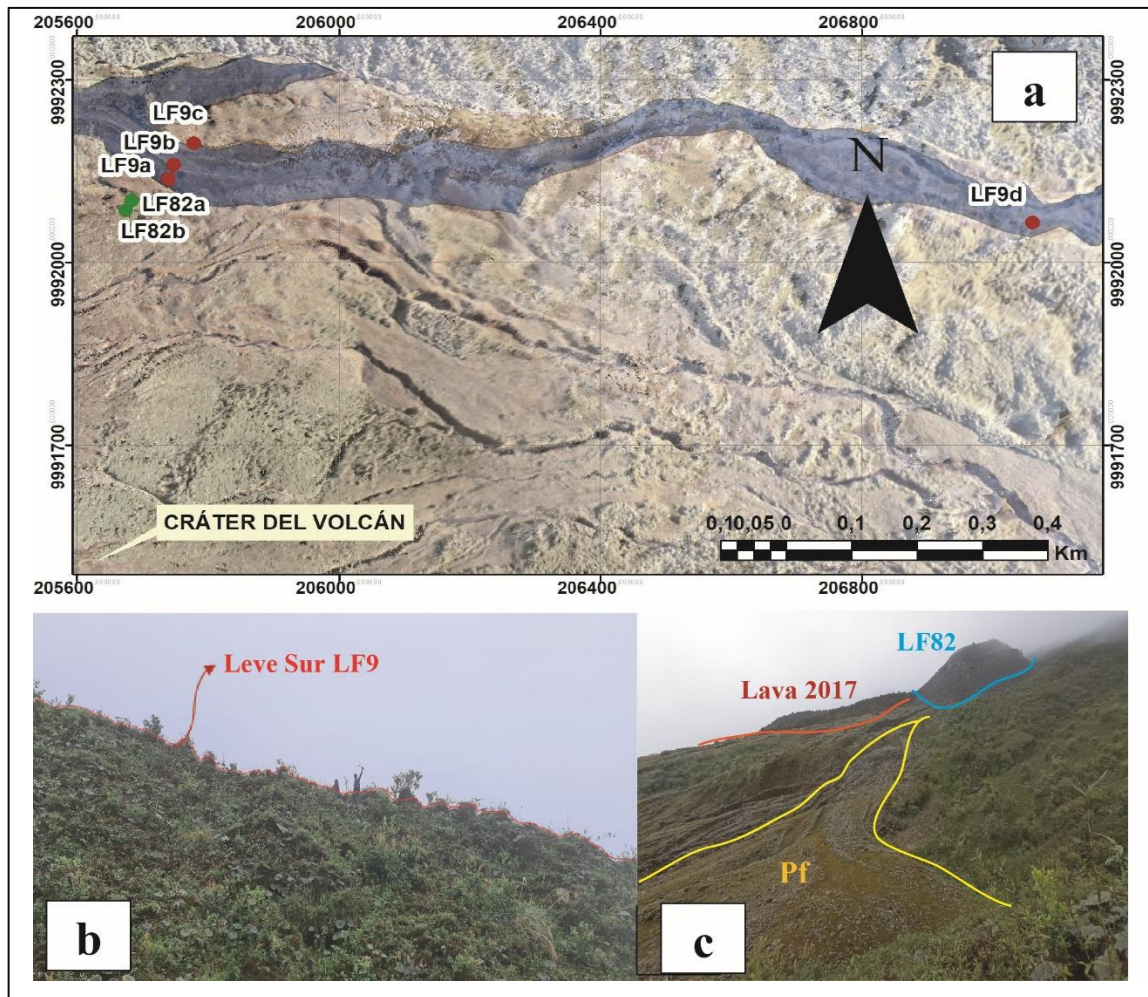


Figura 25: Localización de las muestras extraídas en la campaña de campo de noviembre 2021 (Sección norte).
a) Mapa de las muestras de roca obtenidas en la salida de campo, sección norte de LF9 y LF82, etiquetadas con el Nro. de flujo de lava. **b)** Fotografía tomada desde la posición del frente del flujo LF82 al flanco sur del flujo LF9. **c)** Fotografía de noviembre del 2021 de la posición de 3 flujos de lava emitidos por el volcán (LF82 azul, Lava 2017 rojo y Pf amarillo).

En la cota más alta donde se encuentra expuesta la LF9, se tomó muestras en el leve sur, centro y leve norte del mismo flujo, LF9a-LF9c. Otra muestra fue tomada en la cota más baja, LF9d. En total se consiguió 4 muestras de LF9 y 2 en el frente de la lava LF82 que

corresponde a uno de los flujos de lava más recientes (Fig. 25a, c; Tabla 3). Las muestras recolectadas a lo largo del flujo de lava se utilizan para restringir un modelo detallado de la reología transitoria en función del enfriamiento, la cristalización y la evolución de la composición, durante el emplazamiento (Chevrel et al., 2013).

A continuación, se describe las seis nuevas muestras y análisis obtenidos en el proyecto (Tabla 3).

Tabla 3

Nuevas muestras extraídas de los flujos de lava y analizadas en el presente proyecto.

Nro. de muestras	Fuente	Nro. De flujo de lava	Código	Recurso, información y análisis realizado en este proyecto				
				Lámina delgada	Geoquímica elementos mayores	Petrografía macro y microscópica	Harker - TAS	Reológico
1	<i>Proyecto</i>	LF9a	REV-108	X	X	X	X	X
2	<i>Proyecto</i>	LF9b	REV-109	X	X	X	X	X
3	<i>Proyecto</i>	LF9c	REV-110	X	X	X	X	X
4	<i>Proyecto</i>	LF9d	REV-111	X	X	X	X	X
5	<i>Proyecto</i>	LF82a	REV-106	X	X	X	X	X
6	<i>Proyecto</i>	LF82b	REV-107	X	X	X	X	X

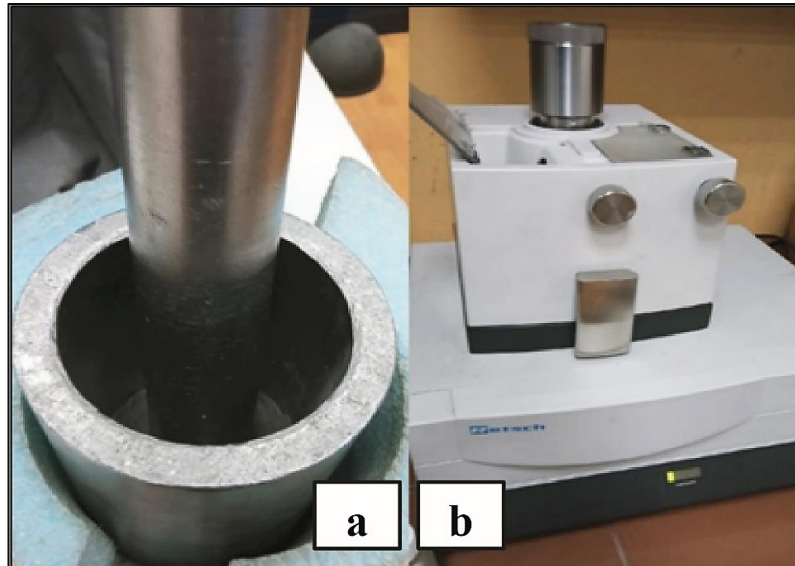
4.2. Análisis de laboratorio

4.2.1. Preparación de muestras

Las muestras de mano colectadas en la campaña de campo se colocan por separado en fundas de muestreo estériles, y éstas a su vez, se etiquetan dependiendo del flujo de lava y la posición donde se extraen. Posterior a ello, las muestras se llevan al Departamento de Geología de la Escuela Politécnica Nacional, lugar, donde se solicitó el equipo “Cortadora de disco de diamante Metkon”, para que la superficie de cada muestra fuera cortada y pulida, con el fin de la eliminación de cualquier rastro de vegetación y oxidación, por efecto de que son flujos emitidos en el 2005 y 2007. Así también, con este equipo cada muestra se divide en una sección de roca para moler y otra sección más uniforme para la realización de una lámina delgada.

La sección de roca para moler se utiliza para análisis químico. Donde la muestra se tritura con una herramienta de acero templado que contaminan con 0.1% de Fe (Fig. 26a) (Reyes Guzmán, 2019), hasta llegar a tamaños granulares, para así, llevar la muestra triturada a una moladora de ágata, instrumento perteneciente al Instituto Geofísico EPN (Fig. 26b), que

pulveriza por completo la muestra. Se repite este procedimiento para cada muestra. La sección más uniforme, se utiliza para análisis petrográfico, donde se cortaron las 6 muestras en forma rectangular de 5 cm de largo por 3 cm de ancho y 1 cm de espesor, generando chips de roca para lámina delgada.



*Figura 26: Equipo necesario para la pulverización de las muestras para la realización de análisis geoquímicos.
a) Moledora de acero templado. b) Moledora de ágata IG-EPN.*

Las seis muestras pulverizadas y sus correspondientes chips para preparación de lámina delgada se etiquetan con sus códigos respectivos y se los envía al Laboratorio Magmas et Volcans (LMV) en la Universidad Clermont Auvergne en Clermont-Ferrand, Francia para obtener la información química de elementos mayores y traza, y las láminas delgadas.

4.2.2. Análisis geoquímico

La información geoquímica de las 6 muestras se adquirió mediante los métodos de espectroscopia de emisión acoplada al plasma atómico (ICP-AES) y espectrometría de emisión de flama atómica en el laboratorio de la Universidad Bretagne Occidentale, Francia. Donde se desarrolló geoquímica de elementos mayores en roca total medidas en % peso y de elementos traza en ppm (partes por millón).

Con esta información mediante el software Icpet se elabora diagramas Harker, los cuales permiten comparar la información de diferentes muestras entre su contenido en SiO₂ con cada óxido mayor, y TAS (Total Alkali Silica), diagrama el cual, permite definir el tipo de roca. Estos diagramas indican la evolución de SiO₂ que presenta cada muestra a lo largo del flujo y en cada fase eruptiva.

4.2.3. Análisis Petrográfico macro y microscópico

Se realizó una descripción macroscópica de las seis muestras de mano de los flujos de lava obtenidas en la campaña de campo, con una lupa de 10x de aumento, para caracterizar las propiedades mineralógicas, textura y estructura de la roca. Este análisis se realiza principalmente, porque se observa a simple vista la variabilidad y orientación de los minerales en la muestra.

Para el análisis microscópico, una vez obtenidas las 19 láminas delgadas (desarrolladas en el proyecto y las proporcionadas por el personal del IG- EPN) se observaron y analizaron bajo el microscopio petrográfico ZEISS Scope. A1 (Fig. 27), donde se definieron las texturas, estructuras y mineralogía presente. También se realizó un conteo modal, con una malla de 200 puntos por lámina, desplazando manualmente la lámina 2.2 mm a lo largo y 1.4 mm a lo ancho entre cada punto.

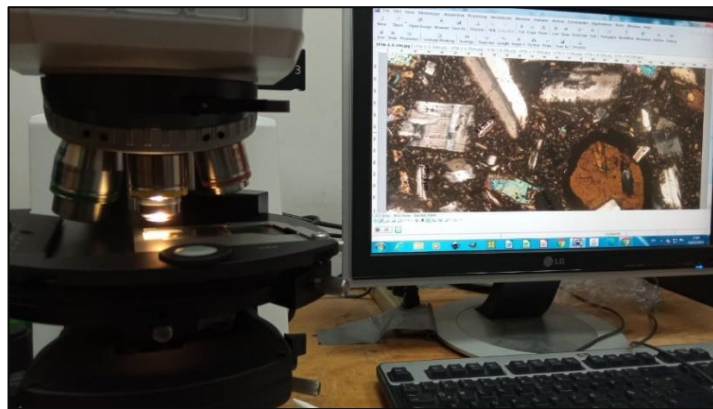


Figura 27: Equipo necesario para el conteo modal de las muestras en lamina delgada. Microscopio ZEISS Scope A1.

Este análisis petrográfico permitió cuantificar los componentes de cada muestra en % de cristales, % de matriz y % de vesículas, valores necesarios para los cálculos posteriores.

4.3. Análisis reológico

4.3.1. Parámetros reológicos en base a las dimensiones morfológicas

Para el desarrollo del análisis morfológico se utilizó un modelo de elevación digital (DEM) del volcán que cubre la mayoría de los flujos de lava considerados en este estudio, correspondiente a octubre del 2013 el cual fue desarrollado por Diefenbach. Este DEM tiene un área de 24.19 km² y tiene una resolución de 0.86 m. Los recientes DEMs han sido

realizados con un énfasis en determinar los cambios morfológicos a nivel de la cumbre y no son utilizados por no cubrir las necesidades básicas de este estudio.

Por parte del IG-EPN los polígonos en archivos .shp de los flujos de lava desde el 2002 hasta la actualidad fueron proporcionados, tomando relevancia los emitidos en el 2005 y 2007, que son LF5 y LF9 respectivamente (Fig. 28). Éstos fueron realizados en base a la proyección de imágenes térmicas sobre el DEM, ortofotos y mapa de pendientes, generando así, los bordes de cada flujo (Vallejo, 2017).

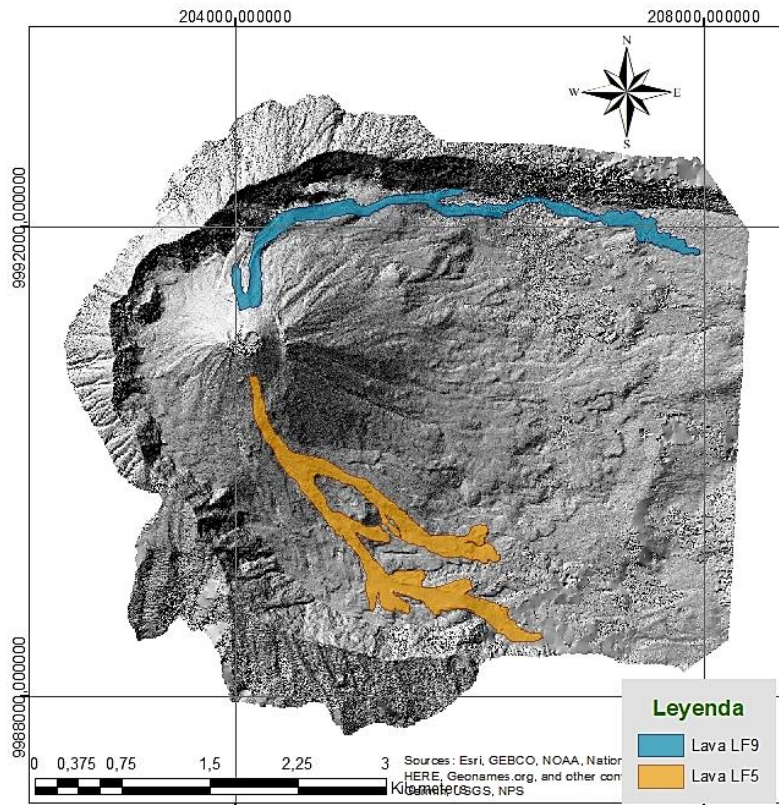


Figura 28: Flujos de lava FL5 y FL9 del volcán El Reventador. Mapa desarrollado en ArcMap en el año 2021 con los polígonos proporcionados por Vallejo (2017).

4.3.1.1 Estimación del error de los polígonos

Con el fin de determinar un error en la delimitación de los polígonos proporcionados y correspondientes a los dos flujos de lava, se realizó un análisis estadístico. Este error hace referencia al error humano causado al momento de la limitación del borde del campo de lava (Calderón, 2022). El valor se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Error área} = \text{Error ubicación} * \text{Perímetro} \quad \text{Ecuación 29}$$

La base del error humano se desarrolla mediante la metodología aplicada por Calderón (2022) donde señala la participación de 12 voluntarios para trazar el borde de los flujos de lava a estudiar (Fig. 29,30). Así también, proporciona a los voluntarios imágenes Ráster de la zona de estudio donde comprenden Ortofotos, Modelo de Elevación Digital (DEM) y modelo de pendientes. Esto permite que el participante pueda guiarse mejor la ubicación del borde del flujo con estas 3 imágenes, debido a que llega a ser muy difícil observar con claridad por la acumulación de flujos principalmente en el flanco sur.

A continuación, se presenta el esquema trazado por los participantes y la autora, del borde del flujo de lava LF5. Éste posee 3 rasgos diferentes (rojo llano, amarillo y negro), los cuales simbolizan la similitud y diferencia de los bordes. Nueve participantes y la autora (borde rojo) generaron un trazo muy similar, por lo cual, se colocó en un mismo tono; dos participantes (borde amarillo y negro) presentan mayor diferencia en la realización del polígono.

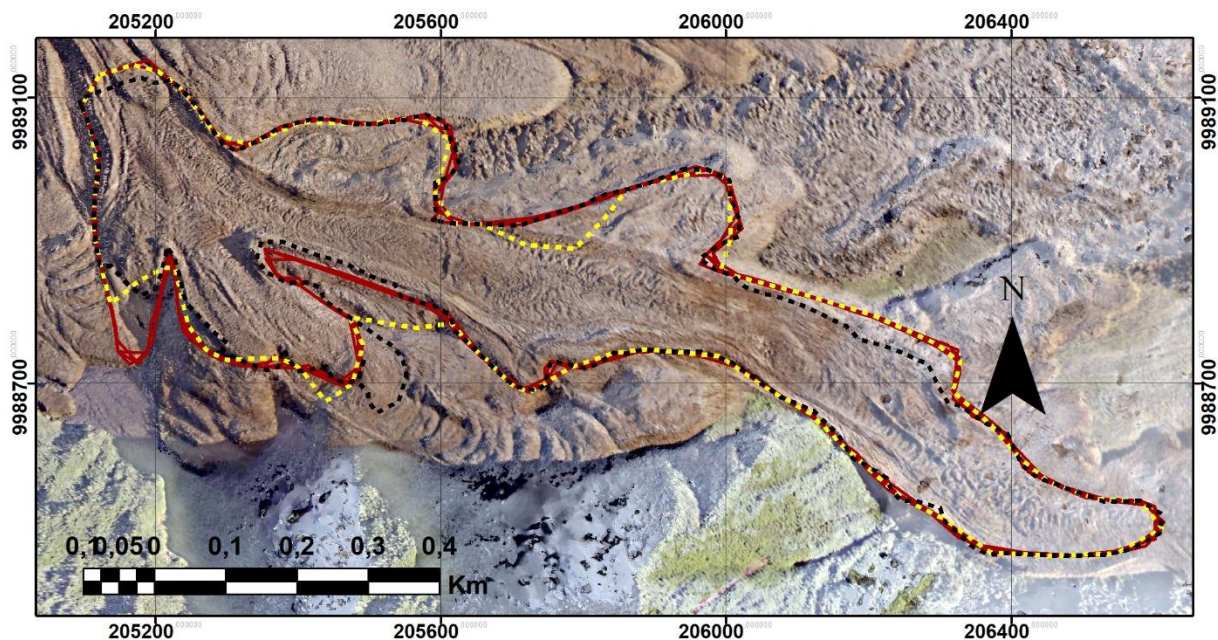


Figura 29: Error de ubicación campo de lava LF5. Polígonos trazados a lo largo de LF5 por 12 participantes para el cálculo del error de ubicación. Las líneas rojas marcan 10 trazos con mayor similitud. Línea amarilla y negra, representan los trazos de 2 participantes que presentan la mayor variación en comparación con los otros participantes.

Tanto la autora, como los participantes generaron 2 valores calculados en el GIS según sus mediciones (Tabla 4,5), el valor del área en m^2 y el valor del perímetro en m. Así también, se tomó 5 valores correspondientes al error de ubicación: 0,05, 0,1, 0,2, 0,3 y 0,35, para el respectivo cálculo del error del área. Posterior a ello, se calculó el Error Absoluto (EA) y Error Relativo (ER) mediante la siguiente ecuación:

$$EA^* = /X - x_i /$$

Ecuación 30

X = Promedio del área medido por los 12 participantes

x_i = Valor del área medido por cada participante

EA = Promedio total del error absoluto parcial EA^* de los 12 participantes.

El valor promedio del Error Absoluto (EA) es comparado con el valor promedio del área (E), para conseguir el error de ubicación más cercano.

Los resultados para el flujo LF5 presentes en la Tabla 4, indican un valor de error similar al utilizar el error de ubicación de 0.1 con respecto al error absoluto, indicando que ese valor es el que más se apega al análisis estadístico experimental. Justificando el valor de 0.1 utilizado para los posteriores cálculos realizados en el flujo LF5.

Tabla 4

Cálculo del Error del área (E), Error Absoluto (EA) y Error Relativo (ER) de LF5 (Fig. 29)

CÁLCULO DE ERRORES LF5									
Participantes	Área m ²	Perímetro m	E (0.05m)	E (0.1m)	E (0.2m)	E (0.3m)	E (0.35m)	EA	ER
Autora	329870.0	4614.5	230.7	461.5	922.9	1384.4	1615.1	220.2	0.07%
Vallejo (2017)	329723.2	4588.0	229.4	458.8	917.6	1376.4	1605.8	73.4	0.02%
1	329411.0	4666.0	233.3	466.6	933.2	1399.8	1633.1	238.8	0.07%
2	330424.0	4645.0	232.3	464.5	929.0	1393.5	1625.8	774.2	0.23%
3	329576.4	4561.5	228.1	456.2	912.3	1368.5	1596.5	73.4	0.02%
4	329429.6	4535.0	226.8	453.5	907.0	1360.5	1587.3	220.2	0.07%
5	329282.8	4508.5	225.4	450.9	901.7	1352.6	1578.0	367.0	0.11%
6	329136.0	4482.0	224.1	448.2	896.4	1344.6	1568.7	513.8	0.16%
7	328989.2	4455.5	222.8	445.6	891.1	1336.7	1559.4	660.6	0.20%
8	328842.4	4429.0	221.5	442.9	885.8	1328.7	1550.2	807.4	0.25%
9 (borde amarillo)	330519.0	4727.0	236.4	472.7	945.4	1418.1	1654.5	869.2	0.26%
10 (borde negro)	330594.0	4685.0	234.3	468.5	937.0	1405.5	1639.8	944.2	0.29%
PROMEDIO X	329649.8	4574.8	228.7	457.5	915.0	1372.4	1601.2	480.2	0.15%

Al igual que el flujo LF5, se realizó el trazo del bode del flujo de LF9. A continuación, se presenta el esquema trazado por el autor y los participantes donde, nueve participantes y la autora (borde rojo) generaron un trazo muy similar, y dos participantes (borde amarillo y negro) presentan mayor diferencia en la realización del polígono.

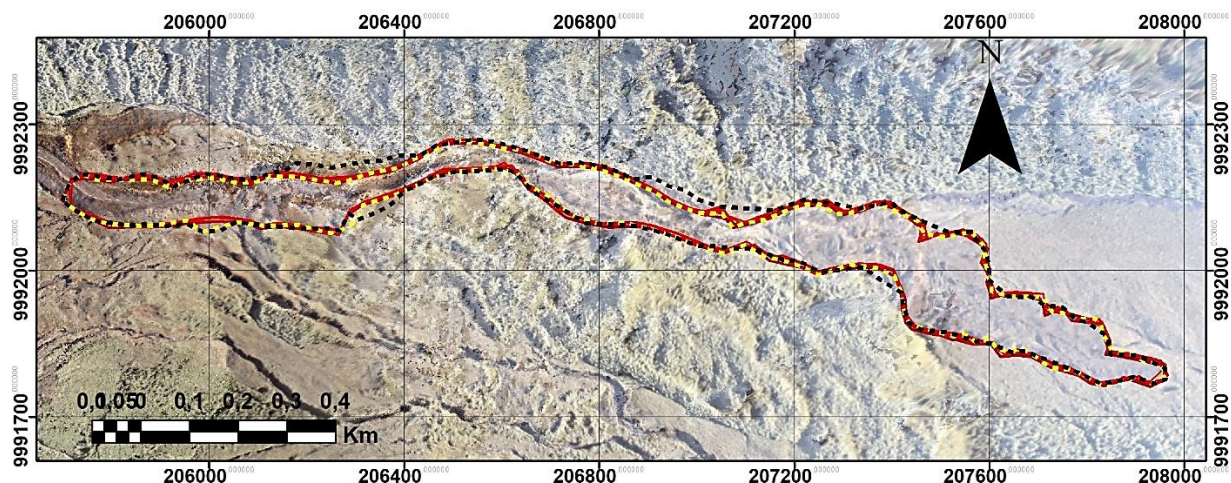


Figura 30: Error de ubicación campo de lava LF9. Polígonos trazados a lo largo de LF9 por 12 participantes para el cálculo del error de ubicación. Las líneas rojas marcan 10 trazos con mayor similitud. Línea amarilla y negra, representan los trazos de 2 participantes que presentan la mayor variación en comparación con los otros participantes.

Los resultados de la Tabla 5 indican un valor de error similar al utilizar el error de ubicación de 0.35 con respecto al error absoluto, indicando que ese valor es el que más se apega al análisis estadístico experimental. Justificando el valor de 0.35 utilizado para los posteriores cálculos realizados en el flujo LF9.

*Tabla 5
Cálculo del Error del área (E), Error Absoluto (EA) y Error Relativo (ER) de LF9 (Fig. 30)*

CÁLCULO DE ERRORES LF9									
Participantes	Área m ²	Perímetro m	E (0.05m)	E (0.1m)	E (0.2m)	E (0.3m)	E (0.35m)	EA	ER
Autor	217533.0	5040.8	252.0	504.1	1008.2	1512.2	1764.3	740.7	0.3%
Vallejo (2017)	217536.0	5127.0	256.4	512.7	1025.4	1538.1	1794.5	740.7	0.3%
1 (borde amarillo)	219439.0	5141.0	257.1	514.1	1028.2	1542.3	1799.4	2643.7	1.2%
2 (borde negro)	211505.0	5033.0	251.7	503.3	1006.6	1509.9	1761.6	5290.3	2.5%
3	215991.0	5120.0	256.0	512.0	1024.0	1536.0	1792.0	804.3	0.4%
4	218338.0	5118.0	255.9	511.8	1023.6	1535.4	1791.3	1542.7	0.7%
5	219442.0	5011.8	250.6	501.2	1002.4	1503.5	1754.1	2646.7	1.2%
6	215103.3	5040.8	252.0	504.1	1008.2	1512.2	1764.3	1692.0	0.8%
7	217827.3	5033.0	251.7	503.3	1006.6	1509.9	1761.6	1032.0	0.5%
8	214551.3	5024.8	251.2	502.5	1005.0	1507.4	1758.7	2244.0	1.0%
9	216275.3	5120.0	256.0	512.0	1024.0	1536.0	1792.0	520.0	0.2%
10	217999.3	5118.0	255.9	511.8	1023.6	1535.4	1791.3	1204.0	0.6%
PROMEDIO	216795.3	5077.4	253.9	507.7	1015.5	1523.2	1777.1	1758.4	1%

A continuación, se plotó los polígonos de las lavas trazados y el DEM del área en el software QGis 3.0, un sistema de información geográfica gratuito para obtener la posición y elevación de un cuerpo. Y mediante la herramienta "Terrain Profile se trazó entre 26 y 29 perfiles topográficos de las lavas LF5 y LF9 con información de su longitud y altitud a lo largo del tramo perpendicular al eje del flujo (Fig. 31 a,b).

En base a los perfiles realizados, se escogió de 8 a 10 que aún conserven la morfología desarrollada en el momento que se emitió, debido que, a lo largo de tiempo, la lava presentaba varios rastros de erosión, los cuales estaban reflejados en muchos de los perfiles trazados en el flujo. Para cada perfil seleccionado se agregó 2 a cada lado, dando un total de 5, separados a una distancia de ~10 m (Fig. 31c). Con ello, se calculó su espesor y ancho para obtener el espesor promedio de cada perfil y obtener valores más exactos.

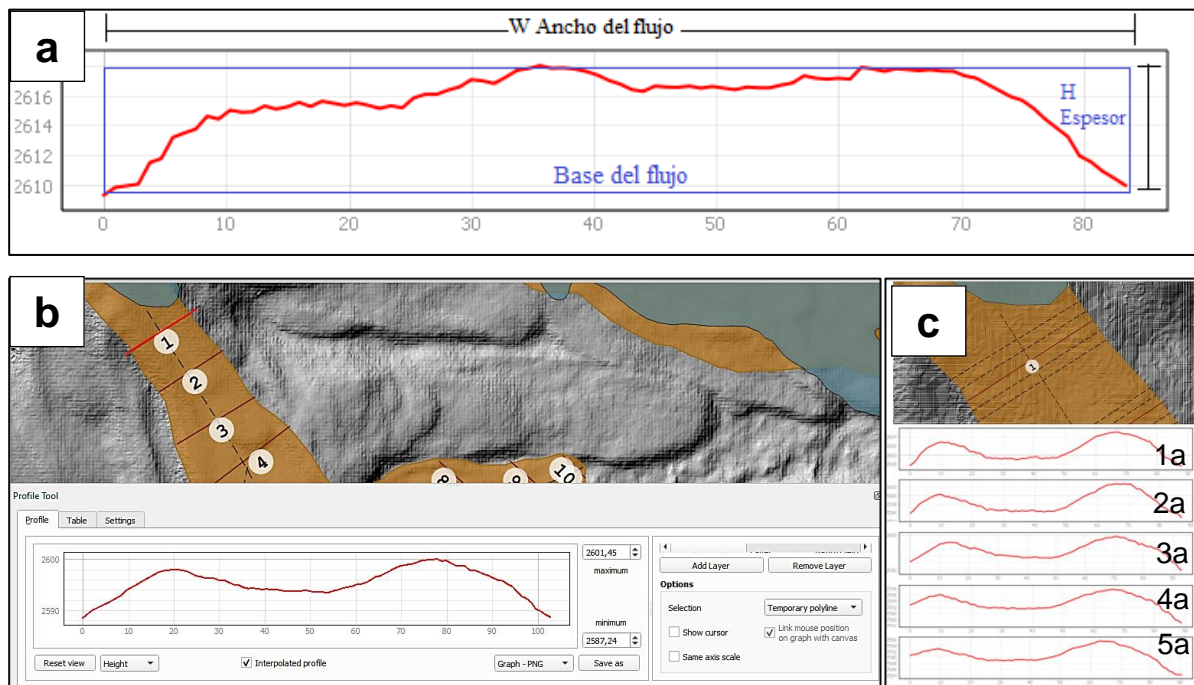


Figura 31: Mediciones morfológicas mediante el Modelo de Elevación digital del volcán. a) Medidas de Ancho W , base B y espesor H , de cada perfil trazado a lo largo del flujo (Perfil correspondiente P7-LF9) b) Herramienta Terrain profile en QGis, el cual, permite realizar perfiles perpendiculares a lo largo del eje del flujo de lava. Perfil 1 principal (Corresponde P1-LF5) c) 5 perfiles secundarios para el promedio del resultado final. Perfiles desarrollados en Qgis 3.0.

Así también, mediante el desarrollo de estos 5 perfiles auxiliares, se calculó el error de cada parámetro reológico perteneciente a cada perfil principal, donde se utilizó la fórmula general para la propagación de errores (E_q) (Ec. 31), la misma que fue descompuesta para las ecuaciones de viscosidad, límite elástico y velocidad, utilizados.

$$Eq = \sqrt{\left(\frac{\delta f}{\delta x} Ex\right)^2 + \left(\frac{\delta f}{\delta y} Ey\right)^2 + \dots + \left(\frac{\delta f}{\delta z} Ez\right)^2}$$

Ecuación 31

Para el cálculo de la viscosidad total y límite elástico (Tabla 6, 7), se deben tomar en cuenta 3 valores promedios y una variable para cada grupo de 5 perfiles a lo largo del flujo, los cuales son: el ancho, el espesor, el ángulo de la pendiente, estos valores se obtienen mediante la medición en la herramienta (Terrain Profile - QGIS) y como variable, la tasa de efusión volumétrica (Q). Para obtener la tasa de efusión volumétrica se utilizó la Ec.2, donde se precisa de los valores totales de ancho, espesor y longitud del flujo, así también el valor de $3 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ que corresponde a la difusividad térmica de la andesita basáltica. Con los valores resultantes se procede a adquirir la viscosidad y límite elástico para cada perfil utilizando las ecuaciones Ec. 3 y Ec. 5; n es una constante adimensional con valor de 3, ρ y g corresponden a la densidad de lavas andesitas basálticas a andesitas con valor de $2600 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (Self et al., 1978; Brown, et al., 1987; Stagpoole, 1999; Malfait et al., 2014) y la aceleración de la gravedad con valor de $9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, respectivamente. Se considera que el flujo se está desacelerando debido al límite elástico de una corteza que está creciendo por enfriamiento conductivo y permite estimar la duración del emplazamiento de un flujo.

Tabla 6

Simbología de las variables aplicadas en las ecuaciones para análisis morfológico.

Variable	Unidad	Definición
Gz		Número de Grätz
<i>u</i>	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Velocidad media del flujo
<i>L</i>	m	Longitud del flujo de lava
κ	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	difusividad térmica
<i>de</i>	m	Diámetro equivalente del flujo
<i>Q</i>	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	Tasa de efusión volumétrica
<i>H</i>	m	Altura de flujo
<i>W</i>	m	Ancho de flujo
<i>w</i>	m	Ancho de flujo menos anchos de los diques estacionarios del canal
ρ	$\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Densidad de lava
<i>g</i>	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	Aceleración gravitacional
α	°	Pendiente de la superficie subyacente
<i>n</i>		Constante establecida en 4 para flujos estrechos
η	Pa.s	Viscosidad de flujo de la ecuación de Jeffreys
<i>T0</i>	Pa	Límite elástico considerando la pendiente subyacente

Para la realización los siguientes cálculos en base a la morfología se consideró al flujo de lava como un fluido newtoniano a Bingham (despreciando la inflación o deflación posterior al emplazamiento) (Harris y Rowland, 2015) donde la velocidad promedio del flujo se calcula mediante la ecuación de Walker (1973). Para esto se consideró un espesor de flujo promedio en base a las dimensiones morfológicas realizadas en el DEM, donde la geometría del flujo de la lava sobre una superficie inclinada dependerá de su viscosidad, densidad, tasa de efusión y gravedad, dadas por la ecuación de Jeffreys y posteriormente modificada por Nichols (1939) (Tabla 7).

Tabla 7
Ecuaciones utilizadas para el análisis reológico en base a la morfología

N	Parámetros	Ecuación	Autor
Ec.2	<i>Tasa de efusión</i>	$Q = uWH = \frac{GzkLW}{H} = \frac{pgH^2 \sin\alpha}{3\eta} WH$	Walker (1973) ; Pinkerton (1987) ; Pinkerton y Wilson (1994) ; Pinkerton y Sparks (1976)
Ec.2	<i>Velocidad</i>	$\mu = \frac{pgH^2 \sin\alpha}{3\eta}$	Jeffreys (1925)
Ec.3	<i>Viscosidad</i>	$\eta_{flow} = \frac{pgH^3 W \sin\alpha}{nQ}$	Dada por la ecuación de Jeffreys y posteriormente modificada por Nichols (1939)
Ec.5	<i>Límite elástico</i>	$\tau_{0flow, 1} = pgH \sin\alpha$	Hulme (1974)

4.3.2. Parámetros reológicos en base a la composición

4.3.2.1. Viscosidad total

Con el objetivo de reproducir los flujos de lava, anteriormente se han hecho suposiciones en las mediciones acerca de cómo se pueden comportar en base a dos parámetros reológicos: viscosidad y límite elástico (Vallejo, 2017). De esta forma, se ha determinado que los flujos de lava pueden comportarse como newtonianos (Huppert et al. 1982; Tallarico y Dragoni 1999) o mucho más complejas como Bingham. La viscosidad de la lava se calculó asumiendo una mezcla de masa fundida y cristales con base en las características petrográficas de las muestras.

Para obtener la viscosidad de los flujos de lava complejos, se siguió el proceso investigado en Vallejo (2017) el cual consiste que, para conocer la viscosidad total del flujo se debe obtener datos de la química para la viscosidad fluida y contenido de cristales de las muestras para la viscosidad relativa.

Tabla 8

Simbología de las variables aplicadas en las ecuaciones para análisis reológico en base a la geoquímica y cristales

Variable	Unidad	Definición
ϕ		Fracción volumétrica de partículas
r		Relación de aspecto de las partículas
γ	s^{-1}	Tasa de deformación
ϕ_m		Fracción máxima de empaquetado aleatorio
B		coeficiente de Einstein (o viscosidad intrínseca)
ϕ_C		Fracción de volumen de partículas gruesas
ϕ_f		Fracción de volumen de partículas finas
ϕ^*		Fracción sólida crítica al inicio del incremento exponencial
ξ		Parámetros empíricos que varían con la velocidad de deformación y la forma de las partículas
γ, δ, ϵ		Cantidad relativa de partículas más finas con respecto a las partículas más gruesas
x		Constantes según componentes químicos (Giordano et al., 2008)
A, C, B		

4.3.2.1.1. Viscosidad relativa

En la estimación de la *viscosidad relativa* (η_r) para este trabajo se tomó la información de 4 modelos pre-existentes y que corresponde a los desarrollados por Einstein, 1906; Einstein y Roscoe, 1952; Krieger y Dougherty, 1959; y Costa et al., 2009; los cuales poseen ecuaciones en función del contenido de cristales Φ (Tabla 9).

Así también, en Costa et al. (2009) esta viscosidad depende de la tasa de deformación $\dot{\epsilon}$. Estos valores varían dependiendo el tipo de flujo del que se va a analizar. Por ejemplo, la formulación propuesta considera la existencia de un campo reológico pseudo-Binghamiano para valores de $\dot{\epsilon} > 10^{-3} s^{-1}$. Las transiciones reológicas que ocurren con el aumento de la velocidad de deformación de un comportamiento newtoniano a no newtoniano y finalmente pseudo-binghamiano, influyen en los parámetros de la función F .

Los parámetros ξ , γ y δ son casi constantes hasta las transición al comportamiento no newtoniano, y pseudo-Bingham (Tabla 10). Los parámetros de la función F (Ec.17.1) fueron descritos empíricamente por Caricchi et al. (2007) en función de $\dot{\epsilon}$ (Tabla 10).

Tabla 9

Ecuaciones utilizadas para el análisis de viscosidad en base a la geoquímica y fracción cristalina

N	Parámetros	Ecuación	Autor
Ec.14		$\eta r = 1 + B\Phi$	Einstein (1906)
Ec.15	Viscosidad relativa	$\eta r = \left(1 - \frac{\Phi}{\Phi_m}\right)^{-2.5}$	Einstein & Roscoe (1952)
Ec.16		$\eta r = \left(1 - \frac{\Phi}{\Phi_m}\right)^{-B\Phi_m}$	Krieger y Dougherty (1959)
Ec.17		$\eta r = \frac{1 + \left(\frac{\Phi}{\Phi_m}\right)^\delta}{[1 - F]^{B\Phi_m}}$	Costa et al. (2009)
Ec.12	Viscosidad Fluida	$\text{Log } \eta f = A + \frac{B}{T(K) - C}$	Ecuación de Fulcher-Tammann de: Vogel (1921) , Fulcher, (1925) , Tammann y Hesse (1926) Mediante la utilización del modelo GRD (Giordano et al., 2008)
Ec.9	Viscosidad Total	$\eta = \eta r(\Phi, \beta) * \eta f(X, T)$	Harris et al. (2015b)
Ec.17.1	F	$F = (1 - \xi) \text{erf} \left[\frac{\sqrt{\pi}}{2(1 - \xi)} \frac{\Phi}{\Phi_m} \left(1 + \frac{\Phi^\nu}{\Phi_m^\nu}\right) \right]$	Costa et al. (2009)
Ec.17.2	δ	$\delta = A - \gamma$	Costa et al. (2009)

Tabla 10

Ecuaciones utilizadas para la obtención de parámetros de la viscosidad propuestos por Caricchi et al., 2007.

TanH representa la tangente hiperbólica.

$\varphi_{\max} = 0.066499 * \text{tanH} (0.913424 * \log_{10} (\dot{\epsilon}) + 3.850623) + 0.591806$	Ecuación 32
$\delta = -6.301095 * \text{tanH} (0.818496 * \log_{10} (\dot{\epsilon}) + 2.86) + 7.462405$	Ecuación 33
$\alpha = -0.00378 * \text{tanH} (1.148101 * \log_{10} (\dot{\epsilon}) + 3.92) + 0.999572$	Ecuación 34
$\gamma = 3.987815 * \text{tanH} (0.8908 * \log_{10} (\dot{\epsilon}) + 3.24) + 5.099645$	Ecuación 35

4.3.2.1.2. Viscosidad Fluida

El modelo más representativo para calcular la viscosidad fluida (ηf) es el desarrollado por Giordano y Dingwell (2003) y su posterior mejora por Giordano et al. (2006, 2008) (GRD) (Ec.12) <https://www.eoas.ubc.ca/~krussell/VISCOSITY/grdViscosity.html>. Representa el último modelo químico multicomponente para calcular la viscosidad de fundidos de silicato que contienen volátiles naturales. Este modelo ilustró la aplicación del modelo de Shaw, (1972) a una base de datos de viscosidades modernas para fundidos multicomponentes naturales

anhidros e hidratados donde, Shaw desarrolló un modelo predictivo alternativo para la viscosidad de fundidos geológicos. (Russell et al., 2022).

Este modelo depende de la composición química de óxidos de elementos mayores y de la temperatura. La geoquímica se obtuvo mediante los análisis previamente explicados en la sección 4.2.2. y la temperatura se determinó en base a los resultados del monitoreo térmico aplicados en los flujos de lava.

Es importante profundizar sobre los valores de la temperatura que se tomaron para los cálculos posteriores en este proyecto, donde realizo una búsqueda minuciosa de todos los registros térmicos aplicados durante la emisión de los flujos de lava. Estos registros fueron proporcionados por el IG-EPN, entidad que posee imágenes térmicas desde el 2002 hasta la actualidad, y éstas a su vez, indican la temperatura de fusión del flujo de lava activo. Cabe recalcar que, es importante que las imágenes se hayan tomado en el momento de emisión de los flujos de lava ya que al pasar el tiempo estos valores suelen disminuir por el enfriamiento no correspondiente a una temperatura de fusión real.

En el software ThermaCAM Researcher (ANEXO 7) se visualizó la temperatura presente de todos los flujos de lava tomadas en diferentes fechas. Sin embargo, muchas de las imágenes presentaban inconsistencias. Primero, no se tomaron en una proyección adecuada apuntada directamente al viento, y según técnicos del IG-EPN, éstas fueron tomadas en una posición oblicua durante la emisión, dando temperaturas más cercanas al frente de lava. Segundo, muchas de estas imágenes fueron tomadas dentro de un rango específico de temperatura, el cual no permitía que los flujos de lava puedan sobrepasar valores de temperatura de 300°C.

Teniendo en cuenta las dos inconsistencias anteriores, se seleccionó la temperatura de imágenes donde hayan sido capturadas en la fecha de emisión del flujo, en un rango adecuado y directamente proyectadas al viento del volcán, a diferentes distancias (1000, 1500 y 2000 m). Dando como mejor opción el valor de temperatura del flujo emitido el 17/06/2005 correspondiente a LF5, con valores de 737, 757 y 775.5 °C.

No fue posible establecer el valor de temperatura de LF9 mediante el análisis de las imágenes térmicas, debido a que éstas fueron tomadas en fechas posteriores a la emisión de este flujo y a su vez, en una posición no adecuada directamente proyectada al viento del volcán. Así también, para considerar una temperatura representativa a lo largo de la actividad eruptiva del volcán, se discurió en determinar una temperatura similar que exhiban la mayoría de los flujos de lava. Sin embargo, los registros térmicos, no establecen un valor dentro de un rango real para este tipo de lavas. Por lo tanto, todos los posteriores cálculos reológicos empleados en LF5, LF9 y a lo largo de las fases eruptivas se desarrollarán con el valor del flujo de lava

del 17/06/2005, considerando que la temperatura de fusión de un volcán debe ser similar a lo largo del proceso eruptivo.

En el artículo científico de Ridolfi et al. (2008) se concluye valores de temperatura de 850 a 952°C pertenecientes a una cámara de magma poco profunda de composición andesítica. Considerando que corresponden a temperaturas del reservorio, éstas indican que los flujos a superficie exhibirán menores temperaturas de fusión. A su vez, al analizar volcanes de composición similar a El Reventador, se determinó que uno de ellos, como es el volcán Santiaguillo en Guatemala con flujos andesíticos, marca temperaturas de fusión de 725°C (Hall, 1987) similar a las temperaturas tomadas en LF5. Con estos criterios se estableció que la temperatura tomada en LF5 representa muy bien a la actividad eruptiva de El Reventador, considerando una composición similar a lo largo de toda la actividad.

Para el desarrollo de la viscosidad total se considera el producto de la viscosidad fluida respecto a la viscosidad relativa en Pa.s (Harris et al., 2015b).

4.3.2.2. Límite elástico (τ)

Para el cálculo de este parámetro se optó por 3 modelos dependientes netamente de la fracción cristalina Φ . Ryerson et al. (1988) propuso calcular el límite elástico en función del ajuste experimental obtenido por cristalización de lava picrítica, en una expresión de ley de potencia. Esta relación es un primer paso para proporcionar un modelo para la predicción de límites elásticos en magmas toleíticos subliquidos que, puede funcionar para magmas de composición similar. Otro modelo es el de Mueller et al. (2010) donde establece una relación a partir de experimentos analógicos, determinando que el límite elástico se alcanza cuando el esfuerzo aplicado es suficiente para hacer que la red se rompa, más allá del cual, la suspensión fluye viscosamente. Y Sehlke et al. (2014) que corresponde al modelo más actual para el cálculo de este parámetro, similar al de Ryerson et al. (1988) (Tabla 11).

Tabla 11

Ecuaciones utilizadas para el análisis del límite elástico en base a la geoquímica y fracción cristalina

N	Parámetros	Ecuación	Autor
Ec.23		$\tau = 6500\Phi^{2.85}$	Ryerson et al. (1988)
Ec.27	Límite elástico	$\tau = \tau * \left(\left(1 - \frac{\Phi}{\Phi_m} \right)^2 - 1 \right)$	Mueller et al. (2010)
Ec.28		$\tau = 1.25e^{12.93\Phi c}$	Sehlke et al. (2014)

Las ecuaciones presentes se aplicarán para lavas de cada fase eruptiva hasta la actualidad, dando énfasis a las lavas LF5 y LF9 donde se determinará la evolución de la misma.

CAPÍTULO V

5. RESULTADOS

El presente capítulo indica el desarrollo mediante el cual, se estimó los valores de los diferentes parámetros reológicos en base a las mediciones morfológicas y a su composición.

5.1. Estimación de parámetros reológicos en base a la morfología

5.1.1. Parámetros reológicos lava LF5

Se trazaron un total de 25 perfiles transversales a lo largo del eje del flujo y se analizaron un total de 8 equidistantes a lo largo del flujo de LF5 (Fig.32), en cada uno de ellos se midió el ancho, el espesor y la longitud del flujo utilizando el DEM de octubre 2013 en el software QGis.

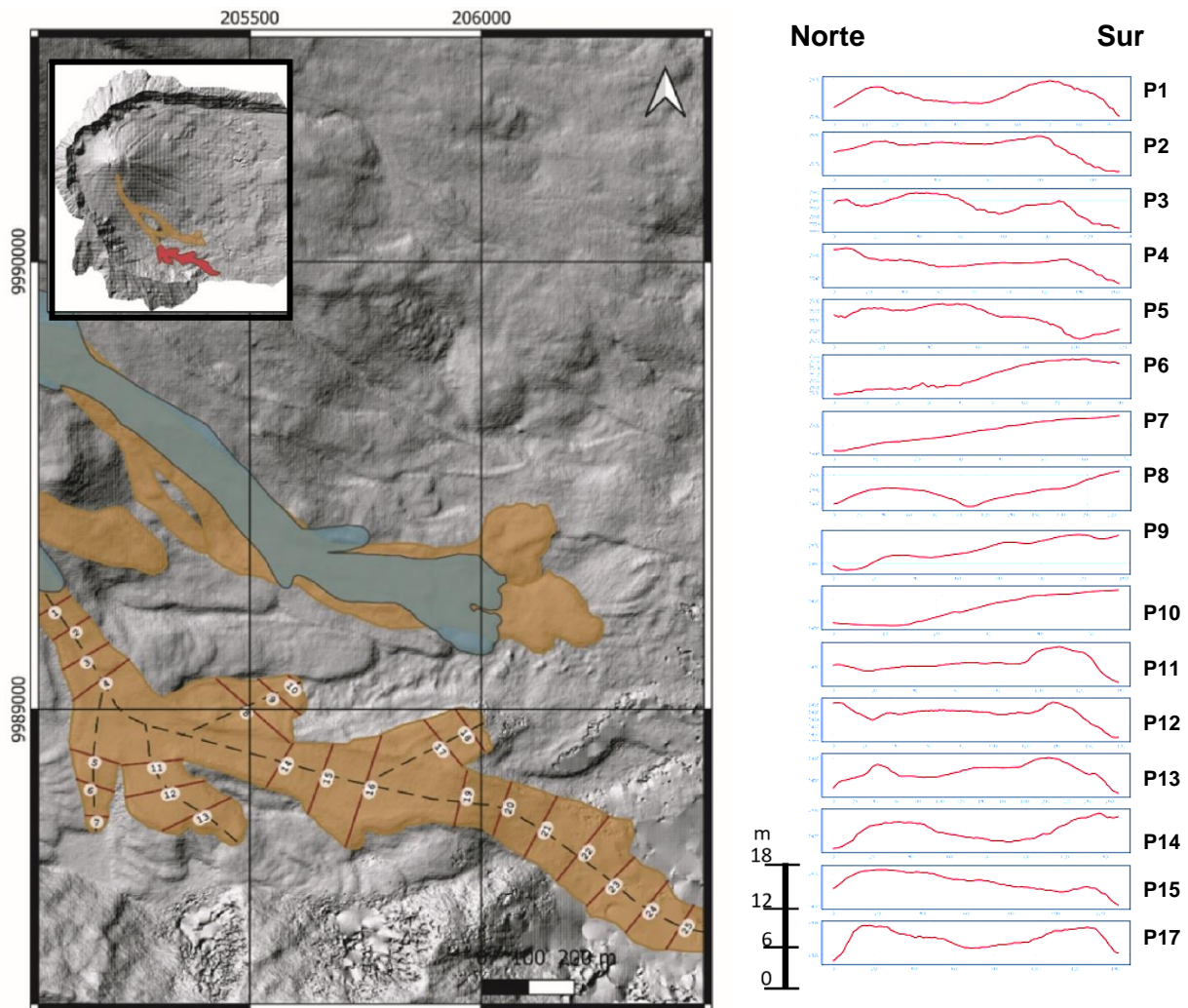


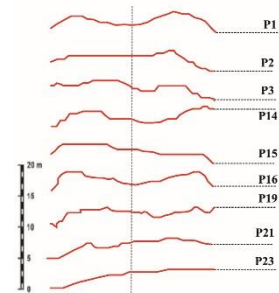
Figura 32: Perfiles a lo largo de la sección expuesta del flujo de lava LF5. Se consideró los perfiles que conservan su morfología cóncava correspondiente a la forma del flujo de lava. En total se tomó la información de ancho, espesor y pendiente de 8 perfiles.

El análisis se determinó en una longitud de 1779.0 ± 46 m correspondiente a todo el rango de perfiles trazados respecto a la longitud total de 3591.6 m del flujo. Como primeros resultados para el cálculo se obtuvo los valores de ancho, el cual varía de 75.4 a 257.6 m con un promedio de 132.64 ± 32 m; un espesor entre los 5 a 15 [m], con una media de 7.19 ± 3 m y una pendiente subyacente promedio del flujo de lava a lo largo del emplazamiento de $14.72^\circ \pm 0.3^\circ$.

Tabla 12

Resultados de la reología en base a los parámetros morfológicos de los perfiles trazados del flujo LF5 (Fig. 32). Se consideró 8 perfiles que conservan la forma cóncava necesaria para este análisis.

Constantes físicas							
Numero de Grätz Gz	300						
Difusividad térmica k [m ² /s]	3.00x10 ⁻⁷						
Densidad de la lava ρ [kg.m ⁻³]	2600						
Gravedad g [m/s ²]	9.8						
Dimensiones para cada perfil							
Perfil	Ancho del flujo W [m]	Espesor H [m]	Pendiente α [°]	Viscosidad η [Pa.s]	Velocidad v [m/s]	Límite elástico τ [Pa]	Velocidad de deformación $\dot{\gamma}$ [s ⁻¹]
P2	91.1 ± 1	7.5 ± 3.6	18.8 ± 2	42462006.9	0.004	61355.7	0.00144496
P3	110.95 ± 2.5	4.5 ± 4	13 ± 2	8035210.2	0.005	26065.2	0.00324387
P14	111.98 ± 3	6.2 ± 2.8	13 ± 2	20692449.3	0.004	35385.7	0.00171008
P15	145.8 ± 4.6	5.8 ± 3	13.45 ± 2	23068614.8	0.003	34509.2	0.00149594
P16	257.6 ± 17	15 ± 2.6	8.5 ± 0.8	444563667.6	0.001	56775.6	0.00012771
P19	124.5 ± 4	6.35 ± 6	24.6 ± 5.7	45541263.8	0.003	67104.5	0.00147349
P21	143.8 ± 8	7.2 ± 7	20.15 ± 10	62387485.5	0.002	62215.0	0.00099724
P23	75.4 ± 27	5 ± 3	5 ± 0.8	2832937.1	0.007	11280.9	0.00398205
Dimensiones para el flujo de lava							
Ancho del flujo W [m]	132.64 ± 32						
Espesor H [m]	7.19 ± 3						
Pendiente α [°]	14.72 ± 0.3						
Longitud L [m]	3591.6 ± 46						
Tasa de efusión Q [m ³ /s]	2.5 ± 1						
Viscosidad η [Pa.s]	8.12x10 ⁷ ±3.2x10 ²						
Velocidad v [m/s]	0.003625						
Límite elástico τ [Pa]	44336.5±134						
Tiempo emplazamiento[d]	~11 calculado. 43 (Vallejo comunicación personal)						



Para el cálculo de la reología en base a la morfología se consideró al flujo de lava como un fluido tipo Newtoniano a Bingham, en el que, los valores de la viscosidad y límite elástico dependerían netamente del ancho, espesor y pendiente del flujo a lo largo del emplazamiento. Las ecuaciones planteadas (Ec. 2,3,5) (Tabla 12) muestran los valores obtenidos de estos parámetros reológicos en cada perfil, de los cuales se obtendrá valores promedio y estos serán representativos a lo largo de todo el flujo. La medición y consiguiente cálculo dio como

resultado una tasa de efusión promedio resultante mediante Ec.2 de $2.5 \pm 1 \text{ m}^3/\text{s}$. El valor de la viscosidad del flujo obtenido usando la ecuación de Jeffreys y modificada por Nichols (1939) (Ec.3) es de $8.12 \times 10^7 \pm 3.2 \times 10^2 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ o su Log de $7.91 \text{ Pa}\cdot\text{s}$. La estimación del límite elástico aparente del flujo es de $4.43 \times 10^4 \pm 134 \text{ Pa}$ o su Log de 4.65 Pa . El tiempo de emplazamiento está definido en Naranjo et al. (2016) y es similar al valor resultante que se da al calcular el tiempo (t) con la ecuación simple de $t = L/v$ (días), siendo L la longitud en m y v la velocidad en m/s dando un valor de ~ 11 días. Sin embargo, mediante Vallejo comunicación personal sísmicamente se calculó un tiempo de 43 días para el emplazamiento de LF5.

5.1.2. Parámetros reológicos lava LF9

Para el LF9 que está ubicado en el flanco norte, se desarrolló la misma metodología planteada en el flujo LF5 (Fig.32), donde se analizaron un total de 10 perfiles transversales de 18 trazados (Fig. 33), y se midió el ancho, el espesor y la longitud del flujo.

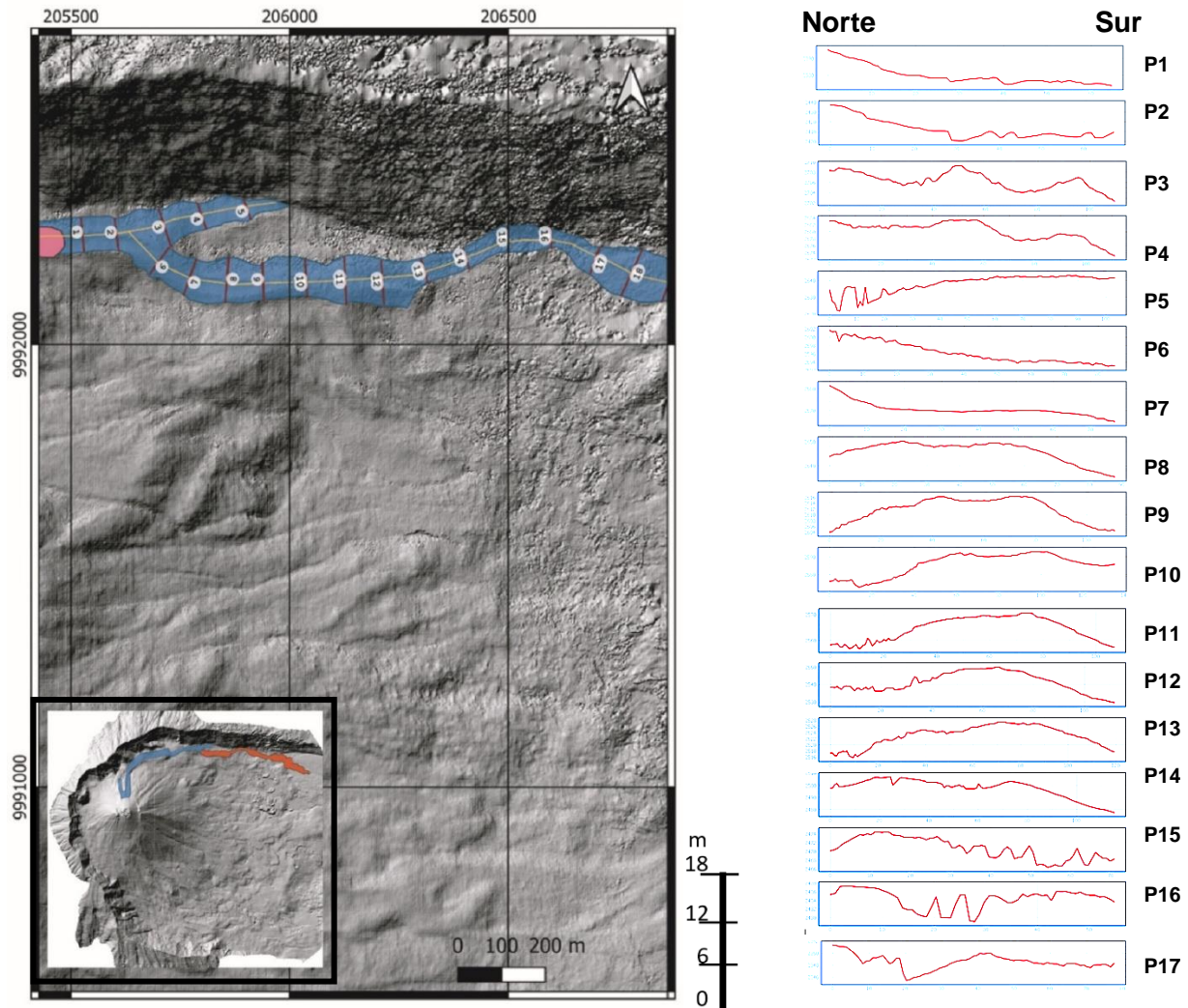


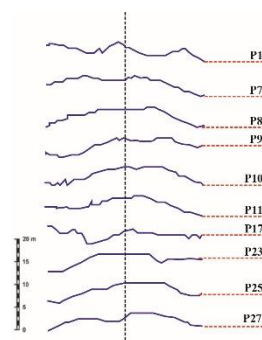
Figura 33: Perfiles a lo largo de la sección expuesta del flujo de lava LF9. Se consideró los perfiles que conservan su morfología cóncava correspondiente a la forma del flujo de lava. En total se tomó la información de ancho, espesor y pendiente de 10 perfiles.

El flujo de lava tiene una longitud de 4542.7 m y la longitud analizada fue de 2967.8 m; el ancho de ese tramo varía de 45.3 m a 109.6 m con un promedio de 81.52 ± 2 m y espesor que oscila entre los 3.8 m a 12.7 m con una media de 7.765 ± 7.3 m. La pendiente subyacente promedio del flujo de lava a lo largo del emplazamiento es de $18.23^\circ \pm 0.4^\circ$.

Tabla 13

Resultados de los parámetros reológicos en base a las mediciones morfológicas de los perfiles trazados del flujo LF9 (Fig.33). Se consideró el total de 10 perfiles que aún conservan su morfología cóncava.

Constantes físicas							
Numero de Grätz Gz	300						
Difusividad térmica k [m ² /s]	3.00x10 ⁷						
Densidad de la lava ρ [kg.m ⁻³]	2600						
Gravedad g [m/s ²]	9.8						
Dimensiones para cada perfil							
Perfil	Ancho del flujo W [m]	Espesor H [m]	Pendiente α [°]	Viscosidad η [Pa.s]	Velocidad v [m/s]	Límite elástico (τ) [Pa]	Velocidad de deformación $\dot{\gamma}$ [s ⁻¹]
P1	45.30 ± 0.7	3.81 ± 4.7	30.51 ± 4	5005749	0.012	49132	0.00981511
P7	79 ± 0.85	4.9 ± 2	25.6 ± 3	16189161	0.006	54296	0.00335385
P8	98.65 ± 5	11.7 ± 11	15 ± 6	187679128	0.002	89042	0.00047444
P9	77.8 ± 0.3	8 ± 6	17.4 ± 5	51669052	0.003	67520	0.00130678
P10	77.6 ± 2	12.7 ± 2.7	14.3 ± 4.4	350137349	0.002	181198	0.00051751
P11	95.7 ± 1	8 ± 4.7	19.51 ± 5	12419519	0.003	130103	0.01047569
P17	64 ± 0.2	4.01 ± 0.9	15.6 ± 2.4	2389411	0.008	14313	0.00599018
P23	109.6 ± 1	9 ± 4	7.9 ± 1.7	85438907	0.002	58179	0.00068094
P25	105 ± 1	6.5 ± 2	6.6 ± 2.4	13065870	0.003	18969	0.0014518
P27	62.5 ± 0.8	4 ± 0.6	9 ± 2.8	2567114	0.008	16164	0.00629656
Dimensiones para el flujo de lava							
Ancho del flujo W [m]	81.52 ± 2						
Espesor H [m]	7.765 ± 7.3						
Pendiente α [°]	18.23 ± 0.4						
Longitud L [m]	4542.7 ± 28						
Tasa de efusión Q [m ³ /s]	2.16 ± 1						
Viscosidad η [Pa.s]	8.34x10 ⁷ ± 1.6x10 ²						
Velocidad v [m/s]	0.0049						
Límite elástico τ [Pa]	67891.5±59						
Tiempo emplazamiento [d]	~10 calculo. 33 (Vallejo comunicación personal)						



La tasa de efusión promedio resultante es de 2.16 ± 1 m³/s. El valor de la viscosidad del flujo obtenido usando la ecuación de Jeffreys y modificada por Nichols (1939) (Ec. 3) es de $8.3 \times 10^7 \pm 1.6 \times 10^2$ Pa.s o el log 7.92 Pa.s. La estimación del límite elástico aparente (Ec.5) del flujo es

de $6.79 \times 10^4 \pm 59$ Pa o el Log 4.83 Pa. El tiempo de emplazamiento está definido en Naranjo et al. (2016) y es similar al valor resultante dado al calcular el tiempo (t) con una ecuación simple de $t = L/v$, con un valor de ~10 días (Tabla 13). Sin embargo, mediante Vallejo comunicación personal sísmicamente se calculó un tiempo de 33 días para el emplazamiento de LF9.

La dinámica reológica a lo largo de los 2 flujos de lava LF5 y LF9 en base a sus mediciones morfológicas se asemeja a un comportamiento Bingham plástico de altas viscosidades y Bingham pseudoplástico en base a la gráfica de esfuerzo cortante vs la tasa de deformación (Fig. 19, 34).

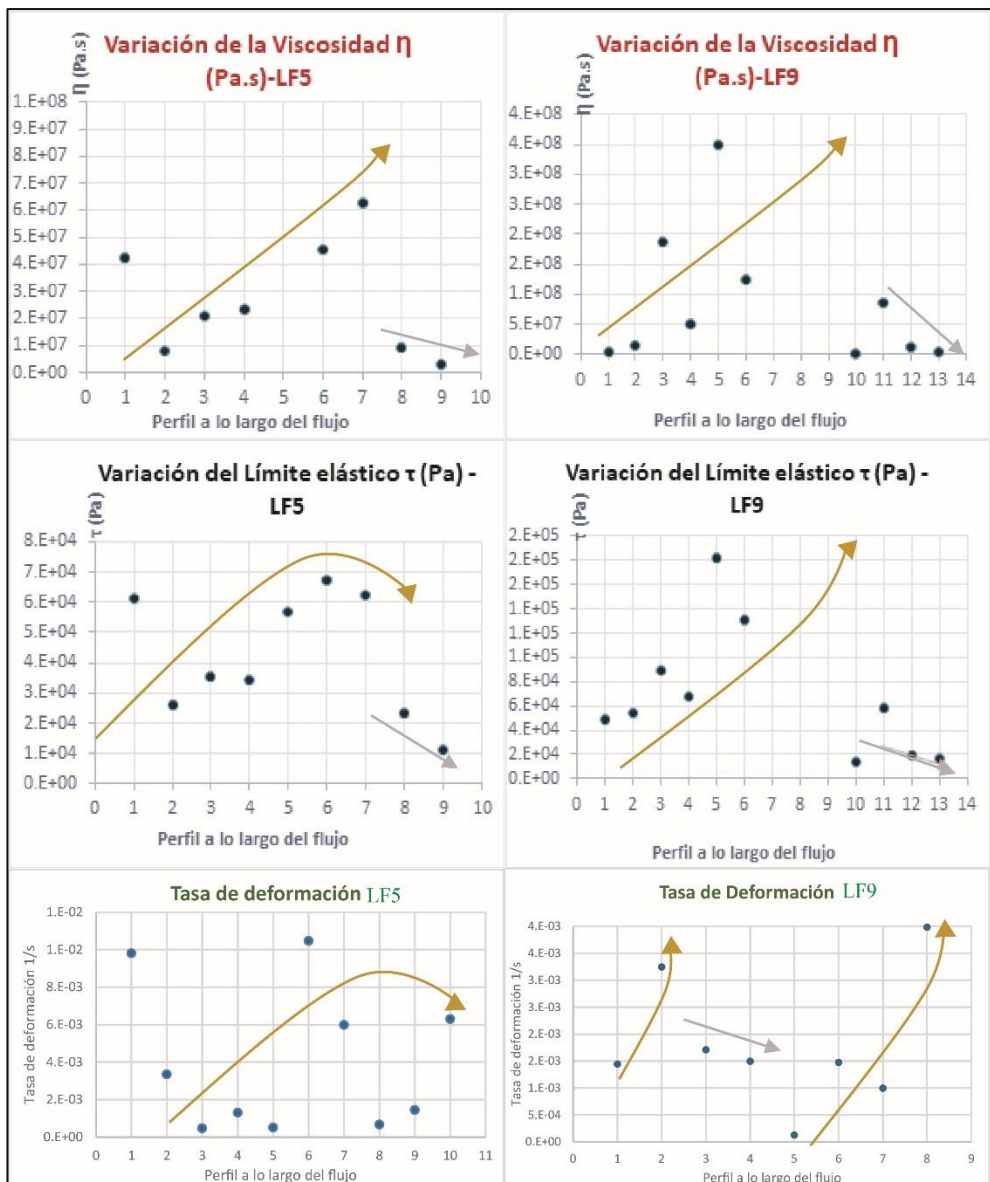


Figura 34: Parámetros reológicos vs la distancia de cada perfil respecto al cráter del volcán. Las gráficas indican el comportamiento de la viscosidad, límite elástico y tasa de deformación a lo largo del flujo de lava LF5 y LF9. La línea amarilla y línea gris representan la tendencia de los valores.

Se observa que en el flujo LF5 el aumento es más prolijo a medida que la lava se emplaza, sin embargo, en la zona más distal, cerca del frente de lava, estos valores disminuyen por los bajos valores del ancho, espesor y pendiente que muestran (Fig. 34). Así también, para el flujo de lava LF9 se observa que este sigue un comportamiento Bingham plástico con posible dilatación (Fig. 34). En la zona distal posicionado en el frente de lava los valores son mucho más bajos consecuente de sus resultados de ancho y espesor.

5.2. Petrografía y Geoquímica de las lavas de El Reventador

5.2.1. Petrografía y mineralogía

Los flujos de lava analizados presentan estructura de tipo bloque, con bloques entre 29 a 46 cm para el flujo LF82 (Fig. 35a), bloques de tamaño entre 30 a 55 cm para el flujo LF9 (Fig. 35b), y un macizo rocoso correspondiente al frente de lava LF82 de ~2.5 m de altura (Fig. 35c). Macroscópicamente presentan una composición andesítica con una coloración grisácea. Los bloques se encuentran cubiertos de alta vegetación, a excepción de los emitidos actualmente (LF82) (Fig. 35).



Figura 35: Fotografías de noviembre 2021. Vista macro de los depósitos lávicos emitidos por El Reventador. a) Flujo de lava tipo bloque LF82a. b) Flujo de lava tipo bloque LF9b zona central. c) Frente de lava LF82b con estructura masiva. La posición de estas muestras de lava está presente en la Fig. 26.

Petrográficamente, se observaron y analizaron 19 láminas delgadas de diferentes flujos de lava del volcán El Reventador (Tabla 14) (1 LF4, 7 LF5, 5 LF9, 2 LF11, 1 LF14, 1 LF25, 2 LF82) (Anexo II, III). Así también, se consideró los resultados del conteo modal y análisis geoquímico de una muestra del flujo de lava LF1 de Estrella et al. (2021).

Tabla 14

Resultados del conteo modal de las muestras obtenidas de los flujos de lava del volcán El Reventador desde el 2002 hasta la actualidad. Se indica el porcentaje total de Cristales, Matriz y vesículas analizadas.

Flujos de Lava	Código	Total Cristales	Total Matriz	Total Vesículas	% Error de cristales
Media LF1	REV- 43	50.00%	30.00%	20.00%	
Media LF4	M1	35.23%	28.41%	36.36%	
Media LF5		47.33%	34.85%	17.81%	
LF5a	M7	45.74%	36.33%	17.93%	3.4%
LF5b	M8	47.14%	35.41%	17.45%	0.4%
LF5c-a	M2	47.26%	36.26%	16.48%	0.1%
LF5c-b	M2	47.26%	36.26%	16.48%	0.1%
LF5d	M10	47.88%	36.96%	15.07%	1.2%
LF5e	M11	47.91%	36.51%	15.58%	1.2%
LF5f	M12	48.13%	26.20%	25.67%	1.7%
Media LF9		42.13%	31.73%	26.14%	
LF9-REV	M13	32.84%	31.34%	35.82%	22.1%
LF9a	REV-108	43.46%	30.37%	26.17%	3.2%
LF9b	REV-109	41.84%	27.55%	30.61%	0.7%
LF9c	REV-110	47.30%	40.54%	12.16%	12.3%
LF9d	REV-111	45.19%	28.85%	25.96%	7.3%
Media LF11		40.35%	29.19%	30.46%	
LF11a	M4	37.33%	21.65%	41.02%	7.5%
LF11b	M5	43.37%	36.73%	19.90%	7.5%
Media LF14	M3	58.58%	30.54%	10.88%	
Media LF25	M6	29.53%	12.75%	57.72%	
Media LF82		50.94%	33.15%	15.92%	
LF82a	REV-106	50.00%	34.21%	15.79%	1.8%
LF82b	REV-107	51.88%	32.08%	16.04%	1.8%

En general, las muestras analizadas en este proyecto presentan textura porfirítica, pilotaxítica con una variación de 29.53 a 58.58 de vol.% de fenocristales, entre 12.75 a 40.54 de vol.% de matriz (microlitos y vidrio) y entre 15.58 a 57.72 vol.% de vesículas. Las vesículas se encuentran de forma irregular con tamaños que varía desde 0.09 hasta 2 mm y generalmente están de forma redondeada y angulares en cada muestra. Los fenocristales están dominados principalmente por plagioclasas tabulares, en menor cantidad piroxenos euhedrales y anfíboles anhedrales a euhedrales (Fig. 36). Así también, los fenocristales se encuentran en 2 grados de cristalización; el primero grado está representado por tamaños de grano que varían de 0.6 a 1.3 mm. En este grado, los fenocristales de plagioclasa poseen formas subhedrales a euhedrales con macla simple y polisintética en su mayoría. Intersticialmente poseen minerales

accesorios como apatitos y zircones, minerales opacos u óxidos de Fe. Mayormente, presentan un aspecto surcado característico de textura Sieve. Los fenocristales de piroxeno de 1er grado están presentes en menor cantidad como clino y ortopiroxeno donde poseen formas euhedrales en la mayoría de las muestras, especialmente en LF5 y colores de birrefringencia altos. Los Fenocristales de Anfíbol presentan formas anhedral a euhedrales, al igual que los piroxenos con birrefringencia alta y algunos con maclas simples. En el segundo grado de cristalización se observan cristales de tamaños de 0.09 a 0.5 mm donde dominan los cristales de plagioclasa tabular de forma anhedral a subhedral en toda la roca y en menor cantidad piroxenos y anfíboles anhedral a euhedrales.

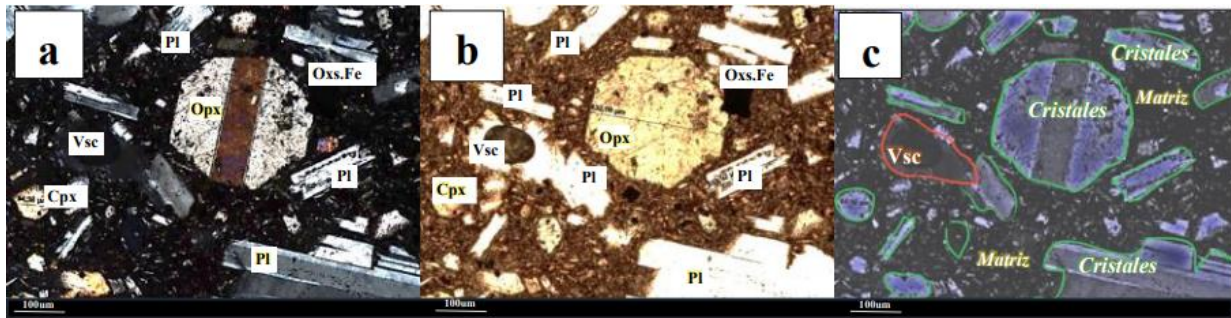


Figura 36: Ejemplo de la división de componentes y clasificación mineralógica. Cristal de piroxeno euhedral con macla lamelar entre cristales de piroxeno distribuidos de forma pilotaxítica de la muestra de lava LF5e. a) Aumento 10x en nicoles cruzados. b) Aumento 10x en luz natural. c) Imagen de lámina delgada con resplandor de neón que indica coneto de cristales, matriz y vesículas.

La matriz representa una mezcla entre microlitos de plagioclasa y piroxeno distribuidos de forma pilotaxítica en el vidrio. El resultado general de las muestras de lava del volcán da una composición andesítica basáltica (Fig. 36) a excepción de las muestras del flujo LF82. Las andesitas basálticas presentan escasos cristales de olivino y vesicularidad muy alta que en algunos casos sobrepasa el 50 vol.% de la muestra generando una textura Escoracea. Los resultados petrográficos de las muestras obtenidas de la actividad más reciente del volcán LF82 dan una composición más intermedia, el porcentaje total de anfíboles es mucho mayor que en las anteriores muestras y presenta una pequeña cantidad de feldespato alcalino, dando como resultado una composición Traquiandesítica.

5.2.1.1. Petrografía de LF5

Se analizaron 6 láminas delgadas a lo largo del flujo LF5, desde la muestra de roca LF5a, la más cercana al cráter, hasta la muestra septentrional LF5f, cuyos resultados se presentan a continuación. Así también, se consideró la muestra REV 58 de Samaniego et al. (2008) perteneciente al flujo LF5.

La descripción petrográfica indica una pequeña variación sistemática en la fracción de volumen de vesículas y cristales a lo largo del flujo LF5 (Fig.37a, b). En general, las rocas conservan una estructura vesicular y textura porfírica por la presencia de fenocristales de plagioclasa, piroxeno y anfíboles envuelta en una matriz criptocristalina. En algunas secciones, por la acumulación de los fenocristales, sobresale la textura glomeroporfídica.

Así también, por la diferencia de tamaño en los fenocristales, las muestras de roca presentan 2 grados de cristalización y una matriz criptocristalina.

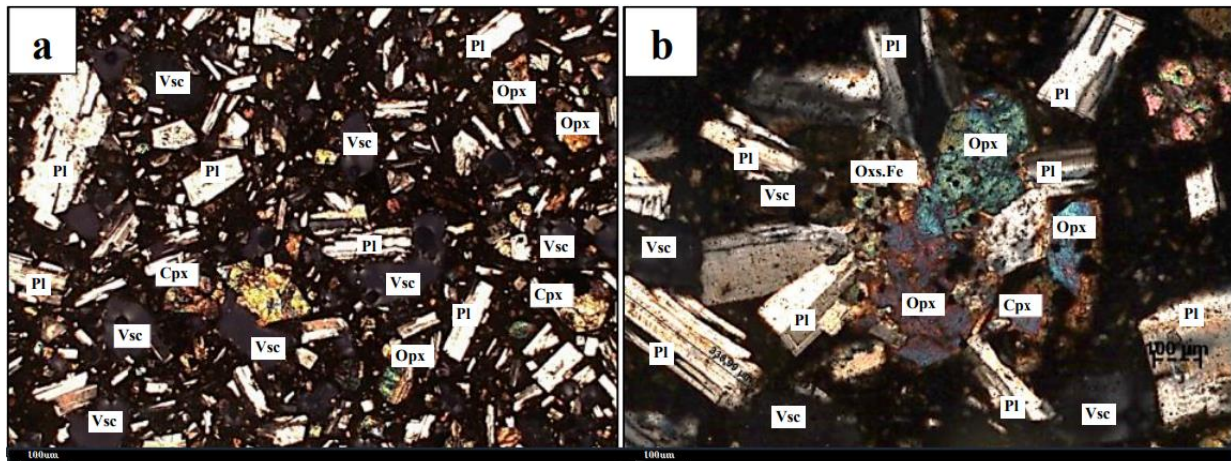


Figura 37: Flujo de lava LF5 vista en microscopio. a) Muestra LF5d - aumento 2.5x, donde se observa cristales de plagioclasa distribuidos de forma pilotaxítica, junto con cristales de piroxeno y anfíbol en menor cantidad de formas subhedrales a euhedrales, envueltos en una matriz criptocristalina compuesta por vidrio, piroxenos y plagioclasas. La textura principal de la muestra corresponde a porfírica y en menor cantidad se observa texturas glomeroporfíricas. La muestra posee vesicularidad alta de forma y tamaño irregular. b) Muestra LF5e - aumento 10x, se observa cristales de plagioclasa sobrepuestos con cristales de piroxenos indicando una textura glomeroporfírica en la muestra. Los cristales de piroxenos presentan formas anhedrales a subhedrales y las plagioclasas de forma subhedral a euhedral.

El primer grado de cristalización está constituido por plagioclasas con un diámetro de hasta 1 mm, piroxenos de hasta 5mm y anfíboles de hasta 10.3 mm. Los Fenocristales de plagioclasa se encuentran en forma tabular, subhedral a euhedral, que en su mayoría poseen macla polisintética y zonación. Así también, estos cristales poseen una textura tipo Sieve que corresponde a un aspecto surcado debido a la disolución de la plagioclasa dentro del fundido. Los piroxenos de 1er grado en su mayoría están presentes en formas euhedrales con colores de birrefringencia altos, y en algunos casos con macla lamelar. Los anfíboles muestran formas que varían de anhedral a euhedral, de relieve y birrefringencia alta y macla simple (Fig.38 a, b, c, d).

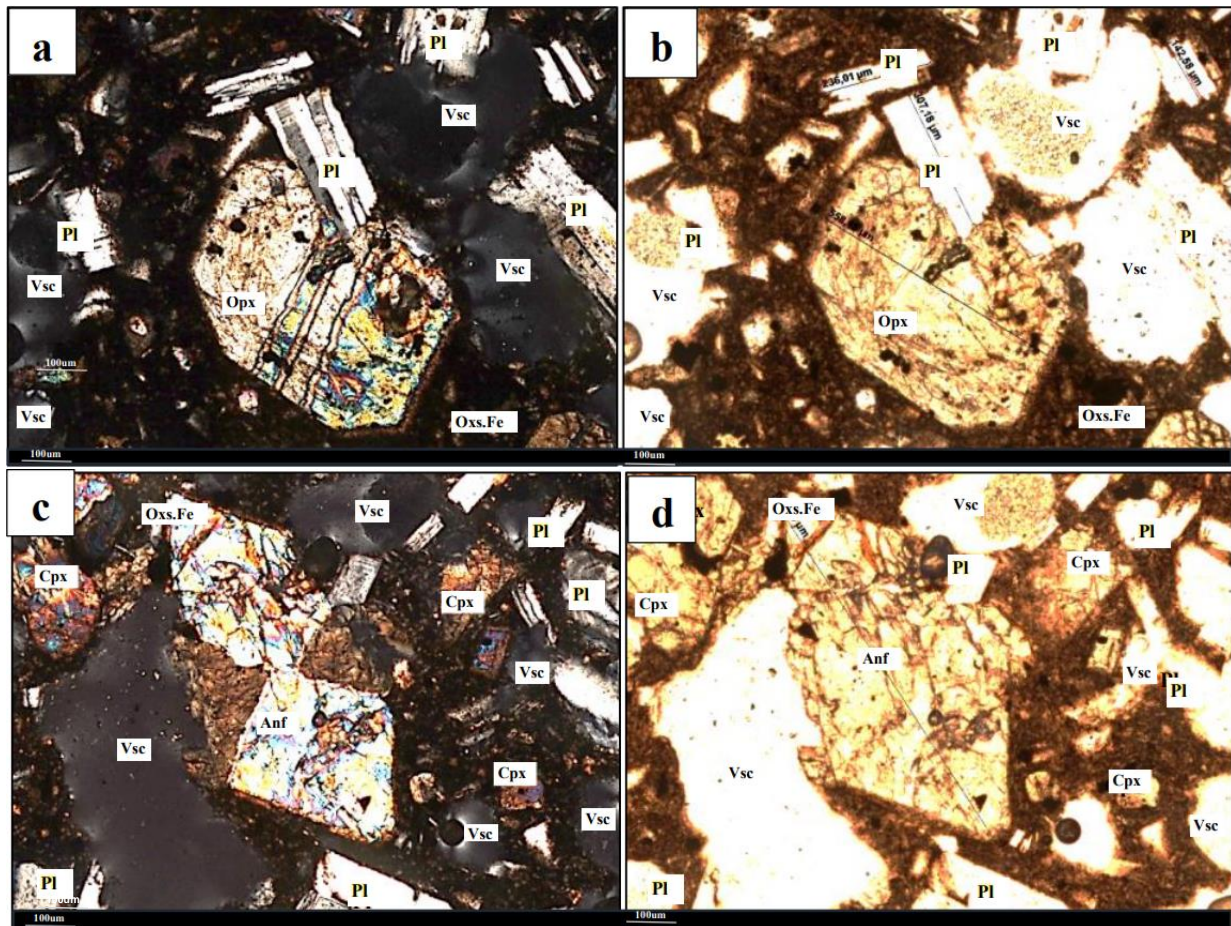


Figura 38: Muestras de flujo de lava LF5 vista en microscopio con aumento 10x nicoles cruzados y luz natural.
Nota: a) Muestra LF5b, se observa cristales de piroxeno euhedrales de 1er grado de cristalización, con una ligera macla lamelar y vesículas amorfas de gran tamaño. b) Muestra LF5b en luz natural. c) Muestra LF5d, cristal de anfíbol euedral de primer orden con macla simple y característica extinción de 45 a 135°. Las vesículas se encuentran de forma irregular y llega a tamaños de 1000µm. d) Muestra LF5d en luz natural.

En el segundo grado donde el tamaño de los cristales varía entre 0.05 a 0.4 mm, predomina la plagioclasa, ésta se encuentra de forma tabular distribuida de manera caótica, representando la textura pilotaxítica. Cabe recalcar que en algunas secciones se aprecia una ligera orientación de los cristales, pero no es representativa en la muestra. Así también los cristales de plagioclasa poseen formas anhedrales a euhedrales, con macla simple, polisintética y de Carlsbad. Los piroxenos y las plagioclasas poseen formas anhedrales a euhedrales, pero con birrefringencia alta. Los anfíboles se encuentran en poca cantidad, con formas anhedrales a subhedrales. Se evidencia escasos cristales de olivino anedral en algunas láminas, de tamaños ~ 0.05 mm de diámetro, considerados como mineral accesorio, debido a que su promedio no supera el 2 vol.% del total (Fig. 39a, b).

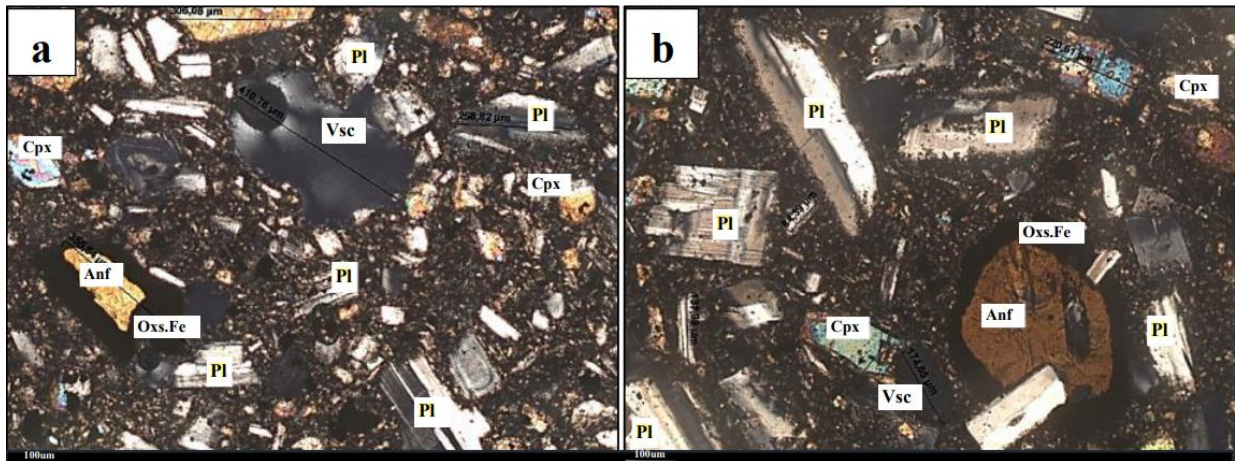


Figura 39: Muestras del flujo de lava LF5 en vista nicols cruzados del microscopio. a) Muestra LF5a, cristales de plagioclasa, piroxeno, anfíboles, óxidos de Fe y vesículas dentro de una matriz criptocristalina color marrón terroso de vidrio, piroxeno y anfíbol. Se observa bordes de oxidación en los cristales anfíbol. b) Muestra LF5b, cristal de anfíbol con borde de oxidación y cristales de plagioclasa tabular de forma subhedral a euhedral.

Los óxidos de Fe están presentes en diferente tamaño en la matriz e intergranular en los fenocristales (Fig.40a), su forma es variable, pasa de cristales redondeados a angulosos, así también, están presentes como bordes de oxidación en algunos anfíboles (Fig.39b). Generalmente en las muestras hay presencia de minerales accesorios como el apatito, rutilo y zircón, de manera intersticial en los fenocristales. El fundido de la roca generó una matriz criptocristalina con cristales de plagioclasa y piroxeno distribuidos de forma pilotaxítica en el vidrio, con coloración marrón en luz natural y café negruzco en nicols cruzados. Por último, las muestras conforman gran cantidad de vesículas de forma irregular con diámetros que oscilan entre 0.03 hasta 3 mm de formas redondeadas a angulares.

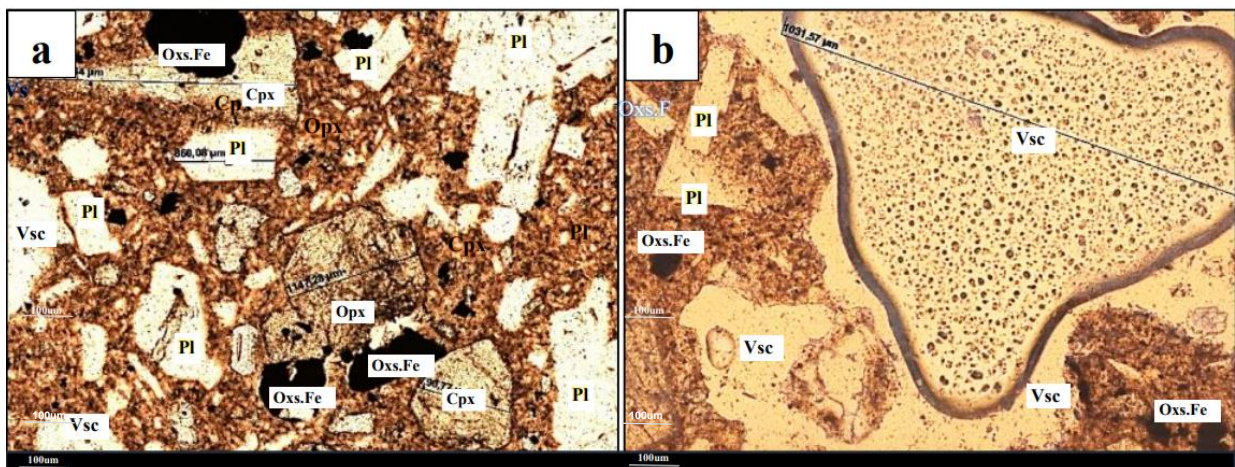


Figura 40: Muestras del flujo LF5 en luz natural del microscopio. a) Muestra LF5c, se observa óxidos de Fe, cristales de piroxenos euhedrales, plagioclasas tabulares en una matriz de color marrón. b) Muestra LF5b, vesículas que alcanzan tamaños de hasta 1300 um.

El flujo LF5, se considera una lava andesita basáltica por el gran contenido de plagioclasas, piroxeno y presencia de anfíboles en las muestras.

El conteo modal de 200 puntos (Tabla 15) indica que en promedio las muestras están compuestas por: 18.03 vol.% en volumen de vesículas, 34.61 vol.% de matriz y 47.34 vol.% de cristales. Se considera un aumento progresivo de los componentes en cada muestra a medida que esta se aproxima al frente de lava; el flujo LF5a (M7) en total tiene 17.93 vol.% de vesículas, 36.33 vol.% de matriz y 45.74 vol.% de cristales y la última muestra LF5f (M-12), la que se encuentra más distal al cráter, en total presenta 25.67 vol.% de vesículas, 26.2 vol.% de matriz y 48.13 vol.% de cristales. Se puede ver, que existe un aumento del 2.39 vol.% de cristales.

Tabla 15

Resultados del conteo modal de las 6 muestras de roca extraídas a lo largo de la lava LF5.

Conteo Modal LF5						
Flujos de lava	LF5a	LF5b	LF5c	LF5d	LF5e	LF5f
	M-7	M-8	M-2	M-10	M-11	M-12
Total Cristales 47.34%	45.74%	47.14%	47.26%	47.88%	47.91%	48.13%
Plagioclasa	29.91%	30.23%	30.77%	32.72%	34.30%	28.80%
Piroxeno	6.01%	6.19%	5.49%	7.44%	5.19%	8.50%
Anfibol	5.41%	7.34%	6.59%	5.02%	3.10%	8.02%
Óxidos de Fe	3.25%	1.75%	4.39%	1.20%	3.89%	2.67%
Accesorio	1.60%	1.63%	0.04%	1.50%	1.43%	0.07%
Total Matriz 34.61%	36.33%	35.41%	36.26%	36.96%	36.51%	26.20%
Total Vesículas 18.03%	17.93%	17.45%	16.48%	15.07%	15.58%	25.67%

5.2.1.2. Petrografía de LF9

Se analizaron 5 láminas delgadas a lo largo del flujo LF9, desde la muestra de roca LF9a, la más cercana al cráter hasta la muestra septentrional LF9-REV cuyos resultados se presentan a continuación.

La descripción petrográfica (Fig.41a; b) indica una pequeña variación en la fracción de volumen de vesículas y cristales a lo largo y ancho del flujo LF9. En general, las rocas presentan una estructura vesicular y textura porfírica por la presencia en su mayoría, de fenocristales de plagioclasa, piroxeno y anfíboles envueltos en una matriz criptocristalina. Estos cristales presentan formas más subhedrales que los minerales analizados en las muestras de LF5, y por la acumulación de los fenocristales en algunas secciones, sobresale

la textura glomeroporfídica. En las láminas por la diferencia de tamaños se puede apreciar 2 grados de cristalización representado en los fenocristales.

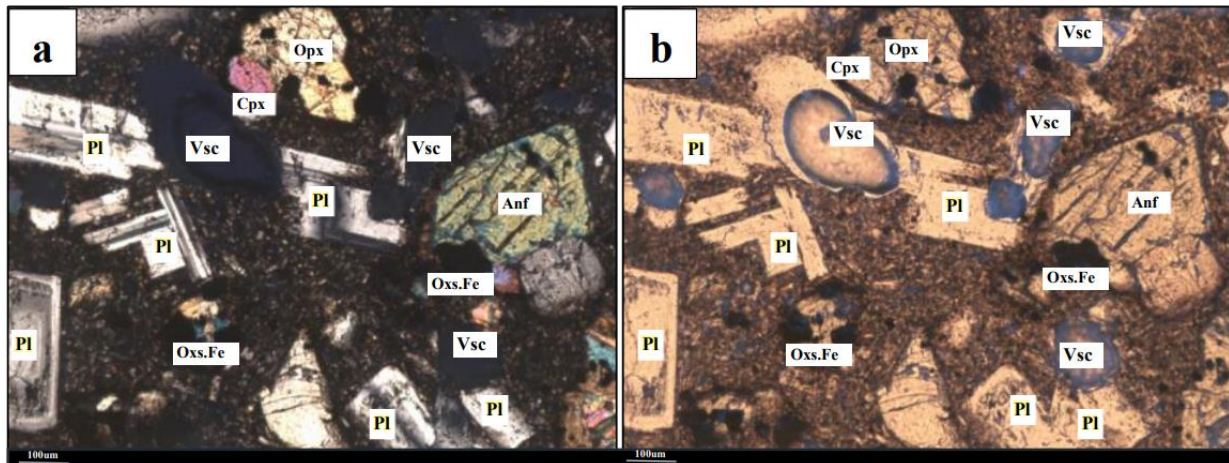


Figura 41: Flujo de lava LF9 vista en microscopio. a) Muestra LF9a - aumento 10x, se observa cristales de plagioclasa distribuidos de forma pilotaxítica, junto con cristales de piroxeno y anfíbol en menor cantidad de formas subhedrales a euhedrales, envueltos en una matriz criptocristalina compuesta por vidrio, piroxenos y plagioclasas. La textura principal de la muestra corresponde a porfírica. La muestra posee vesicularidad de forma y tamaño irregular. Se puede observar una vesícula entre un cristal tabular de plagioclasa. b) Muestra LF9a - aumento 10x, en luz natural. Los cristales de piroxenos presentan formas anhedrales a subhedrales y las plagioclasas de forma subhedral.

El primer grado de cristalización (Fig.42a, b) está constituido por plagioclasas hasta 0.9 mm, piroxenos hasta 0.86 mm y anfíboles hasta 1.02 mm de diámetro. Los fenocristales de plagioclasa se encuentran en forma tabular, subhedral a anhedral, que en su mayoría poseen macla polisintética.

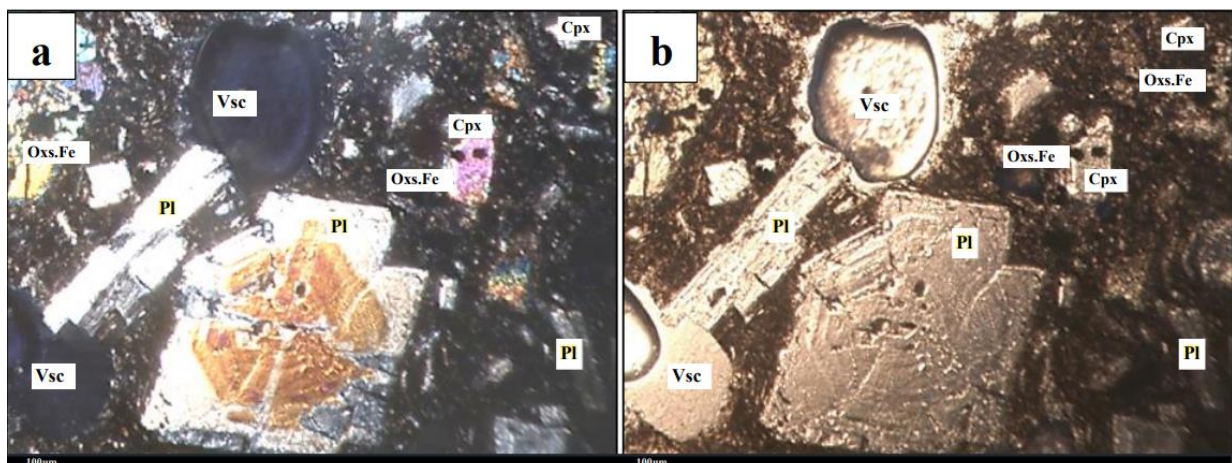


Figura 42: Muestra LF9a en nicols cruzados y luz natural, se observa cristal euhedral de plagioclasa. a) Muestra LF9a, cristal de plagioclasa euhedral con macla de Carlsbad de forma cúbica, en nicols cruzados. b) Muestra LF9a en luz natural, se observa vesicularidad redondeada.

Así también, estos cristales presentan textura Sieve. Los piroxenos de 1er grado están presentes en formas anhedrales con colores de birrefringencia altos. Los anfíboles muestran formas que varían de anhedral a subhedral, de relieve y birrefringencia alta y macla simple.

En el segundo grado (Fig. 43a, b) donde el tamaño de los cristales varía entre 0.048 a 0.6 mm, predomina la plagioclasa, ésta se encuentra de forma tabular distribuida de manera caótica, representando en su mayoría una textura tranquílica por la presencia de una ligera orientación en los cristales, aunque en algunas secciones sobresalga la textura pilotaxítica. Así también los cristales de plagioclasa poseen formas anhedrales a euhedrales, con macla polisintética y de Carlsbad.

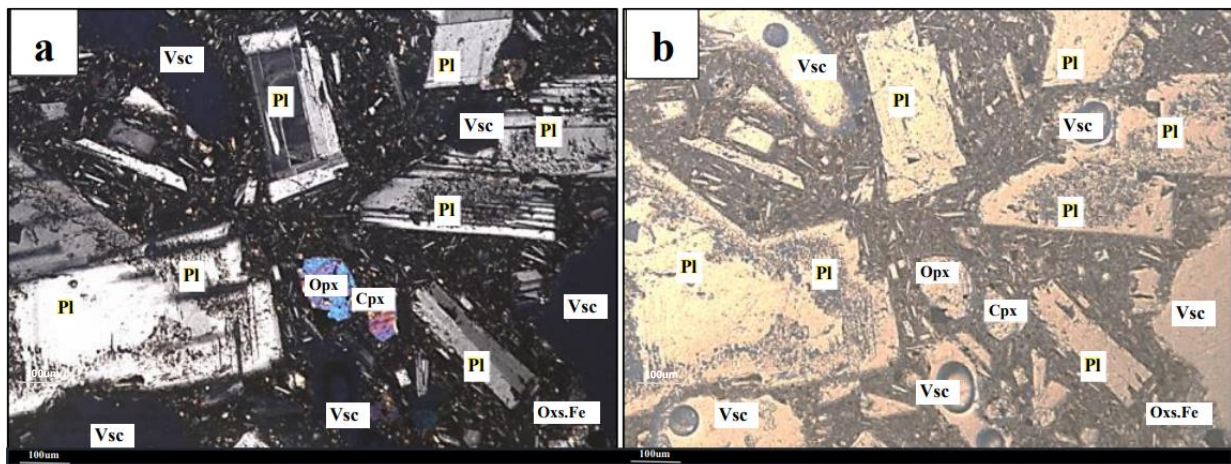


Figura 43: Flujo de lava LF9 vista en microscopio. a) Muestra LF9b - aumento 10x, se observa cristales de plagioclasa distribuidos de forma pilotaxítica, junto con cristales de piroxeno y anfíbol en menor cantidad de formas subhedrales a euhedrales, envueltos en una matriz criptocristalina compuesta por vidrio, piroxenos y plagioclasas. Los cristales de plagioclasa se encuentran en su mayoría con macla polisintética. b) Muestra LF9b en luz natural.

Los piroxenos, como la plagioclasa poseen formas anhedrales a euhedrales, pero con birrefringencia alta y en mayor cantidad a comparación de la lava LF5. Los anfíboles, se encuentran en poca cantidad, con formas anhedrales a subhedrales. Los óxidos de Fe están presentes en diferentes tamaños, tanto en la matriz como intergranular, su forma es variable, pasa de cristales redondeados a angulosos. Así también, en las muestras hay presencia de minerales accesorios como el apatito y zircón, de manera intersticial en los fenocristales. Comparando con el flujo LF5 perteneciente a la Fase B, en estas muestras se puede visualizar un ligero mayor porcentaje de cristales de olivino, indicando que la composición de LF9 es ligeramente más máfica que LF5.

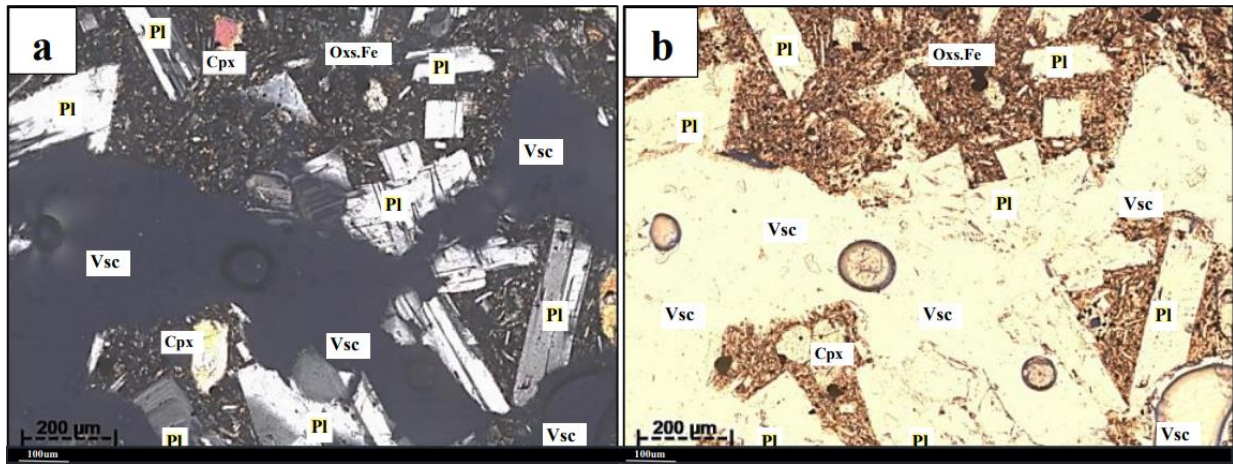


Figura 44: Muestra LF9d, alta vesicularidad. a) Muestra LF9d - aumento 10x, en luz natural. La muestra presenta gran cantidad de vesicularidad interconectada y cristales de plagioclasa de forma subhedral a anhedral distribuidos de manera caótica. b) Muestra LF9d -aumento 10x en luz natural.

El flujo LF9, se considera una lava de composición andesita basáltica por el gran contenido de plagioclasas, piroxeno y presencia de anfíboles en las muestras.

Tabla 16

Resultados del conteo modal de las 4 muestras de roca extraídos a lo largo de la lava LF9.

		Conteo Modal LF9			
		LF9a	LF9b	LF9c	LF9d
Flujos de lava		REV-108	REV-109	REV-110	REV-111
Total Cristales	44.83%	43.46%	43.36%	47.30%	45.19%
Plagioclasa		31%	29.08%	32.11%	26.92%
Piroxeno		5.65%	5.61%	5.41%	5.77%
Anfibol		5.76%	4.59%	9.00%	9.13%
Óxidos de Fe		0.52%	1.02%	0.32%	1.44%
Accesorio		0.52%	3.06%	0.45%	1.92%
Total Matriz	31.73%	30.35%	27.18%	40.54%	28.85%
Total Vesículas	23.44%	26.19%	29.45%	12.16%	25.96%

El conteo modal de 200 (Tabla 16) puntos indica que en promedio las muestras están compuestas por: 23.44 vol.% de vesículas, 31.73 vol.% de matriz y 44.83 vol.% de cristales. Se considera un aumento progresivo de componentes en las muestras desde el flujo F9a (REV108) que en total tiene 26.19 vol.% de vesículas, 30,35 vol.% de matriz y 43.46 vol.% de cristales y la última muestra LF9d (REV-111), la que se encuentra más distal al cráter, en total presenta 25,69 vol.% de vesículas, 28.85 vol.% de matriz y 45,18 vol.% de cristales. Se puede ver, que existe un aumento del 1.72 vol.% de cristales considerando el valor de LF9a y LF9d, pertenecientes al leve Sur.

Las muestras LF9a, LF9b y LF9c fueron obtenidas del leve sur, centro y leve norte formando una línea perpendicular al eje del flujo LF9, a una misma distancia al cráter del volcán. Se observa que el valor de cristalinidad en los leves es mayor comparada a la del centro, y esto se debe al momento de emplazamiento del flujo, mientras en los leves los bloques de lava se emplazaron, en el centro seguía en continuo movimiento hasta alcanzar la longitud total.

5.2.1.3. Dinámica y evolución de lavas (variación de componentes)

Los análisis de lámina delgada de los 6 flujos de lava (LF1, LF4, LF5, LF9, LF11, LF25) (Fig.45) indican variabilidad de composición a lo largo de la actividad eruptiva del volcán. Se puede observar que la muestra extraída del flujo LF5 tiene homogeneidad de composición en relación con las demás muestras, sin embargo, posee una ligera variación la cual, se verá con mayor detalle en la Fig. 47. Con este resultado se aprecia que la composición petrográfica varía en cada flujo y a lo largo del mismo, sin embargo, hay que tomar en cuenta que mientras más muestras se extraigan de cada lava emplazada, mayor será la exactitud para estimar su variación.

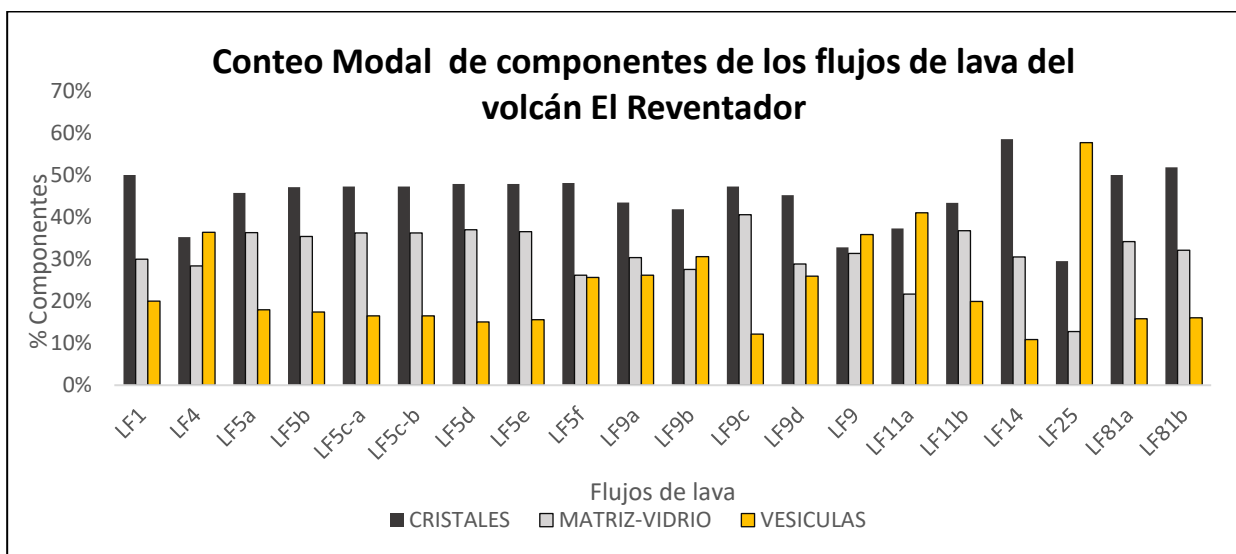


Figura 45: Diagrama de componentes (Cristales, Matriz y Vesículas) de las muestras de lava analizadas en este trabajo, proporcionadas por el IG-EPN y obtenidas en la campaña de campo noviembre 2021.

Para las muestras derivadas del flujo LF9 se observa una mayor variabilidad, especialmente para LF9c la cual, representa mayor porcentaje de cristales y matriz y mucho menor porcentaje de vesículas. En las muestras obtenidas del flujo LF82 se ve una gran similitud de componentes, por la corta distancia de donde fueron extraídas. La muestra que mayor

diferencia presenta con respecto a las otras es LF25 la cual, posee un gran porcentaje de vesículas y por lo tanto un bajo porcentaje total de cristales y matriz (Fig. 45).

Un gran ejemplo representa las 2 muestras obtenidas del flujo de lava LF11 (Fig. 46), la cuales, se sitúan en distintas posiciones respecto al cráter. La muestra un poco más cercana al cráter del volcán (LF11a) posee una menor proporción de cristales, y un mayor porcentaje de vesículas en comparación con la muestra más distal (LF11b), el cual tiene mayor porcentaje de cristales y un menor porcentaje de vesículas.

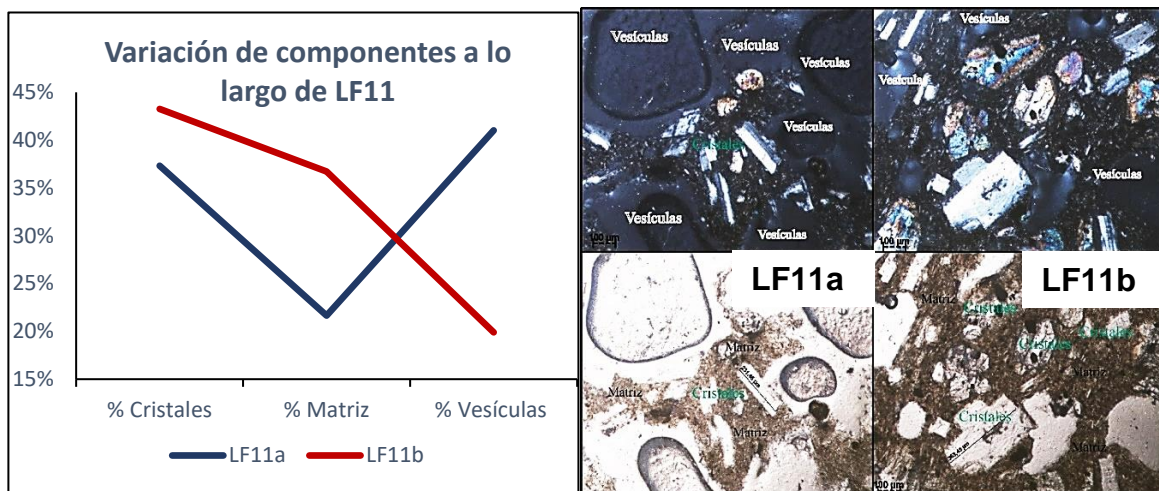


Figura 46: Variación de componentes de 2 muestras de roca del flujo de lava LF11. Se observan imágenes donde en la muestra LF11a hay un mayor porcentaje de vesículas y un mínimo contenido de cristales, mientras que en la muestra LF11b el porcentaje de vesículas es mucho menor y el contenido de cristales se incrementa.

Con este ejemplo se puede determinar que una sola muestra a lo largo del volcán no es representativa para determinar la composición exacta de un flujo de lava, especialmente de depósitos que varían de intermedios a ácidos, se necesita un mayor número de muestras con las que se pueda calcular un promedio y evidenciar la evolución que ha tenido a lo largo del flujo, en base a la posición en la que fue extraída, si se encuentra cercana o distal al cráter del volcán y si está posicionada en los leves o centro del flujo.

El conteo modal de las muestras extraídas a lo largo de la lava LF5 (Fig. 47), indica una ligera variabilidad de componentes. La muestra más proximal al cráter del volcán (LF5a) posee un menor porcentaje de cristales en comparación con la muestra más septentrional (LF5f), que es la que mayor porcentaje posee.

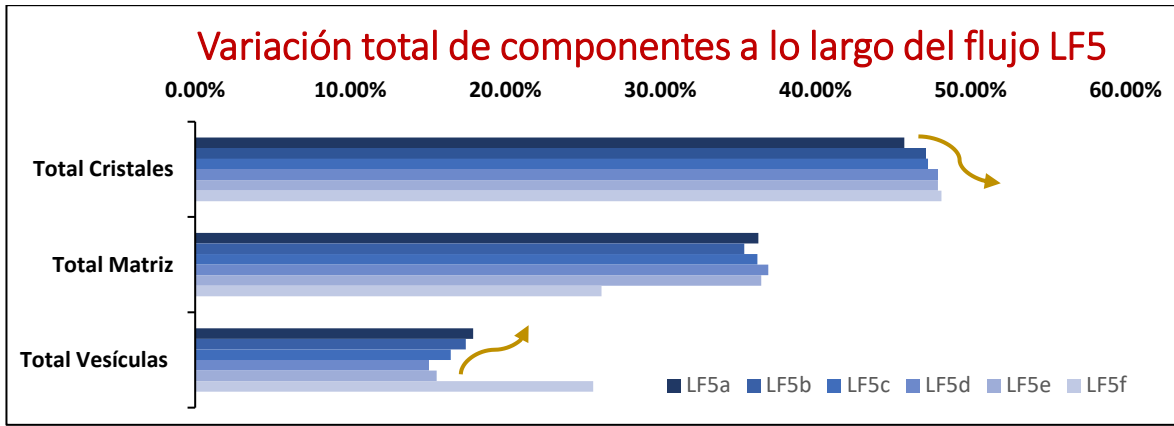


Figura 47: Variación total de componentes de las diferentes muestras de roca obtenidas a lo largo del flujo LF5.

El contenido de vesículas disminuye progresivamente a medida que la muestra es tomada a una distancia más distal del cráter, a excepción de la muestra LF5f. Ésta posee un porcentaje de vesículas mucho mayor, un valor no representativo para el flujo de lava.

Para el análisis de componentes del flujo LF9 se consideró 2 criterios (Fig. 48): El primero, la variación de 2 muestras de lava LF9a, la más cercana al cráter y LF9d, la más distal del cráter, ubicadas en el leve sur a una distancia de ~1380.000 m. El segundo criterio, la variación composicional de 3 muestras ubicadas en los leves sur, centro y norte (LF9a, LF9b y LF9c) del flujo a una misma distancia respecto al cráter.

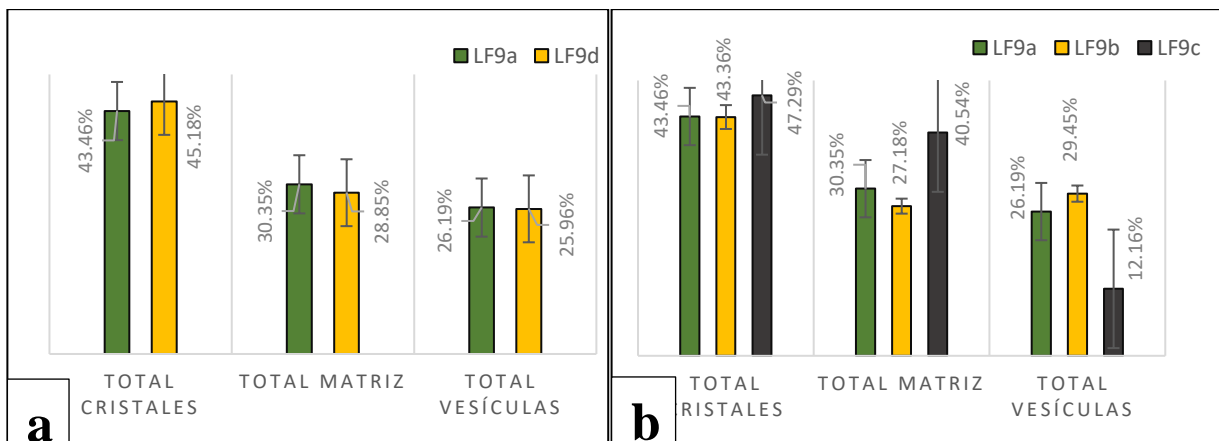


Figura 48: Variación total de componentes a lo largo del flujo LF9. a) Variación de componentes entre la muestra LF9a y LF9d, muestras de roca ubicadas en el leve sur a una cierta distancia. b) Variación de componentes de las muestras tomadas perpendicularmente a la dirección del flujo LF9.

El primer criterio cumple con lo analizado en el flujo LF5, el porcentaje de cristales aumentó a medida que la muestra se sitúa más distal del cráter, y se tiene un aumento progresivo. Con

el segundo criterio, se pudo interpretar que el porcentaje de cristales es menor en el centro del flujo y un poco mayor en los leves. Esto se debe a que durante el emplazamiento el flujo de lava continua en movimiento en el centro, y el depositado en sus leves se encuentra invariable. La interpretación de variabilidad reológica del flujo LF9 se realizará en base al primer criterio.

5.2.2. Geoquímica de elementos mayores.

La Geoquímica de elementos mayores de muestras obtenidas en los flujos de lava del volcán hasta diciembre 2022 ilustrada en un diagrama TAS de Lebas et al. (1986) (Anexo I), indica acumulación de composición en el área de basalto tranquiandesítico y traquiandesita (Fig.49). Donde las muestras más máficas están dadas en el flujo LF9 y las más ácidas en LF82. Se aplicó la norma CIPW para convertir la composición química de la roca en una composición mineral ideal (Anexo II), dando como principales minerales la Albita (Ab) y Anortita (An) que representan a las plagioclasas sódicas y cálcicas. En menor proporción Ortoclasa (Or) con excepción de las muestras de LF82 (Rev 106 - Rev 107) que indican un porcentaje mayor. Seguidos del Diópsido (Di), Hipersteno (Hy) y Cuarzo (Q).

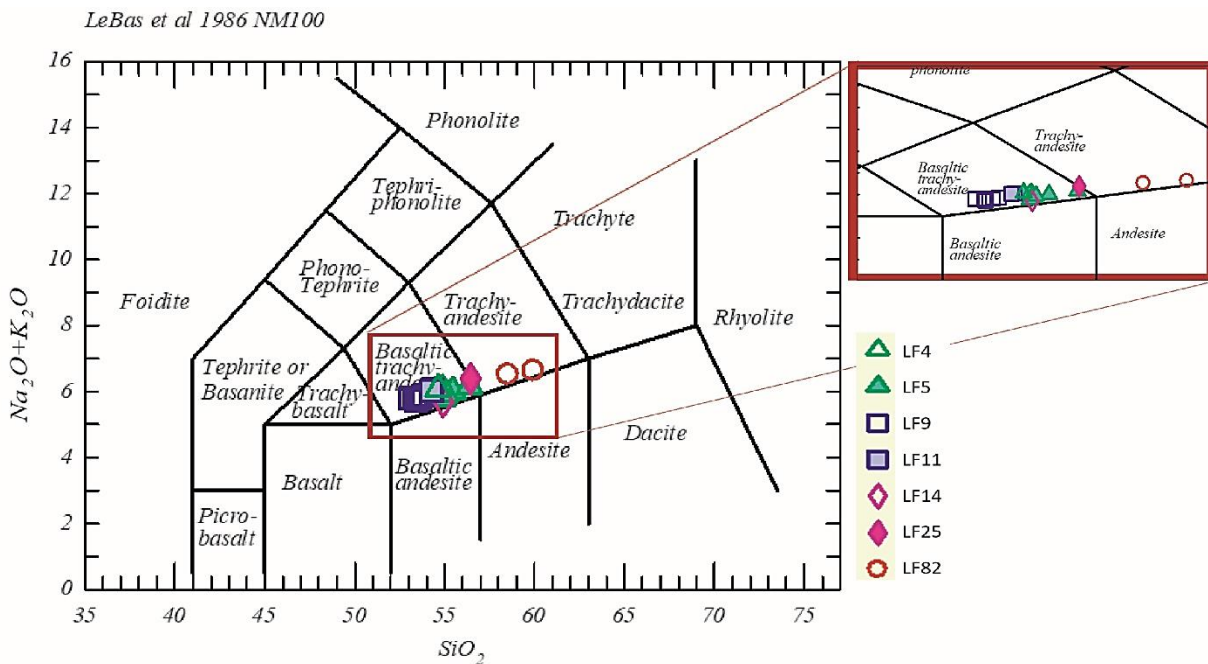


Figura 49: Diagrama TAS de los valores químicos de las muestras de lava LF4 hasta la LF25 realizado en el software IGPET. En esta gráfica se observa que las muestras extraías presentan una secuencia dentro de la composición de basalto traquiandesítico para las lavas del volcán El Reventador.

Estos resultados marcan una posición similar de los resultados descritos en anteriores trabajos donde han analizado la geoquímica de estas lavas (Naranjo, 2013; Estrella, 2021), con excepción de las muestras de la actividad más reciente del volcán las cuales marcan una composición más intermedia (círculos rojos) que todas las anteriores muestras (Fig. 49).

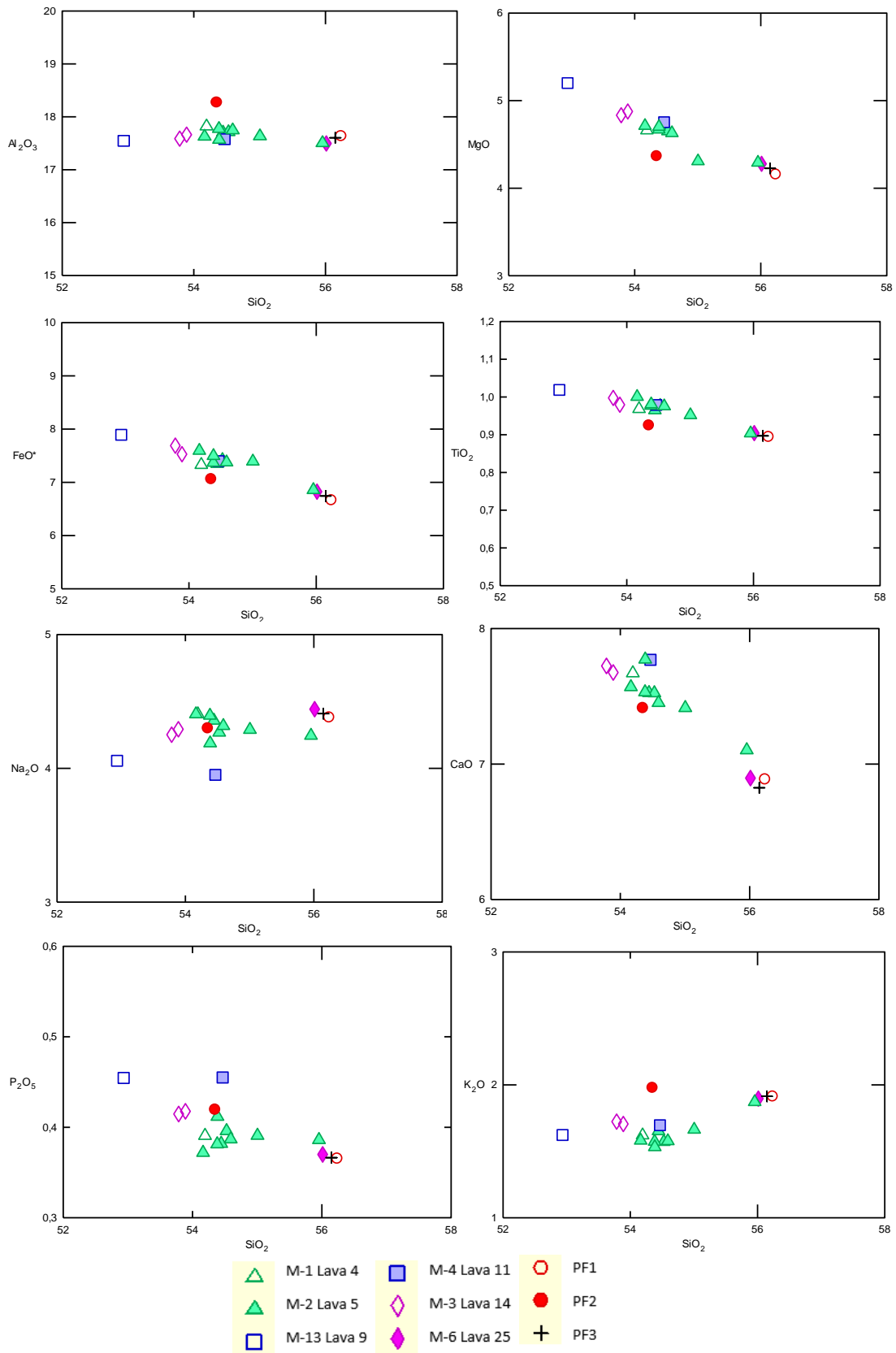


Figura 50: Diagramas Harker de muestras de roca de los flujos de lava de El volcán El Reventador realizados en el software IGPET. Los valores geoquímicos para este análisis fueron Recuperados de: Vallejo, (2017).

Se realizaron diagramas Harker en base a los resultados geoquímicos obtenidos por Vallejo (2017), Samaniego et al. (2008) y en este proyecto (Fig.50), donde se observa una tendencia suave en la variación de cada uno de los óxidos principales. Harker (1909) propuso que el SiO₂ aumentaba constantemente con la evolución magmática y, por lo tanto, lo utilizó como abscisa para indicar el grado de evolución (Winter, 2014). Estos diagramas muestran correlaciones negativas de % de MgO, FeO, TiO, CaO y P₂O₅ y para el % Al₂O₃ presenta una correlación ligeramente positiva. En el % Na₂O hay una tenue discontinuidad, comienza siendo una tendencia lineal positiva y termina ligeramente negativa. Las tendencias representarían la actividad eruptiva del volcán desde la Fase A hasta la Fase F, con un rango de contenido de SiO₂ que va desde 53% a ~56%. Se aprecia que la muestra LF9-M13 es la que menor porcentaje de SiO₂ posee, con un valor de 52,93%, esta composición puede influir a que fue extraída del flujo de lava con mayor desplazamiento en comparación a las otras lavas emitidas desde el 2002. La lava LF5 posee una composición intermedia con respecto a los otros flujos de lava. Por último la muestra LF25 y los flujos LF82 tienen una composición más ácida, que las anteriores muestras analizadas.

5.2.2.1. Geoquímica Flujo de lava LF5

Las muestras de LF5 etiquetadas con el código de Vallejo (2017) (Tabla 14) son ilustradas en la Fig. 51, con el fin de conocer su posición exacta y compararlas con los resultados en porcentaje de sílice.

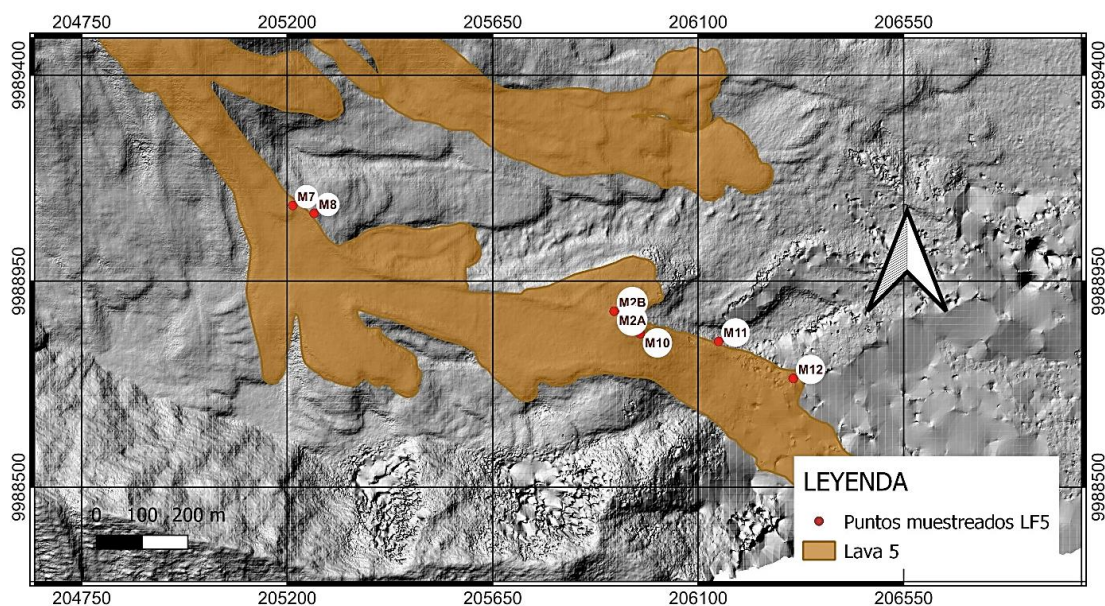


Figura 51: Puntos de coordenadas de las muestras obtenidas del flujo de lava LF5.

La geoquímica de elementos mayores de las diferentes muestras de roca a lo largo del flujo LF5 (Fig. 52) se representan a continuación:

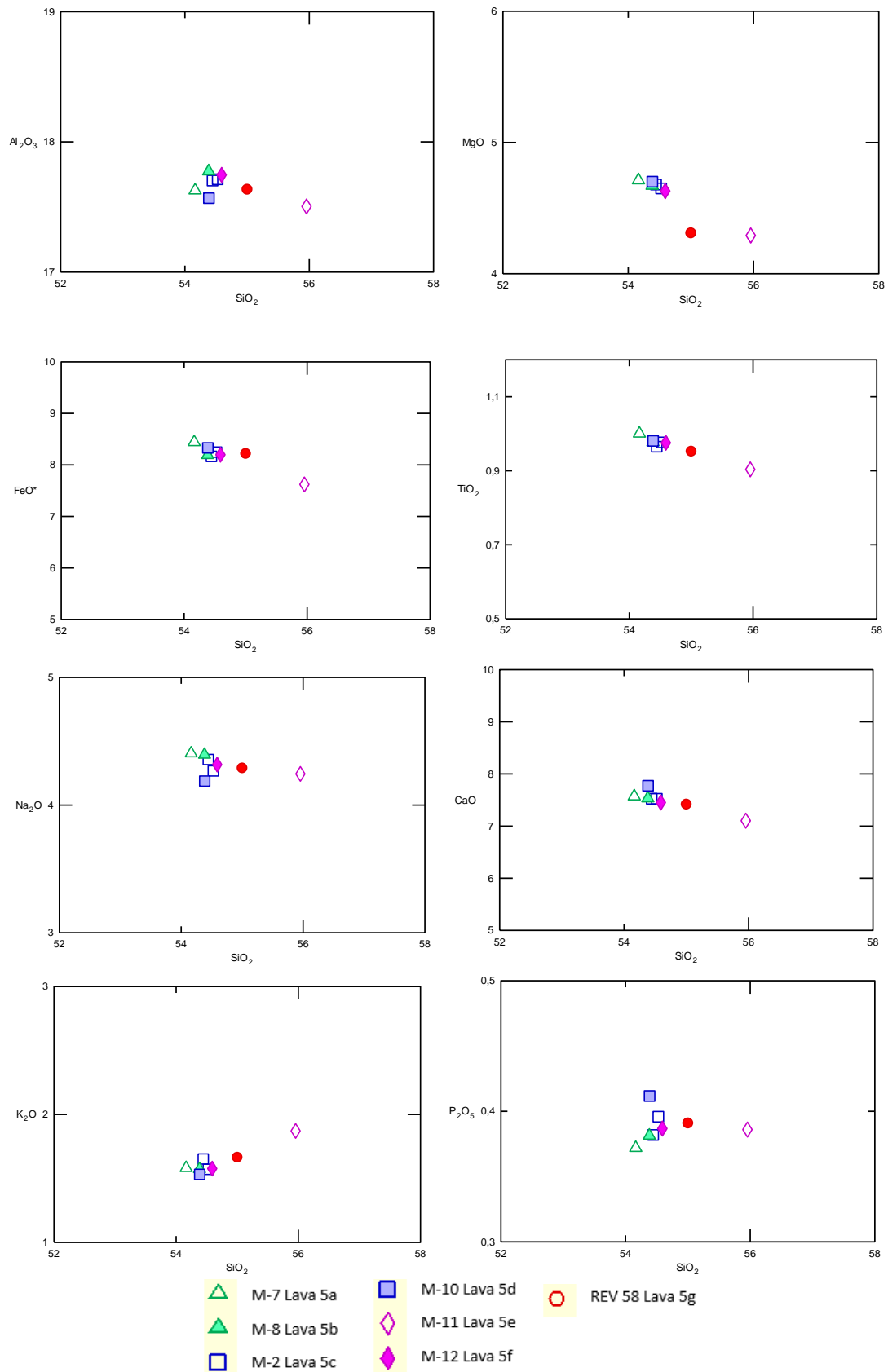


Figura 52: Diagramas Harker de muestras de roca del flujo de lava LF5 (Fig. 51) de El volcán El Reventador realizados en el software IGPET. Los valores geoquímicos para este análisis fueron Recuperados de: Vallejo, (2017) y Samaniego et al. (2008).

Se realizaron diagramas Harker de óxidos de elementos mayores de las muestras, las cuales fueron etiquetadas con el código bibliográfico y el código colocado en este trabajo (Tabla 14). Los valores geoquímicos obtenidos en el laboratorio fueron previamente calculados con Fe total y normalizados al 100%. Como resultado se ilustra que la química de roca del flujo de lava LF5 a lo largo del leve norte (Fig. 52), presentan una ligera homogeneidad en la composición de elementos mayores. Los diagramas demuestran una tendencia lineal negativa, a excepción en el %K₂O que conserva una tendencia positiva. Su contenido en óxido de SiO₂ varía entre 54 a 56%, con una acumulación significativa de muestras entre 54 a 55% (Fig. 52).

Los diagramas indican una continuidad tanto en la posición del leve como en el porcentaje de SiO₂. La muestra LF5a (M-7), la más proximal al cráter (Fig.52), es la que menor contenido de sílice posee, en la cual, se ve un ligero aumento progresivo a medida que la muestra se encuentra más distal del cráter, representada por LF5f (M-12). Sin embargo, los análisis químicos indican que esta lava no demuestra una evolución significativa, infiriendo que corresponde a un magma primitivo; si bien existe una variación, ésta es mínima.

5.2.2.2. Geoquímica Flujo de lava LF9

Las muestras de LF9 son ilustradas en la Fig. 53, con el fin de conocer su posición exacta y compararlas con los resultados en porcentaje de sílice.

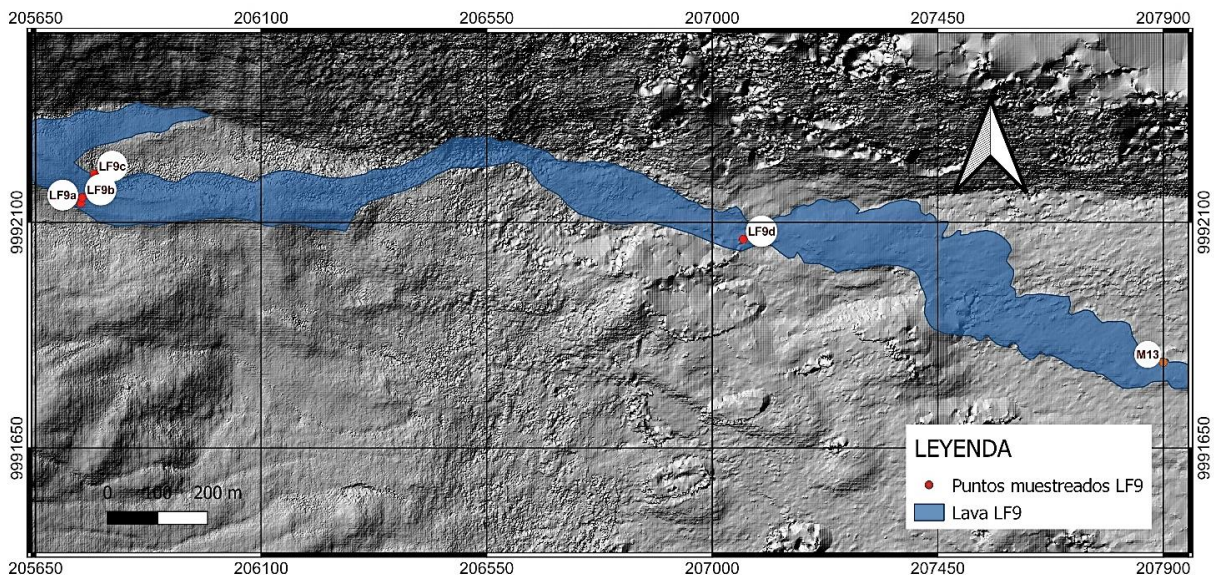


Figura 53: Posición de coordenadas de las muestras de roca obtenidas del flujo LF9.

Geoquímica de elementos mayores de las diferentes muestras de roca a lo largo del flujo LF9 (Fig. 53, 54) representadas a continuación:

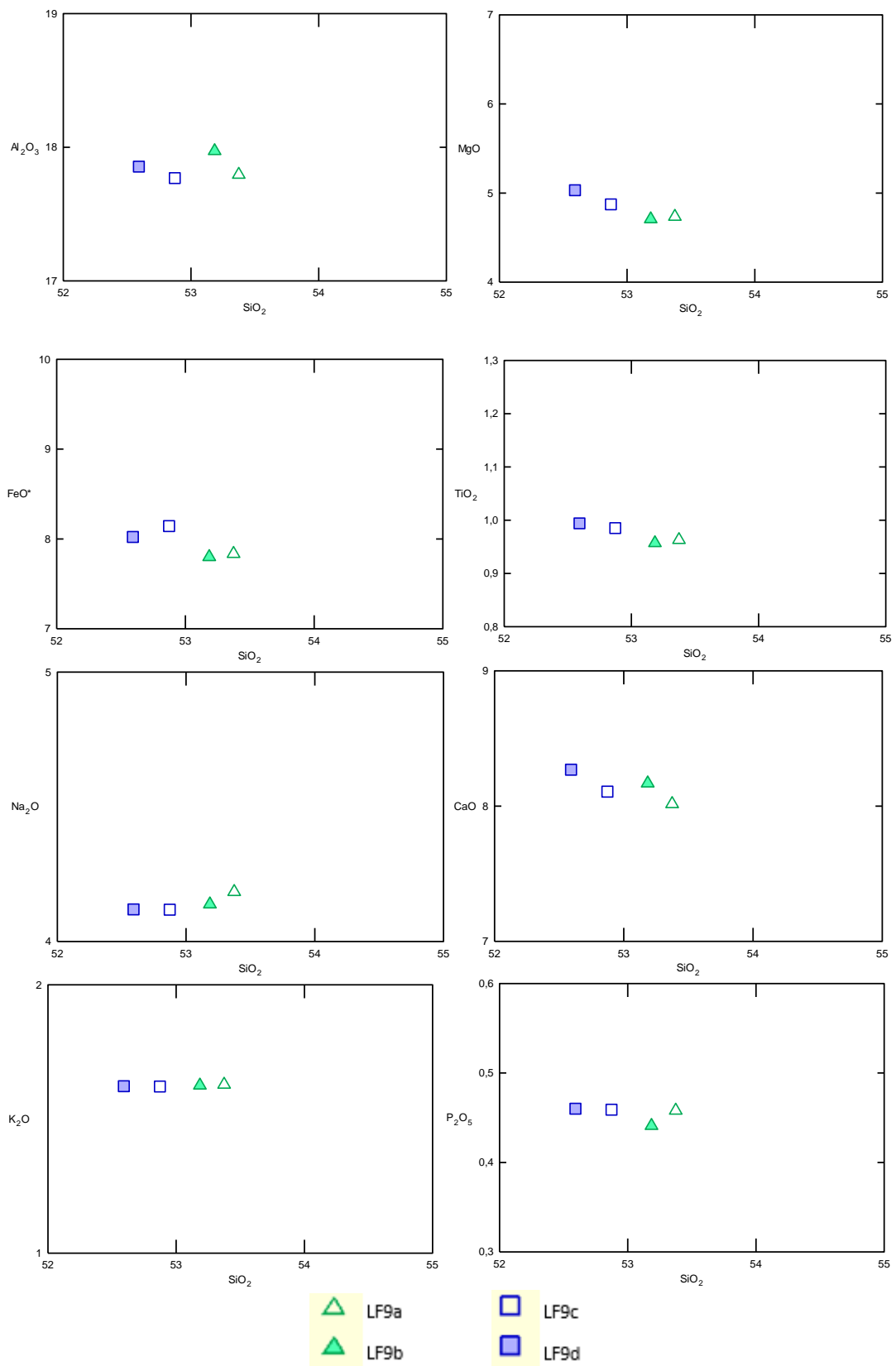


Figura 54: Diagramas Harker de muestras de roca del flujo de lava LF9 (Fig. 53) de El volcán El Reventador realizados en el software IGPET. Los valores geoquímicos para este análisis fueron Recuperados en la campaña de campo de noviembre del 2021.

La química de las muestras de roca del flujo de lava LF9 (Fig.54), indica una relativa homogeneidad en la composición de elementos mayores con un porcentaje que varía de 52.5 a 53.5 % de SiO₂. Los diagramas binarios Harker demuestran una correlación lineal positiva en % K₂O y %Na₂O, una correlación negativa para los óxidos %MgO, %TiO, %CaO y %FeO. que conservan una tendencia positiva. Por último, para él % de Al₂O₃ y P₂O₅ no se presenta una tendencia estrictamente ascendente y descendente por el pequeño número de muestras.

Los análisis químicos indican una continuidad de porcentaje de Sílice, pero no corresponde a la posición respecto al cráter del volcán (Fig. 54). Las muestras LF9a, LF9b y LF9c, están ubicadas en el leve sur, centro y leve norte respectivamente a la misma distancia del cráter, indicando que la muestra LF9a es la que mayor porcentaje en sílice presenta, seguida de la muestra central LF9b y posteriormente de LF9c. La muestra de roca que menos contenido de sílice posee es LF9d que corresponde a la más distal, ubicada en el leve Sur del flujo. Tomando en cuenta las muestras LF9a y LF9d, tanto en posición como distancia, a diferencia del análisis del flujo LF5, existe una disminución de porcentaje en Sílice, donde, la muestra M-13-LF9 analizada anteriormente tiene un valor de Sílice de 52.94% y su posición es la más cercana al frente de lava, este porcentaje es ligeramente mayor que LF9d. Esto quiere decir, que el valor de sílice está disminuyendo a medida que la muestra está más distal del cráter del volcán, pero en este caso es necesario que se obtenga un mayor número de muestras para que se pueda interpretar de mejor manera la correlación de distancia y porcentaje de Sílice (Fig. 55b).

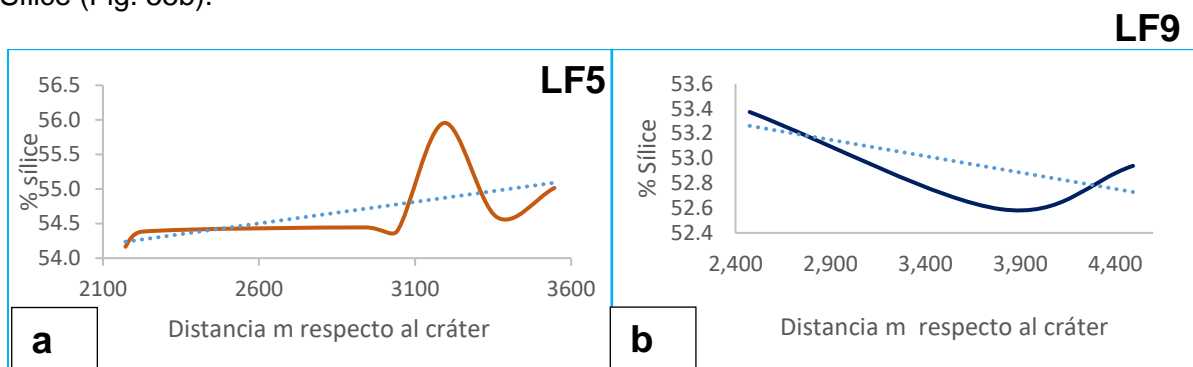


Figura 55: Distancia de muestras del leve Sur, desde el cráter respecto al porcentaje de sílice. a) LF5. b) LF9.

5.3. Estimación de parámetros reológicos en base a la composición

5.3.1. Reología LF5

5.3.1.1. Viscosidad del flujo de lava LF5

Viscosidad relativa (η_r) del flujo de lava LF5 (Tabla 17; Fig. 56) representada a continuación:

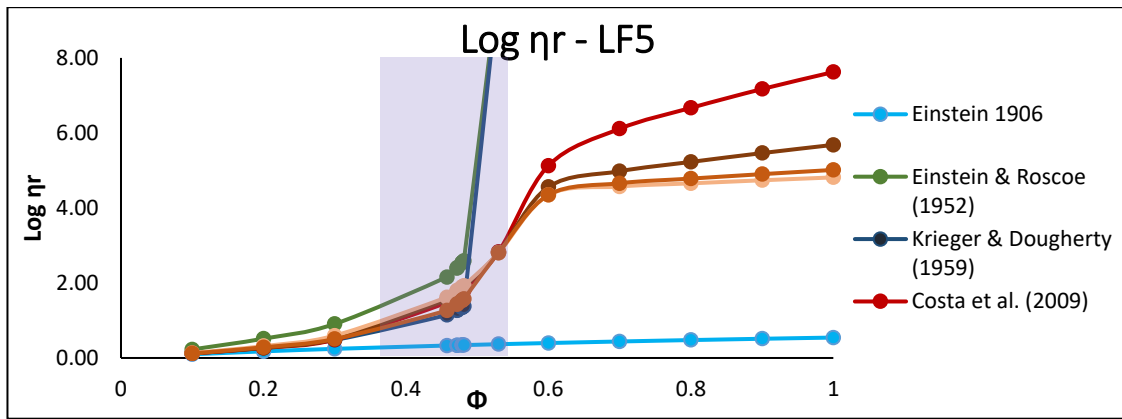


Figura 56: Log de viscosidad relativa respecto a la fracción cristalina. Se aprecia que el modelo de Einstein y Roscoe, 1952; y Krieger y Dougherty, 1959 tienden a valores infinitos y el modelo de Costa et al., 2009 se apega más a valores reales cuando la fracción cristalina tiende al empaquetamiento máximo. Zona morada representa los valores de las muestras de los flujos de lava analizados en este trabajo.

Mediante la cuantificación de componentes en la petrografía, se procedió a determinar el logaritmo de la viscosidad relativa (η_r) a través de 4 modelos que se encuentran en función del contenido de cristales a lo largo de las muestras adquiridas en el flujo de lava LF5 (Tabla 17).

Tabla 17

Resultado de la viscosidad relativa de la lava LF5, mediante los 4 modelos aplicados: Einstein, 1906; Einstein y Roscoe, 1952; Krieger y Dougherty, 1959; Costa et al., 2009. Para el modelo de Costa et al., 2009 se utilizó 4 valores de tasa de deformación del flujo según Caricchi et al., 2007.

LAVAS	Log η_r -1	Log η_r -2	Log η_r -3	Log η_r -4	Log η_r -5	Log η_r -6	Log η_r -7
	Einstein, 1906	Einstein y Roscoe, 1952	Krieger y Dougherty, 1959	Costa et al., 2009	Costa et al., 2009	Costa et al., 2009	Costa et al., 2009
LF5a	0.33	2.16	1.14	1.47	1.55	1.62	1.26
LF5b	0.34	2.39	1.27	1.66	1.73	1.79	1.43
LF5c	0.34	2.41	1.28	1.68	1.75	1.81	1.44
LF5d	0.34	2.54	1.34	1.77	1.84	1.89	1.53
LF5e	0.34	2.54	1.35	1.78	1.84	1.89	1.54
LF5f	0.34	2.59	1.37	1.81	1.88	1.93	1.57
LF5-REV58	0.37	∞	∞	2.83	2.81	2.80	2.80

Se determinó un aumento de viscosidad relativa (η_r) a medida que la muestra se aleja del cráter del volcán, lo cual, se debe al aumento de la fracción cristalina (Tabla 17; Fig.56). El Log de la viscosidad relativa del modelo de Einstein (1906) indica una variación del 0.33 a

0.37, mostrando similitud en sus resultados, pero no apegado al valor de los otros modelos. En el modelo de Einstein y Roscoe, 1952, al igual que en el modelo de Krieger y Dougherty, (1959) no da un valor exacto a medida que la fracción cristalina se acerca al empaquetamiento máximo y por consecuencia conducen a valores infinitos, se tiene una variación de 2.16 a infinito y de 1.14 a infinito respectivamente.

En este trabajo, se tomó énfasis a los resultados obtenidos mediante el modelo de Costa et al. (2009) debido a que es el único modelo que aparte de la fracción cristalina, la viscosidad depende de la velocidad de deformación y así, se puede obtener valores a medida que la fracción cristalina se aproximaba al empaquetamiento máximo. Para este modelo se consideró 4 valores diferentes de velocidad de deformación según Caricchi et al. (2007) ($1E-04 \text{ s}^{-1}$, $1E-03 \text{ s}^{-1}$, $1E-02 \text{ s}^{-1}$) y $4.16E-03 \text{ s}^{-1}$ correspondiente al valor estimado de la tasa de deformación del flujo LF5. Tomando énfasis al último valor, el resultado indica una variación de 1.26 -2.83 del Log de η_r , lo que es igual a 18,36 -672.68 de η_r (Tabla 17; Fig.56).

Los resultados para la viscosidad fluida (η_f) de las muestras de roca total (LF5a-f) y del líquido residual (LF5-REV 58) (Tabla 18; Fig.57), son presentados a continuación, estos fueron calculados a temperaturas de 737 a 775.5 ° C, en base a las imágenes térmicas registradas en el momento de emisión.

Tabla 18

Resultados de la viscosidad fluida de la lava LF5, mediante el modelo de Giordano et al., 2008. El rango de temperatura varía desde los 737 a 775.5 °C

Log η_f LF5			
Lava	737 °C	757 °C	775.5 °C
LF5a (Pa.s)	9.36	8.8	8.31
LF5b (Pa.s)	9.49	8.92	8.43
LF5c (Pa.s)	9.11	8.57	8.11
LF5d (Pa.s)	9.35	8.79	8.3
LF5e (Pa.s)	10	9.41	8.91
LF5f (Pa.s)	9.37	8.81	8.33
LF5-REV58 (Pa.s)	9.9	9.3	8.8

Para la obtención de la viscosidad fluida (η_f) de LF5 se prefijó un rango de 737 a 775.5 ° C el cual, se encuentra dividido en 3 temperaturas captadas a una distancia de 1000 m, 1500 m y 2000 m, con el fin de entender la variación de cada muestra. Esto ha permitido mostrar la variabilidad correspondiente de las rocas andesíticas (Fig. 21, 57) a esa temperatura, pertenecientes a los modelos experimentales.

El rango de valores de log η_f a los 737°C corresponde 9.11 – 10 Pa.s, a temperatura de 757 °C el rango disminuye entre 8.57- 9.41 Pa.s. y para 775.5 °C el log de la viscosidad fluida está

entre 8,11-8.91 Pa.s Dando como resultado un log de viscosidad fluida para las lavas del Reventador de 8.11 a 10 Pa.s (Fig. 57; Tabla 18). Así también, en la gráfica Log η_f vs T se observa que a menores temperaturas el valor de esta viscosidad es mucho mayor que a mayores temperaturas (Fig. 57).

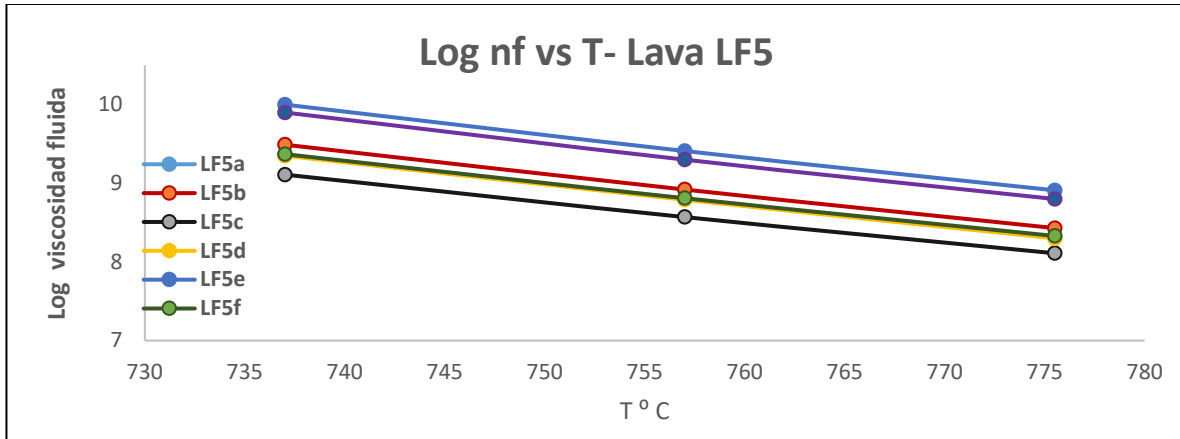


Figura 57: Log de viscosidad fluida respecto a la Temperatura de LF5. Se observa una variación continua de las muestras a medida que la temperatura aumenta.

Por ello, la temperatura del flujo de lava es uno de los factores importantes para la determinación de la viscosidad, ya que define el valor exacto de viscosidad y a su vez indica si este valor es alto o bajo.

Se observa en la tabla de resultados de viscosidad fluida (Tabla 18) un aumento desde la lava LF5a hasta la LF5-REV 58 indicando que, al igual que la viscosidad relativa, en la viscosidad fluida los valores incrementan a medida que está más distal del cráter del volcán. Sin embargo, el aumento no es progresivo (Fig. 58).

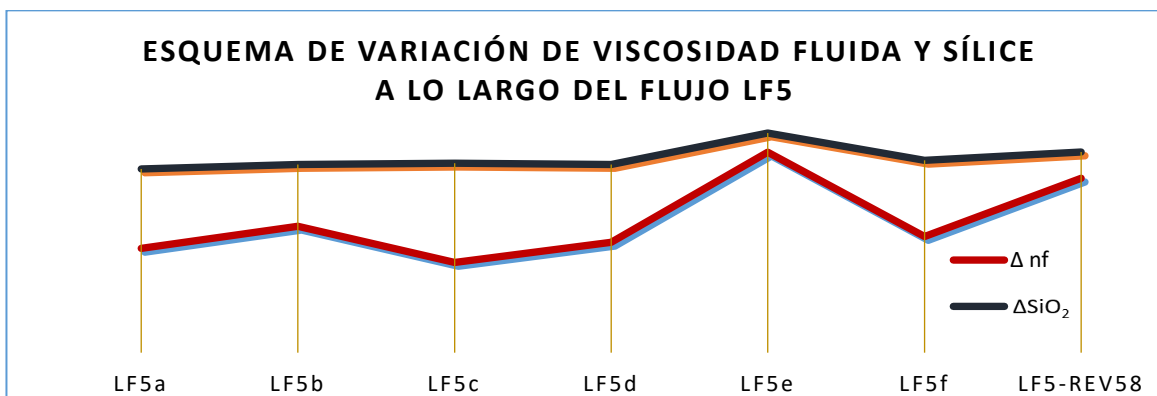


Figura 58: Esquema de variación de viscosidad fluida y porcentaje de Sílice a lo largo del flujo LF5.

Se visualiza que, a lo largo del flujo, la viscosidad fluida aumenta y disminuye, coincidente al aumento y disminución del % de SiO_2 de las muestras (Fig. 58).

La tabla de resultados de la viscosidad total (η_T) (Tabla 19) hace referencia a 3 valores para cada muestra de viscosidad fluida a temperaturas de 737 °C, 757 °C y 775.5 °C. Así también, se consideró el resultado empleado en los 4 métodos aplicados para el cálculo de viscosidad relativa. Al analizar los valores resultantes estimados de la viscosidad relativa del fluido, se determinó que el modelo que más se apega a resultados coherentes para andesitas basálticas es el modelo de Costa et al. (2008). Como resultado se tiene que el log de la viscosidad total del flujo de LF5 varía desde 9.55 a 11.54 Pa.s, lo que es igual a 3.55×10^9 a 3.47×10^{11} Pa.s.

Tabla 19

Resultados de la viscosidad total de la lava LF5 mediante la combinación de los 4 modelo para la viscosidad relativa con el modelo de Giordano et al. (2008) para la viscosidad fluida. Se enfatizó en el resultado de la viscosidad total con el modelo de Costa et al. (2009)

LAVA		LF5a	LF5b	LF5c	LF5d	LF5e	LF5f	LF5 REV58
Log η_f - 737°C		9.36	9.49	9.11	9.35	10	9.37	9.9
Log η_f - 757°C		8.8	8.92	8.57	8.79	9.41	8.81	9.3
Log η_f - 775.5°C		8.31	8.43	8.11	8.3	8.91	8.33	8.8
Log η_r -1	Einstein 1906	0.33	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.37
Log η_r -2	Einstein y Roscoe, 1952	2.16	2.39	2.41	2.54	2.54	2.59	
Log η_r -3	Krieger y Dougherty, 1959	1.14	1.27	1.28	1.34	1.35	1.37	
Log η_r -4	Costa et al., 2009	1.26	1.43	1.44	1.53	1.54	1.57	2.80
(Log η_T) 737°C	Einstein 1906	9.69	9.83	9.45	9.69	10.34	9.71	10.27
	Einstein y Roscoe, 1952	11.52	11.88	11.52	11.89	12.54	11.96	
	Krieger y Dougherty, 1959	10.50	10.76	10.39	10.69	11.35	10.74	
	Costa et al., 2009	10.62	10.92	10.55	10.88	11.54	10.94	12.70
(Log η_T) 757°C	Einstein 1906	9.13	9.26	8.91	9.13	9.75	9.15	9.67
	Einstein y Roscoe, 1952	10.96	11.31	10.98	11.33	11.95	11.40	
	Krieger y Dougherty, 1959	9.94	10.19	9.85	10.13	10.76	10.18	
	Costa et al., 2009	10.06	10.35	10.01	10.32	10.95	10.38	12.10
(Log η_T) 775.5°C	Einstein 1906	8.64	8.77	8.45	8.64	9.25	8.67	9.17
	Einstein y Roscoe, 1952	10.47	10.82	10.52	10.84	11.45	10.92	
	Krieger y Dougherty, 1959	9.45	9.70	9.39	9.64	10.26	9.70	
	Costa et al., 2009	9.57	9.86	9.55	9.83	10.45	9.90	11.60

5.3.1.2. Límite elástico de LF5

En este caso, la dependencia del límite elástico se debe únicamente al aumento del contenido de cristales (Tabla 20; Fig.59).

Tabla 20

Resultados del límite elástico de la lava LF5 utilizando 3 modelos dependientes de la fracción cristalina:
 Ryerson et al. (1988); Mueller et al. (2010); Sehlke et al. (2014).

LAVA	Φ	Log τ 1	Log τ 2	Log τ 3
		Ryerson et al. (1988)	Mueller et al. (2010)	Sehlke et al. 2014
LF5a (Pa)	0.46	2.845	1.985	2.665
LF5b (Pa)	0.47	2.882	2.752	2.744
LF5c (Pa)	0.47	2.885	2.864	2.751
LF5d (Pa)	0.48	2.901	3.947	2.786
LF5e (Pa)	0.48	2.902	4.058	2.787
LF5f (Pa)	0.48	2.908	∞	2.800

En este trabajo para determinar el límite elástico se utilizó 3 modelos los cuales dependen únicamente de la fracción cristalina. Los resultados con Ryerson et al. (1988) indican que el valor logarítmico de τ aumenta exponencialmente a medida que aumenta su contenido de cristales. La variación del límite elástico va de 6.99×10^2 a 8.09×10^2 Pa. En Mueller et al. (2010), la variación de τ va desde 9.67×10^1 a 1.14×10^4 Pa una muestra antes del infinito, debido a que, en este caso, la fracción cristalina tiende a acercarse al empaquetamiento máximo. Por último, Sehlke et al. (2014) presenta valores de 4.63×10^2 hasta 6.30×10^2 Pa.

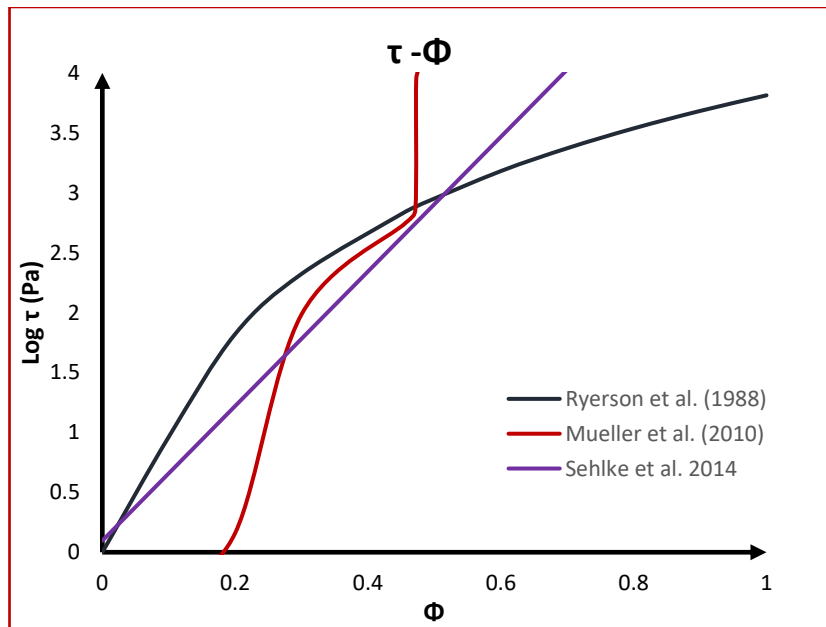


Figura 59: Log de límite elástico en función de la fracción cristalina de LF5 utilizando los modelos de:
 Ryerson et al. (1988); Mueller et al. (2010); Sehlke et al. 2014.

5.3.2. Reología LF9

5.3.2.1. Viscosidad del flujo de lava LF9

Mediante la cuantificación de componentes en la petrografía, se procedió a calcular la viscosidad relativa a través de 4 modelos que se encuentran en función del contenido de cristales a lo largo de las muestras adquiridas en el flujo de lava LF9.

Se determinó un aumento de viscosidad relativa a medida que la muestra se encontraba más distal del cráter del volcán, lo cual, se debe al aumento cristalino que se tiene progresivamente. No se consideró a la muestra M-13-LF9 por su alto porcentaje de vesicularidad (porcentaje anómalo que no representa al flujo). Por lo que, el cálculo solo es posible con las muestras del leve sur LF9a y LF9d (Tabla. 21; Fig. 60). El Log de la viscosidad relativa en el modelo de Einstein (1906) indica una variación del 0.32 a 0.33, mostrando similitud en sus resultados, pero no apegado al valor de los otros modelos.

Tabla 21

Resultados de la viscosidad relativa de la lava LF9, mediante los 4 modelos aplicados: Einstein, 1906; Einstein y Roscoe, 1952; Krieger y Dougherty, 1959; Costa et al., 2009. Para el modelo de Costa et al., 2009 se utilizó 4 valores de tasa de deformación del flujo según Caricchi et al., 2007.

	Log η_r -1	Log η_r -2	Log η_r -3	Log η_r -4	Log η_r -5	Log η_r -6	Log η_r -7
LAVAS	Einstein 1906	Eisntein y Roscoe, 1952	Krieger y Dougherty, 1959	Costa et al., 2009	Costa et al., 2009	Costa et al., 2009	Costa et al., 2009
LF9a	0.32	2.73	1.29	1.72	1.78	1.82	1.51
LF9d	0.33	3.38	1.60	2.05	2.09	2.11	1.87

En el modelo de Einstein y Roscoe, (1952), se tiene una variación de 2.73 a 3.38; en el de Krieger y Dougherty, (1959) da un valor de 1.29 a 1.60. Al igual que el flujo LF5, se tomó énfasis en el modelo de Costa et al. (2009) con velocidad de deformación del flujo LF9 de $5.94 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, debido a que es el único modelo que aparte de la fracción cristalina, la viscosidad depende de la velocidad de deformación dando valores más exactos. Este modelo indica una variación de 1.51 a 1.87 del Log de η_r , lo que es igual 32.36 a 74.13.

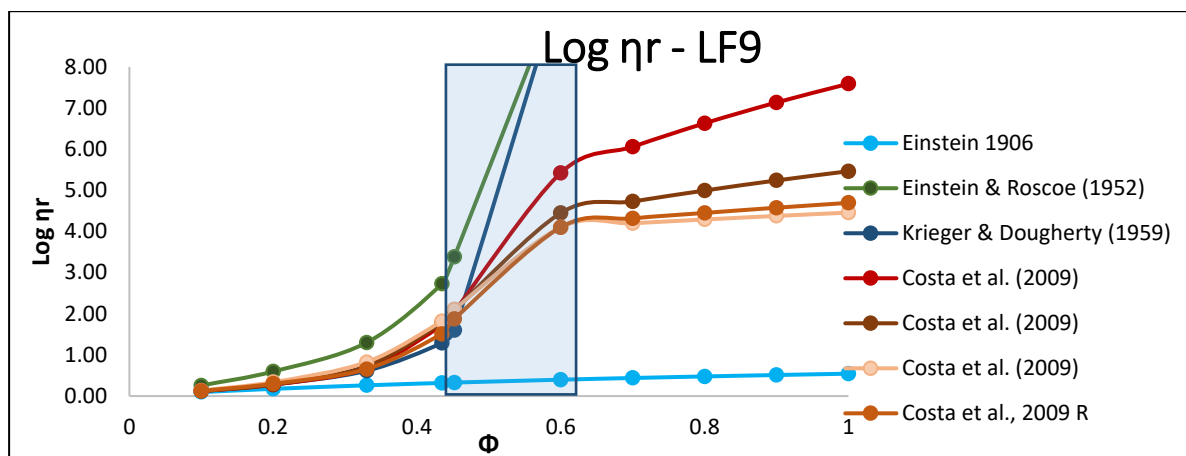


Figura 60: Log de viscosidad relativa de LF9 respecto a la fracción cristalina. Se aprecia que el modelo de Einstein y Roscoe, 1952; y Krieger y Dougherty, 1959 tienden a valores infinitos y el modelo de Costa et al., 2009 se apega a valores reales para andesitas. Zona marcada representa los valores de las muestras de los flujos de lava analizados.

El cálculo de la viscosidad fluida se aplicó para las muestras LF9a y LF9d a temperaturas desde 737 ° C a 775.5 ° C, en base a los resultados de cámaras térmicas, y utilizando el modelo GRD. Se observa una ligera disminución de viscosidad fluida desde la muestra LF9a hasta LF9d a medida que está más distal al cráter del volcán (Tabla 22; Fig.61).

Tabla 22

Resultados de la viscosidad fluida de la lava LF9, mediante el modelo de Giordano et al., 2008. El rango de temperatura varía desde los 737 a 775.5 °C

Log ηf LF9			
Flujo de lava	737°C	757°C	775.5°C
LF9a (Pa.s)	9.7	9.08	8.56
LF9d (Pa.s)	9.6	8.97	8.44

El rango de valores de η_f a los 737°C corresponde a 9.6 – 9.7 Pa.s y a temperaturas de 775.5 °C el rango disminuye a 8.44 - 8.56. Dando como resultado un log de viscosidad fluida para LF9 de 8.44 a 9.7 Pa.s.

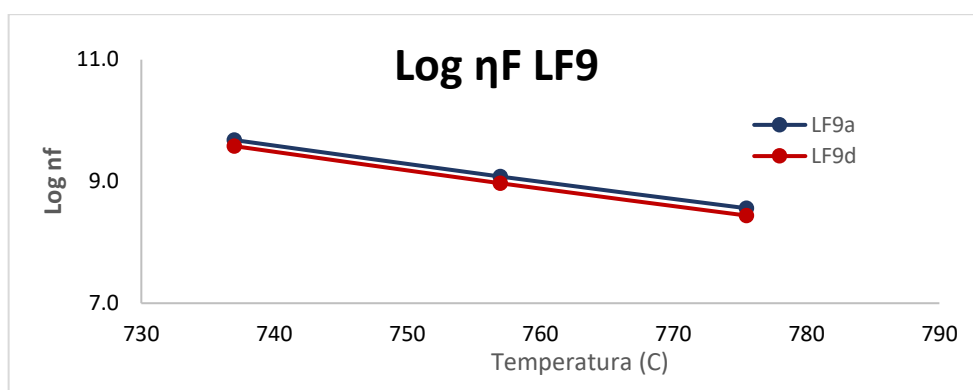


Figura 61: Log de viscosidad fluida respecto a la temperatura de LF9. Se observa una variación continua de las muestras a medida que la temperatura aumenta.

El log de la viscosidad total del flujo LF9 enfatizando el modelo de Costa et al. (2009) da un rango de 10.07 a 11.45 Pa.s, lo que es igual a 1.17×10^{10} - 2.82×10^{11} Pa.s (Tabla 23).

Tabla 23

Resultados de la viscosidad total de la lava LF9 mediante la combinación de los 4 modelo para la viscosidad relativa con el modelo de Giordano et al., 2008 para la viscosidad fluida. Se enfatizó en el resultado de la viscosidad total de Costa et al. (2009)

LAVA		LF9a (Pa.s)	LF9d (Pa.s)
737° C		9.7	9.6
757° C		9.08	8.97
775.5° C		8.56	8.44
η_r-1	Einstein 1906	0.32	0.33
η_r-2	Einstein y Roscoe, 1952	2.73	3.38
η_r-3	Krieger y Dougherty, 1959	1.29	1.6
η_r-4	Costa et al., 2009	1.51	1.87
(Log η) 737° C	Einstein 1907	10	9.91
	Einstein y Roscoe, 1953	12.41	12.96
	Krieger y Dougherty, 1960	10.97	11.18
	Costa et al., 2010	11.19	11.45
(Log η) 757° C	Einstein 1907	9.4	9.3
	Einstein y Roscoe, 1953	11.81	12.35
	Krieger y Dougherty, 1960	10.37	10.57
	Costa et al., 2010	10.59	10.84
(Log η) 775.5° C	Einstein 1907	8.88	8.77
	Einstein y Roscoe, 1953	11.29	11.82
	Krieger y Dougherty, 1960	9.85	10.04
	Costa et al., 2010	10.07	10.31

5.3.2.2. Límite elástico de LF9

En este caso, la dependencia del límite elástico se debe únicamente al aumento del contenido de cristales. Se utilizó los 3 modelos que dependen únicamente de la fracción cristalina. En Ryerson et al. (1988) se puede observar que el valor logarítmico de τ , aumenta a medida que aumenta su contenido de cristales (Tabla 24; Fig. 62).

Tabla 24

Resultados del límite elástico de la lava LF9 utilizando 3 modelos dependientes de la fracción cristalina: Ryerson et al. (1988); Mueller et al. (2010); Sehlke et al. (2014).

LAVA	Φ	Log τ 1	Log τ 2	Log τ 3
		Ryerson et al. (1988)	Mueller et al. (2010)	Sehlke et al. (2014)
LF9a (Pa)	0.43	2.78	1.56	2.54
LF9d (Pa)	0.45	2.83	2.08	2.63

La variación de Log Límite elástico va de 2.78 a 2.83 Pa. En Mueller et al. (2010), La variación de τ va desde 1.56 a 2.08 Pa, en este caso, la fracción cristalina tiende a acercarse al empaquetamiento máximo. Por último, Sehlke et al. (2014) presenta valores de 2.54 a 2.63 Pa (Tabla 24; Fig. 62).

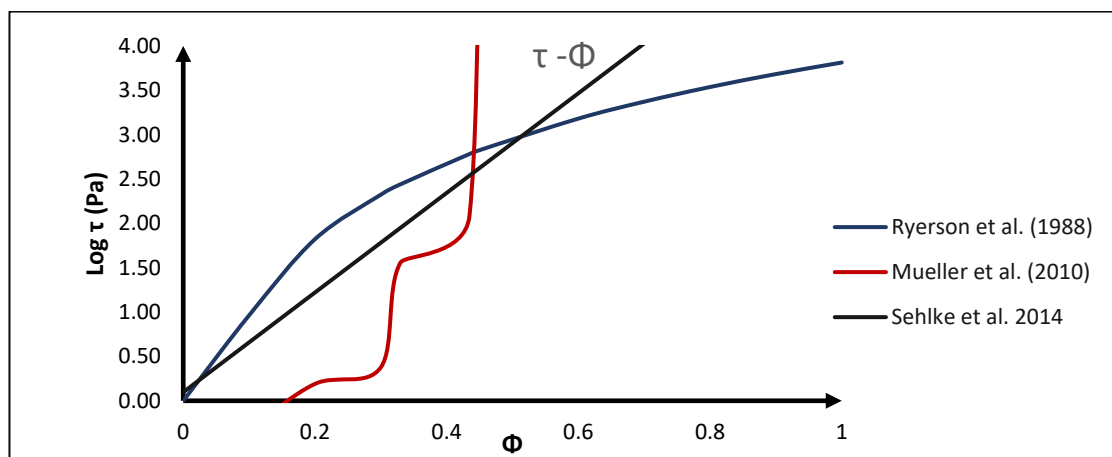


Figura 62: Log de límite elástico de LF9 en función de la fracción cristalina utilizando Ryerson et al. (1988); Mueller et al. (2010); Sehlke et al. 2014.

5.3.3. Reología de cada fase eruptiva

5.3.3.1. Viscosidad total de cada fase eruptiva

Para calcular la viscosidad total de las 6 fases eruptivas, se tomó los valores geoquímicos y de fracción cristalina representativos que corresponden a una muestra de cada flujo LF1, LF5, LF9, LF11, LF25 y LF82 (Fig. 63).

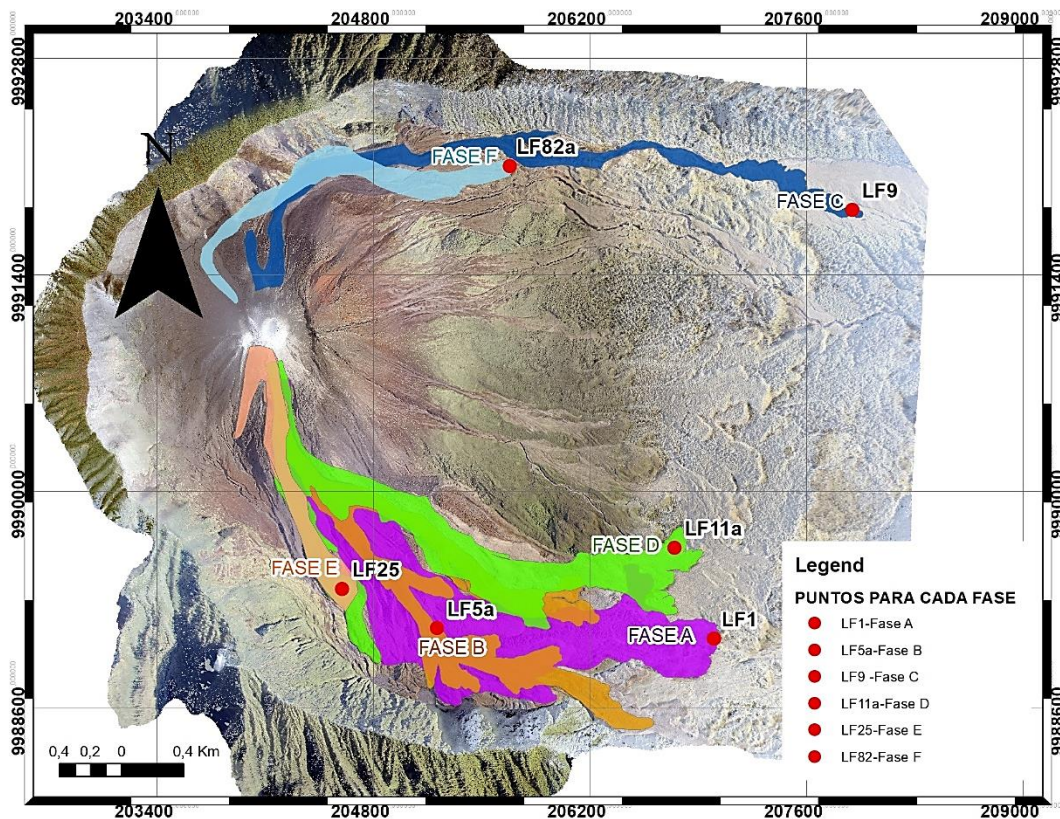


Figura 63: Posición de las muestras correspondiente a cada Fase eruptiva. Se seleccionó 6 muestras significativas que representen a cada fase eruptiva y con ello calcular la reología a lo largo de la actividad.

Cada una de estas muestras pertenecen a las fases de la actividad efusiva del volcán El Reventador hasta la actualidad A, B, C, D, E, F. Mediante los 4 modelos para la viscosidad relativa junto al modelo de Giordano et al. (2008) para viscosidad fluida, aplicados en la reología de LF5 y LF9, se calculó cada una de estas muestras. Los resultados se describen a continuación (Tabla 25):

Tabla 25

Viscosidad relativa de una muestra significativa de cada fase eruptiva del volcán El Reventador desde el 2002 hasta la actualidad

FASES	LAVAS	FLUJO DE LAVA ANALIZADO	TIEMPO MEDIO	Log de Viscosidad Relativa η_r			
				Log η_r 1- Einstein 1906	Log η_r 2- Einstein y Roscoe 1952	Log η_r 3- Krieger y Dougherty, 1959	Log η_r 4 - Costa et al., 2009
A	LF1-LF2	LF1	2002	0.352	1.360	0.952	0.957
B	LF3-LF7	LF5	2006	0.331	2.158	1.144	1.264
C	LF8-LF10	LF9	2009	0.260	1.287	0.609	0.650
D	LF11-LF17	LF11	2012	0.286	2.140	0.928	1.064
E	LF18-LF75	LF25	2016	0.240	4.513	1.354	1.546
F	LF76-82	LF82	2018	0.352	3.602	1.869	2.139

En la viscosidad relativa para cada fase se empleó los 4 modelos: Einstein, (1906); Einstein y Roscoe (1952); Krieger y Dougherty (1959); Costa et al. (2009), dando énfasis al resultado de Costa et al. (2009). La Fase A, la cual corresponde al inicio de la reactivación volcánica de El Reventador, tiene un log de viscosidad relativa desde 0.352 -1.360, tomando el valor de 0.957, coincidente con los resultados de Krieger y Dougherty, (1959). En la Fase B, utilizando la muestra de LF5a depositada en el leve Sur, hay un rango de 0.331 a 2.158. La Fase C tiene valores de 0.260 a 1,287, utilizando la muestra LF9-M13. Para la Fase D su resultado varía de 0.286 a 2.140, con un valor de Costa et al. (2009) de 1.064. Para la Fase E, fase que presenta menor alcance de emplazamiento, el log de viscosidad relativa va desde 0.240 a 4.513. Por último, para la Fase F, correspondiente a la fase actual, el rango va desde 0.352 a 3.602. Los resultados indican que existe un incremento progresivo desde la Fase C hasta la F a excepción de los resultados del cálculo con el método de Einstein y Roscoe, (1952) que hay una ligera disminución en la última fase (Fig. 64).

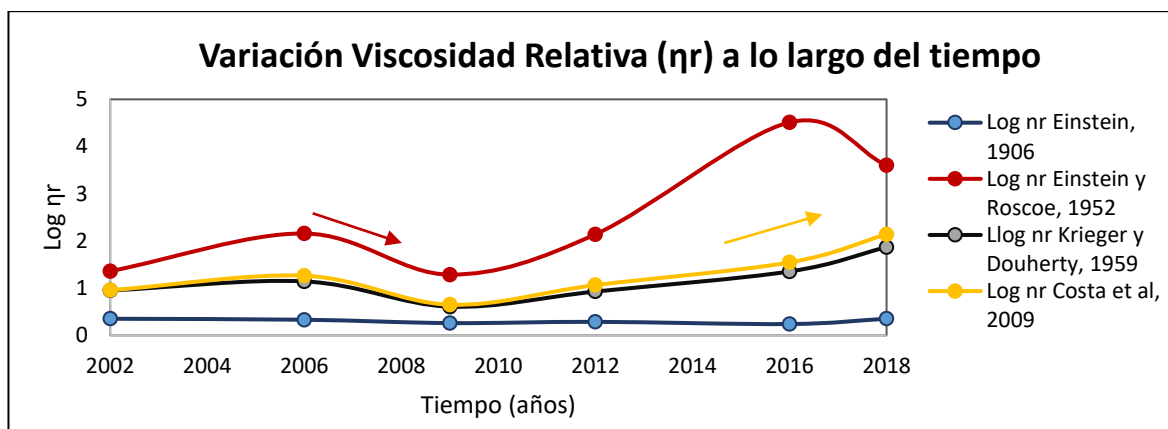


Figura 64: Viscosidad relativa de una muestra significativa de cada fase eruptiva del volcán El Reventador desde el 2002 hasta la actualidad utilizando los 4 métodos para el cálculo de la viscosidad relativa: Einstein, 1906; Einstein y Roscoe, 1952; Krieger y Dougherty, 1959; Costa et al., 2009.

Para el cálculo de la viscosidad fluida se utilizó el método de Giordano et al. (2008) (Tabla 26; Fig. 65), el cual, calcula su logaritmo en base a la geoquímica de elementos mayores de las muestras en un rango de temperatura. Para estos datos se tomó las mismas muestras utilizadas para el cálculo de la viscosidad relativa (LF1, LF5, LF9, LF11, LF25 y LF82) con el rango de temperatura de 737°C a 775.5 °C, aplicada en los anteriores cálculos. El resultado de la viscosidad fluida en el rango de temperatura para cada Fase es el siguiente: para la Fase A se tiene una variación de 9.17 a 10.23 Pa.s. En la Fase B se tiene valores de 8.51 a 9.61 Pa.s; Los valores de la Fase C van de 8.35 a 9.47 Pa.s . Los valores de la Fase D están entre 8.48 a 9.58 Pa.s. Los valores de la Fase E están entre 8.78 a 9.85 Pa.s. Y, por último, los valores de la Fase F están entre 9.16 a 10.22 Pa.s (Tabla 26).

Tabla 26

Viscosidad fluida en un rango de Temperatura de 737°C a 775.5°C, de cada fase eruptiva del volcán El Reventador desde el 2002 hasta la actualidad utilizando el cálculo de Giordano et al. (2008).

Log de viscosidad fluida η_f			
FASES	737 °C	757 °C	775.5 °C
A (Pa.s)	10.23	9.66	9.17
B (Pa.s)	9.61	9.02	8.51
C (Pa.s)	9.47	8.86	8.35
D (Pa.s)	9.58	8.99	8.48
E (Pa.s)	9.85	9.27	8.78
F (Pa.s)	10.22	9.65	9.16

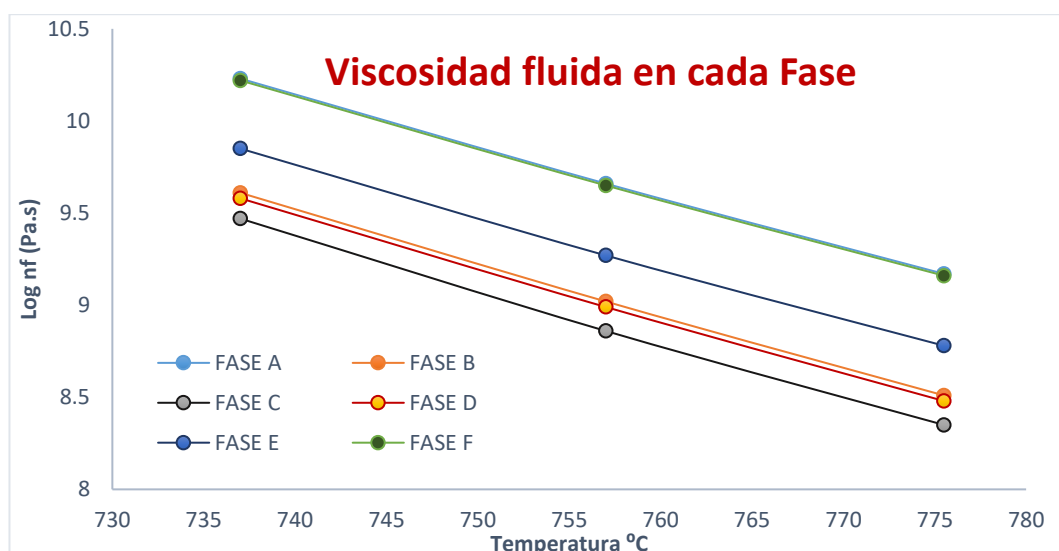


Figura 65: Variación de la viscosidad fluida de cada fase eruptiva en un rango de Temperatura de 737°C a 775.5°C.

Para el cálculo de la viscosidad total (Tabla 27; Fig. 66) se consideró el resultado de la viscosidad relativa de Costa et al. (2009) de cada Fase y la viscosidad fluida en temperatura de 737 °C y 775.5 °C. Con estos datos se obtuvieron los siguientes resultados. El Log de la viscosidad total en la Fase A está entre 10.13 a 11.19 Pa.s; en la viscosidad de la Fase B esta entre 9.77 a 10.87 Pa.s; en la Fase C los valores están entre 9 a 10.12 Pa.s; en la Fase D los valores están entre 9.54 a 10.64 Pa.s; el log de la viscosidad total de la Fase E es de 10.33 a 11.40 Pa.s; por último, en la fase F esta entre 11.30 a 12.36 Pa.s.

Tabla 27

Resultados de la viscosidad total de cada fase eruptiva mediante el producto de los 4 modelo para la viscosidad relativa con el modelo de Giordano et al., 2008 para la viscosidad fluida.

FASES	FLUJO DE LAVA ANALIZADO	TIEMPO MEDIO	Log Viscosidad Relativa η_r	Log Viscosidad fluida η_f			Log Viscosidad Total		
			Costa et al., 2009	737 °C (Pa.s)	757 °C (Pa.s)	775.5 °C (Pa.s)	Costa et al., 2009 - 737 °C (Pa.s)	Costa et al., 2009 - 757 °C (Pa.s)	Costa et al., 2009 - 775.5 °C (Pa.s)
A	LF1	2002	0.957	10.23	9.66	9.17	11.19	10.62	10.13
B	LF5	2006	1.264	9.61	9.02	8.51	10.87	10.28	9.77
C	LF9	2009	0.650	9.47	8.86	8.35	10.12	9.51	9.00
D	LF11	2012	1.064	9.58	8.99	8.48	10.64	10.05	9.54
E	LF25	2016	1.546	9.85	9.27	8.78	11.40	10.82	10.33
F	LF82	2018	2.139	10.22	9.65	9.16	12.36	11.79	11.30

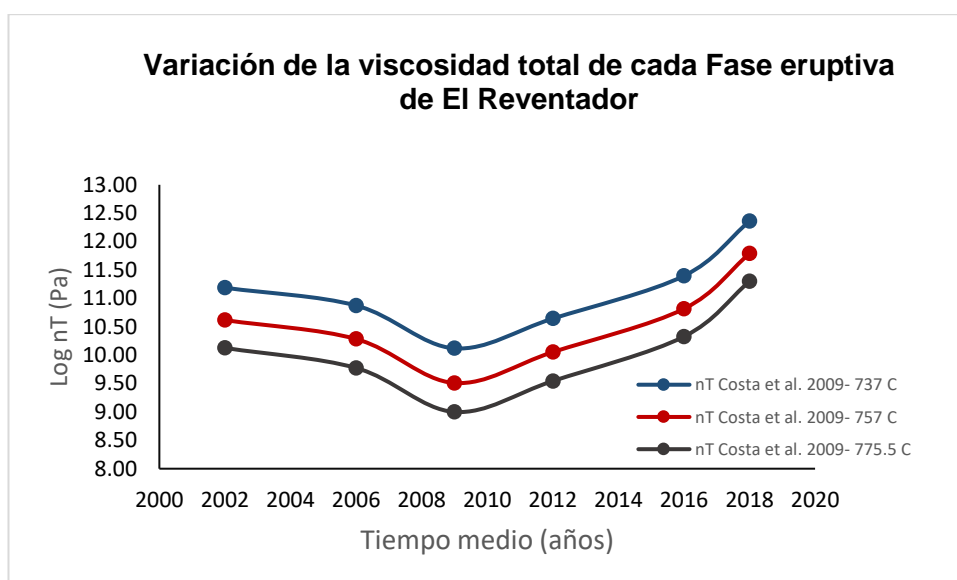


Figura 66: Variación de la viscosidad total a lo largo de la actividad eruptiva de El Reventador desde el 2002 hasta la actualidad. (Línea roja representa la viscosidad a temperaturas de 757°C, línea azul representa la viscosidad a 737°C y línea gris representa la viscosidad a temperatura de 775.5°C)

Se observa un incremento progresivo desde la Fase C hasta la Fase actual, a una temperatura de 737°C y 775.5°C con resultados paralelos y una diferencia de 1 (Fig. 66).

5.3.3.2. Límite elástico total de cada fase eruptiva

Para el cálculo del límite elástico (Tabla 28; Fig. 67), se consideró los 3 métodos utilizados en LF5 y LF9 (Ryerson et al. (1988); Mueller et al. (2010); Sehlke et al. (2014), para las muestras tomadas representando cada fase eruptiva. Se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 28

Resultados de límite elástico de cada fase eruptiva del volcán El Reventador utilizando los métodos de Ryerson et al. (1988); Mueller et al. (2010); Sehlke et al. (2014).

FASES	TIEMPO MEDIO	Φ	Φ_m	Log τ_1	Log τ_2	Log τ_3
				Ryerson et al. (1988)	Mueller et al. (2010)	Sehlke et al. (2014)
A (Pa)	2002	0.50	0.70	2.95	0.43	2.90
B (Pa)	2006	0.46	0.53	2.84	1.10	2.67
C (Pa)	2009	0.33	0.47	2.43	0.37	1.94
D (Pa)	2012	0.37	0.43	2.59	1.08	2.19
E (Pa)	2016	0.30	0.30	2.30	2.99	1.76
F (Pa)	2018	0.50	0.52	2.95	2.21	2.90

El límite elástico de la Fase A esta entre 0.43 a 2.95 Pa; el límite elástico de la Fase B esta entre 1.1 a 2.84 Pa; en la Fase C los valores están entre 0.37 a 2.43 Pa; en la Fase D los

valores de T están entre 1.08 a 2.59; el límite elástico de la Fase E es de 1.76 a 2.99 Pa. por último, el límite elástico de la fase E es de 2.21 a 2.95 Pa.

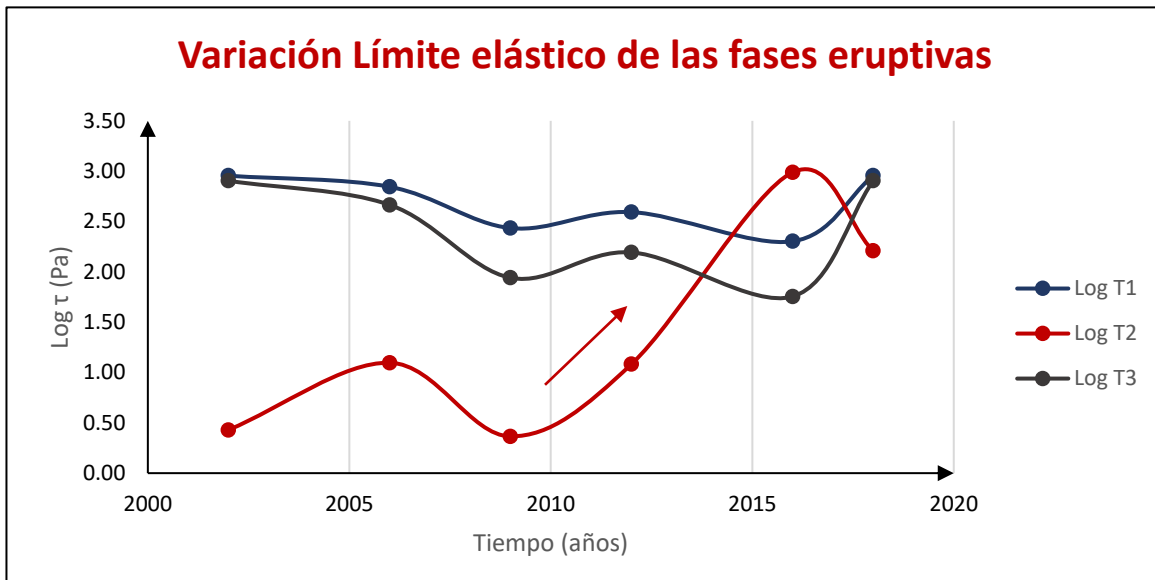


Figura 67: Variación del límite elástico a lo largo de la actividad eruptiva de El Reventador desde el 2002 hasta la actualidad.

Se observa que sus valores no son progresivos a lo largo del tiempo (Fig. 67). Existe un aumento únicamente mediante el método de Mueller et al. (2010) (Log τ_2). Sin embargo, en base a la utilización de los otros métodos (Log τ_1 - Ryerson et al., 1988; Log τ_2 Sehlke et al., 2014), los cuales presentan paralelismo, están representados por aumento y disminución a medida que pasa de una fase a otra.

5.4. Comparación de metodologías

Para entender la diferencia de los métodos se realizará una breve comparación entre los valores reológicos obtenidos en base a las mediciones morfológicas y en base a la composición, de muestras en una misma posición (Fig. 68, 69).

Se visualiza que, para el flujo de lava LF5 los perfiles P19 Y P21 trazados coinciden con la posición de los puntos M10-LF5d y M11-LF5e respectivamente (Fig. 69). El Log de los valores resultantes de viscosidad total de los 2 perfiles son de 7.658 Pa.s y 7.795 Pa.s (Tabla 12) y de las 2 muestras mediante el modelo de Costa et al. (2009) están presentes en un rango de 9.83 a 10.88 Pa.s y 10.45-11.54 Pa.s respectivamente (Tabla 17). Así también, el Log del límite elástico de los perfiles tienen valores de 4.826 y 4.79 Pa, respectivamente (Tabla 12) y de las muestras en base a Mueller et al. (2010) son de: 1.985 - 4.058 Pa (Tabla 20). Se

visualiza que los resultados de la viscosidad promedio en base a la morfología no se encuentra en el rango de valores obtenido en los cálculos realizados en base a su composición. El límite elástico no presenta coincidencia con los valores calculados morfológicamente como los calculados en base a su composición, pero son similares.

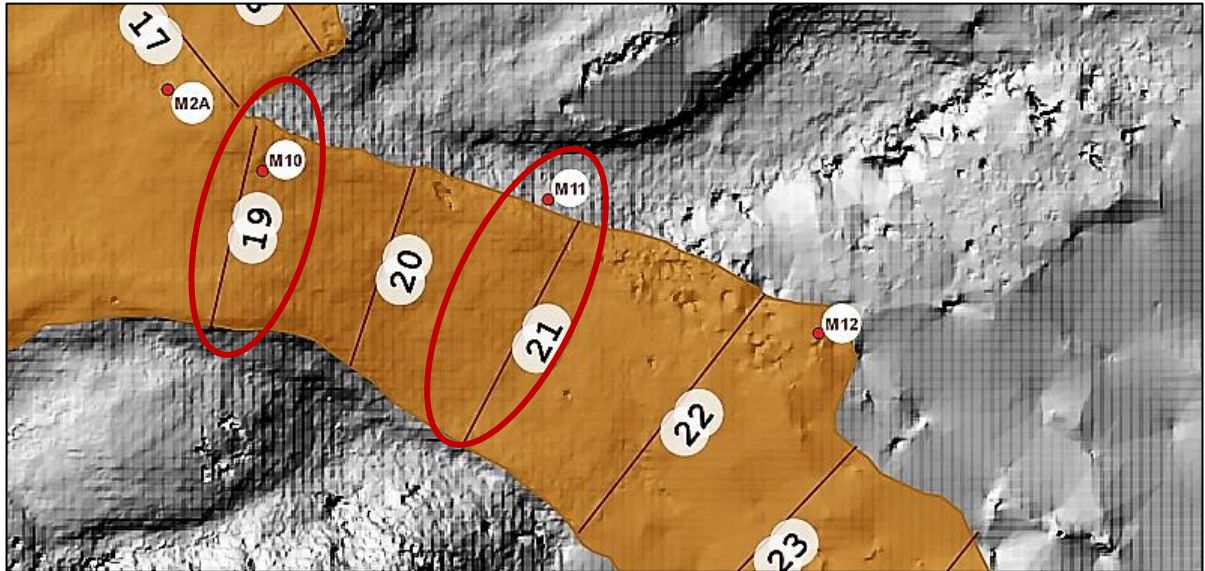


Figura 68: Localización de perfiles trazados para el cálculo morfológico de la reología y de los puntos correspondientes a las muestras para el cálculo de la reología en base a su composición del flujo LF5.

Para el flujo de lava LF9, mediante la comparación entre el perfil trazado P7 con la muestra LF9a (Fig. 69). El Log de los valores resultantes de viscosidad total del perfil es de 7.209 Pa.s (Tabla 13) y de la muestra mediante el modelo de Costa et al. (2009) presenta un rango de 10.07-11.19 Pa.s.(Tabla 23).

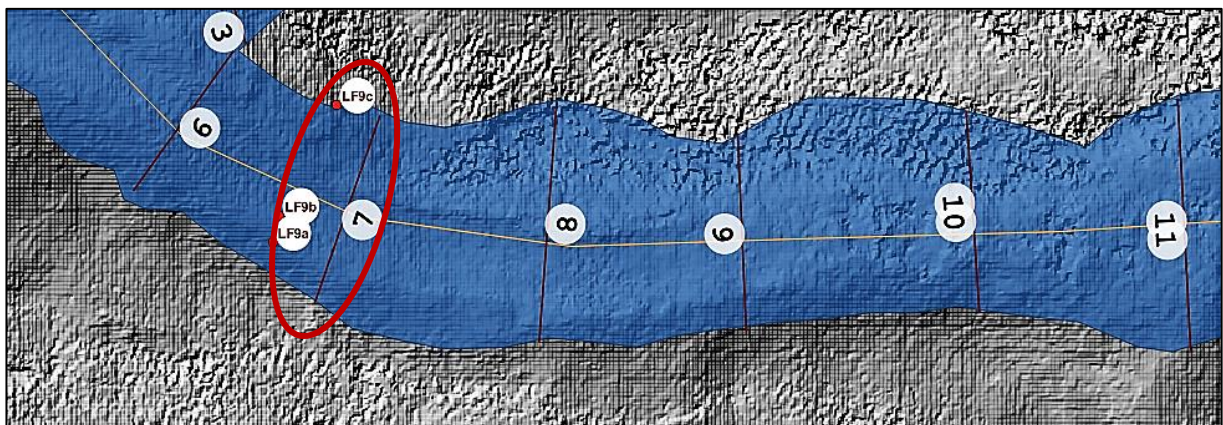


Figura 69: Localización de perfiles trazados para el cálculo morfológico de la reología y de los puntos correspondientes a las muestras para el cálculo de la reología en base a su composición del flujo LF9

Así también, el Log del límite elástico del perfil tiene un valor de 4.73 Pa. (Tabla 13) y de la muestra en base a Mueller et al. (2010) de 1.56 Pa (Tabla 24). Se visualiza que el resultado de la viscosidad promedio en base a la morfología no se encuentra en el rango de valores obtenido en los cálculos realizados en base a su composición, al igual que para el flujo LF5. El límite elástico no presenta coincidencia con los valores calculados morfológicamente como los calculados en base a su composición.

Estas diferencias pueden deberse a que los perfiles trazados en el método morfológico no representan perfiles ideales para la medición exacta del ancho, espesor, altura y pendiente. Así también, este método funciona mediante el promedio de todos los trazos generados a lo largo del flujo ya que existen diferencias topográficas que se desprecia al momento de comparar los parámetros en un solo perfil. Por último, los resultados obtenidos mediante el método composicional son muy altos debido a que la temperatura de fusión utilizada en las ecuaciones es muy baja, lo que conlleva valores altos de viscosidad. Para el límite elástico, los resultados en base a la composición presentan una alta variabilidad generando un valor más real al calculado mediante las mediciones morfológicas.

CAPÍTULO VI

6. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El presente capítulo expone la dinámica reológica a lo largo de la actividad eruptiva de El Reventador, donde se compara los resultados reológicos de los flujos de lavas de este volcán en base a las mediciones morfológicas y cálculos en base a su composición (Capítulo V), junto con valores de la literatura correspondientes a flujos de lava de similares composiciones. Así también muestra la variabilidad composicional entre los flujos de lava analizados y a lo largo de los mismos. Por último, en base a los resultados reológicos composicional, se realiza una interpretación del dinamismo y la obtención de resultados finales totales para las lavas del volcán a lo largo de la actividad eruptiva.

6.1. Caracterización reológica de lavas andesíticas de El Reventador

Como se describió en el capítulo V, los flujos del volcán El Reventador son de composición andesita basáltica, especialmente en las primeras Fases eruptivas (Fase A, B, C, D, E); mientras que la última (Fase F), los flujos de lava son traquiandesíticos. Esta composición es afirmada mediante su descripción petrográfica y geoquímica.

Las viscosidades calculadas usando las ecuaciones de Jeffreys y Nichols (1939) para el flujo LF5 y LF9 son de 8.12×10^7 Pa.s y 8.3×10^7 Pa.s respectivamente, donde asume un comportamiento reológico Bingham (Fig. 34). Por lo especificado anteriormente, estos valores son aproximaciones que no consideran en su totalidad la heterogeneidad de la lava (porcentaje de cristales, vesículas y geoquímica de elementos mayores). Sin embargo, su resultado es similar a la viscosidad de las lavas andesíticas de Infiernillo en Michoacán-México, con un valor de 3.68×10^8 Pa.s (Reyes Guzmán, 2019), a los flujos del Tungurahua a temperaturas de 1098°C (Chevrel et al., 2015) y al flujo F6 andesítico de Metate (Chevrel et al., 2016b) (Tabla 29). Así también, en Pinkerton y Wilson (1994) el valor de la viscosidad aparente para un flujo andesítico es de 1×10^5 a 1×10^9 Pa.s, con un límite elástico de 0.5×10^5 a 3.6×10^5 Pa. El límite elástico de los 2 flujos LF5 y LF9, calculados en base a su morfología, corresponde a valores similares al rango inferido para flujos andesíticos, cuya magnitud es de 4.43×10^4 Pa y 6.79×10^4 Pa respectivamente.

Es necesario señalar que la geometría de los perfiles trazados a lo largo de estos flujos (LF5 y LF9) no son ideales para este tipo de medición, como los trazados en Chevrel et al. (2013), Ramírez (2020) (Fig. 21) y Calderón (2022) ya que éstos presentan varias irregularidades superficiales, que no permiten una correcta medida del ancho y espesor en cada perfil (Fig. 33, 34), generando valores con alta disparidad entre sí.

Tabla 29: Parámetros reológicos resultantes en diferentes flujos de lava de volcanes del mundo

Parámetros reológicos estimados mediante el método morfológico				
Autor	Volcán	Viscosidad (Pa.s)	Límite elástico (Pa)	Composición
Belousov y Belousova (2018)	Tolbachik, Russia	$5 \times 10^3 - 5 \times 10^4$		Traquiandesitas basálticas
Belousov y Belousova (2018)	Tolbachik, Russia	$6 \times 10^4 - 4 \times 10^5$		Traquiandesitas basálticas
Reyes Guzmán (2019)	Malpaís de Zacapu-El Capaxtiro	1.45×10^{10}	1.03×10^5	Andesita dacítica
Reyes Guzmán (2019)	Malpaís de Zacapu-El Infiernillo	3.68×10^8	2.20×10^4	Andesítica
Reyes Guzmán (2019)	Malpaís de Zacapu-Malpaís Las Viboras	1.12×10^{11}	1.10×10^5	Andesítica
Reyes Guzmán (2019)	Malpaís de Zacapu-Malpaís Prieto	5.05×10^{10}	7.17×10^4	Andesítica
Chevrel et al. (2016)	El Metate- F6	1×10^{10}	1.40×10^5	Andesítica
Chevrel et al. (2016)	El Metate- F6	6×10^8	1.90×10^5	Andesítica
Chevrel et al. (2016)	El Metate- F7	6×10^9	1.10×10^5	Andesítica
Chevrel et al. (2016)	El Metate- F8	2×10^{10}	8.20×10^4	Andesítica
Chevrel et al. (2016)	El Metate- F11	2×10^{11}	1.20×10^5	Andesítica
Naranjo et al. (1992)	Lonquimay, Chile	$1 \times 10^5 - 1 \times 10^9$		Andesítica
Navarro Ochoa et al (2002)	Colima, México	$1 \times 10^9 - 1 \times 10^{10}$		Andesítica
Ramírez (2020)	Rancho Seco, México	$1 \times 10^7 - 1 \times 10^9$		Andesítica
Ramírez (2020)	Popocatepetl, lava Nealtican, México (andesitas)	1×10^9		Andesítica
De Silva et al. (1994)	Chao, Chile	$1 \times 10^9 - 1 \times 10^{10}$		Andesítica
Harris et al. (2002; 2004)	Santiaguito, Guatemala	1×10^9		Andesítica
Este estudio	Volcán El Reventador LF5	8.12×10^7	4.43×10^4	Andesita basáltica
Este estudio	Volcán El Reventador LF5	8.3×10^7	6.79×10^4	Andesita basáltica
Calderón (2022)	Volcán Sierra Negra	1.4×10^5	5.97×10^3	Basáltica
Chevrel et al. (2013)	Zona volcánica occidental en Islandia	2.86×10^5	3.49×10^3	Basáltica
Chevrel et al. (2013)	Zona volcánica occidental en Islandia	6.41×10^5	4.68×10^3	Basáltica
Chevrel et al. (2013)	Zona volcánica occidental en Islandia	5.98×10^3	2.10×10^3	Basáltica
Walker (1967)	Etna, Italia (1966)	3.38×10^3		Basáltica
Gauthier (1973)	Etna, Italia (1971)	$1 \times 10^3 - 1 \times 10^5$		Basáltica

Los valores reológicos obtenidos en las mediciones morfológicas, comparado con los valores reológicos en base a su composición para LF5 y LF9, no indican similitud en los resultados de

viscosidad. El promedio de la viscosidad total calculada con las mediciones morfológicas presenta una diferencia de 10^3 órdenes comparado con el rango de viscosidad obtenida con el cálculo composicional. Es decir, las aproximaciones petrográficas en 737-775.5 °C generaron resultados de viscosidad aparente de 3.55×10^9 a 3.47×10^{11} Pa.s para LF5 y 1.17×10^{10} a 2.82×10^{11} Pa.s para LF9. En este caso, se aprecia que LF5 tiene un valor máximo de viscosidad ligeramente mayor que LF9, este valor se puede relacionar con el alcance en superficie de los dos flujos, LF9 tiene una longitud ligeramente mayor que LF5. Por lo cual, comparando la viscosidad a una misma temperatura, se puede apreciar que mientras el valor es menor, el desplazamiento del flujo de lava será mayor. Así también, geoquímicamente LF9 presenta una composición de SiO_2 menor de los otros flujos de lava, interviniendo directamente en el valor final de viscosidad.

Trabajos como Kilburn y Lopes (1991), Harris y Rowland (2015), Chevrel et al. (2013), Reyes Guzmán (2019) han demostrado que la viscosidad aumenta con el enfriamiento, disminuyendo la velocidad de emplazamiento del flujo sobre la superficie. Este aumento de viscosidad se puede apreciar con mayor claridad el flujo LF5 donde las muestras más distales (LF5-REV 58) tienen viscosidades aparentes con órdenes de magnitud de 1×10^{11} - 1×10^{12} , mientras que las muestras proximales (LF5a) tienen viscosidades de 1×10^{10} Pa.s a 737°C (Tabla 19). Esto representa valores muy altos comparados con los resultados obtenidos de manera composicional en Harris et al. (2015) para flujos andesíticos, donde indica un rango de 1×10^5 a 1×10^7 Pa.s. Sin embargo, para los flujos del volcán El Metate de Michoacán-México (Chevrel et al., 2016b) y lavas de Malpaís de Zacapu Prieto y Las Víboras (Ramírez, 2020) presentan resultados que varían entre 1×10^{10} y 1×10^{11} Pa.s durante el emplazamiento utilizando características petrográficas geoquímicas y morfológicas (Tabla 29). Mediante la recopilación de información reológica de diferentes artículos y proyectos investigativos, se puede determinar que, para composiciones andesíticas es posible tener valores de viscosidad altos, los cuales dependen mayormente de la temperatura de fusión del flujo de lava, indicando que mientras menor sea el valor de la temperatura, mayor será su viscosidad y esta viscosidad decrece a medida que aumenta la temperatura (Fig. 70). Así también, se observa que para cada tipo de roca los valores de viscosidad se encuentran agrupados (Fig. 70a). Para los valores de límite elástico en base a la composición, los obtenidos en este proyecto, no presentan similitud en comparación con otros volcanes de composición similar (Fig. 70b). Esto se debe a que los modelos utilizados para el cálculo de este parámetro dependen netamente de la fracción cristalina y la fracción cristalina no es homogénea a lo largo del flujo, está relacionado netamente de la posición de donde fue extraída. Si el cálculo del límite elástico se lo realiza con una muestra que presenta un bajo porcentaje cristalino, el resultado será proporcional sin la intervención de la química y temperatura de las muestras para los modelos utilizados (Tabla 11).

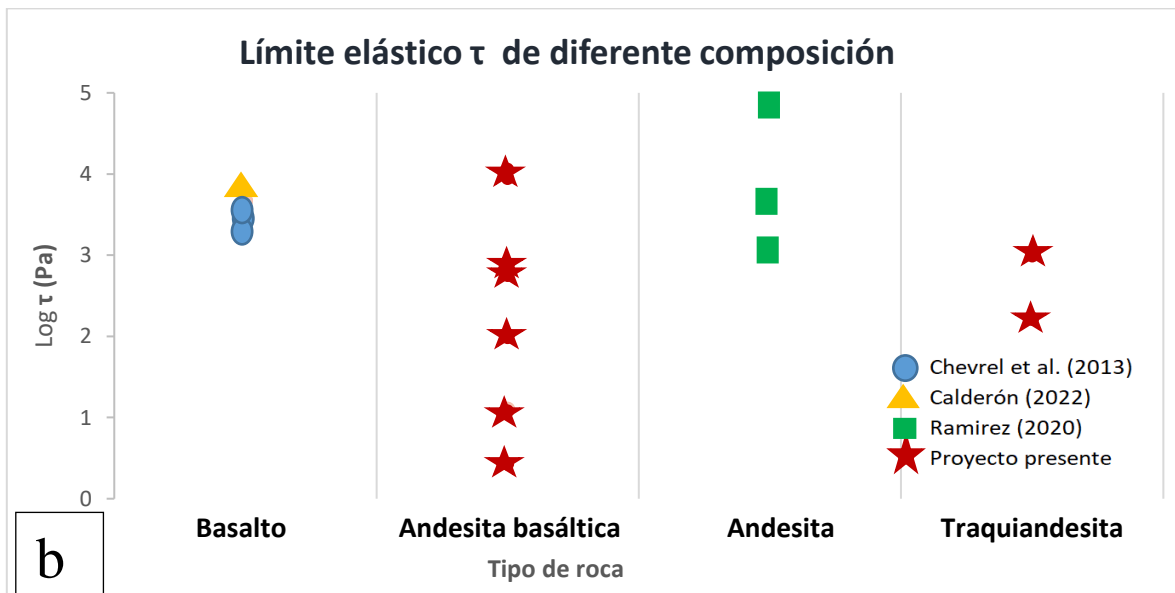
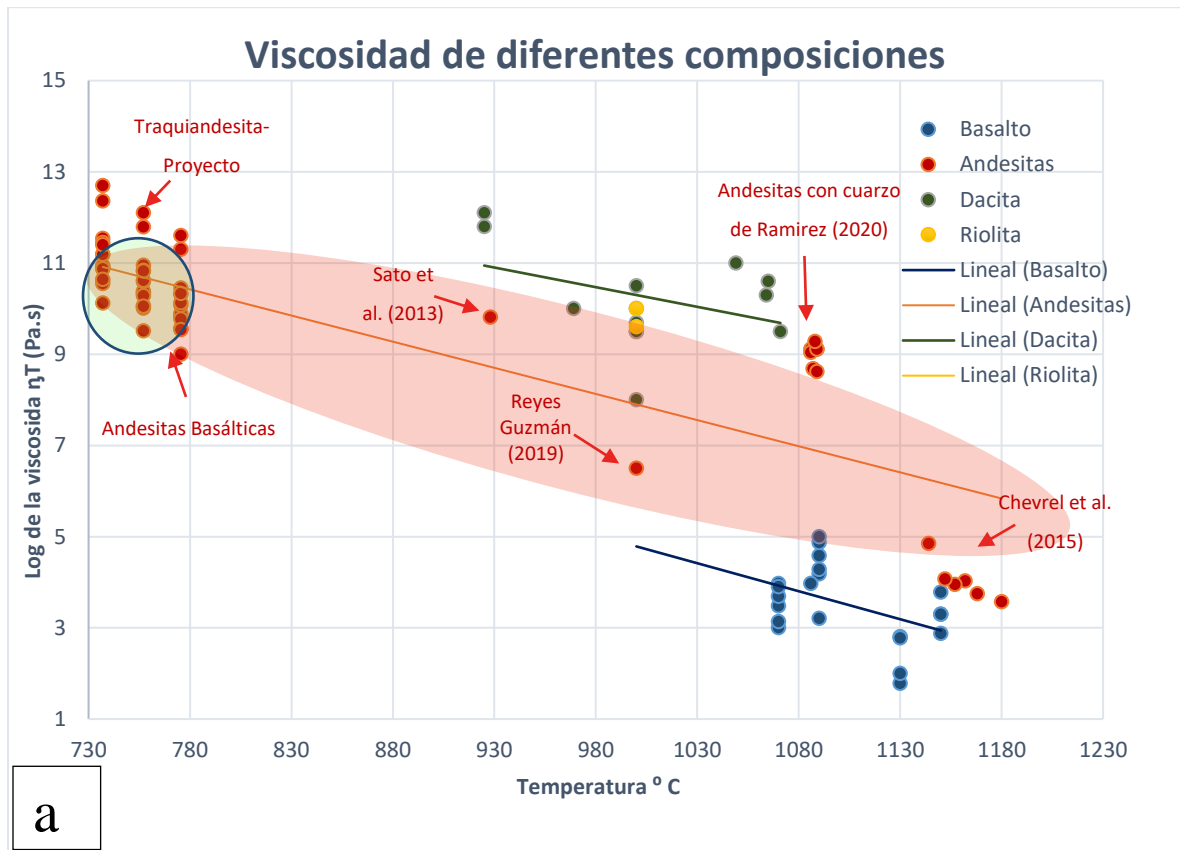


Figura 70: a) Diagrama de puntos de viscosidad respecto a la Temperatura de diferentes muestras de roca extraídas de volcanes del mundo (Anexo IV), los valores obtenidos en el presente proyecto se encuentran dentro del rango de las andesitas. b) Log de límite elástico de flujos de lava de diferentes volcanes incluyendo los de este volcán (estrella roja) que señalan una composición basalto andesítico y traquiandesítico. Así también, una variación de ~0,5 a ~4 del Log de límite elástico (Anexo V).

Al analizar los resultados obtenidos se ha verificado que los valores de viscosidad mediante la metodología en base a la composición química y de contenido de cristales no se apega a un

rango de valores de otras lavas andesíticas debido a que han sido calculadas a temperaturas mayores. Sin embargo, los valores obtenidos en este trabajo no se alejan de viscosidades reales a esa temperatura. Así también, señala que los valores de límite elástico presentan alta inestabilidad. El $\text{Log } \tau$ varía de ~ 0.5 a ~ 4 Pa en andesita basáltica y de 2 a 3 Pa. en traquiandesita; no existen valores representativos que puedan ser confiables para inferir en resultados de límite elástico mediante los modelos utilizados.

Se debe considerar, que los parámetros reológicos dependen también de la cantidad y forma de las vesículas presentes en la roca. Sin embargo, en el proyecto no se ha profundizado en su análisis. Por lo que, para complementar con estos valores, se requiere de un mayor estudio de la forma de las vesículas presentes en las muestras para el cálculo de la viscosidad total con mayor precisión. De acuerdo con Mader et al. (2013) y Reyes Guzmán (2019) el porcentaje de vesículas puede incrementar o disminuir la viscosidad del flujo de lava según su forma. Si las vesículas tienen forma alargada, el esfuerzo aplicado en el fluido se distribuye durante el cambio de forma, por lo que la viscosidad aparente de la lava es menor en comparación a una lava sin vesículas. Por otro lado, si las vesículas son de forma redondeada, el esfuerzo aplicado al fluido se incorpora al rotar las vesículas, por lo que la viscosidad aparente de la lava es mayor a la de una lava sin vesículas. El contenido y la forma de las vesículas presentes en los flujos LF5 y LF9 exhiben formas más redondeadas que alargadas, pero altamente irregulares, por lo que no se consideró su análisis para la interpretación.

6.2. Comportamiento reológico de las lavas de El Reventador

Los resultados de viscosidad total a lo largo del flujo de lava LF5 (Fig. 71a) indican simetría en los 4 modelos utilizados para el cálculo en 737°C y 775.5°C . La variación reológica señala un aumento de viscosidad en muestras más distales del cráter del volcán (3100 y 3600 m), coincidentes con los picos más altos de contenido de sílice. Esto sugiere que, a lo largo del flujo de lava si existe una variación de la viscosidad, un ligero aumento debido a la gran cantidad de fracción cristalina y sílice en las muestras.

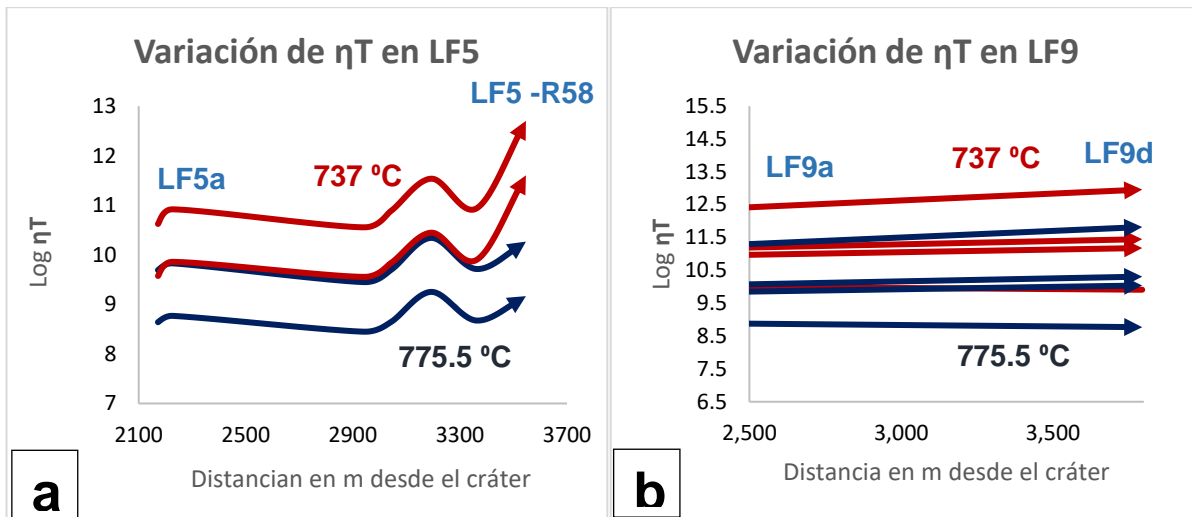


Figura 71: Log de la viscosidad total a lo largo de los flujos de lava LF5 y LF9. a) Log de Viscosidad Total respecto a la distancia de la muestra respecto al cráter del volcán. Se observa la variación de la viscosidad a lo largo de la lava LF5. b) Log de Viscosidad Total respecto a la distancia de la muestra respecto al cráter del volcán. Se observa la variación de la viscosidad a lo largo de la lava LF9.

Los resultados de la viscosidad total del flujo de lava LF9 a lo largo del leve sur (Fig. 71b), indican un aumento progresivo, tanto por el aumento de la fracción cristalina, como su contenido de sílice y de elementos mayores. De todas las muestras tomadas en este flujo se considera que la viscosidad respecto a su posición del cráter es variable. Se tiene en cuenta que el aumento de viscosidad relativa a lo largo del flujo es progresivo por la dependencia de la fracción cristalina, sin embargo, el aumento de viscosidad fluida no lo es, por depender de su composición química. A lo largo de las muestras se tiene un aumento y disminución de SiO_2 , por ende, por depender mayormente de la viscosidad fluida, este valor se apega a su variación. El resultado genera que la viscosidad total resultante para cada muestra de lava indique un ligero incremento desde la muestra más cercana al cráter hasta la más distal. Este resultado según el modelo reológico del esfuerzo cortante (Fig. 19) señala que los 2 flujos de lava se apegan a un comportamiento Bingham plástico, considerando la tasa de deformación calculada en la morfología (Fig. 34) y el incremento de viscosidad y límite elástico diferente de cero en base a su composición.

Se aprecia que, al igual que la viscosidad, el límite elástico de LF5 (Fig. 72a), tiende a aumentar a lo largo del flujo a medida que la muestra se encuentra más distal del cráter. Se considera que éste, netamente depende de la fracción cristalina. Mediante las ecuaciones de Ryerson et al. (1988) y Sehike et al. (2014), se observa que tiene un resultado paralelo con una diferencia de log de 0.1. Los resultados de Mueller et al. (2010) indican el aumento hacia el infinito, por depender también de su empaquetamiento máximo.

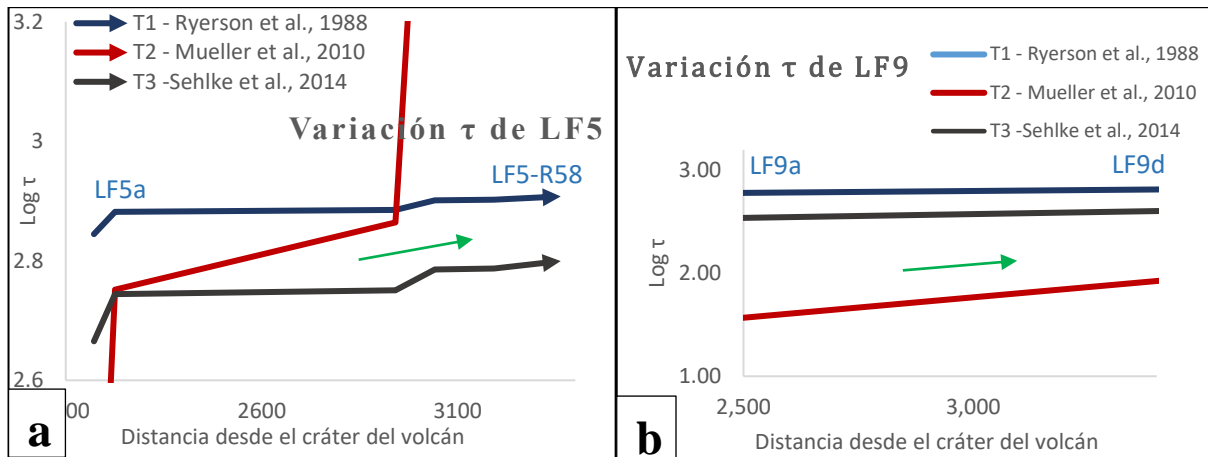


Figura 72: Log del límite elástico a lo largo de los flujos LF5 y LF9. a) Log del límite elástico respecto a la distancia de la muestra respecto al cráter del volcán. Se observa la variación del límite elástico a lo largo de la lava LF5 b) Log del límite elástico respecto a la distancia de la muestra respecto al cráter del volcán. Se observa la variación del límite elástico a lo largo de la lava LF9.

Similar al resultado del flujo LF5, el límite elástico de LF9 (Fig. 72b) tiene un ligero aumento a medida que se aleja del cráter del volcán, su aumento es más representativo por deberse a 2 muestras analizadas. Y como únicamente depende de la fracción cristalina, a medida que ésta aumenta, aumentará el límite elástico.

Al analizar la reología de cada fase eruptiva, se enfatizó en los resultados de viscosidad, dando éstos valores positivos y concordantes, a diferencia del límite elástico. La viscosidad relativa da como resultado un incremento mediante los 4 modelos utilizados a lo largo de la actividad eruptiva del volcán (Fig.73).

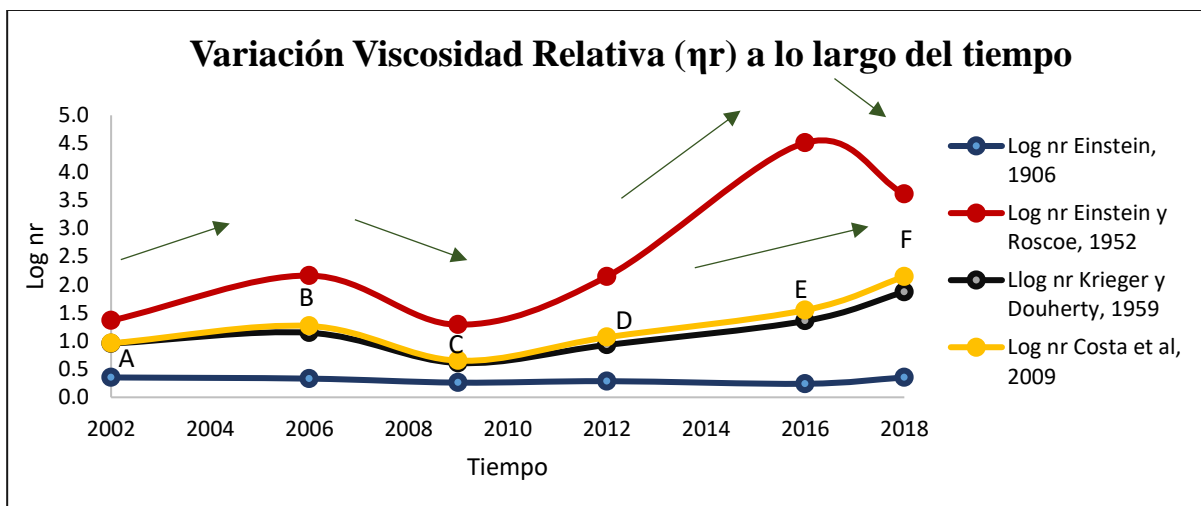


Figura 73: Variación de la viscosidad relativa a lo largo del tiempo desde el 2002 hasta la actualidad, utilizando los cuatro métodos aplicados en todo el proyecto. A, B, C, D, E, F significan las Fases eruptivas.

Esto quiere decir que, la viscosidad relativa del volcán El Reventador por depender netamente de la fracción cristalina está aumentando en el transcurso del tiempo, desde la Fase C.

Los resultados de la viscosidad relativa (Fig. 73) en cada fase indican variación y no homogeneidad en toda la actividad. Primero, entre el periodo del 2002 al 2006 existe un ligero aumento de viscosidad; del 2006 al 2009 la viscosidad relativa disminuye, manifestando el valor más bajo de $\text{Log } \eta_r$ correspondiente a la Fase C. Desde ese punto a la actualidad, la viscosidad relativa aumenta consecuente del alto valor cristalino que presentan las muestras analizadas en las últimas fases, considerando los valores resultantes en Costa et al. (2009) y Krieger y Douherty (1959) por su alta similitud. Así también, en el modelo de Einstein y Roscoe (1952) se observa un decrecimiento de viscosidad en la última fase, no considerado en los otros modelos. Esto se debe a la dependencia del empaquetamiento máximo cristalino en la ecuación; en la Fase E se utilizó el análisis de LF25. Si bien, esta muestra no es la que mayor fracción cristalina posee en comparación a las otras, esta presenta un empaquetamiento máximo muy similar a su fracción cristalina, generando que su valor incremente notablemente y se vea mayormente reflejado en la ecuación de Einstein y Roscoe (1952).

Es importante mencionar que los métodos aplicados para la viscosidad relativa a lo largo del tiempo de Krieger y Douherty (1959) y Costa et al. (2009) generan curvas sobrepuestas en una misma posición. Tomando en cuenta que este trabajo ha enfatizado el resultado de Costa et al. (2009) por su mayor dependencia de variables, la similitud de curvas induce que a lo largo de un periodo de tiempo la ecuación de Krieger y Douherty (1959) funciona muy bien para determinar la variabilidad de viscosidad relativa. Esta semejanza es fundamental, debido a que se considera el cálculo de Costa et al. (2009), una ecuación mucho más compleja y al percibir que entre las dos ecuaciones no hay diferencia, para posteriores análisis se puede calcular la viscosidad relativa con Krieger y Douherty dando un resultado efectivo. Sin embargo, al medir esta viscosidad a lo largo de un solo flujo, la ecuación de Krieger y Douherty (1959) no es tan efectiva debido a que no calcula valores de muestras que presentan fracciones cristalinas semejantes al empaquetamiento máximo. Por lo cual, Krieger y Douherty es un buen modelo para determinar la variabilidad de viscosidad a lo largo del tiempo, mas no, a lo largo de un flujo de lava.

Para la viscosidad fluida (Fig. 74) se identifica una ligera variación de forma convexa a lo largo de toda la actividad eruptiva (Fig. 74), con un valor más bajo en la Fase C, generando un ligero punto de inflexión. Desde ese punto al igual que en viscosidad relativa el incremento es progresivo hasta las fechas actuales.

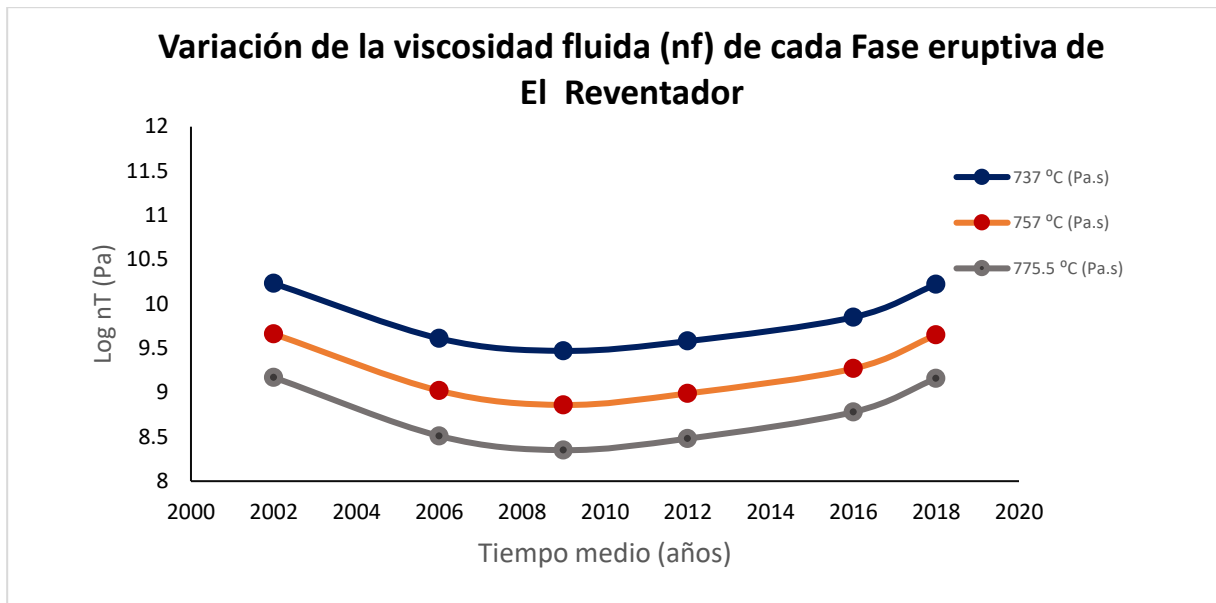


Figura 74: Variación de la viscosidad fluida a lo largo del tiempo desde el 2002 hasta la actualidad a una temperatura de 737°C y 775.5 °C. A, B, C, D, E, F significan las Fases eruptivas. La viscosidad fluida a diferente temperatura indica valores paralelos con una diferencia de 0.5 Pa.

La variación de la viscosidad fluida, por ser dependiente de la geoquímica de las muestras indica un ligero cambio a lo largo de toda su actividad, resultado que se espera en todo tipo de volcanes. Detalladamente se puede apreciar que la viscosidad fluida varía a lo largo del tiempo. Con la presencia de un punto de inflexión en la Fase C, este valor se debe a que la muestra LF9 utilizada para esta fase, es la que menor contenido de SiO₂ posee (Fig. 49, 54), en comparación a las otras muestras obtenidas de los flujos.

Finalmente, la viscosidad total a lo largo de la actividad eruptiva del volcán (Fig.75) indica paralelismo entre los valores a 737, 757 y 775.5 °C. Su actividad denota un aumento desde la fase A a la Fase B y una disminución en la Fase C generando un punto de inflexión marcado. Posterior a las 3 fases, sus valores incrementan progresivamente, debido a que la actividad se vuelve más ácida y con mayor porcentaje de cristales. Los resultados se pueden observar gráficamente en el alcance superficial de los flujos de lava de cada fase eruptiva. Morfológicamente desde la Fase D, el alcance de los flujos de lava es mucho menor (Fig. 11 - 17), congruente con los altos valores de viscosidad. Así también, se puede interpretar que la fase C la cual tuvo los flujos de lava con mayor longitud en el volcán (Fig. 13), representa la viscosidad más baja mediante los cuatro métodos utilizados.

VARIACIÓN DE LA VISCOSIDAD TOTAL A LO LARGO DE TODA LA ACTIVIDAD

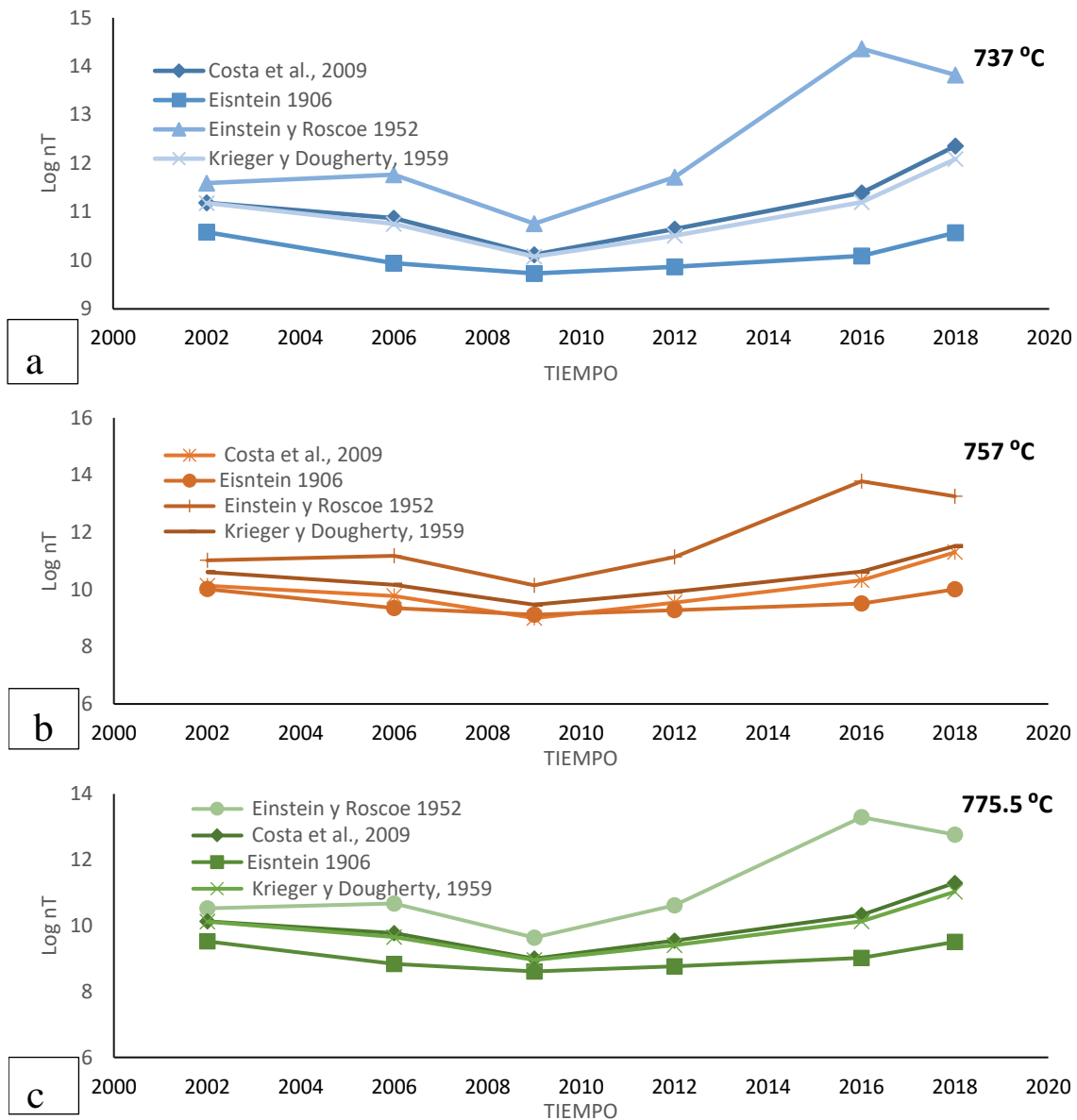


Figura 75: Variación de la viscosidad total a lo largo de la actividad eruptiva del volcán El Reventador. Se observa que la composición de los flujos de lava de las fases más recientes ha presentado viscosidades altas. A, B, C, D, E, F significa las Fases eruptivas. a) viscosidad total en 737°C. b) viscosidad total en 757°C. c) viscosidad total en 775.5°C.

No se enfatizó en la interpretación del límite elástico sobre la variación a lo largo de la actividad eruptiva en este capítulo, puesto que, los resultados descritos en el Capítulo V sección 5.3.3.2, mencionan que, en la actividad eruptiva del volcán, el límite elástico presenta un aumento y disminución, sin ser consecuente con los valores de viscosidad.

Mediante la aplicación de los 3 modelos planteados (Ryerson et al., 1988; Mueller et al., 2010; Sehlke et al., 2014) por depender netamente de la fracción cristalina, y a su vez, considerar

una sola muestra representando la fase eruptiva, se estaría efectuando lo señalado en la sección 6.2, donde infiere que una sola muestra no es representativa para determinar la composición a lo largo del flujo de lava, esta puede variar dependiendo de la posición en la que se encuentre. De tal manera que, para este parámetro reológico, los métodos aplicados no funcionan correctamente con una sola muestra de roca representando cada fase como lo planteado en la viscosidad.

CAPÍTULO VII

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

Este trabajo analiza las muestras existentes y la morfología de los flujos de lava con el fin de entender el dinamismo y evolución a lo largo de dos flujos de lava y del tiempo de actividad eruptiva presente en El Reventador. Bibliográficamente se determinó que los análisis reológicos en lavas andesíticas son escasos, pero existen pocos estudios como Arenal en Borgia et al. 1983, Cigolini et al., 1984; Lonquimay en Naranjo et al., 1992; Santiaguito en Harris et al., 2003, 2004; y Zacapú en Reyes Guzmán, 2019, con los cuales, los resultados planteados en este proyecto son comparados.

Las muestras de roca obtenidas del volcán desde el flujo LF1 hasta LF82 indican una composición andesítica basáltica y traquiandesitas para los flujos actuales. Las lavas de LF5 exhiben pequeños porcentajes de olivino lo que afirma su composición máfica, las muestras del flujo LF9 presentan porcentaje de olivino ligeramente mayor al flujo LF5, indicando que su composición es relativamente más máfica que la muestra LF5 (Sección 5.2.1). Posterior a ello, las muestras de LF82 poseen un ligero porcentaje de feldespatos alcalinos indicando que su composición es mucho más ácida que las otras muestras. Así también, estos cristales están relacionados con los valores obtenidos en los análisis geoquímicos de elementos mayores que son reflejados en los diagramas Harker y TAS (Sección 5.2.2).

Este proyecto, ha combinado las mediciones superficiales en base al modelo de elevación digital de El Reventador y los métodos petrográficos de diferentes muestras de roca para inferir la reología de las lavas LF5 y LF9 como un valor estimado y a lo largo de su actividad eruptiva.

La reología en base a la morfología de los flujos analizados indica que para la viscosidad obtenida en LF5 y LF9 hay valores con órdenes de 1×10^7 Pa.s, similar a los descritos por otros autores. Los resultados promedio de límite elástico presentan valores similares con cifras de 1×10^4 Pa, dentro de los valores preestablecidos por otros autores para las lavas andesíticas (Sección 5.1 y 6.1).

Los resultados reológicos en base a la composición, en un rango de 737 a 775.5 °C medido por imágenes térmicas, englobando la temperatura de fusión de los flujos de lava de El Reventador, y enfatizando en el resultado de Costa et al. (2009) junto con Giordano et al. (2008) indican un rango de viscosidad de 3.55×10^9 a 3.47×10^{11} Pa.s y 1.17×10^{10} - 2.82×10^{11} Pa.s, para LF5 y LF9 respectivamente. El límite elástico tiene valores con cifras de 1×10^2 a

1×10^4 Pa, un rango que poco se asemeja a los resultados para límite elástico establecidos para este tipo de lavas y en los obtenidos utilizando el método morfológico. Únicamente se calculó el límite elástico mediante ecuaciones que solo dependen de la fracción cristalina y esta fracción para las muestras de lava LF5 y LF9 es de 0.46 a 0.48 y 0.43 a 0.45 respectivamente. El resultado indica que los 2 flujos de lava LF5 y LF9 se apegan a un modelo Bingham plástico (Sección 6.2) (Fig.19, 34), congruente con lo que presentaría una un fluido multifásico como son los flujos de lava (Sección 5.3.1 y 5.3.2).

La dinámica de estos flujos de lava en base a su composición, indica un ligero incremento de viscosidad a medida que la muestra está más distal del cráter. Primero con la cristalinidad de las lavas, la fracción cristalina de las muestras de LF5 aumentan progresivamente desde LF5a a LF5-REV58 medidos desde el cráter. Al igual que del flujo LF9, la muestra LF9d presenta una fracción ligeramente mayor que LF9a. Por lo tanto, por depender netamente de la fracción cristalina, la viscosidad relativa de los flujos de composiciones de andesitas basálticas aumenta progresivamente hasta su emplazamiento. Estos valores adimensionales se multiplicaron con los obtenidos en la viscosidad fluida, generando que la dinámica de la viscosidad total tenga mayor relación con el aumento y disminución de sílice que del contenido de cristales de las muestras extraídas. Aun así, existe un aumento desde la muestra más cercana al cráter a la muestra más distal. Asimismo, se determinó que el límite elástico en los 2 flujos presenta un leve incremento en la muestra más distal del cráter (Sección 6.3).

Las muestras que se tomaron pertenecientes a cada fase eruptiva del volcán desde el 2002 hasta la actualidad (LF1, LF5, LF9, LF11, LF25 y LF82), dan un resultado de viscosidad coherente con el alcance de los flujos de donde se extrajeron las muestras. A excepción de la fase A, se puede observar un aumento de la viscosidad a lo largo de las Fases eruptivas, relacionando con el alcance de los flujos de lava. Como ejemplo se tiene a la Fase E, la cual representa una de las fases con mayor viscosidad en la etapa eruptiva del volcán; superficialmente tiene menor alcance de emplazamiento. Así también, la Fase C, la cual ha generado los flujos de lava con mayor alcance, es la que menor valor de viscosidad presenta en toda la actividad del volcán. Sin embargo, mediante la realización del proyecto, se infirió que la fracción cristalina no representa en su totalidad el valor de todo el flujo, debido a que varía dependiendo de su posición. Por lo que, al tomar una sola muestra para toda la Fase eruptiva no representará al valor real, sino solo a un valor estimado u aproximado. Generando que el resultado del límite elástico, por ser netamente dependiente de esta fracción, las fases se encuentran caracterizadas por altos y bajos consecutivamente, y para entender su dinámica es necesario un mejor análisis con metodologías que no solo dependan de su cristalinidad.

Se determinó que la variación de la viscosidad relativa y viscosidad total a lo largo de la actividad eruptiva del volcán, los valores de Krieger y Dougherty, (1959) y Costa et al. (2009), son muy similares, generando un resultado casi igual. Por lo que se concluye que el modelo de Krieger y Dougherty, (1959) funciona perfectamente para analizar la dinámica de viscosidad en todo el periodo eruptivo de El Reventador, considerando que es un método mucho más fácil de calcular que el modelo de Costa. Sin embargo, para analizar la evolución a lo largo de un solo flujo de lava, presenta mejores resultados el modelo de Costa et al., (2009), ya que permite obtener valores de viscosidad para muestras cercanas al empaquetamiento máximo, muestras que usualmente están posicionadas cercanas del frente de lava.

Los flujos de lava de composición andesíticas analizados en este trabajo, indican una mezcla compleja de factores variables a lo largo de su emplazamiento, caracterizadas por la presencia de cristales, vesículas y líquido, de tal manera que no se los pueden tratar como flujos homogéneos, y por ende el cálculo de la reología no puede despreciar estos factores. A su vez, morfológicamente no representan un fluido ideal; mediante el trazo de cada perfil se pudo determinar que los flujos no se encuentran geoméricamente adaptados a la morfología necesaria para medir el ancho y espesor puntual del flujo. Así mismo, al calcular el tiempo de emplazamiento con los valores de velocidad resultante junto con la longitud del flujo, da tiempos similares a los descritos en Naranjo et al. (2016). Sin embargo, recientemente se determinó que los tiempos de emplazamiento son mucho mayor (Vallejo comunicación personal). Por lo cual, por más preciso que se realizó el cálculo morfológico, para las lavas de El Reventador no es efectivo un estudio reológico en base a su morfología. Determinando que para este proyecto la metodología que se apega al valor reológico más exacto es la obtenida mediante el contenido de cristales y geoquímica.

7.2. Recomendaciones

7.2.1. Recomendaciones para la toma de muestras

- ✚ Para la realización de láminas delgadas se recomienda que los cortes se desarrollen donde se encuentre la textura más significativa de la roca. Por lo general, las muestras de roca de flujos de lava presentan vesicularidad, y si el corte de la lámina se lo realiza en una sección que sea alta en vesículas, al momento de realizar los análisis en microscopio, el porcentaje de vesículas será mucho mayor comparado con los demás componentes, y a su vez, la mineralogía de la muestra no se podrá apreciar con claridad (sucedido en la muestra LF9-REV). Así también, para el análisis geoquímico, antes de

moler la muestra, se recomienda que se limpie de todo rastro de vegetación y se le deje secar completamente en el sol para que esté libre de humedad.

- ✚ Para el mejoramiento de resultados en base a los métodos aplicados es necesario que se realicen más campañas de campo donde se pueda obtener numerosas muestras de rocas a lo largo de los flujos de lava. Para el cálculo de la viscosidad relativa es necesario el valor del empaquetamiento máximo, y aquel se obtiene en base a la mayor fracción cristalina cuantificada en las muestras. Por ello, mientras más muestras se obtenga mayor será la exactitud de ese valor.

7.2.2. Recomendaciones para un continuo análisis

- ✚ Para el análisis de los parámetros reológicos en base a su morfología es necesario que la medición de la altura, ancho, espesor y ángulo de inclinación se realice con mayor exactitud. Considerando que cualquier variación en la medición puede generar un error y a su vez resultados no puntuales.
- ✚ Para la obtención reológica de los flujos de lava de El Reventador u otro volcán a analizar en base a su composición, se recomienda tomar los modelos investigativos de Costa et al. (2009) para la viscosidad relativa y Giordano et al, (2008) para la viscosidad fluida. Así también, para el cálculo del límite elástico buscar más ecuaciones que no dependan únicamente de la fracción cristalina, para que los resultados obtenidos puedan tener mayor exactitud y sean más confiables.
- ✚ Se recomienda calcular la temperatura del fluido mediante termometría como lo realizado en Chevrel et al. (2013), y conocer el valor reológico propio de cada flujo y por ende de cada fase. Con ello, se puede aplicar más métodos para calcular el límite elástico que dependan también de la temperatura.
- ✚ Para los análisis geoquímicos se recomienda que en su mayoría se realice análisis de óxidos de elemento mayores de líquido residual y no en roca total. Debido a que, para aplicar en la viscosidad fluida con el método de Giordano et al. (2008) se necesita que se lo realice con este tipo de análisis, que por falta de acceso a datos no se lo realizó en este proyecto.
- ✚ Se recomienda realizar un análisis morfológico de la vesicularidad de las muestras de roca, ya que como se comentó en el trabajo, su forma interviene en el valor final de viscosidad.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilera, E. A. (1988). El Reventador: an active volcano in the sub-andean zone of Ecuador. *Rend. Soc. Ital. Mineral. Petrol.*, 43, 853–875.
- Alemán, A., & Ramos, V. (2000). Northern Andes. In *Tectonic evolution of South America*. (Cordani, U.G.; Milani, E.J.; Thomaz Filho, A.; Campos, D.A.; editors). *International Geological Congress*, 31, p. 453-480.
- Almeida, M., Gaunt, E., & Ramón, P. (2019). Ecuador's El Reventador Volcano Continually Remakes Itself. *Eos*, 100. doi:10.1029/2019EO117105
- Almeida, M., Gaunt, H., & Ramón, P. (2019). Ecuador's El Reventador Volcano Continually Remakes Itself. *Eos*, 100. <https://doi.org/10.1029/2019eo117105>
- Alvarado, A., Audin, L., Nocquet, J. M., Jaillard, E., Mothes, P., Jarrín, P., Segovia, M., Rolandone, F., & Cisneros, D. (2016). Partitioning of oblique convergence in the Northern Andes subduction zone: Migration history and the present-day boundary of the North Andean Sliver in Ecuador. *Tectonics*, 35(5), 1048-1065. <https://doi.org/10.1002/2016tc004117>
- Arnold, D., Biggs, J., Dieterich, H., Vallejo Vargas, S., Wadge, G., & Mothes, P. (2019). Lava flow morphology at an erupting andesitic stratovolcano: A satellite perspective on El Reventador, Ecuador. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 372, 34-47. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.01.009>
- ASPDEN J. A., & Litherland, J. (1992). *The geology and Mesozoic*. 205, pp. 187.
- Baby, P., Rivadeneira, M., & Barragán, R. (2004). *La cuencaoriente: geología y petróleo*. Quito : *Travaux de l'InstitutFrancais d'Études Andines*.
- Banfill, P. (1994). Rheological methods for assessing the flow properties of mortar and related materials. *Construction and Building Materials*, 8(1), 43-50. [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(94\)90007-8](https://doi.org/10.1016/0950-0618(94)90007-8)
- Barberi, F., Coltelli, M., Ferrara, G., Innocenti, F., Navarro, J. M., & Santacroce, R. (1988). Plio-Quaternary volcanism in Ecuador. *Geological Magazine*. 125(1). doi:10.1017/S0016756800009328
- Barnes, H. A. (1999). The yield stress—a review or ‘παντα ρει’—everything flows?. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 81(1-2), 133-178.

- Barrágan, R., Geist, D., Hall, M., Larson, P., & Kurz, M. (1998). Subduction controls on the composition of lavas from the Ecuadorian Andes. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 154, p. 153-166.
- Belousov, A., & Belousova, M. (2018). Dynamics and viscosity of 'a'a and pahoehoe lava flows of the 2012–2013 eruption of Tolbachik volcano, Kamchatka (Russia). *Bulletin of Volcanology*, 80(1). <https://doi.org/10.1007/s00445-017-1180-2>
- Benitez, S. (1995). *Évolution géodynamique de la province côtière sud-équatorienne au Crétacé supérieur-Tertiaire*. Université Joseph- Fourier - Grenoble I.
- Bottinga, Y., & Weill, D. F. (1972). The viscosity of magmatic silicate liquids; a model calculation. *American Journal of Science*. 272(5), 438–475. doi:10.2475/ajs.272.5.438
- Brown, G., Rymer, H., & Thorpe, R. (1987). The evolution of andesite volcano structures: new evidence from gravity studies in Costa Rica. *Earth and Planetary Science Letters*, 82(3-4), 323-334. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(87\)90206-8](https://doi.org/10.1016/0012-821x(87)90206-8)
- Cande, S., & Leslie, R. (1986). Late Cenozoic tectonics of the Southern Chile Trench. . *Journal of Geophysical Research*, 1, No. B1, p. 471-496.
- Caricchi, L., Burlini, L., Ulmer, P., Gerya, T., Vassalli, M., & Papale, P. (2007). Non-Newtonian rheology of crystal-bearing magmas and implications for magma ascent dynamics. *Earth and Planetary Science Letters*, 264(3-4), 402-419. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.09.032>
- Carracedo, J. C., & Perez-Torrado, F. J. (2015). Peligros asociados a las coladas de lava. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 23(1), 49-49.
- Cashman, K. V., Thornber, C., & Kauahikaua, J. P. (1999). Cooling and crystallization of lava in open channels, and the transition of Pāhoehoe Lava to'A'ā. *Bulletin of volcanology*, 61, 306-323.
- Castruccio, A., Rust, A., & Sparks, R. (2013). Rheology and flow of crystal-bearing lavas: Insights from analogue gravity currents. *Earth and Planetary Science Letters*, 297. 471–480.
- Chakraborty, P., Gioia, G., & Kieffer, S. (2006). Volcán Reventador's unusual umbrella. *Geophysical Research Letters*, 33(5). <https://doi.org/10.1029/2005gl024915>
- Chevrel, M. O., Cimarelli, C., deBiasi, L., Hanson, J. B., Lavallée, Y., Arzilli, F., & Dingwell, D. B. (2015). Viscosity measurements of crystallizing andesite from Tungurahua

- volcano (Ecuador). *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 16(3), 870 - 889. <https://doi.org/10.1002/2014gc005661>
- Chevrel, M. O., Guilbaud, M. N., & Siebe, C. (2016). The ~AD 1250 effusive eruption of El Metate shield volcano (Michoacán, Mexico): magma source, crustal storage, eruptive dynamics, and lava rheology. *Bulletin of Volcanology*, 78(4). <https://doi.org/10.1007/s00445-016-1020-9>
- Chevrel, M. O., Harris, A. J., James, M. R., Calabrò, L., Gurioli, L., & Pinkerton, H. (2018). The viscosity of pāhoehoe lava: In situ syn-eruptive measurements from Kilauea, Hawaii. *Earth and Planetary Science Letters*, 493, 161-171. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.04.028>
- Chevrel, M. O., Siebe, C., Guilbaud, M. N., & Salinas, S. (2015). The AD 1250 El Metate shield volcano (Michoacán): Mexico's most voluminous Holocene eruption and its significance for archaeology and hazards. *The Holocene*, 26(3), 471-488. <https://doi.org/10.1177/0959683615609757>
- Chevrel, M., Platz, T., Hauber, E., Baratoux, D., Lavallée, Y., & Dingwell, D. (2013). Lava flow rheology: A comparison of morphological and petrological methods. *Earth and Planetary Science Letters*, 384, 109-120. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.09.022>
- Collot, J. Y., Agudelo, W., Ribodetti, A., & Marcaillou, B. (2008). Origin of a crustal splay fault and its relation to the seismogenic zone and underplating at the erosional north Ecuador-south Colombia oceanic margin. *Journal of Geophysical Research*, 113(B12). <https://doi.org/10.1029/2008jb005691>
- Contreras Vargas, M. A. (2013). Dinámica de flujos de lava históricos de los volcanes Lonquimay y Villarrica, Andes del Sur, Chile.
- Contreras, M. A., & Castruccio, Á. ¿Cómo influyen las propiedades del sistema magmático en la morfología de un edificio volcánico? Análisis de los volcanes Lascar, Lonquimay y Llaima, Andes Centrales y Andes del Sur de Chile.
- Cordonnier, B., Caricchi, L., Pistone, M., Castro, J., Hess, K. U., Gottschaller, S., Manga, M., Dingwell, D., & Burlini, L. (2012). The viscous-brittle transition of crystal-bearing silicic melt: Direct observation of magma rupture and healing. *Geology*, 40(7), 611-614. <https://doi.org/10.1130/g3914.1>
- Costa, A., Caricchi, L., & Bagdassarov, N. (2009). A model for the rheology of particle-bearing suspensions and partially molten rocks. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10(3), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2008gc002138>

- Crisp, J., & Baloga, S. (1994). Influence of crystallization and entrainment of cooler material on the emplacement of basaltic aa lava flows. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99(B6), 11819-11831. <https://doi.org/10.1029/94jb00134>
- Daly, M. C. (1989). Correlations between Nazca/Farallon Plate kinematics and forearc basin evolution in Ecuador. *Tectonics*, 8(4), 769-790. <https://doi.org/10.1029/tc008i004p00769>
- Delpit, S, Le Pennec, J, Samaniego, P, Hidalgo, S & Robin C. (2008) Dynamics of the November 3, 2002 eruption of El Reventador volcano, Ecuador: Insights from the morphology of ash particles. 7th International Symposium on Andean Geodynamics (ISAG 2008, Nice), Extended Abstracts: 180-183.
- Deniaud, Y. (2000). Enregistrements sédimentaire et structural de l'évolution géodynamique des Andes Equatoriennes au cours du Néogène: Etude des bassins d'avant-arc et bilans de masse., PhD thesis, Université Joseph Fourier Grenoble.
- Dewey, J., & Lamb, S. (1992). Active tectonics of the Andes. *Tectonophysics*, 205(1-3), 79-95. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(92\)90419-7](https://doi.org/10.1016/0040-1951(92)90419-7)
- De Silva, S. L., Self, S., Francis, P. T., Drake, R. P., & Carlos, R. J. (1994). Effusive silicic volcanism in the Central Andes: The Chao dacite and other young lavas of the Altiplano-Puna Volcanic Complex. *Journal of Geophysical Research*, 99(B9), 17805-17825. <https://doi.org/10.1029/94jb00652>
- DGGM. (1982). Mapa Geológico del Ecuador . Escala 1:100000. Quito.
- Dingwell, D. B., & Mysen, B. O. (1985). Effects of water and fluorine on the viscosity of albite melt at high pressure: a preliminary investigation. *Earth and Planetary Science Letters*, 74(2-3), 266-274. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(85\)90026-3](https://doi.org/10.1016/0012-821x(85)90026-3)
- Dixon, J. M., & Summers, J. M. (1986). Another word on the rheology of silicone putty: Bingham. *Journal of Structural Geology*, 8(5), 593-595. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(86\)90010-6](https://doi.org/10.1016/0191-8141(86)90010-6)
- Dragoni, M. (1989). A dynamical model of lava flows cooling by radiation. *Bulletin of Volcanology*, 51(2), 88-95. <https://doi.org/10.1007/bf01081978>
- Dumont, J., Santana, E., Vilema, W., Pedoja, K., Ordóñez, M., Cruz, M., Jiménez, N., & Zambrano, I. (2005). Morphological and microtectonic analysis of Quaternary deformation from Puná and Santa Clara Islands, Gulf of Guayaquil, Ecuador (South

- OCP Ecuador (2020). Nuestra Historia. Sitio web: <https://www.ocpecuador.com/nuestra-historia/>
- Ego, F., Sébrier, M., Lavenu, A., Yepes, H., & Egues, A. (1996). Quaternary state of stress in the Northern Andes and the restraining bend model for the Ecuadorian Andes. *Tectonophysics*, 259(1-3), 101-116. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(95\)00075-5](https://doi.org/10.1016/0040-1951(95)00075-5)
- Egüez, A. A. (2003). Mapade fallas y pliegues cuaternarias de Ecuador y regiones oceánicas adyacentes, escala 1: 1 250000. Proyecto ILP –EPN, USGS .
- Einstein, A. (1906). Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen. *Annalen der Physik*, 324(2), 289-306. <https://doi.org/10.1002/andp.19063240204>
- Estrella, M. (2021). Caracterización Geoquímica y petrográfica de los productos eruptivos del volcán El Reventador: periodo 2002-2018. . Proyecto de titulación. Departamento de Geología. Escuela Politécnica Nacional.
- Feininger, T., & Bristow, C. R. (1980). Cretaceous and Paleogene geologic history of coastal Ecuador. *Geologische Rundschau*, 69(3), 849-874. <https://doi.org/10.1007/bf02104650>
- Feininger, T. (1987). Allochthonous terranes in the Andes of Ecuador and northwestern Peru. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 24(2), 266-278. <https://doi.org/10.1139/e87-028>
- Feininger, T. & Seguin, K; Simple Bouguer gravity anomaly field and the inferred crustal structure of continental Ecuador. *Geology* 1983;; 11 (1): 40–44. doi: [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1983\)11<40:SBGAF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1983)11<40:SBGAF>2.0.CO;2)
- Ferrari, L., & Tibaldi, A. (1992). Recent and active tectonics of the north-eastern Ecuadorian Andes. *Journal of Geodynamics*, 15(1-2), 39-58. [https://doi.org/10.1016/0264-3707\(92\)90005-d](https://doi.org/10.1016/0264-3707(92)90005-d)
- Fink, J. H., & Zimbelman, J. R. (1986). Rheology of the 1983 Royal Gardens basalt flows, Kilauea Volcano, Hawaii. *Bulletin of Volcanology*, 48(2-3), 87-96. <https://doi.org/10.1007/bf01046544>
- GANSSE, A. (1973). Facts and theories on the Andes. *Journal of the Geological Society*, 129(2), 93-131. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.129.2.0093>

- Gay, E. C., Nelson, P. A., & Armstrong, W. P. (1969). Flow properties of suspensions with high solids concentration. *AIChE Journal*, 15(6), 815-822. <https://doi.org/10.1002/aic.690150606>
- George, H. F., & Qureshi, F. (2013). Newton's Law of Viscosity, Newtonian and Non-Newtonian Fluids. *Encyclopedia of Tribology*, 2416-2420. https://doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5_143
- Gho, R. (2013). Determinación de parámetros eruptivos de flujos de lava del complejo volcánico Lonquimay (38°S), Andes del Sur. Santiago de Chile: Universidad de Chile. Departamento de Geología.
- Giordano, D., Russell, J. K., & Dingwell, D. B. (2008). Viscosity of magmatic liquids: A model. *Earth and Planetary Science Letters*, 271(1-4), 123-134. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.03.038>
- Goossens, P., & Rose, W. (1973). Chemical Composition and Age Determination of Tholeiitic Rocks in the Basic Igneous Complex, Ecuador. *Bulletin of the Geological Society of America*, 84(3), 1043-1052. [http://doi.org/10.1130/0016-7606\(1973\)84<1043:CCAADO>2.0.CO;2](http://doi.org/10.1130/0016-7606(1973)84<1043:CCAADO>2.0.CO;2)
- Griffiths, R. W. (2000). The Dynamics of Lava Flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 32(1), 477-518. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.32.1.477>
- Guillier, B., Chatelain, J. L., Jaillard, É., Yepes, H., Poupinet, G., & Fels, J. F. (2001). Seismological evidence on the geometry of the Orogenic System in central-northern Ecuador (South America). *Geophysical Research Letters*, 28(19), 3749-3752. <https://doi.org/10.1029/2001gl013257>
- Gutscher, M. A., Malavieille, J., Lallemand, S., & Collot, J. Y. (1999). Tectonic segmentation of the North Andean margin: impact of the Carnegie Ridge collision. *Earth and Planetary Science Letters*, 168(3-4), 255-270. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(99\)00060-6](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(99)00060-6)
- Hall, A. 1987. *Igneous Petrology*. 573 pág. Longman Scientific & Tecnical.
- Hall, M. L., & Mothes, P. A. (2008). Quilotoa volcano — Ecuador: An overview of young dacitic volcanism in a lake-filled caldera. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176(1), 44-55. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.01.025>
- Hall, M., Ramón, P., Mothes, P., LePennec, J. L., García, A., Samaniego, P., & Yepes, H. (2004). Volcanic eruptions with little warning: the case of Volcán Reventador's

- Surprise November 3, 2002 Eruption, Ecuador. *Revista geológica de Chile*, 31(2). <https://doi.org/10.4067/s0716-02082004000200010>
- Hall, M., Samaniego, P., Le Pennec, J., & Johnson, J. (2008). Ecuadorian Andes volcanism: A review of Late Pliocene to present activity. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176(1), 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.06.012>
- Hampel, A., Adam, J., & Kukowski, N. (2004). Response of the tectonically erosive south Peruvian forearc to subduction of the Nazca Ridge: Analysis of three-dimensional analogue experiments. *Tectonics*, 23(5), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2003tc001585>
- Harker, A. (1909). *The Natural History of Igneous Rocks*. Methuen and Co., London, 344 p.
- Harris, A. J. L., & Allen, J. S. (2008). One-, two- and three-phase viscosity treatments for basaltic lava flows. *Journal of Geophysical Research*, 113(B9). <https://doi.org/10.1029/2007jb005035>
- Harris, A. J. (2013). Lava Flows In *Modeling Volcanic Processes : The Physics and Mathematics of Volcanism*, eds. Sarah A. Fagents, Tracy K. P. Gregg, and Rosaly M. C. Lopes. Cambridge University Press, 421.
- Harris, A. J. (2015). Lava Flows and Rheology In *The Encyclopedia of Volcanoes*: eds. Sigurdsson, H., Houghton, B., McNutt, S., Rymer, H., Stix, J., Academic Press of Elseiver. 321-342.
- Harris, A. J., & Rowland, S. K. (2015). Lava Flows and Rheology. *The Encyclopedia of Volcanoes*, 321-342. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-385938-9.00017-1>
- Harris, A. J. L., Flynn, L. P., Matias, O., Rose, W. I., & Cornejo, J. P. (2004). The evolution of an active silicic lava flow field: an ETM+ perspective. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 135(1-2), 147-168. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2003.12.011>
- Hervé, F., Demant, A., Ramos, V.A., Pankhurst, R.J., Suárez, M. (2000). The Southern Andes. In: Cordani, U.G., Milani, E.J., Thomaz Filho, A., Campos, D.A. (ed.) *Tectonic Evolution of South America*. 31st IGC, Rio de Janeiro, Brazil, Spec. Publ. 605-634. [A paper on the geological evolution of the Southern Andes, with emphasis on the main geological units and their tectonic significance.]
- Hidalgo S., Gerbe M. C., Martin H., Samaniego Pablo, Bourdon E. (2012). Role of crustal and slab components in the Northern Volcanic Zone of the Andes (Ecuador) constrained by Sr-Nd-O isotopes. *Lithos*, 132, p. 180-192. ISSN 0024-4937.

- Hoffer, G., Eissen, J., Beate, B., Bourdon, E., Fornari, M., & Cotten, J. (2008). Geochemical and petrological constraints on rear - arc magma genesis processes in Ecuador : The Puyo cones and Mera lavas volcanic formations . *Journal of Volcanology and Geothermal Research* . 107-118
- Hughes, R. A., & Pilatasig, L. F. (2002). Cretaceous and Tertiary terrane accretion in the Cordillera Occidental of the Andes of Ecuador. *Tectonophysics*, 345(1-4), 29-48. [https://doi.org/10.1016/s0040-1951\(01\)00205-0](https://doi.org/10.1016/s0040-1951(01)00205-0)
- Hulme, G. (1974). The Interpretation of Lava Flow Morphology. *Geophysical Journal International*, 39(2), 361-383. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.1974.tb05460.x>
- IG-EPN. (11 de Septiembre de 2020). INFORME ESPECIAL DEL VOLCÁN EL REVENTADOR N°2 - 2020. Obtenido de <https://www.igepn.edu.ec/servicios/noticias/1831-informe-especial-del-volcan-el-reventador-n-2-2020>
- IG-EPN. (2022). INFORME VOLCÁNICO ESPECIAL WOLF - 2022-002. Obtenido de <https://www.igepn.edu.ec/interactuamos-con-usted/1910-informe-volcanico-especial-wolf-2022-002>
- INECEL (Ministerio de Energía y Minas, I. E. (1988). Estudio Vulcanológico de El Reventador”. Estudios realizados por INECEL y la Asociación de Firms Consultoras del Proyecto Hidroeléctrico Coca-Codo Sinclair-Electroconsul-Tractionel-rodioAstec – Ingeconsult – Caminos y Canales. Ambato, Ecuador. Impresión Instituto Geográfico, 1-117.
- Jaillard, E., Hérial, G., Monfret, T., Díaz-Martínez, E., Baby, P., Lavenu, A., & Dumont, J. (2000). Tectonic evolution of the Andes of Ecuador, Peru, Bolivia and northernmost Chile. In *Tectonic evolution of South America* . (Cordani, U.G.; Milani, E.J.; Thomaz Filho, A.; Campos, D.A.; editors). *International Geological Congress*, No. 31, p. 481-559.
- Jaillard, E., Ordoñez, M., Suárez, J., Toro, J., Iza, D., & Lugo, W. (2004). Stratigraphy of the late Cretaceous–Paleogene deposits of the cordillera occidental of central Ecuador: geodynamic implications. *Journal of South American Earth Sciences*, 17(1), 49-58. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2004.05.003>
- James, D. (1970). Plate tectonic model for the evolution of the Central Andes. *Geological Society of America Bulletin*, 82, p. 3325-3346. DOI : 10.1130/0016-7606(1971)82[3325:PTMFTE]2.0.CO;2

- James, D., & Sacks, I. (1999). Cenozoic formation of the Central Andes: A geophysical perspective. In *Geology and Ore Deposits of the Central Andes*. (Skinner, B.J.; editor). Society of Economic Geology, Special Publication, No. 7, p. 1-26.
- Jeffreys, H. (1925). LXXXIV. The flow of water in an inclined channel of rectangular section. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 49(293), 793-807. <https://doi.org/10.1080/14786442508634662>
- Jiménez, C. (2018). MECÁNICA DE FLUIDOS: VISCOSIDAD Y TURBULENCIA. Tecnológico de Costa Rica.
- Johnson, J., Samaniego, P., Hall, M. L. P., & Le Pennec, J. L. (2008). Foreword. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176(1), v. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.08.005>
- Jordan, T. E., Burns, W. M., Veiga, R., Pángaro, F., Copeland, P., Kelley, S., & Mpodozis, C. (2001). Extension and basin formation in the southern Andes caused by increased convergence rate: A mid-Cenozoic trigger for the Andes. *Tectonics*, 20(3), 308-324. <https://doi.org/10.1029/1999tc001181>
- Jordan, T; Isacks, B; Allmendinger, B; Brewer, J; Ramos, V; Ando C; Andean tectonics related to geometry of subducted Nazca plate. *GSA Bulletin* 1983;; 94 (3): 341–361. doi: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1983\)94<341:ATRTGO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1983)94<341:ATRTGO>2.0.CO;2)
- Kellogg, J. V. (1995). Tectonic development of Panama, Costa Rica, and the Colombian Andes: Constrains from Global Positioning System geodetic studies and gravity. *Geological Society of America. Special Paper*, 75-90.
- Kendrick, E., Bevis, M., Smalley, R., Brooks, B., Vargas, R. B., Lauría, E., & Fortes, L. P. S. (2003). The Nazca–South America Euler vector and its rate of change. *Journal of South American Earth Sciences*, 16(2), 125-131. [https://doi.org/10.1016/s0895-9811\(03\)00028-2](https://doi.org/10.1016/s0895-9811(03)00028-2)
- Kerr, A. C. (2002). The nature and provenance of accreted oceanic terranes in western Ecuador: Geochemical and tectonic constraints. *Journal of the Geological Society of London*, 159, 577–594. Doi: <https://doi.org/10.1144/0016-764901-15>
- Kilburn, C. R. J., & Lopes, R. M. C. (1991). General patterns of flow field growth: Aa and blocky lavas. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 96(B12), 19721-19732. <https://doi.org/10.1029/91jb01924>
- Kolzenburg, S., Giordano, D., Cimarelli, C., & Dingwell, D. (2016). In situ thermal characterization of cooling/crystallizing lavas during rheology measurements and

- implications for lava flow emplacement. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 195, 244-258. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2016.09.022>
- Krieger, I. M., & Dougherty, T. J. (1959). A Mechanism for Non-Newtonian Flow in Suspensions of Rigid Spheres. *Transactions of the Society of Rheology*, 3(1), 137-152. <https://doi.org/10.1122/1.548848>
- Lejeune, A. M., & Richet, P. (1995). Rheology of crystal-bearing silicate melts: An experimental study at high viscosities. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100(B3), 4215-4229. <https://doi.org/10.1029/94jb02985>
- Lev, E., & James, M. R. (2014). The influence of cross-sectional channel geometry on rheology and flux estimates for active lava flows. *Bulletin of Volcanology*, 76(7). <https://doi.org/10.1007/s00445-014-0829-3>
- Litherland, M., & Aspden, J. (2002). Terrane-boundary reactivation: A control on the evolution of the Northern Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, Vol. 5, p. 71-76.
- Llambías, E. J., G. W. Bertotto, C. Risso e I. R. Hernando (2010). El volcanismo cuaternario en el retroarco de Payenia: una revisión. *Asociación Geológica Argentina* 67 (2): 278-300.
- Llewellyn, E., & Manga, M. (2005). Bubble suspension rheology and implications for conduit flow. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 143(1-3), 205-217. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2004.09.018>
- Lozano, P., Bussmann, R. W., Peyre, G., & Grefa, F. (2020). Regeneración vegetal en la caldera del volcán Reventador en la cordillera subandina del norte de la Amazonía Ecuatoriana. *Ciencia y Tecnología*, 13(1), 27-37. <https://doi.org/10.18779/cyt.v13i1.345>
- Luzieux, L., Heller, F., Spikings, R., Vallejo, C., & Winkler, W. (2006). Origin and Cretaceous tectonic history of the coastal Ecuadorian forearc between 1°N and 3°S: Paleomagnetic, radiometric and fossil evidence. *Earth and Planetary Science Letters*, 249(3-4), 400-414. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.07.008>
- Macharé, J., & Ortlieb, L. (1992). Plio-Quaternary vertical motions and the subduction of the Nazca Ridge, central coast of Peru. *Tectonophysics*, 205(1-3), 97-108. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(92\)90420-b](https://doi.org/10.1016/0040-1951(92)90420-b)
- Mader, H., Llewellyn, E., & Mueller, S. (2013). The rheology of two-phase magmas: A review and analysis. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 257, 135-158. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2013.02.014>
- MAE. (2013). Ministerio del Ambiente. Sistema de Clasificación del Ecuador Continental. Subsecretaría de Patrimonio Natural, Quito.

- Magnall, N., James, M. R., Tuffen, H., & Vye-Brown, C. (2017). Emplacing a Cooling-Limited Rhyolite Lava Flow: Similarities with Basaltic Lava Flows. *Frontiers in Earth Science*, 5. <https://doi.org/10.3389/feart.2017.00044>
- Malfait, W. J., Seifert, R., Petitgirard, S., Mezouar, M., & Sanchez-Valle, C. (2014). The density of andesitic melts and the compressibility of dissolved water in silicate melts at crustal and upper mantle conditions. *Earth and Planetary Science Letters*, 393, 31-38. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.02.042>
- Manga, M., Castro, J., Cashman, K. V., & Loewenberg, M. (1998). Rheology of bubble-bearing magmas. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 87(1-4), 15-28. [https://doi.org/10.1016/s0377-0273\(98\)00091-2](https://doi.org/10.1016/s0377-0273(98)00091-2)
- Marsh, B. D. (1981). On the crystallinity, probability of occurrence, and rheology of lava and magma. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 78(1), 85-98. <https://doi.org/10.1007/bf00371146>
- Martyr, A., & Plint, M. (2012). Tribology, Fuel, and Lubrication Testing. *Engine Testing*, 517-529. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-096949-7.00020-0>
- Morrison, A., Whittington, A., Smets, B., Kervyn, M., & Sehlke, A. (2020). The rheology of crystallizing basaltic lavas from Nyiragongo and Nyamuragira volcanoes, D.R.C. *Volcanica*, 3(1), 1-28. <https://doi.org/10.30909/vol.03.01.0128>
- Mothes, P., Hall, M., Andrade, D., Samaniego, P., Pierson, T., Ruiz, G., & Yepes, H. (2004). Character, Stratigraphy and Magnitude of Historical Lahars of Cotopaxi Volcano, Ecuador. *Acta Vulcanologica*, Vol. 16, 85-108.
- Mpodozis, C. & Ramos V. (1990). The andes of Chile and Argentina. *Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources, Earth Science Series*,
- Mueller, S., Llewellyn, E. W., & Mader, H. M. (2009). The rheology of suspensions of solid particles. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 466(2116), 1201-1228. <https://doi.org/10.1098/rspa.2009.0445>
- Muñoz, J., Troncoso, R., Duhart, P., Crignola, P., Farmer, L., & Stern, C. R. (2000). The relation of the mid-Tertiary coastal magmatic belt in south-central Chile to the late Oligocene increase in plate convergence rate. *Revista geológica de Chile*, 27(2). <https://doi.org/10.4067/s0716-02082000000200003>
- Naranjo, J. A., Sparks, R. S. J., Stasiuk, M. V., Moreno, H., & Ablay, G. J. (1992). Morphological, structural and textural variations in the 1988–1990 andesite lava of

- Lonquimay Volcano, Chile. *Geological Magazine*, 129(6), 657-678.
<https://doi.org/10.1017/s0016756800008426>
- Naranjo MF. (2013). Estudio Petro-Geoquímico y Cronológico de los Flujos de lava emitidos por el volcán Reventador entre 2002 a 2009, Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniera Geóloga. Facultad de Geología y Petróleos. Escuela Politécnica Nacional.
- Naranjo, M. F., Ebmeier, S. K., Vallejo, S., Ramón, P., Mothes, P., Biggs, J., & Herrera, F. (2016). Mapping and measuring lava volumes from 2002 to 2009 at El Reventador Volcano, Ecuador, from field measurements and satellite remote sensing. *Journal of Applied Volcanology*, 5(1). <https://doi.org/10.1186/s13617-016-0048-z>
- Nichols, R. L. (1939). Viscosity of Lava. *The Journal of Geology*, 47(3), 290-302. <https://doi.org/10.1086/624778>
- Pardo-Casas, F., & Molnar, P. (1987). Relative motion of the Nazca (Farallon) and South American Plates since Late Cretaceous time. *Tectonics*, 6(3), 233-248. <https://doi.org/10.1029/tc006i003p00233>
- Peccerillo, A., & Taylor, S. R. (1976). Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1), 63-81. <https://doi.org/10.1007/bf00384745>
- Pedoja, K., Dumont, J., Lamothe, M., Ortlieb, L., Collot, J. Y., Ghaleb, B., Auclair, M., Alvarez, V., & Labrousse, B. (2006). Plio-Quaternary uplift of the Manta Peninsula and La Plata Island and the subduction of the Carnegie Ridge, central coast of Ecuador. *Journal of South American Earth Sciences*, 22(1-2), 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2006.08.003>
- PetroEcuador, E. (2018). El SOTE escribe su propia historia: 5.000 millones de barriles y desarrollo para el Ecuador. Sitio web <https://www.eppetroecuador.ec/?p=5793>
- Phan-Thien, N., & Pham, D. (1997). Differential multiphase models for polydispersed suspensions and particulate solids. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 72(2-3), 305-318. [https://doi.org/10.1016/s0377-0257\(97\)90002-1](https://doi.org/10.1016/s0377-0257(97)90002-1)
- Pinkerton, H. (1987). Factors affecting the morphology of lava flows. *Endeavour*, 11(2), 73-79. [https://doi.org/10.1016/0160-9327\(87\)90241-9](https://doi.org/10.1016/0160-9327(87)90241-9)
- Pinkerton, H., & Sparks, R. S. J. (1978). Field measurements of the rheology of lava. *Nature*, 276(5686), 383-385. <https://doi.org/10.1038/276383a0>

- Pinkerton, H., & Stevenson, R. (1992). Methods of determining the rheological properties of magmas at sub-liquidus temperatures. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 53(1-4), 47-66. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(92\)90073-m](https://doi.org/10.1016/0377-0273(92)90073-m)
- Pinkerton, H., & Sparks, R. S. J. (1978b). Field measurements of the rheology of lava. *Nature*, 276(5686), 383-385. <https://doi.org/10.1038/276383a0>
- Pinkerton, H., & Wilson, L. (1994). Factors controlling the lengths of channel-fed lava flows. *Bulletin of Volcanology*, 56(2), 108-120. <https://doi.org/10.1007/bf00304106>
- Ramírez Uribe, Siebe, C., Chevrel, M., & Fisher, C. (2020). Rancho Seco monogenetic volcano (Michoacán, Mexico): Petrogenesis and lava flow emplacement based on LiDAR images. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 01-19.
- Ramón, P. & Vallejo Vargas, S. (2012). Growth And Evolution Of A Scoria Cone And Dome Inside The Reventador Volcano Crater 2010-2011. *Cities on Volcanoes*. Instituto Geofísico
- Ramón, P., Vallejo, S., Mothes, P., Andrade, D., Vásconez, F., Yepes, H., . . . S. (2021). Instituto Geofísico – Escuela Politécnica Nacional, el Servicio Sismológico y Volcanológico Ecuatoriano. *Volcánica*, 104-112.
- Ramos, V., & Alemán, A. (2000). Tectonic Evolution of the Andes. In *Tectonic evolution of South America*. (Cordani, U.G.; Milani, E.J.; Thomaz Filho, A.; Campos, D.A.; editors). International Geological Congress, 31, p. 635-685. <https://doi.org/10.4067/s0716-02082000000200006>
- Reyes Guzmán, N. (2019). Reología de los flujos de lava del Malpaís de Zacapu (Michoacán). Tesis para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Tierra (Vulcanología). UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO. POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA.
- Reyes, P., 2013. Évolution du relief le long des marges actives : Etude de la déformation Plio - Quaternaire de la cordillère côtière d'Equateur, PhD tesis , Université de Nice - Sophia Antipolis, Nice, France. 279p.
- Richet, P., Mysen, B., & Andrault, D. (1996). Melting and premelting of silicates: Raman spectroscopy and X-ray diffraction of Li₂SiO₃ and Na₂SiO₃. *Physics and Chemistry of Minerals*, 23(3). <https://doi.org/10.1007/bf00220727>
- Ridolfi, F., Puerini, M., Renzulli, A., Menna, M., & Toulkeridis, T. (2008). The magmatic feeding system of El Reventador volcano (Sub-Andean zone, Ecuador) constrained by texture, mineralogy and thermobarometry of the 2002 erupted products. *Journal of*

Volcanology and Geothermal Research, 176(1), 94-106. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.03.003>

Roscoe, R. (1952). The viscosity of suspensions of rigid spheres. *British Journal of Applied Physics*, 3(8), 267-269. <https://doi.org/10.1088/0508-3443/3/8/306>

Russell, J. K., Hess, K. U., & Dingwell, D. B. (2022). Models for viscosity of geological melts. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 87(1), 841-885.

Ryerson, F. J., Weed, H. C., & Piwinski, A. J. (1988). Rheology of subliquidus magmas: 1. Picritic compositions. *Journal of Geophysical Research*, 93(B4), 3421. <https://doi.org/10.1029/jb093ib04p03421>

Salgado Loza, J. A., Mothes, P. A., & Córdova, M. D. (2021). New observations on the recent eruptive activity of Sumaco Volcano (Ecuador), based on geochronology, stratigraphy and petrography. *Journal of South American Earth Sciences*, 112, 103568. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103568>

Samaniego, P., Eissen, J. P., Le Pennec, J. L., Robin, C., Hall, M. L., Mothes, P., Chavrit, D., & Cotten, J. (2008). Pre-eruptive physical conditions of El Reventador volcano (Ecuador) inferred from the petrology of the 2002 and 2004–05 eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176(1), 82-93. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.03.004>

Samaniego, P., Bablon, M., Ancellin, M. A., Hidalgo, S., Quidelleur, X., Vlastélic, I., ... & Gannoun, A. (2019, September). The temporal evolution of the Ecuadorian volcanic arc during the last 1 Ma. In *8th International Symposium on Andean Geodynamics (ISAG)*.

Samaniego, P., Martin, H., Monzier, M., Robin, C., Fornari, M., Eissen, J. P., & Cotten, J. (2005). Temporal Evolution of Magmatism in the Northern Volcanic Zone of the Andes: The Geology and Petrology of Cayambe Volcanic Complex (Ecuador). *Journal of Petrology*, 46(11), 2225-2252. <https://doi.org/10.1093/petrology/egi053>

Sato, H., Suzuki-Kamata, K., Sato, E., Sano, K., Wada, K., & Imura, R. (2013). Viscosity of andesitic lava and its implications for possible drain-back processes in the 2011 eruption of the Shinmoedake volcano, Japan. *Earth, Planets and Space*, 65(6), 623-631. <https://doi.org/10.5047/eps.2013.05.018>

Schuster, Robert L., and Highland, Lynn M., 2004, Impact of landslides and innovative landslide-mitigation measures on the natural environment: International Conference on Slope Engineering, Hong Kong, China, December 8–10, 2003, keynote address, Proceedings 29.

- Sehlke, A., Whittington, A., Robert, B., Harris, A., Gurioli, L., & Médard, E. (2014). Pahoehoe to `a`a transition of Hawaiian lavas: an experimental study. *Bulletin of Volcanology*, 76(11). <https://doi.org/10.1007/s00445-014-0876-9>
- Self, S., Wilson, L., & Nairn, I. A. (1978). Vulcanian eruption mechanisms (No. NASA-CR-157063).
- Semperé, T., Hérail, G., Oller, J., & Bonhomme, M. (1990). Late Oligocene-early Miocene major tectonic crisis and related basins in Bolivia. *Geology*, Vol. 18, No. 10, p. 946-949
- Shaw, H. R. (1969). Rheology of Basalt in the Melting Range. *Journal of Petrology*, 10(3), 510-535. <https://doi.org/10.1093/petrology/10.3.510>
- Shaw, H. R. (1972). Viscosities of magmatic silicate liquids; an empirical method of prediction. *American Journal of Science*, 272(9), 870-893. <https://doi.org/10.2475/ajs.272.9.870>
- Simkin, T., Siebert, L., McClelland, L., Bridge, D., & Newhall. (1981). *Volcanoes of the World*. Smithsonian Inst., Hutchison Ross Publ. Co. Penn. 233
- Siravo, G., Speranza, F., Mulas, M., & Costanzo-Alvarez, V. (2021). Significance of Northern Andes Terrane Extrusion and Genesis of the Interandean Valley: Paleomagnetic Evidence From the “Ecuadorian Orocline”. *Tectonics*, 40(7). <https://doi.org/10.1029/2020tc006684>
- Soler Manuel, M. A. (1976). Hidrodinámica de los fluidos no-newtonianos: aplicación al derrame en un medio poroso. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Stagpoole, V. (1999). The Awhitu volcanic complex, an offshore Pliocene volcano in the northern Taranaki Basin, New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 42(3), 327-334. <https://doi.org/10.1080/00288306.1999.9514849>
- Spikings, R. A., Seward, W., & Ruiz, G. M. (2000). Low-temperature thermochronology of the northern Cordillera Real, Ecuador: Tectonic insights from zircon and apatite fission track analysis. *Tectonics*, 19(4), 649-668. <https://doi.org/10.1029/2000tc900010>
- Stein, D. J., & Spera, F. J. (1992). Rheology and microstructure of magmatic emulsions: theory and experiments. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 49(1-2), 157-174. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(92\)90011-2](https://doi.org/10.1016/0377-0273(92)90011-2)
- Stern, C. R. (2004). Active Andean volcanism: its geologic and tectonic setting. *Revista geológica de Chile*, 31(2). <https://doi.org/10.4067/s0716-02082004000200001>

- Strivens, T. (1999). An introduction to rheology. *Paint and Surface Coatings*, 550-574. <https://doi.org/10.1533/9781855737006.550>
- Tallarico, A., & Dragoni, M. (1999). Viscous Newtonian laminar flow in a rectangular channel: application to Etna lava flows. *Bulletin of Volcanology*, 61(1-2), 40-47. <https://doi.org/10.1007/s004450050261>
- Tammann, G., & Hesse, W. (1926). Die Abhängigkeit der Viskosität von der Temperatur bei unterkühlten Flüssigkeiten. *Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie*, 156(1), 245-257. <https://doi.org/10.1002/zaac.19261560121>
- Tebbens, S. F., Cande, S. C., Kovacs, L., Parra, J. C., LaBrecque, J. L., & Vergara, H. (1997). The Chile ridge: A tectonic framework. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B6), 12035-12059. <https://doi.org/10.1029/96jb02581>
- Tibaldi, A., Lagmay, A. M. F. A., & Ponomareva, V. V. (2005). Effects of basement structural and stratigraphic heritages on volcano behaviour and implications for human activities (the UNESCO/IUGS/IGCP project 455). *Episodes*, 28(3), 158-170. <https://doi.org/10.18814/epiiugs/2005/v28i3/002>
- Torres, M., Fierro, V., Paéz, S., Plúa, F., Carrera, M., Moscoso, N., . . . Espinel, D. (2018). Informe Final. Resultados de las modelaciones Biofísicas, Valoración económica y propuesta de políticas. Cuenca del Río Coca. Economía de los sistemas y la biodiversidad .
- 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)
- Urbain, G., Bottinga, Y., & Richet, P. (1982). Viscosity of liquid silica, silicates and aluminosilicates. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 46(6), 1061-1072. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(82\)90059-x](https://doi.org/10.1016/0016-7037(82)90059-x)
- Vallejo, S. (2017). Numerical models of volcanic flows for an estimation and delimitation of volcanic hazards, the case of Reventador volcano (Ecuador). *Earth Sciences*. Université Clermont Auvergne. English. ffNNT : 2017CLFAC100ff. fftel-01930269f
- Vallejo Vargas, S., & Kelfoun, K. (2016). VolcFlow, an approach to simulate lava flows. Case of El Reventador volcano (Ecuador). Laboratoire Magmas et Volcans, Clermont-Ferrand, France. Instituto Geofísico - Escuela Politécnica Nacional, Quito -Ecuador, 1.

- Vallejo Vargas, S., Kelfoun, K., Diefenbach, A., Ramón, P., Vásconez, F., Naranjo, F., & Pino, G. (2015). Numerical simulations of lava flows. A calibration from thermal images of lava emplacement at El Reventador volcano. *Laboratoire Magmas et Volcans - Université Blaise Pascal, ClermontFerrand - France*, 1.
- Vallejo, C. W. (2009). Mode and timing of terrane accretion in the forearc of the Andes in Ecuador. Mode and timing of terrane accretion in the forearc of the Andes in Ecuador. In: Kay, S.M., Ramos, V.A., Dickinson, W.R. (Eds.), *Backbone of the Americas: Shallow Subduction, Plateau Uplift, and Ridge and Terrane Collision*, 197–216. doi:[https://doi.org/10.1130/2009.1204\(09\)](https://doi.org/10.1130/2009.1204(09))
- Vallejo, S., Naranjo, F., Ramón, P., Kelfoun, K., Chevrel, O., & Almeida, M. (2018). Characterization of lava flows from an andesitic volcano as input data for numerical flow simulations, case El Reventador volcano (Ecuador). Session: S01.14 - Volcano geology and field observations aimed at validation of numerical models, 1.
- Vallejo, S., Ramón, P., Naranjo, F., Kelfoun, K., Samaniego, P., Coppola, D., & Diefenbach, A. (2016). Eruptive activity of El Reventador volcano (Ecuador) between 2002 -2014. *Instituto Geofísico - EPN*, 1.
- Vásconez, F., Moussallam, Y., Bani, P., Battaglia, J., Hidalgo, S., Benbakkar, M., Harris, A. J. L., & Narváez, D. (2022). Ash and gas discharge during open vent activity at El Reventador (Ecuador): explosion-style transitions driven by conduit capping. *Bulletin of Volcanology*, 84(8). <https://doi.org/10.1007/s00445-022-01585-1>
- Vásconez, F., Moussallam, Y., Harris, A. J. L., Latchimy, T., Kelfoun, K., Bontemps, M., Macías, C., Hidalgo, S., Córdova, J., Battaglia, J., Mejía, J., Arrais, S., Vélez, L., & Ramos, C. (2022). VIGIA: A Thermal and Visible Imagery System to Track Volcanic Explosions. *Remote Sensing*, 14(14), 3355. <https://doi.org/10.3390/rs14143355>
- Wadge, G., Saunders, S., & Itikarai, I. (2012). Pulsatory andesite lava flow at Bagana Volcano. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 13(11). <https://doi.org/10.1029/2012gc004336>
- Walker, G. (1973). Mount Etna and the 1971 eruption - Lengths of lava flows. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 274(1238), 107-118. <https://doi.org/10.1098/rsta.1973.0030>
- Whittington, A., Richet, P., & Holtz, F. (2000). Water and the viscosity of depolymerized aluminosilicate melts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(21), 3725-3736. [https://doi.org/10.1016/s0016-7037\(00\)00448-8](https://doi.org/10.1016/s0016-7037(00)00448-8)

Wright, R. (2015). MODVOLC: 14 years of autonomous observations of effusive volcanism from space. *Geological Society, London, Special Publications*, 426(1), 23-53. <https://doi.org/10.1144/sp426.12>

Zhou, J. Z. Q., Uhlherr, P. H. T., & Luo, F. T. (1995). Yield stress and maximum packing fraction of concentrated suspensions. *Rheologica Acta*, 34(6), 544-561. <https://doi.org/10.1007/bf00712315>

ANEXOS

Anexo I

ANÁLISIS GEOQUÍMICOS DE ELEMENTOS MAYORES DE LAS MUESTRAS DE LAVA DEL VOLCÁN EL REVENTADOR

En la presente tabla se puede apreciar el resultado de porcentaje de elementos mayores de 22 muestras correspondientes a flujos de lava desde LF4 hasta LF82. Las muestras M-1 hasta Pf-3 fueron proporcionadas por Vallejo et al., 2017 y desde REV-106 hasta REV 111, se obtuvieron en la campaña de campo del presente proyecto.

Echant.	Nro Lava	SiO2 %	TiO2 %	Al2O3 %	Fe2O3 %	MnO %	MgO %	CaO %	Na2O %	K2O %	P2O5 %	Ba%	Sr %	H2O+	H2O-	Total %
M-1	Lav 4	53.93	0.96	17.73	8.10	0.13	4.64	7.63	4.38	1.61	0.39	0.09	0.10	0.06	-0.17	99.60
M-2A	Lav 5c	54.22	0.96	17.63	8.13	0.13	4.66	7.49	4.34	1.64	0.38	0.09	0.10	0.08	-0.20	99.66
M-2B	Lav 5c	54.45	0.98	17.69	8.23	0.13	4.64	7.51	4.26	1.57	0.40	0.09	0.10	0.08	-0.17	99.95
M-3	Lav 14	54.21	0.97	17.49	8.18	0.13	4.73	7.73	3.93	1.69	0.45	0.10	0.10	0.08	-0.19	99.62
M-4	Lav 11	53.46	0.97	17.52	8.30	0.14	4.84	7.61	4.26	1.69	0.41	0.09	0.10	0.07	-0.26	99.21
M-5	Lav 11	53.59	0.99	17.52	8.51	0.14	4.82	7.70	4.24	1.72	0.41	0.10	0.10	0.07	-0.22	99.68
M-6	Lav 25	55.58	0.90	17.36	7.53	0.12	4.24	6.84	4.41	1.88	0.37	0.10	0.10	0.06	-0.16	99.34
M-7	Lav 5a	53.86	0.99	17.53	8.39	0.13	4.69	7.53	4.38	1.57	0.37	0.09	0.10	0.04	-0.20	99.47
M-8	Lav 5b	54.09	0.97	17.68	8.15	0.13	4.64	7.49	4.37	1.56	0.38	0.09	0.10	0.03	-0.19	99.47
M-10	Lav 5d	54.31	0.98	17.54	8.32	0.13	4.69	7.76	4.18	1.53	0.41	0.09	0.10	0.05	-0.17	99.92
M-11	Lav 5e	56.02	0.90	17.53	7.63	0.12	4.30	7.11	4.25	1.87	0.39	0.11	0.10	0.00	0.00	100.33
M-12	Lav 5f	54.72	0.98	17.79	8.22	0.13	4.64	7.47	4.33	1.58	0.39	0.09	0.10	0.05	-0.19	100.29
M-13	Lav 9	52.87	1.02	17.52	8.76	0.14	5.19	8.24	4.05	1.62	0.45	0.09	0.10	0.02	-0.23	99.85
Pf-1	Pf1	55.94	0.89	17.54	7.37	0.12	4.14	6.85	4.36	1.90	0.36	0.10	0.10	0.02	-0.17	99.51
Pf-2	Pf2	54.21	0.92	18.22	7.83	0.13	4.36	7.39	4.29	1.97	0.42	0.11	0.10	0.03	-0.14	99.84
Pf-3	Pf3	55.82	0.89	17.50	7.45	0.12	4.20	6.78	4.38	1.90	0.36	0.10	0.10	0.04	-0.21	99.43
REV-106	Lav 82a	58.48	0.79	17.61	6.94	0.11	3.47	6.36	4.38	2.14	0.34	-	-	-	-0.12	100.50
REV-107	Lav 82b	59.48	0.74	17.07	6.48	0.10	3.15	5.98	4.39	2.19	0.31	-	-	-	-0.10	99.78
REV-108	Lav 9a	53.59	0.97	17.87	8.74	0.14	4.75	8.05	4.20	1.63	0.46	-	-	-	-0.20	100.21
REV-109	Lav 9b	53.89	0.97	18.21	8.78	0.14	4.77	8.28	4.19	1.65	0.45	-	-	-	-0.27	101.07
REV-110	Lav 9c	52.81	0.98	17.75	9.04	0.15	4.87	8.10	4.11	1.62	0.46	-	-	-	-0.27	99.61
REV-111	Lav 9d	52.57	0.99	17.85	8.91	0.14	5.03	8.27	4.12	1.62	0.46	-	-	-	-0.27	99.70

Anexo II

APLICACIÓN DE LA NORMA CIPW DE LOS ANÁLISIS GEOQUÍMICOS
PRESENTADOS EN EL ANEXÓ I

Muestra	Q	Ort	Ab	An	Hy	Di	Hem	Ilm	Tit	Ap	Cc	%An en	
												PI	ITT
M1 Lav 4	2.56	9.57	37.26	24.05	8.51	6.67	8.14	0.27	2.02	0.92	0	39.22	73.44
M2A Lav 5c	3.12	9.75	36.85	23.86	8.72	6.31	8.16	0.27	2.01	0.9	0	39.3	73.58
M2B Lav 5c	3.96	9.28	36.1	24.52	8.94	5.69	8.24	0.27	2.03	0.93	0	40.44	73.86
M3 Lav 14	4.78	10.02	33.42	25.2	9.14	5.81	8.21	0.28	2.03	1.07	0	42.98	73.42
M4 Lav 11	2.33	10.07	36.3	23.88	9.04	6.68	8.36	0.29	2.02	0.98	0	39.68	72.58
M5 Lav 11	2.42	10.17	35.96	23.81	8.83	6.9	8.54	0.29	2.06	0.98	0	39.83	72.36
M6 Lav 25	4.88	11.2	37.57	22.19	8.15	5.39	7.58	0.26	1.88	0.87	0	37.13	75.84
M7 Lav 5a	2.77	9.34	37.25	23.65	8.66	6.61	8.43	0.28	2.09	0.88	0	38.83	73.01
M8 Lav 5b	3.1	9.28	37.16	24.12	8.8	6.1	8.18	0.27	2.04	0.9	0	39.36	73.66
M10 Lav 5d	4.09	9.05	35.42	24.6	8.69	6.5	8.32	0.28	2.03	0.97	0	40.98	73.16
M11 Lav 5e	5.64	11.05	35.89	23.18	8.21	5.34	7.61	0.26	1.87	0.91	0	39.24	75.76
M12 Lav 5f	3.84	9.31	36.51	24.38	8.94	5.57	8.19	0.27	2.03	0.91	0	40.03	74.04
M13 Lav 9	1.81	9.58	34.3	24.87	9.29	7.87	8.76	0.3	2.09	1.07	0	42.03	70.56
Pf1	5.44	11.3	37.06	22.8	8.07	4.92	7.4	0.25	1.86	0.86	0	38.08	76.6
Pf2	2.57	11.68	36.37	24.7	8.48	5.14	7.84	0.27	1.91	0.99	0	40.44	75.32
Pf3	5.21	11.3	37.28	22.58	8.27	4.84	7.49	0.25	1.86	0.86	0	37.72	76.37
REV-106	8.51	12.53	36.8	21.95	6.82	3.79	6.89	0.23	1.63	0.8	0	37.36	79.79
REV-107	10.51	12.98	37.14	20.42	6.01	3.94	6.48	0.21	1.53	0.73	0	35.47	81.05
REV-108	2.41	9.61	35.39	24.95	8.53	7.01	8.7	0.3	1.97	1.08	0	41.34	72.36
REV-109	2.2	9.6	35	25.65	8.4	7.15	8.66	0.29	1.96	1.04	0	42.29	72.45
REV-110	1.97	9.57	34.83	25.2	8.83	7.12	9.04	0.31	2.01	1.08	0	41.97	71.57
REV-111	1.22	9.58	34.83	25.43	9.03	7.53	8.91	0.3	2.03	1.08	0	42.2	71.06

Anexo III

ANÁLISIS MACROSCÓPICO EN MUESTRA DE MANO DE 6 MUESTRAS OBTENIDAS EN CAMPO (REV 106 -REV 111)

Se realizó una Tabla ilustrativa de la apreciación compositiva en muestra de mano de las rocas obtenidas en noviembre 2021.

FICHA DE LOS FLUJOS DE LAVA – VOLCÁN EL REVENTADOR			
Responsable:	Ivonne Marín	Ficha N°	01
Tipo de la muestra:	Flujo de lavaLF9	Código de la muestra	A - leve sur
DATOS DE UBICACIÓN		DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA	
Ubicación geográfica (Prov/Cantón/Parroquia)		<i>Características de los componentes</i>	
Límite Napo -Sucumbios / volcán El Reventador		Color	nego grisáceo
Acceso al lugar:		Textura	porfíritica
Carretera Teniente Hugo Ortiz		Estructura	vesicular / masiva
INFORMACIÓN DE COORDENADAS UTM (Sistema de Proyección WGS84)		Tamaño del grano	<2 mm
		Forma de los granos	tabulares
X	205740	% Fenocristales	20%
Y	999238	% matriz	80%
Z (ALTURA m.s.n.m.)	2602	Contenido de Minerales	
DATOS ESTRUCTURALES (áзимut de buzamiento)		Minerales Principales	Plagioclasa tabular, piroxeno
		Minerales Secundarios	S/I
Observación: grandes bloques semiredondeados homogéneos de aproximadamente 45 cm, cubiertos por vegetación		Minerales Accesorios	S/I
		Mineralización	No
		Grado de meteorización	Baja
		Tipo de alteración	Oxidación en los bordes
Análisis de Laboratorio: Si	geoquímica total: Si	Lamina delgada: Si	Nombre de la roca Andesita basáltica

FICHA DE LOS FLUJOS DE LAVA – VOLCÁN EL REVENTADOR			
Responsable:	Ivonne Marín	Ficha N°	2
Tipo de la muestra:	Flujo de lavaLF9	Código de la muestra	B - Cuerpo de lava
DATOS DE UBICACIÓN		DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA	
Ubicación geográfica (Prov/Cantón/Parroquia)		<i>Características de los componentes</i>	
Límite Napo -Sucumbios / volcán El Reventador		Color	nego grisáceo
Acceso al lugar:		Textura	porfíritica
Carretera Teniente Hugo Ortiz		Estructura	vesicular / masiva
INFORMACIÓN DE COORDENADAS UTM (Sistema de Proyección WGS84)		Tamaño del grano	<3mm
		Forma de los granos	tabulares
X	205740	% Fenocristales	40%
Y	9992139	% matriz	60%
Z (ALTURA m.s.n.m.)	2600	Contenido de Minerales	
DATOS ESTRUCTURALES (áзимut de buzamiento)		Minerales Principales	Plagioclasa tabular, piroxeno
		Minerales Secundarios	S/I
Observación: cuerpo de lava, vegetación menor y diferencia de cota bloques entre 40 a 45 cm de diámetro.		Minerales Accesorios	S/I
		Mineralización	No
		Grado de meteorización	Baja
		Tipo de alteración	Oxidación en los bordes
Análisis de Laboratorio: Si	geoquímica total: Si	Lamina delgada: Si	Nombre de la roca Andesita basáltica

FICHA DE LOS FLUJOS DE LAVA – VOLCÁN EL REVENTADOR					
Responsable:		Ivonne Marín		Ficha N°	3
Tipo de la muestra:		Flujo de lavaLF9		Código de la muestra	C - Leve norte
DATOS DE UBICACIÓN			DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA		
Ubicación geográfica (Prov/Cantón/Parroquia)			<i>Características de los componentes</i>		
Límite Napo -Sucumbios / volcán El Reventador			Color	negro grisáceo	
Acceso al lugar:			Textura	porfíritica	
Carretera Teniente Hugo Ortiz			Estructura	vesicular / masiva	
INFORMACIÓN DE COORDENADAS UTM (Sistema de Proyección WGS84)			Tamaño del grano	<2mm	
			Forma de los granos	tabulares	
X	205729		% Fenocristales	20%	
Y	9992238		% matriz	80%	
Z (ALTURA m.s.n.m.)	2608		Contenido de Minerales		
DATOS ESTRUCTURALES (áзимut de buzamiento)			Minerales Principales	Plagioclasa tabular, piroxeno	
			Minerales Secundarios	S/I	
Observación: bloques cubiertos por vegetación entre 40 a 45 cm			Minerales Accesorios	S/I	
			Mineralización	No	
			Grado de meteorización	Baja	
			Tipo de alteración	Oxidación en los bordes	
Análisis de Laboratorio: Si	geoquímica total: Si	Lamina delgada: Si	Nombre de la roca	Andesita basáltica	

FICHA DE LOS FLUJOS DE LAVA – VOLCÁN EL REVENTADOR					
Responsable:		Ivonne Marín		Ficha N°	4
Tipo de la muestra:		Flujo de lavaLF9		Código de la muestra	D - Leve norte
DATOS DE UBICACIÓN			DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA		
Ubicación geográfica (Prov/Cantón/Parroquia)			<i>Características de los componentes</i>		
Límite Napo -Sucumbios / volcán El Reventador			Color	negro grisáceo	
Acceso al lugar:			Textura	porfíritica	
Carretera Teniente Hugo Ortiz			Estructura	vesicular / masiva	
INFORMACIÓN DE COORDENADAS UTM (Sistema de Proyección WGS84)			Tamaño del grano	<2mm	
			Forma de los granos	tabulares	
X	207062		% Fenocristales	25%	
Y	9992066		% matriz	75%	
Z (ALTURA m.s.n.m.)	2267		Contenido de Minerales		
DATOS ESTRUCTURALES (áзимut de buzamiento)			Minerales Principales	Plagioclasa, piroxeno, anfíbol	
			Minerales Secundarios	S/I	
Observación: bloques cubiertos por menor vegetación entre 40 a 45 cm			Minerales Accesorios	S/I	
			Mineralización	No	
			Grado de meteorización	Baja	
			Tipo de alteración	Oxidación en los bordes	
Análisis de Laboratorio: Si	geoquímica total: Si	Lamina delgada: Si	Nombre de la roca	Andesita basáltica	

FICHA DE LOS FLUJOS DE LAVA – VOLCÁN EL REVENTADOR				
Responsable:	Ivonne Marín	Ficha N°	5	
Tipo de la muestra:	Flujo de lavaLF82	Código de la muestra	E - Frente del flujo	
DATOS DE UBICACIÓN		DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA		
Ubicación geográfica (Prov/Cantón/Parroquia)		<i>Características de los componentes</i>		
Límite Napo -Sucumbios / volcán El Reventador		Color	negro grisáceo	
Acceso al lugar:		Textura	porfírica	
Carretera Teniente Hugo Ortiz		Estructura	escoracea/vesicular	
INFORMACIÓN DE COORDENADAS UTM		Tamaño del grano	<2mm	
(Sistema de Proyección WGS84)		Forma de los granos	tabulares	
X	205890	% Fenocristales	25%	
Y	9992338	% matriz	75%	
Z (ALTURA m.s.n.m.)	2550	<i>Contenido de Minerales</i>		
DATOS ESTRUCTURALES (áзимut de buzamiento)		Minerales Principales	Plagioclasa, piroxeno, anfíbol	
		Minerales Secundarios	S/I	
Observación: bloques entre 30 a 40 cm , rodados		Minerales Accesorios	S/I	
		Mineralización	No	
		Grado de meteorización	Baja	
		Tipo de alteración	Oxidación en los bordes	
Análisis de Laboratorio: Si	geoquímica total: Si	Lamina delgada: Si	Nombre de la roca	Andesita basáltica

Anexo IV

ANÁLISIS PETROGRÁFICO EN LÁMINA DELGADA DE 19 MUESTRAS OBTENIDAS EN CAMPO (REV 106 -REV 111) Y PROPORCIONADAS POR IG-EPN

Se realizó tablas de resultado de los componentes y composición de las muestras de los flujos de lava de El Reventador, con el fin, de cualificar sus componentes (Cristales, matriz y vesículas). Para estas tablas se nombró los minerales con las siguientes abreviaturas.

Plagioclasa: *Pl*

Ortopiroxeno: *Opx*

Clinopiroxeno: *Cpx*

Hornblenda: *Hnb*

Anfibol: *Anf*

Olivino: *Ol*

Óxidos de Fe: *Oxs. Fe*

Feldespato Potásico: *Felds. K*

Vesículas: *Vsc*

ANÁLISIS MICROSCÓPICO FLUJOS DE LAVA VOLCÁN EL REVENTADOR

Código de Muestra: 20738	Lava: LF5a
Localización: Volcán El Reventador, Napo/Sucumbíos	Fecha: 2008
Coordenadas	X: 205212 Y: 9989115 Z: 2490
Textura: Porfírica, Pilotaxítica, Inequigranular (3 etapas de cristalización), Poiquítica, Sieve, Corona.	
Estructura: Vesicular	
Tamaño de grano: grano fino	
Tipo de matriz: criptocristalina	

COMPOSICIÓN MINERALÓGICA:

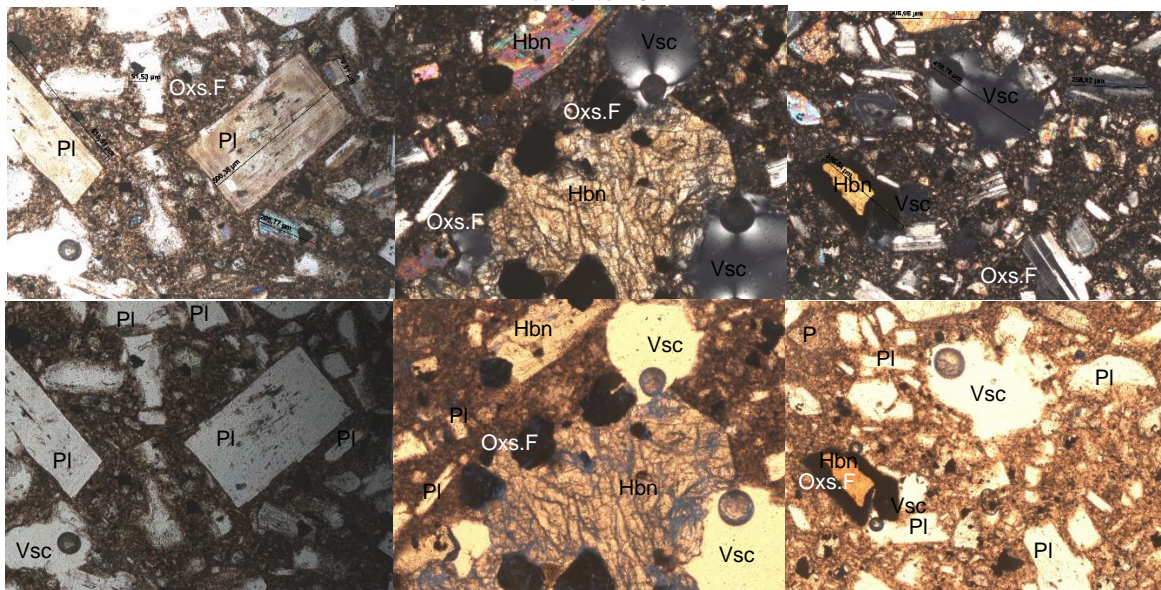
FENOCRISTALES	TAMAÑO	CARACTERÍSTICAS	PORCENTAJE
Plagioclasa	0,07 - 0,9mm	En la muestra de roca está presente 3 etapas de cristalización: la 1era y 2da como fenocristales y la 3era en la matriz. Muestra maclas: simples, polisintética (en su mayoría), Carlsbad (2%). Posee zonación en los cristales de la 1er etapa (5%). Los cristales de 1era etapa tienen forma euhedral, los de 2da etapa de forma anhedral con bordes muy irregulares. Se encuentran ligeramente fracturadas e intersticialmente poseen pequeños cristales de óxidos de Fe en su interior. Algunos cristales presentan aspecto surcado correspondiente a la Tx. Sieve.	29,91%
Piroxeno	0,06-0,8mm	Presente en 2 etapas de cristalización: la 1era como fenocristal y la 2da en la matriz. Bordes de oxidación (2%). Su forma varía de euhedral a anhedral. Posee cristales de Óxidos de Fe intersticialmente.	6,01%
Anfibol	0,08-0,12mm	Presente en 2 etapas de cristalización: la 1era y 2da etapa como fenocristales. Posee formas subhedrales a anhedrales y cristales de Óxidos de Fe intersticialmente. Bordes de oxidación más pronunciados (3%).	5,41%
Óxidos de Fe	0,03-0,1 mm	Presentes inequigranularmente y con bordes irregulares	3,25%
Olivino	0,09mm	Fracturas con relieve muy alto y colores de birrefringencia de 3er orden.	1,06%
MATRIZ	CARACTERÍSTICAS		PORCENTAJE
Plagioclasa	Tabulares		36,33%
Piroxeno	Forma anhedral		
Vidrio	Masa marrón grisácea rodeando los cristales de plagioclasa y piroxeno		
ACCESORIOS	CARACTERÍSTICAS		PORCENTAJE
Apatito	Forma euhedral presente en los cristales de plagioclasa		0.10%
VESÍCULAS	CARACTERÍSTICAS		PORCENTAJE
Vesículas irregulares	De diversos tamaños, redondeados a angulares.		17,93%
OBSERVACIONES			TOTAL
La mayoría de los cristales se encuentran con forma anhedral, hay una gran cantidad de vesículas. La muestra en lamina tiene un aspecto marrón terroso por la presencia de vidrio en la matriz.			100%

TOTAL DE COMPONENTES

TOTAL DE CRISTALES	45,74%
TOTAL DE MATRIZ	36,33%
TOTAL DE VESÍCULAS	17,93%

ESQUEMA LÁMINA DELGADA

Aumento 10X



Andesita porfírica

ANÁLISIS MICROSCÓPICO FLUJOS DE LAVA VOLCÁN EL REVENTADOR

Código de Muestra: 20739	Lava: LF5b
Localización: Volcán El Reventador, Napo/Sucumbíos	Fecha: 2008
Coordenadas	X: 205259 Y: 9989098 Z: 2542

Textura: Porfirítica, Glomeroporfídica, Pilotaxítica, Inequigranular (3 etapas de cristalización), Poiquilitica, Sieve, Corona.
Estructura: Vesicular
Tamaño de grano: grano fino -muy fino
Tipo de matriz: criptocristalina

COMPOSICIÓN MINERALÓGICA:

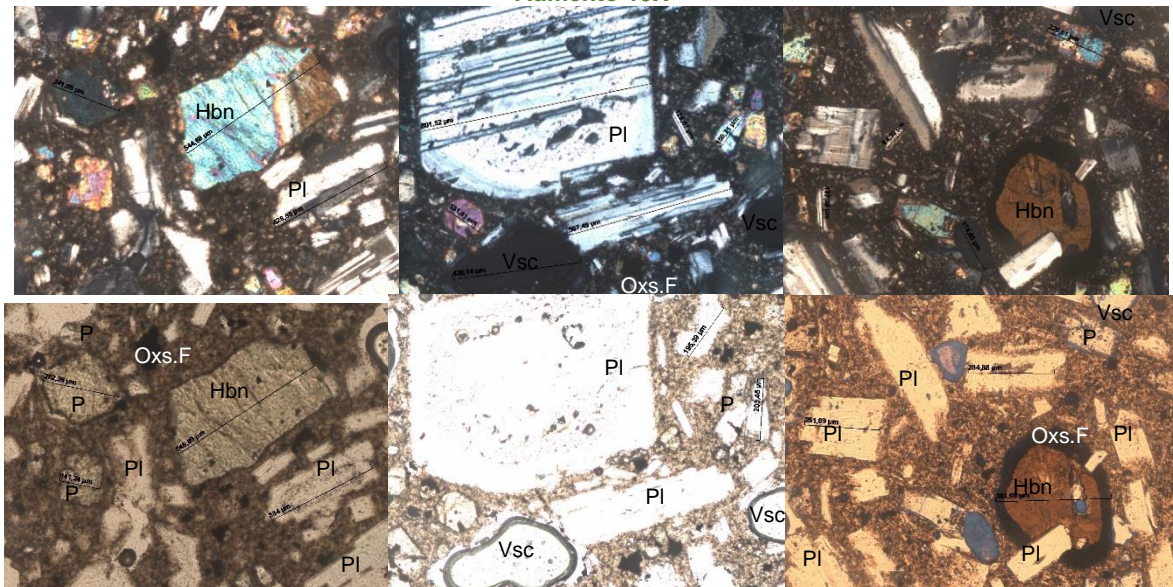
FENOCRISTALES	TAMAÑO	CARACTERÍSTICAS	PORCENTAJE
Plagioclasa	0,03 – 1 mm	En la muestra de roca está presente 3 etapas de cristalización: la 1era y 2da como fenocristales y la 3era en la matriz. Muestra maclas: polisintética (en su mayoría), Carlsbad (1%). Posee zonación en los cristales de la 1era y 2da etapa (9%). Los cristales de 1era etapa tienen forma euahedral equigranular, los de 2da etapa de forma subhedral tabular. Intersticialmente poseen pequeños cristales de óxidos de Fe en su interior. Algunos cristales presentan aspecto surcado correspondiente a la Tx. Sieve.	30,23%
Piroxeno	0,06-0,4mm	Presente en 3 etapas de cristalización: la 1era y 2da como fenocristal y la 3era en la matriz. Bordes de oxidación (4%). Su forma varía de euahedral a subhedral. Posee cristales de Óxidos de Fe intersticialmente. Tamaño de grano menor que la muestra LF5a.	6,19 %
Anfibol	0,08-0,11mm	Presente en 2 etapas de cristalización: la 1era y 2da etapa como fenocristales. Posee formas subhedrales a anhedrales y cristales de Óxidos de Fe intersticialmente.	7,34%
Óxidos de Fe	0,03-0,1 mm	Presentes inequigranularmente, con bordes irregulares.	1,75%
Olivino	0,4 mm	Fracturas con relieve muy alto y colores de birrefringencia de 3er orden. Prismático euahedral con corona de reacción.	1,51%
MATRIZ		CARACTERÍSTICAS	PORCENTAJE
Plagioclasa	Tabulares		34,41%
Piroxeno	Forma anhedral		
Vidrio	Masa marrón grisácea rodeando los cristales de plagioclasa y piroxeno		
ACCESORIOS		CARACTERÍSTICAS	PORCENTAJE
Apatito	Forma euahedral presente en los cristales de plagioclasa		0.12%
Zircón	Forma euahedral presente en los cristales de anfibol. Birrefringencia alta		
VESÍCULAS		CARACTERÍSTICAS	PORCENTAJE
Vesículas irregulares	De diversos tamaños, amorfos, tamaños más grandes que los cristales.		14,45%
OBSERVACIONES			TOTAL
Tamaños de piroxenos y anfíboles de menor tamaño que la muestra LF5a.			100%

TOTAL DE COMPONENTES

TOTAL DE CRISTALES	47,14%
TOTAL DE MATRIZ	35,41%
TOTAL DE VESÍCULAS	17,45%

ESQUEMA LÁMINA DELGADA

Aumento 10X



Andesita porfirítica

ANÁLISIS MICROSCÓPICO FLUJOS DE LAVA VOLCÁN EL REVENTADOR

Código de Muestra: 20732	Lava: LF5c
Localización: Volcán El Reventador, Napo/Sucumbíos	Fecha: 2008
Coordenadas	X: 205916 Y: 9988884 Z: 2423

Textura: Porfírica, Pilotaxítica, Inequigranular (3 etapas de cristalización), Glomeroporfídica, Poiquilitica, Sieve.

Estructura: Vesicular con ligera orientación de flujo.

Tamaño de grano: grano fino

Tipo de matriz: criptocristalina

COMPOSICIÓN MINERALÓGICA:

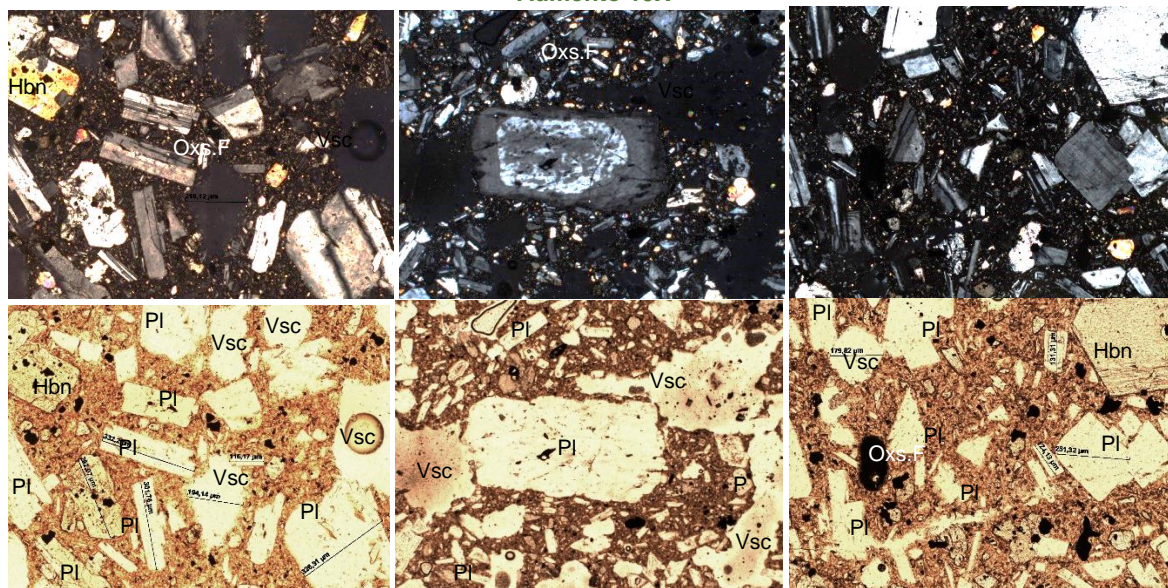
FENOCRISTALES	TAMAÑO	CARACTERÍSTICAS	PORCENTAJE
Plagioclasa	0,05 - 1mm	En la muestra de roca está presente en 3 etapas de cristalización: la 1era y 2da como fenocristales y la 3era en la matriz. Muestra maclas: simples, polisintética (en su mayoría), Carlsbad (7%). Posee zonación en los cristales de la 1er etapa (6%). Los cristales de 1era etapa tienen forma euhedral, los de 2da etapa de forma euhedral a subhedral de tamaños muy irregulares. Se encuentran ligeramente fracturadas e intersticialmente poseen pequeños cristales de óxidos de Fe en su interior. Algunos cristales presentan aspecto surcado correspondiente a la Tx.. Sieve.	30,77%
Piroxeno	0,04-0,75mm	Presente en 2 etapas de cristalización: la 1era como fenocristal y la 2da en la matriz. Su forma varía de euhedral a anhedral. Posee cristales de Óxidos de Fe intersticialmente. Tamaño muy irregular.	5,49%
Anfibol	0,08-1,2mm	Presente en 2 etapas de cristalización: la 1era y 2da etapa como fenocristales. Posee formas euhedrales a subhedral y cristales de Óxidos de Fe intersticialmente. Cristales de gran tamaño.	6,59%
Óxidos de Fe	0,02-0,1 mm	Presentes inequigranularmente y con bordes irregulares	4,39%
Olivino	0,13mm	Fracturas con relieve muy alto y colores de birrefringencia de 3er orden.	0,2%
MATRIZ	CARACTERÍSTICAS		PORCENTAJE
Plagioclasa	Tabulares		36,26%
Piroxeno	Forma anhedral		
Vidrio	Masa marrón grisácea rodeando los cristales de plagioclasa y piroxeno		
ACCESORIOS	CARACTERÍSTICAS		PORCENTAJE
Apatito	Forma euhedral presente en los cristales de plagioclasa		0,17%
VESÍCULAS	CARACTERÍSTICAS		PORCENTAJE
Vesículas irregulares	De diversos tamaños, redondeados a angulares.		16,48%
OBSERVACIONES			TOTAL
Existe una acumulación de cristales de plagioclasa distribuidos de manera pilotaxítica envueltos de óxido de Fe, su forma es tabular equigranular. En esa zona presenta una vesicularidad más regular.			100%

TOTAL DE COMPONENTES

TOTAL DE CRISTALES	47,26%
TOTAL DE MATRIZ	36,26%
TOTAL DE VESÍCULAS	16,48%

ESQUEMA LÁMINA DELGADA

Aumento 10X



Andesita porfírica

ANÁLISIS MICROSCÓPICO FLUJOS DE LAVA VOLCÁN EL REVENTADOR

Código de Muestra: 20740	Lava: LF5d
Localización: Volcán El Reventador, Napo/Sucumbíos	Fecha: 2008
Coordenadas	Z: 2420
X: 205973	Y: 9988835

Textura: Porfirítica, Glomeroporfidica, Pilotaxítica, Inequigranular (3 etapas de cristalización), Poiquilitica, Sieve, Corona.

Estructura: Vesicular

Tamaño de grano: grano fino

Tipo de matriz: criptocristalina (menos cantidad de cristales en el vidrio)

COMPOSICIÓN MINERALÓGICA:

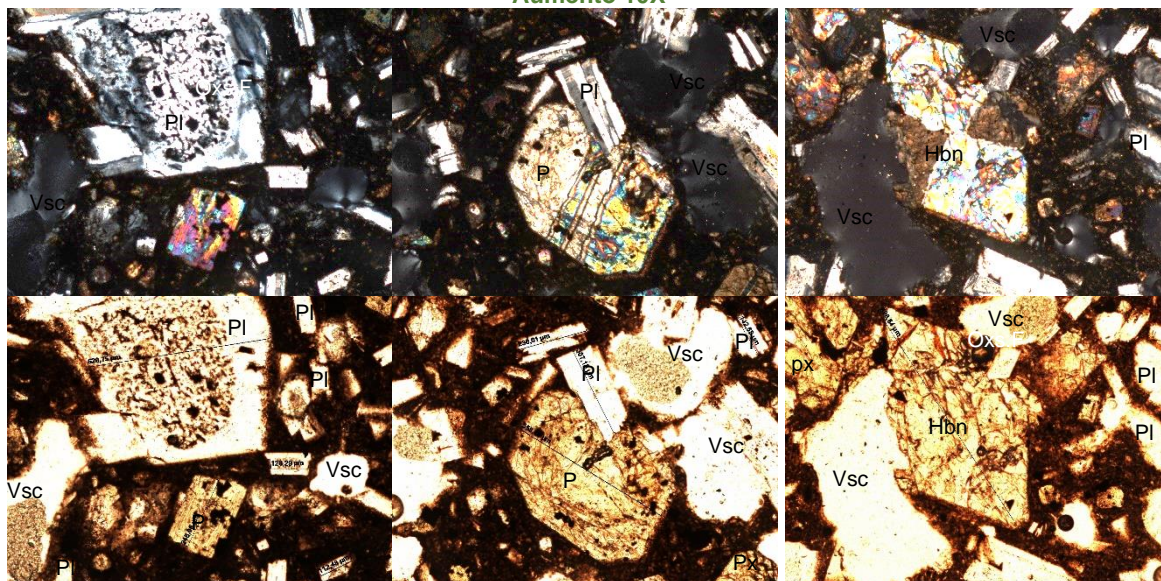
FENOCRISTALES	TAMAÑO	CARACTERÍSTICAS	PORCENTAJE
Plagioclasa	0,07 - 0,9mm	En la muestra de roca está presente en 3 etapas de cristalización: la 1era y 2da como fenocristales y la 3era en la matriz. Muestra maclas: simples, polisintética (en su mayoría), Carlsbad (2%). Posee zonación en los cristales de la 1er etapa (10%). Los cristales de 1era etapa tienen forma euhedral, los de 2da etapa de forma anhedral con bordes muy irregulares. Se encuentran ligeramente fracturadas e intersticialmente poseen pequeños cristales de óxidos de Fe en su interior. Algunos cristales presentan aspecto surcado correspondiente a la Tx. Sieve. Posee cristales redondeados.	32,72 %
Piroxeno	0,06-0,8mm	Presente en 3 etapas de cristalización: la 1era y 2da como fenocristal y la 3ra en la matriz. Bordes de oxidación (0,4%). Su forma varía de euhedral a subhedral. Posee cristales de Óxidos de Fe intersticialmente.	7,44%
Anfibol	0,08-0,12mm	Presente en 2 etapas de cristalización: la 1era y 2da etapa como fenocristales. Posee formas euhedrales y cristales de Óxidos de Fe intersticialmente. Colores de birrefringencia altos.	5,02%
Óxidos de Fe	0,03-0,1 mm	Presentes inequigranularmente y con bordes irregulares	1,2%
Olivino	0,09mm	Fracturas con relieve muy alto y colores de birrefringencia de 3er orden.	1,2%
MATRIZ		CARACTERÍSTICAS	PORCENTAJE
Plagioclasa	Tabulares		
Piroxeno	Forma anhedral		36,96%
Vidrio	Masa marrón grisácea rodeando los cristales de plagioclasa y piroxeno. Mayor cantidad de vidrio en la matriz.		
ACCESORIOS		CARACTERÍSTICAS	PORCENTAJE
Apatito	Forma euhedral presente en los cristales de plagioclasa		0.3%
Rutilo	Forma subhedral, coloración marrón rojizo.		
VESÍCULAS		CARACTERÍSTICAS	PORCENTAJE
Vesículas irregulares	De diversos tamaños, redondeados a angulares.		15,07%
OBSERVACIONES			TOTAL
			100%

TOTAL DE COMPONENTES

TOTAL DE CRISTALES	47,88%
TOTAL DE MATRIZ	36,96%
TOTAL DE VESÍCULAS	15,07%

ESQUEMA LÁMINA DELGADA

Aumento 10X



Andesita porfirítica

ANÁLISIS MICROSCÓPICO FLUJOS DE LAVA VOLCÁN EL REVENTADOR

Código de Muestra: 20738	Lava: LF5e
Localización: Volcán El Reventador, Napo/Sucumbíos	Fecha: 2008
Coordenadas	X: 206145 Y: 9988818 Z: 2367

Textura: Porfírica, Glomeroporfídica, Pilotaxítica, Inequigranular (3 etapas de cristalización), Poiquilitica, Sieve.
Estructura: Vesicular
Tamaño de grano: grano fino
Tipo de matriz: criptocristalina

COMPOSICIÓN MINERALÓGICA:

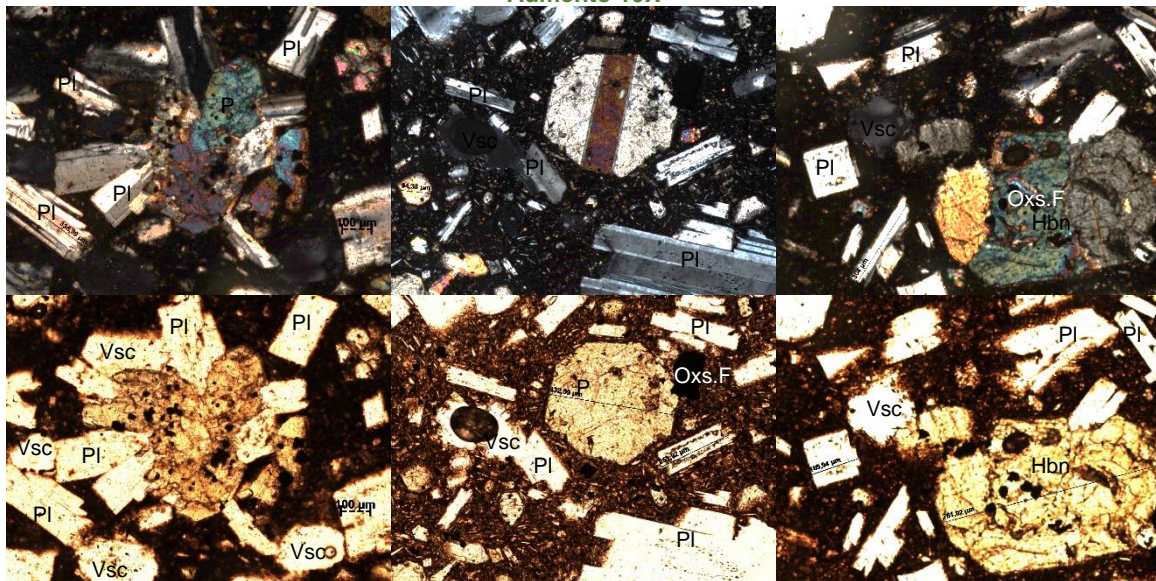
FENOCRISTALES	TAMAÑO	CARACTERÍSTICAS	PORCENTAJE
Plagioclasa	0,07 - 0,9mm	En la muestra de roca está presente en 3 etapas de cristalización: la 1era y 2da como fenocristales y la 3era en la matriz. Muestra maclas: simples, polisintética (en su mayoría). Posee zonación en los cristales de la 1er etapa (6%). Los cristales de 1era etapa tienen forma euédral a subhedral, los de 2da etapa de forma subhedral tabular con bordes muy irregulares. Se encuentran ligeramente fracturadas e intersticialmente poseen pequeños cristales de óxidos de Fe en su interior. Algunos cristales presentan aspecto surcado correspondiente a la Tx. Sieve.	34,30%
Piroxeno	0,06-0,8mm	Presente en 3 etapas de cristalización: la 1era y 2da como fenocristal y la 3ra en la matriz. Bordes de oxidación (1%). Su forma varía de subhedral a anhedral. Posee cristales de Óxidos de Fe intersticialmente.	5,19%
Anfibol	0,08-1,8 mm	Presente en 2 etapas de cristalización: la 1era y 2da etapa como fenocristales y la 3ra en la matriz. Posee formas subhedrales a anhedrales y cristales de Óxidos de Fe intersticialmente. Bordes de oxidación más pronunciados (3%). De gran tamaño.	3,1%
Óxidos de Fe	0,03-0,1 mm	Presentes inequigranularmente y con bordes irregulares	3,89%
Olivino	0,08mm	Fracturas con relieve muy alto y colores de birrefringencia de 3er orden.	1,3%
MATRIZ		CARACTERÍSTICAS	PORCENTAJE
Plagioclasa	Tabulares		
Piroxeno	Forma anhedral		36,51%
Vidrio	Masa marrón grisácea rodeando los cristales de plagioclasa y piroxeno		
ACCESORIOS		CARACTERÍSTICAS	PORCENTAJE
Apatito	Forma euédral presente en los cristales de plagioclasa		0.13%
VESÍCULAS		CARACTERÍSTICAS	PORCENTAJE
Vesículas irregulares	De diversos tamaños, redondeados a angulares.		15.58%
OBSERVACIONES			TOTAL
			100%

TOTAL DE COMPONENTES

TOTAL DE CRISTALES	47,91%
TOTAL DE MATRIZ	36,51%
TOTAL DE VESÍCULAS	15.58%

ESQUEMA LÁMINA DELGADA

Aumento 10X



Andesita porfírica

ANÁLISIS MICROSCÓPICO FLUJOS DE LAVA VOLCÁN EL REVENTADOR

Código de Muestra: 20742	Lava: LF5f
Localización: Volcán El Reventador, Napo/Sucumbíos	Fecha: 2008
Coordenadas X: 206308	Y: 9988737
	Z: 2338

Textura: Porfírica, Pilotaxítica, Inequigranular (3 etapas de cristalización), Poiquilítica, Sieve, Corona.

Estructura: Vesicular

Tamaño de grano: grano fino

Tipo de matriz: criptocristalina

COMPOSICIÓN MINERALÓGICA:

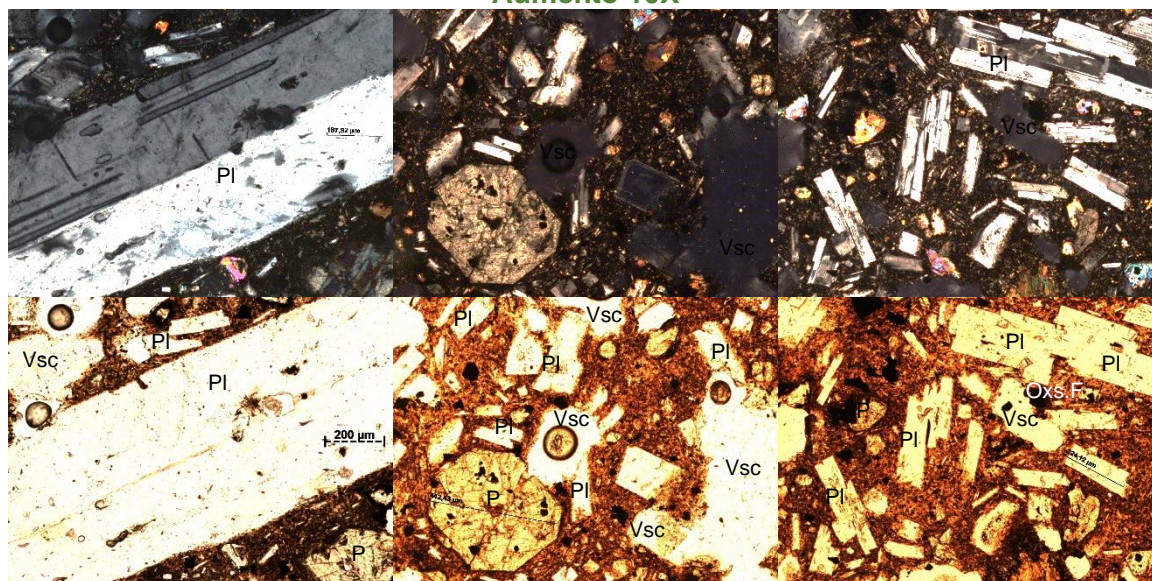
FENOCRISTALES	TAMAÑO	CARACTERÍSTICAS	PORCENTAJE
Plagioclasa	0,07 - 0,9mm	En la muestra de roca está presente en 3 etapas de cristalización: la 1era y 2da como fenocristales y la 3era en la matriz. Muestra maclas: simples, polisintética (en su mayoría), Carlsbad (4%). Posee zonación en los cristales de la 1er etapa (0,2%). Los cristales de 1era etapa tienen forma euهدral, los de 2da etapa de forma anhedral con bordes muy irregulares. Se encuentran ligeramente fracturadas e intersticialmente poseen pequeños cristales de óxidos de Fe en su interior. Algunos cristales presentan aspecto surcado correspondiente a la Tx. Sieve.	28,80%
Piroxeno	0,06-0,8mm	Presente en 3 etapas de cristalización: la 1era y 2da como fenocristal y la 3ra en la matriz. Bordes de oxidación (0,4%). Su forma varía de euهدral a anhedral. Posee cristales de Óxidos de Fe intersticialmente.	8,5%
Anfibol	0,08-0,16mm	Presente en 2 etapas de cristalización: la 1era y 2da etapa como fenocristales y la 3ra en la matriz. Posee formas subhedrales a anhedrales y cristales de Óxidos de Fe intersticialmente. Bordes de oxidación más pronunciados (4%).	8,02%
Óxidos de Fe	0,03-0,1 mm	Presentes inequigranularmente y con bordes irregulares	2,67%
Olivino	0,07mm	Fracturas con relieve muy alto y colores de birrefringencia de 3er orden.	0%
MATRIZ		CARACTERÍSTICAS	PORCENTAJE
Plagioclasa	Tabulares		
Piroxeno	Forma anhedral		26,2%
Vidrio	Masa marrón grisácea rodeando los cristales de plagioclasa y piroxeno		
ACCESORIOS		CARACTERÍSTICAS	PORCENTAJE
Apatito	Forma euهدral presente en los cristales de plagioclasa		0,07%
VESÍCULAS		CARACTERÍSTICAS	PORCENTAJE
Vesículas irregulares	De diversos tamaños, redondeados a angulares.		25,67%
OBSERVACIONES			TOTAL
			100%

TOTAL DE COMPONENTES

TOTAL DE CRISTALES	48,13%
TOTAL DE MATRIZ	26,2%
TOTAL DE VESÍCULAS	25,67%

ESQUEMA LÁMINA DELGADA

Aumento 10X



Andesita porfírica

ANÁLISIS MICROSCÓPICO FLUJOS DE LAVA VOLCÁN EL REVENTADOR

Código de Muestra: 20731	Lava: LF4
Localización: Volcán El Reventador, Napo/Sucumbíos	Fecha: 2008
Coordenadas	X: 206782 Y: 9988489 Z: 2104
Textura: Porfírica, Pilotaxítica, Inequigranular (3 etapas de cristalización), Poiquilitica, Sieve, Corona.	
Estructura: Vesicular	
Tamaño de grano: grano fino	
Tipo de matriz: criptocristalina	

COMPOSICIÓN MINERALÓGICA:

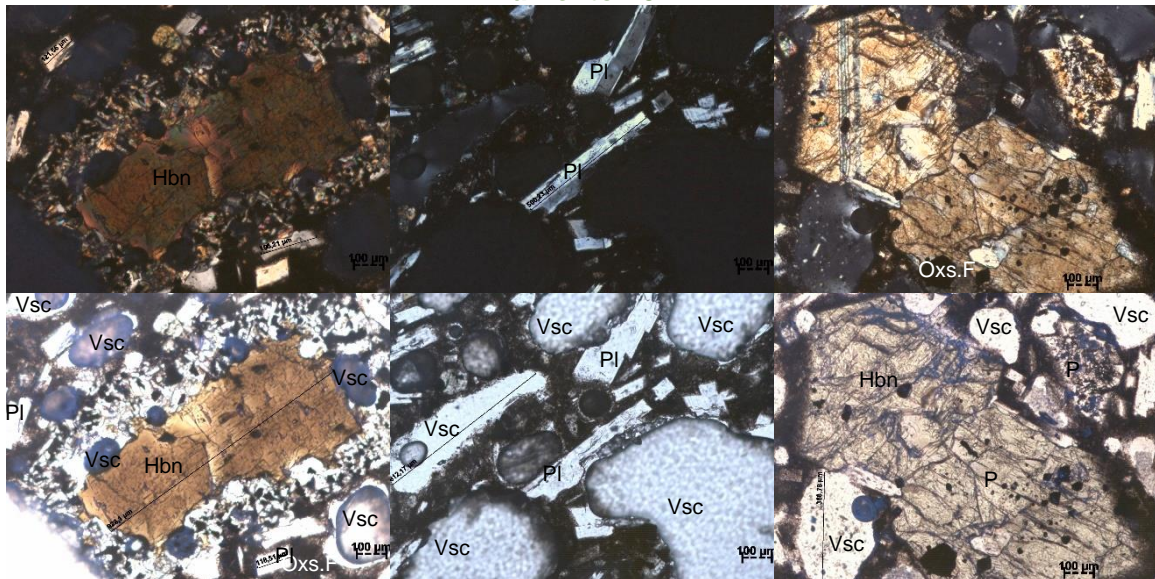
FENOCRISTALES	TAMAÑO	CARACTERÍSTICAS	PORCENTAJE
Plagioclasa	0,07 - 0,9mm	En la muestra de roca está presente 3 etapas de cristalización: la 1era y 2da como fenocristales y la 3era en la matriz. Aproximadamente el 20% del total de plagioclasas corresponden a la 1era etapa. Muestra maclas: simples y polisintética (en su mayoría). Posee zonación en los cristales de la 1er etapa (5%). Los cristales de 1era etapa tienen forma euhedral a subhedral, los de 2da etapa de forma subhedral a anhedral con bordes muy irregulares tabulares. Se encuentran ligeramente fracturadas e intersticialmente poseen pequeños cristales de óxidos de Fe en su interior. Algunos cristales presentan aspecto surcado correspondiente a la Tx. Sieve. Presenta alteración a arcilla.	23,53%
Piroxeno	0,06-0,8mm	Presente en 3 etapas de cristalización: la 1era y 2da como fenocristal y la 3ra en la matriz. Colores de birrefringencia de 3er orden. Su forma varía de euhedral a anhedral. Posee cristales de Óxidos de Fe intersticialmente.	6,42%
Anfibol	0,08-0,12mm	Presente en 2 etapas de cristalización: la 1era y 2da etapa como fenocristales. Tamaños grandes en la roca. Posee formas anhedrales y cristales de Óxidos de Fe intersticialmente. Bordes de oxidación pronunciados.	4,28%
Óxidos de Fe	0,03-0,1 mm	Presentes inequigranularmente y con bordes irregulares. Dentro de cristales como fenocristales y en la matriz.	3,25%
Olivino	0,09mm	Fracturas con relieve muy alto y colores de birrefringencia de 3er orden.	1,03%
MATRIZ	CARACTERÍSTICAS		PORCENTAJE
Plagioclasa	Tabulares		28,41%
Piroxeno	Forma anhedral		
Vidrio	Masa marrón grisácea rodeando los cristales de plagioclasa y piroxeno		
ACCESORIOS	CARACTERÍSTICAS		PORCENTAJE
Apatito	Forma euhedral presente en los cristales de plagioclasa		0,10%
VESÍCULAS	CARACTERÍSTICAS		PORCENTAJE
Vesículas irregulares	De diversos tamaños, redondeados a angulares.		36,36%
OBSERVACIONES			TOTAL
La mayoría de los cristales se encuentran con forma anhedral, hay una gran cantidad de vesículas. La muestra en lamina tiene un aspecto marrón terroso por la presencia de vidrio en la matriz.			100%

TOTAL DE COMPONENTES

TOTAL DE CRISTALES	35,23%
TOTAL DE MATRIZ	28,41%
TOTAL DE VESÍCULAS	36,36%

ESQUEMA LÁMINA DELGADA

Aumento 10X



Andesita porfírica

ANÁLISIS MICROSCÓPICO FLUJOS DE LAVA VOLCÁN EL REVENTADOR

Código de Muestra: 20733	Lava: LF5c
Localización: Volcán El Reventador, Napo/Sucumbíos	Fecha: 2008
Coordenadas	X: 205916 Y: 9988884 Z: 2423

Textura: Porfírica, Pilotaxítica, Inequigranular (3 etapas de cristalización), Poiquítica, Sieve, Corona.
Estructura: Vesicular
Tamaño de grano: grano fino
Tipo de matriz: criptocristalina

COMPOSICIÓN MINERALÓGICA:

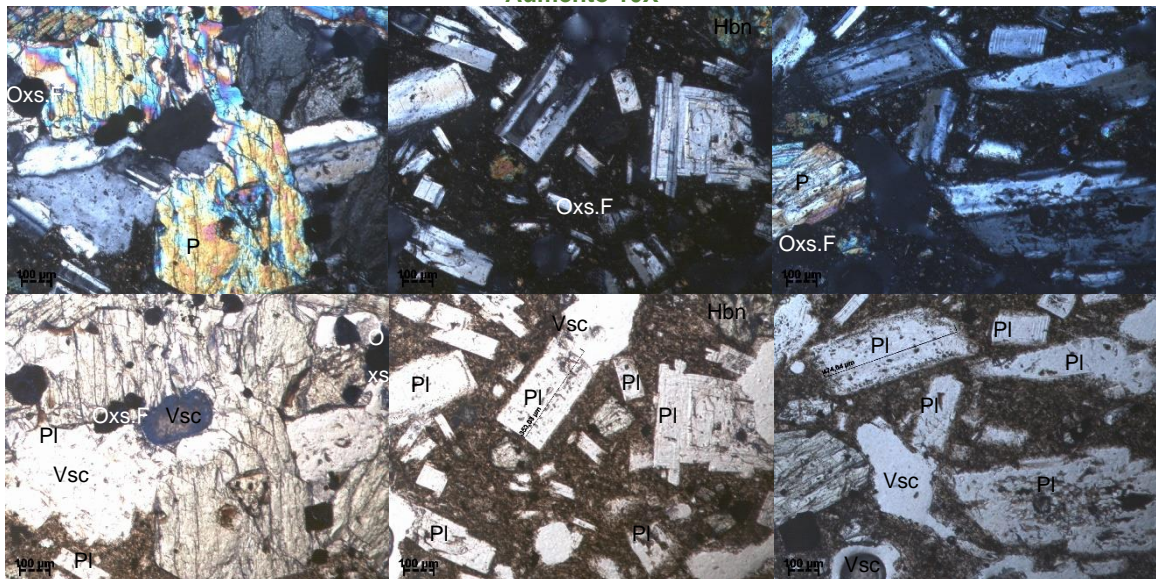
FENOCRISTALES	TAMAÑO	CARACTERÍSTICAS	PORCENTAJE
Plagioclasa	0,07 - 0,9mm	En la muestra de roca está presente en 3 etapas de cristalización: la 1era y 2da como fenocristales y la 3era en la matriz. Muestra maclas: simples, polisintética (en su mayoría), Carlsbad (7%). Posee zonación en los cristales de la 1er etapa (6%). Los cristales de 1era etapa tienen forma euhedral, los de 2da etapa de forma euhedral a subhedral de tamaños muy irregulares. Se encuentran ligeramente fracturadas e intersticialmente poseen pequeños cristales de óxidos de Fe en su interior. Algunos cristales presentan aspecto surcado correspondiente a la Tx.. Sieve.	30,77%
Piroxeno	0,06-0,8mm	Presente en 2 etapas de cristalización: la 1era como fenocristal y la 2da en la matriz. Su forma varía de euhedral a anhedral. Posee cristales de Óxidos de Fe intersticialmente. Tamaño muy irregular.	5,49%
Anfibol	0,08-0,12mm	Presente en 2 etapas de cristalización: la 1era y 2da etapa como fenocristales. Posee formas euhedrales a subhedrales y cristales de Óxidos de Fe intersticialmente. Cristales de gran tamaño.	6,59%
Óxidos de Fe	0,03-0,1 mm	Presentes inequigranularmente y con bordes irregulares	9%
Olivino	0,09mm	Fracturas con relieve muy alto y colores de birrefringencia de 3er orden.	0%
MATRIZ		CARACTERÍSTICAS	PORCENTAJE
Plagioclasa	Tabulares		
Piroxeno	Forma anhedral		36,26%
Vidrio	Masa marrón grisácea rodeando los cristales de plagioclasa y piroxeno		
ACCESORIOS		CARACTERÍSTICAS	PORCENTAJE
Apatito	Forma euhedral presente en los cristales de plagioclasa		0.10%
VESÍCULAS		CARACTERÍSTICAS	PORCENTAJE
Vesículas irregulares	De diversos tamaños, redondeados a angulares.		16,48%
OBSERVACIONES			TOTAL
La mayoría de los cristales se encuentran con forma anhedral, hay una gran cantidad de vesículas. La muestra en lamina tiene un aspecto marrón terroso por la presencia de vidrio en la matriz.			100%

TOTAL DE COMPONENTES

TOTAL DE CRISTALES	47,26%
TOTAL DE MATRIZ	36,26%
TOTAL DE VESÍCULAS	16,48%

ESQUEMA LÁMINA DELGADA

Aumento 10X



Andesita porfírica

ANÁLISIS MICROSCÓPICO FLUJOS DE LAVA VOLCÁN EL REVENTADOR

Código de Muestra: 20743	Lava: LF9
Localización: Volcán El Reventador, Napo/Sucumbíos	Fecha: 2008
Coordenadas	X: 207900 Y: 9991821 Z: 2150

Textura: Porfírica, Pilotaxítica, Glomeroporfírica, Inequigranular (3 etapas de cristalización), Poiquilitica.

Estructura: Vesicular

Tamaño de grano: grano fino

Tipo de matriz: criptocristalina

COMPOSICIÓN MINERALÓGICA:

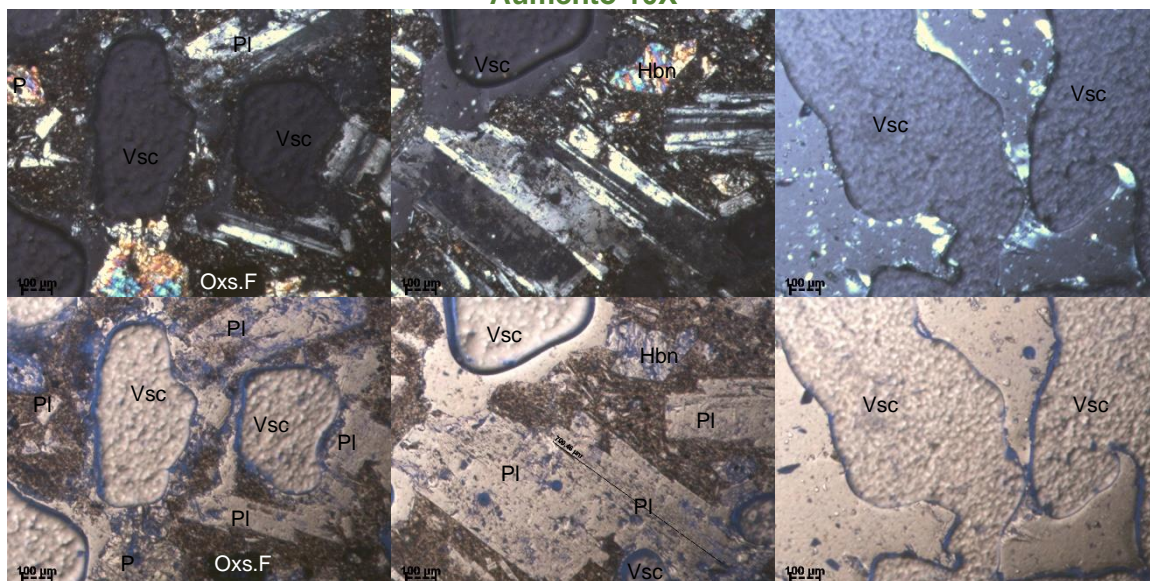
FENOCRISTALES	TAMAÑO	CARACTERÍSTICAS	PORCENTAJE
Plagioclasa	0,07 - 0,9mm	En la muestra de roca está presente 3 etapas de cristalización: la 1era y 2da como fenocristales y la 3era en la matriz. Primera etapa aproximadamente 5%. Muestra maclas: simples, polisintética (en su mayoría). Posee zonación en los cristales de la 1er etapa (15%). Los cristales de 1era etapa tienen forma euhedral, los de 2da etapa de forma anhedral con bordes muy irregulares. Se encuentran ligeramente fracturadas e intersticialmente poseen pequeños cristales de óxidos de Fe en su interior.	20,74%
Piroxeno	0,06-0,8mm	Presente en 2 etapas de cristalización: la 1era como fenocristal y la 2da en la matriz. Bordes de oxidación (3%). Su forma varía de euhedral a subhedral. Posee cristales de Óxidos de Fe intersticialmente. Macla simple	8,21%
Anfibol	0,08-0,12mm	Presente en 2 etapas de cristalización: la 1era y 2da etapa como fenocristales. Posee formas subhedrales a anhedral y cristales de Óxidos de Fe intersticialmente. Bordes de oxidación más pronunciados (3%).	2,99%
Óxidos de Fe	0,03-0,1 mm	Presentes inequigranularmente y con bordes irregulares	0,75%
Olivino			0%
MATRIZ		CARACTERÍSTICAS	PORCENTAJE
Plagioclasa	Tabulares		31,34%
Piroxeno	Forma anhedral		
Vidrio	Masa marrón grisácea rodeando los cristales de plagioclasa y piroxeno		
ACCESORIOS		CARACTERÍSTICAS	PORCENTAJE
Apatito	Forma euhedral presente en los cristales de plagioclasa		0.10%
VESÍCULAS		CARACTERÍSTICAS	PORCENTAJE
Vesículas irregulares	De diversos tamaños, redondeados a angulares. Domina la roca		35,82%
OBSERVACIONES			TOTAL
La mayoría de los cristales se encuentran con forma anhedral, hay una gran cantidad de vesículas. La muestra en lamina tiene un aspecto marrón terroso por la presencia de vidrio en la matriz.			100%

TOTAL DE COMPONENTES

TOTAL DE CRISTALES	32,84%
TOTAL DE MATRIZ	31,34%
TOTAL DE VESÍCULAS	35,82%

ESQUEMA LÁMINA DELGADA

Aumento 10X



Andesita porfírica

ANÁLISIS MICROSCÓPICO FLUJOS DE LAVA VOLCÁN EL REVENTADOR

Código de Muestra: 20735	Lava: LF11a
Localización: Volcán El Reventador, Napo/Sucumbíos	Fecha: 2008
Coordenadas	X: 206749 Y: 9989634 Z: 2256

Textura: Porfírica, Pilotaxítica, mayormente equigranular (3 etapas de cristalización), Poiquilítica.

Estructura: Vesicular

Tamaño de grano: grano fino

Tipo de matriz: criptocristalina

COMPOSICIÓN MINERALÓGICA:

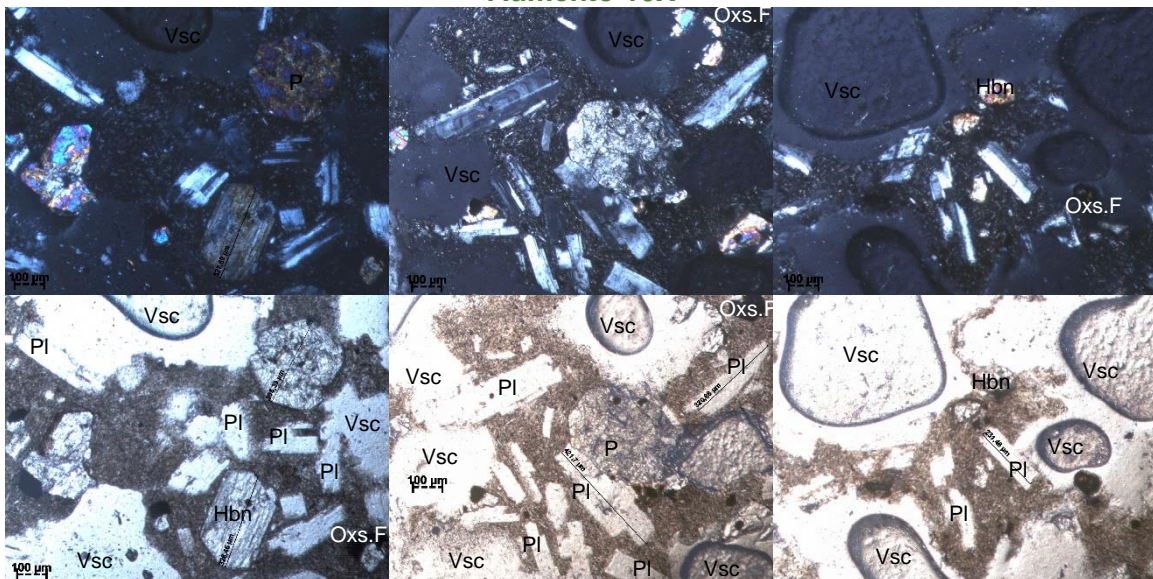
FENOCRISTALES	TAMAÑO	CARACTERÍSTICAS	PORCENTAJE
Plagioclasa	0,07 - 0,9mm	En la muestra de roca está presente 3 etapas de cristalización: la 1era y 2da como fenocristales y la 3era en la matriz. La 1era etapa solo presenta el 5% del total de plagioclasas. Muestra maclas: simples, polisintética (en su mayoría), Carlsbad (1%). Posee zonación en los cristales de la 1er etapa (5%). Los cristales de 1era etapa tienen forma euhedral, los de 2da etapa de forma anhedral con bordes muy irregulares. Se encuentran ligeramente fracturadas e intersticialmente poseen pequeños cristales de óxidos de Fe en su interior. Algunos cristales presentan aspecto surcado correspondiente a la Tx. Sieve.	25,07%
Piroxeno	0,06-0,8mm	Presente en 3 etapas de cristalización: la 1era y 2da como fenocristal y la 3ra en la matriz. Bordes de oxidación (2%). Su forma varía de subhedral a anhedral. Posee cristales de Óxidos de Fe intersticialmente. La mayoría de sus cristales son equigranulares.	4,76%
Anfibol	0,08-0,12mm	Presente en 2 etapas de cristalización: la 1era y 2da etapa como fenocristales. Posee formas subhedrales a anhedrales y cristales de Óxidos de Fe intersticialmente. Bordes de oxidación más pronunciados (3%). Colores de birrefringencia altos	5,9%
Óxidos de Fe	0,03-0,1 mm	Presentes inequigranularmente y con bordes irregulares	1,5%
Olivino			0%
MATRIZ		CARACTERÍSTICAS	PORCENTAJE
Plagioclasa	Tabulares		
Piroxeno	Forma anhedral		21,65%
Vidrio	Masa marrón grisácea rodeando los cristales de plagioclasa y piroxeno		
ACCESORIOS		CARACTERÍSTICAS	PORCENTAJE
Apatito	Forma euhedral presente en los cristales de plagioclasa		0.10%
VESICULAS		CARACTERÍSTICAS	PORCENTAJE
Vesículas irregulares	De diversos tamaños, redondeados a angulares. Dominan la roca		41,02%
OBSERVACIONES			TOTAL
La mayoría de los cristales se encuentran con forma anhedral, hay una gran cantidad de vesículas. La muestra en lamina tiene un aspecto marrón terroso por la presencia de vidrio en la matriz.			100%

TOTAL DE COMPONENTES

TOTAL DE CRISTALES	37,33%
TOTAL DE MATRIZ	21,65%
TOTAL DE VESICULAS	41,02%

ESQUEMA LÁMINA DELGADA

Aumento 10X



Andesita porfírica

ANÁLISIS MICROSCOPICO FLUJOS DE LAVA VOLCÁN EL REVENTADOR

Código de Muestra: 20736	Lava: LF11b
Localización: Volcán El Reventador, Napo/Sucumbíos	Fecha: 2008
Coordenadas	X:206749 Y: 9989325 Z:2232

Textura: Porfírica, Pilotaxítica, Inequigranular (3 etapas de cristalización), Poiquilítica, Sieve, Corona.
Estructura: Vesicular
Tamaño de grano: grano fino
Tipo de matriz: criptocristalina

COMPOSICIÓN MINERALÓGICA:

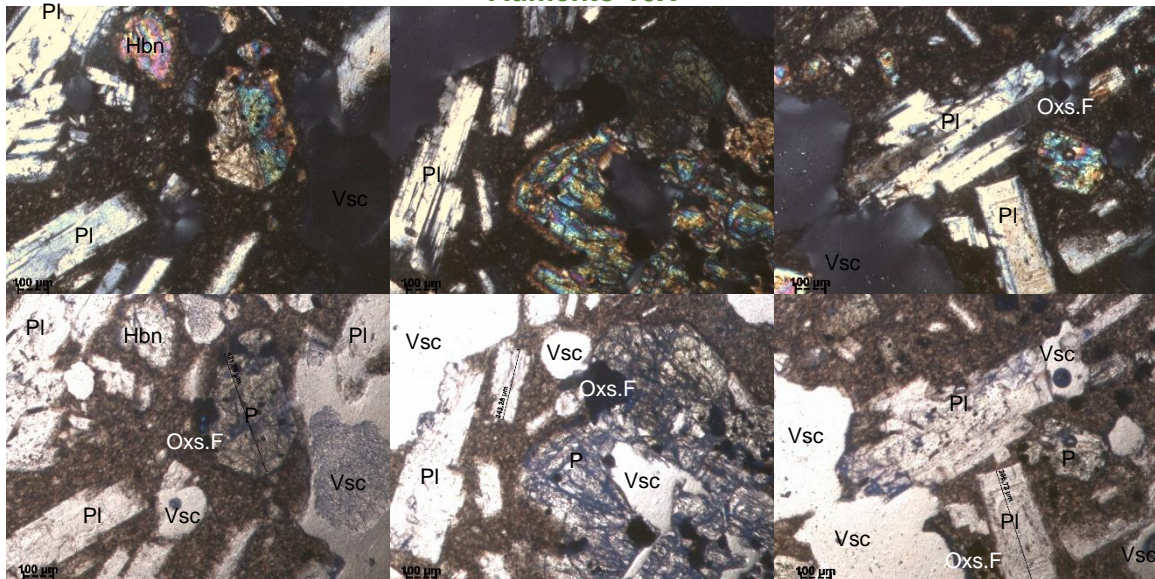
FENOCRISTALES	TAMAÑO	CARACTERISTICAS	PORCENTAJE
Plagioclasa	0,07 - 0,9mm	En la muestra de roca está presente 3 etapas de cristalización: la 1era y 2da como fenocristales y la 3era en la matriz. Muestra maclas: simples, polisintética (en su mayoría), Carlsbad (3%). Posee zonación en los cristales de la 1er etapa (14%). Los cristales de 1era etapa tienen forma euhedral, los de 2da etapa de forma anhedral con bordes muy irregulares. Se encuentran ligeramente fracturadas e intersticialmente poseen pequeños cristales de óxidos de Fe en su interior. Algunos cristales presentan aspecto surcado correspondiente a la Tx. Sieve.	24.90%
Piroxeno	0,06-0,8mm	Presente en 2 etapas de cristalización: la 1era como fenocristal y la 2da en la matriz. Bordes de oxidación (2%). Su forma en su mayoría es euhedral. Posee cristales de Óxidos de Fe intersticialmente.	8.14%
Anfibol	0,08-0,12mm	Presente en 2 etapas de cristalización: la 1era y 2da etapa como fenocristales. Posee formas subhedral a euhedral y cristales de Óxidos de Fe intersticialmente. Bordes de oxidación más pronunciados (3%).	7.59%
Óxidos de Fe	0,03-0,1 mm	Presentes inequigranularmente y con bordes irregulares	2.53%
Olivino			0%
MATRIZ		CARACTERISTICAS	PORCENTAJE
Plagioclasa	Tabulares		36,73%
Piroxeno	Forma anhedral		
Vidrio	Masa marrón grisácea rodeando los cristales de plagioclasa y piroxeno. Cristales más homogéneos.		
ACCESORIOS		CARACTERISTICAS	PORCENTAJE
Apatito	Forma euhedral presente en los cristales de plagioclasa		0.10%
VESICULAS		CARACTERISTICAS	PORCENTAJE
Vesículas irregulares	De diversos tamaños, redondeados a angulares.		19,9%
OBSERVACIONES			TOTAL
La mayoría de los cristales se encuentran con forma anhedral, hay una gran cantidad de vesículas. La muestra en lamina tiene un aspecto marrón terroso por la presencia de vidrio en la matriz.			100%

TOTAL DE COMPONENTES

TOTAL DE CRISTALES	43,37%
TOTAL DE MATRIZ	36,73%
TOTAL DE VESÍCULAS	19,9%

ESQUEMA LÁMINA DELGADA

Aumento 10X



Andesita porfírica

ANÁLISIS MICROSCÓPICO FLUJOS DE LAVA VOLCÁN EL REVENTADOR

Código de Muestra: 20734	Lava: LF14
Localización: Volcán El Reventador, Napo/Sucumbíos	Fecha: 2008
Coordenadas	Z: 2490
X: 205212	Y: 9989115

Textura: Porfírica, Pilotaxítica, Inequigranular (3 etapas de cristalización), Poiquilítica, Sieve, Corona.

Estructura: Vesicular

Tamaño de grano: grano fino

Tipo de matriz: criptocristalina

COMPOSICIÓN MINERALÓGICA:

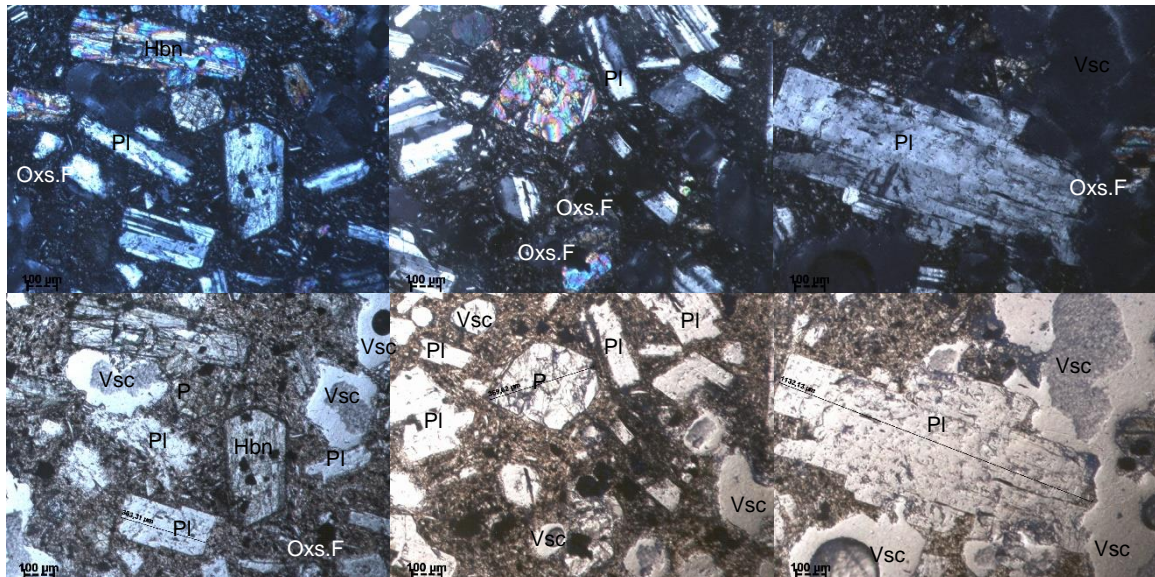
FENOCRISTALES	TAMAÑO	CARACTERÍSTICAS	PORCENTAJE
Plagioclasa	0,07 - 0,9mm	En la muestra de roca está presente 3 etapas de cristalización: la 1era y 2da como fenocristales y la 3era en la matriz. Muestra maclas: simples, polisintética (en su mayoría), Carlsbad (2%). Posee zonación en los cristales de la 1er etapa (5%). Los cristales tienen forma tabular subhedral, con bordes muy irregulares. Se encuentran ligeramente fracturadas e intersticialmente poseen pequeños cristales de óxidos de Fe en su interior. Algunos cristales presentan aspecto surcado correspondiente a la Tx. Sieve.	41%
Piroxeno	0,06-0,8mm	Presente en 2 etapas de cristalización: la 1era como fenocristal y la 2da en la matriz. Bordes de oxidación (2%). Su forma varía de euhedral a anhedral. Posee cristales de Óxidos de Fe intersticialmente.	5,86%
Anfibol	0,08-0,12mm	Presente en 2 etapas de cristalización: la 1era y 2da etapa como fenocristales. Posee formas subhedrales a anhedrales y cristales de Óxidos de Fe intersticialmente. Bordes de oxidación más pronunciados (2%).	5,02%
Óxidos de Fe	0,03-0,1 mm	Presentes inequigranularmente y con bordes irregulares	5,86%
Olivino	0,09mm	Fracturas con relieve muy alto y colores de birrefringencia de 3er orden.	0,84%
MATRIZ		CARACTERÍSTICAS	PORCENTAJE
Plagioclasa	Tabulares		
Piroxeno	Forma anhedral		30,54%
Vidrio	Masa marrón grisácea rodeando los cristales de plagioclasa y piroxeno		
ACCESORIOS		CARACTERÍSTICAS	PORCENTAJE
Apatito	Forma euhedral presente en los cristales de plagioclasa		0,10%
VESÍCULAS		CARACTERÍSTICAS	PORCENTAJE
Vesículas irregulares	De diversos tamaños, redondeados a angulares.		10,88%
OBSERVACIONES			TOTAL
La mayoría de los cristales se encuentran con forma anhedral, hay una gran cantidad de vesículas. La muestra en lamina tiene un aspecto marrón terroso por la presencia de vidrio en la matriz.			100%

TOTAL DE COMPONENTES

TOTAL DE CRISTALES	58,58%
TOTAL DE MATRIZ	30,54%
TOTAL DE VESÍCULAS	10,88%

ESQUEMA LÁMINA DELGADA

Aumento 10X



Andesita porfírica

ANÁLISIS MICROSCÓPICO FLUJOS DE LAVA VOLCÁN EL REVENTADOR

Código de Muestra: 20737	Lava: LF25
Localización: Volcán El Reventador, Napo/Sucumbíos	Fecha: 2008
Coordenadas	Z: -
X: 204599	Y: 9989370

Textura: Porfírica, Pilotáxica, Inequigranular (3 etapas de cristalización), Poiquítica, Sieve.

Estructura: Vesicular

Tamaño de grano: grano fino

Tipo de matriz: criptocristalina

COMPOSICIÓN MINERALÓGICA:

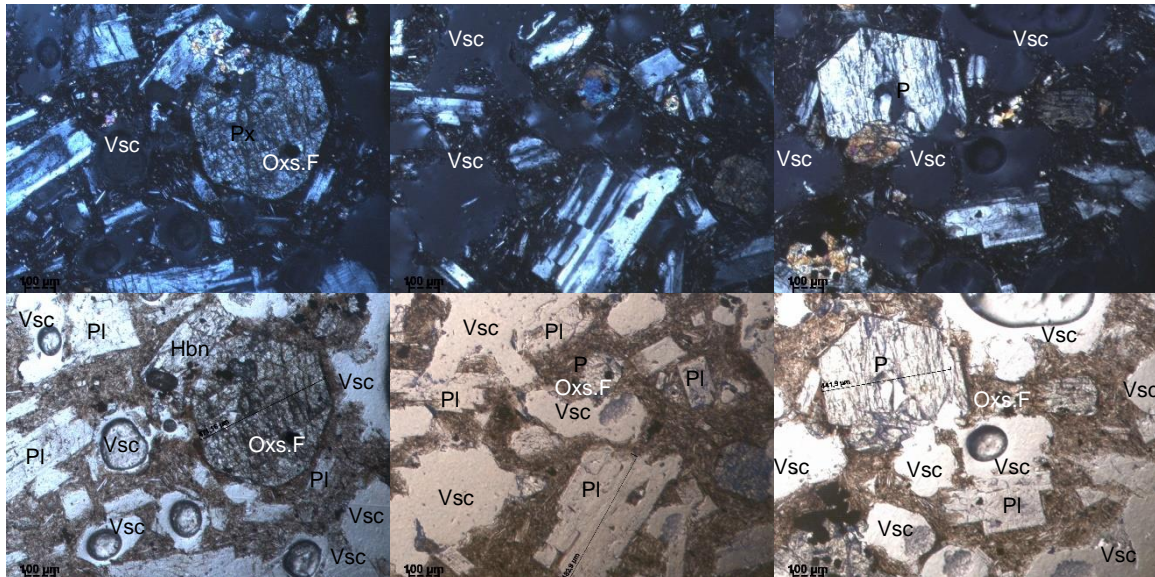
FENOCRISTALES	TAMAÑO	CARACTERÍSTICAS	PORCENTAJE
Plagioclasa	0,07 - 0,9mm	En la muestra de roca está presente 3 etapas de cristalización: la 1era y 2da como fenocristales y la 3era en la matriz. Muestra maclas: simples, polisintética (en su mayoría), Carlsbad (1%). Posee zonación en los cristales de la 1er etapa (5%). Los cristales de 1er etapa tienen forma euhedral, los de 2da etapa de forma anhedral con bordes muy irregulares. Se encuentran ligeramente fracturadas e intersticialmente poseen pequeños cristales de óxidos de Fe en su interior. Algunos cristales presentan aspecto surcado correspondiente a la Tx. Sieve.	23,49%
Piroxeno	0,15-0,6mm	Presente en 3 etapas de cristalización: la 1era y 2da como fenocristal y la 3ra en la matriz. Bordes de oxidación (2%). Su forma varía de euhedral a anhedral. Posee cristales de Óxidos de Fe intersticialmente.	2,68%
Anfibol	0,38-0,8mm	Presente en 2 etapas de cristalización: la 1era y 2da etapa como fenocristales. Posee formas subhedrales a anhedrales y cristales de Óxidos de Fe intersticialmente. Bordes de oxidación más pronunciados (2%).	4,03%
Óxidos de Fe	0,03-0,1 mm	Presentes inequigranularmente y con bordes irregulares	0,67%
Olivino			0%
MATRIZ		CARACTERÍSTICAS	PORCENTAJE
Plagioclasa	Tabulares		12,75%
Piroxeno	Forma anhedral		
Vidrio	Masa marrón grisácea rodeando los cristales de plagioclasa y piroxeno		
ACCESORIOS		CARACTERÍSTICAS	PORCENTAJE
Apatito	Forma euhedral presente en los cristales de plagioclasa		0,10%
VESÍCULAS		CARACTERÍSTICAS	PORCENTAJE
Vesículas irregulares	De diversos tamaños, redondeados a angulares. Domina la roca.		57,72%
OBSERVACIONES			TOTAL
La mayoría de los cristales se encuentran con forma anhedral, hay una gran cantidad de vesículas. La muestra en lamina tiene un aspecto marrón terroso por la presencia de vidrio en la matriz. Muy alta vesicularidad.			100%

TOTAL DE COMPONENTES

TOTAL DE CRISTALES	29,53%
TOTAL DE MATRIZ	12,75%
TOTAL DE VESÍCULAS	57,72%

ESQUEMA LÁMINA DELGADA

Aumento 10X



Andesita porfírica

ANÁLISIS MICROSCÓPICO FLUJOS DE LAVA VOLCÁN EL REVENTADOR

Código de Muestra: REV 108	Lava: LF9
Localización: Volcán El Reventador, Napo/Sucumbíos	Fecha: 2021
Coordenadas	Z: 2602
X: 205740	Y: 9992138

Textura: Porfírica, Semitraquítica, Inequigranular (3 etapas de cristalización), Sieve.
Estructura: Vesicular
Tamaño de grano: grano fino
Tipo de matriz: criptocristalina

COMPOSICIÓN MINERALÓGICA:

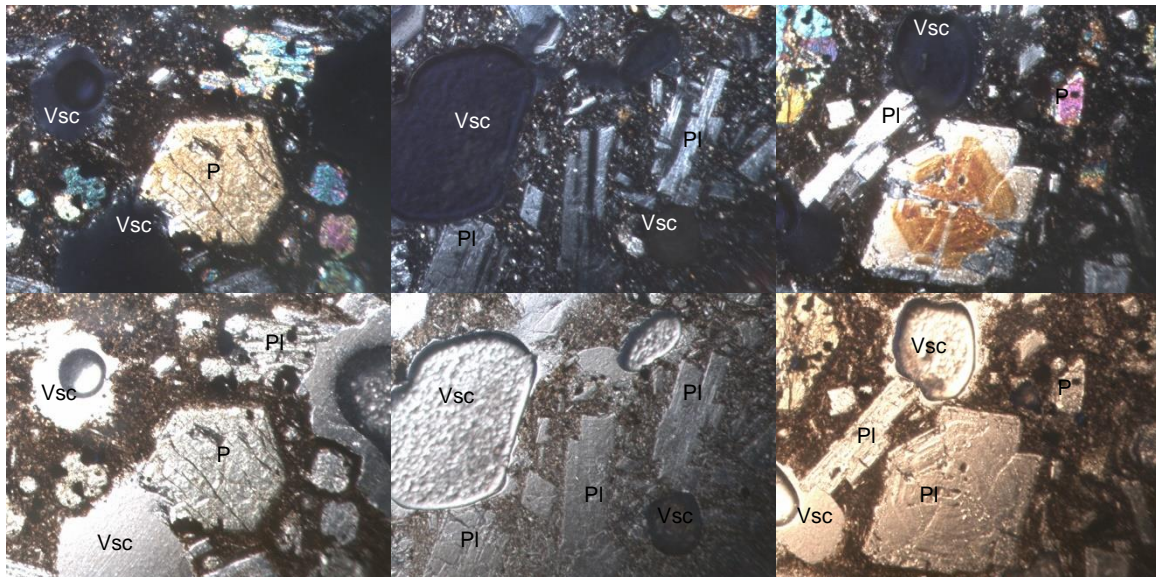
FENOCRISTALES	TAMAÑO	CARACTERÍSTICAS	PORCENTAJE
Plagioclasa	0,07 - 0,86 mm	En la muestra de roca está presente 3 etapas de cristalización: la 1era y 2da como fenocristales y la 3era en la matriz. Muestra maclas: simples, polisintética (en su mayoría), Carlsbad (1%). Posee zonación en los cristales de la 1er etapa (5%). Los cristales de 1era etapa tienen forma euهدral, los de 2da etapa de forma anhedral con bordes muy irregulares. Se encuentran ligeramente fracturadas e intersticialmente poseen pequeños cristales de óxidos de Fe en su interior. Algunos cristales presentan aspecto surcado correspondiente a la Tx. Sieve.	31%
Piroxeno	0,13-0,57mm	Presente en 2 etapas de cristalización como fenocristales y en la matriz. Bordes de oxidación (2%). Su forma varía de subhedral a anhedral. Posee cristales de Óxidos de Fe intersticialmente.	5,76%
Anfibol	0,37-0,88mm	Presente en 2 etapas de cristalización: la 1era y 2da etapa como fenocristales. Posee formas subhedrales a anhedrales y cristales de Óxidos de Fe intersticialmente. Bordes de oxidación más pronunciados (2%).	5,76%
Óxidos de Fe	0,03-0,1 mm	Presentes inequigranularmente y con bordes irregulares	0,5235%
Olivino	0,05	Anhedral a subhedral	0,5235%
MATRIZ	CARACTERÍSTICAS		PORCENTAJE
Plagioclasa	Tabulares		
Piroxeno	Forma anhedral		30,37%
Vidrio	Masa marrón grisácea rodeando los cristales de plagioclasa y piroxeno		
ACCESORIOS	CARACTERÍSTICAS		PORCENTAJE
Apatito	Forma euهدral presente en los cristales de plagioclasa		0.10%
VESÍCULAS	CARACTERÍSTICAS		PORCENTAJE
Vesículas irregulares	De diversos tamaños, redondeados a angulares.		26,17%
OBSERVACIONES			TOTAL
La mayoría de los cristales se encuentran con forma anhedral, hay una gran cantidad de vesículas. La muestra en lamina tiene un aspecto marrón terroso por la presencia de vidrio en la matriz.			100%

TOTAL DE COMPONENTES

TOTAL DE CRISTALES	43.46%
TOTAL DE MATRIZ	30,37%
TOTAL DE VESÍCULAS	26,17%

ESQUEMA LÁMINA DELGADA

Aumento 10X



Andesita porfírica

ANÁLISIS MICROSCÓPICO FLUJOS DE LAVA VOLCÁN EL REVENTADOR

Código de Muestra: REV 109	Lava: LF9
Localización: Volcán El Reventador, Napo/Sucumbíos	Fecha: 2008
Coordenadas	Z: 2591
X: 205743	Y: 9992149

Textura: Porfírica, Pilotaxítica, Inequigranular (3 etapas de cristalización), Poiquilitica, Sieve.
Estructura: Vesicular
Tamaño de grano: grano fino
Tipo de matriz: criptocristalina

COMPOSICIÓN MINERALÓGICA:

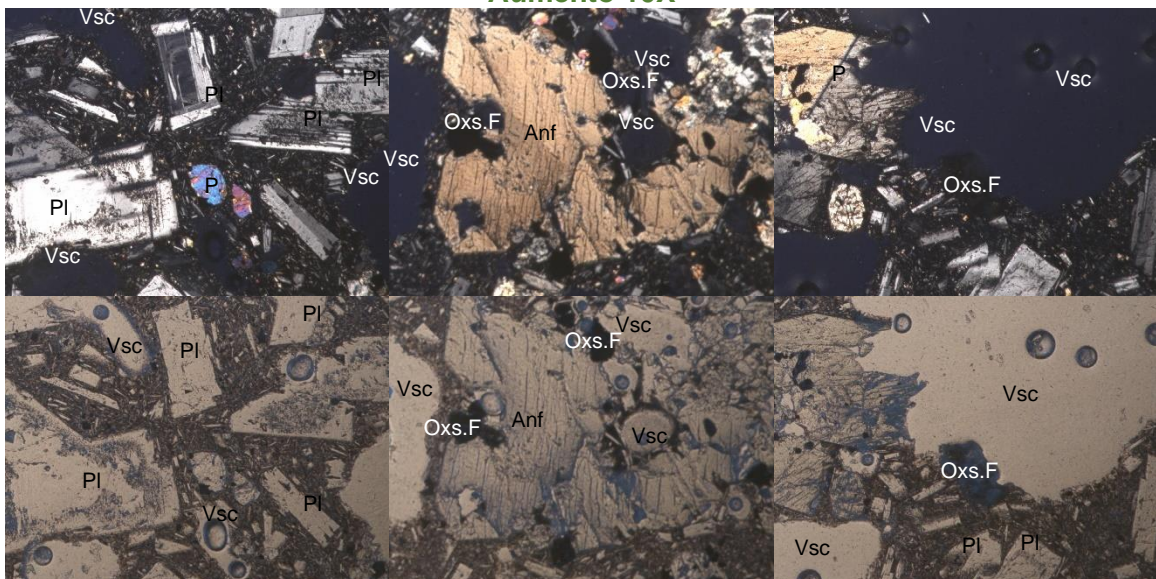
FENOCRISTALES	TAMAÑO	CARACTERÍSTICAS	PORCENTAJE
Plagioclasa	0,25 - 0,86mm	En la muestra de roca está presente 3 etapas de cristalización: la 1era y 2da como fenocristales y la 3era en la matriz. Muestra maclas: simples, polisintética (en su mayoría), Carlsbad (1%). Posee zonación en los cristales de la 1er etapa (5%). Los cristales de 1era etapa tienen forma euhedral, los de 2da etapa de forma anhedral con bordes muy irregulares. Se encuentran ligeramente fracturadas e intersticialmente poseen pequeños cristales de óxidos de Fe en su interior. Algunos cristales presentan aspecto surcado correspondiente a la Tx. Sieve.	29,08%
Piroxeno	0,15-0,55mm	Presente en 3 etapas de cristalización: la 1era y 2da como fenocristal y la 3ra en la matriz. Bordes de oxidación (2%). Su forma varía de euhedral a anhedral. Posee cristales de Óxidos de Fe intersticialmente.	5,61%
Anfibol	0,38-0,8mm	Presente en 2 etapas de cristalización: la 1era y 2da etapa como fenocristales. Posee formas subhedrales a anhedrales y cristales de Óxidos de Fe intersticialmente. Bordes de oxidación más pronunciados (2%).	4,59%
Óxidos de Fe	0,03-0,1 mm	Presentes inequigranularmente y con bordes irregulares	1,02%
Olivino	0,06	Anhedral a subhedral	3,37%
MATRIZ		CARACTERÍSTICAS	PORCENTAJE
Plagioclasa	Tabulares		27,55%
Piroxeno	Forma anhedral		
Vidrio	Masa marrón grisácea rodeando los cristales de plagioclasa y piroxeno		
ACCESORIOS		CARACTERÍSTICAS	PORCENTAJE
Apatito	Forma euhedral presente en los cristales de plagioclasa		0.10%
VESÍCULAS		CARACTERÍSTICAS	PORCENTAJE
Vesículas irregulares	De diversos tamaños, redondeados a angulares. Domina la roca.		30,61%
OBSERVACIONES			TOTAL
La mayoría de los cristales se encuentran con forma anhedral, hay una gran cantidad de vesículas. La muestra en lamina tiene un aspecto marrón terroso por la presencia de vidrio en la matriz. Muy alta vesicularidad.			100%

TOTAL DE COMPONENTES

TOTAL DE CRISTALES	41.84%
TOTAL DE MATRIZ	27,55%
TOTAL DE VESÍCULAS	30,61%

ESQUEMA LÁMINA DELGADA

Aumento 10X



Andesita porfírica

ANÁLISIS MICROSCÓPICO FLUJOS DE LAVA VOLCÁN EL REVENTADOR

Código de Muestra: REV 110	Lava: LF9
Localización: Volcán El Reventador, Napo/Sucumbíos	Fecha: 2008
Coordenadas	Z: 2602
X: 205767	Y: 9992196

Textura: Porfírica, Pilotáxica, Inequigranular (3 etapas de cristalización), Poiquítica, Sieve.
Estructura: Vesicular
Tamaño de grano: grano fino
Tipo de matriz: criptocristalina

COMPOSICIÓN MINERALÓGICA:

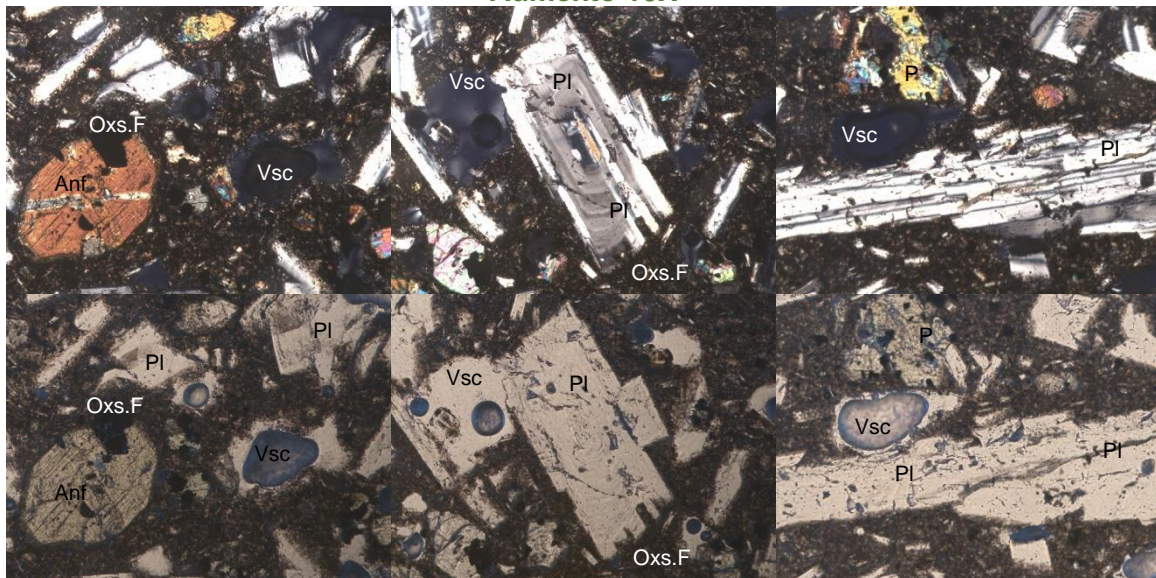
FENOCRISTALES	TAMAÑO	CARACTERÍSTICAS	PORCENTAJE
Plagioclasa	0,08 - 0,7mm	En la muestra de roca está presente 3 etapas de cristalización: la 1era y 2da como fenocristales y la 3era en la matriz. Muestra maclas: simples, polisintética (en su mayoría), Carlsbad (1%). Posee zonación en los cristales de la 1er etapa (5%). Los cristales de 1era etapa tienen forma euhedral, los de 2da etapa de forma anhedral con bordes muy irregulares. Se encuentran ligeramente fracturadas e intersticialmente poseen pequeños cristales de óxidos de Fe en su interior. Algunos cristales presentan aspecto surcado correspondiente a la Tx. Sieve.	32,11%
Piroxeno	0,18-0,45mm	Presente en 3 etapas de cristalización: la 1era y 2da como fenocristal y la 3ra en la matriz. Bordes de oxidación (2%). Su forma varía de euhedral a anhedral. Posee cristales de Óxidos de Fe intersticialmente.	5,41%
Anfibol	0,38-0,8mm	Presente en 2 etapas de cristalización: la 1era y 2da etapa como fenocristales. Posee formas subhedrales a anhedrales y cristales de Óxidos de Fe intersticialmente. Bordes de oxidación más pronunciados (2%).	9,00%
Óxidos de Fe	0,03-0,1 mm	Presentes inequigranularmente y con bordes irregulares	0,32%
Olivino	0,06	Anhedral	0,45%
MATRIZ	CARACTERÍSTICAS		PORCENTAJE
Plagioclasa	Tabulares		
Piroxeno	Forma anhedral		40,54%
Vidrio	Masa marrón grisácea rodeando los cristales de plagioclasa y piroxeno		
ACCESORIOS	CARACTERÍSTICAS		PORCENTAJE
Apatito	Forma euhedral presente en los cristales de plagioclasa		0,10%
VESÍCULAS	CARACTERÍSTICAS		PORCENTAJE
Vesículas irregulares	De diversos tamaños, redondeados a angulares. Domina la roca.		12,16%
OBSERVACIONES			TOTAL
La mayoría de los cristales se encuentran con forma anhedral, hay una gran cantidad de vesículas. La muestra en lamina tiene un aspecto marrón terroso por la presencia de vidrio en la matriz. Muy alta vesicularidad.			100%

TOTAL DE COMPONENTES

TOTAL DE CRISTALES	47,30%
TOTAL DE MATRIZ	40,54%
TOTAL DE VESÍCULAS	12,16%

ESQUEMA LÁMINA DELGADA

Aumento 10X



Andesita porfírica

ANÁLISIS MICROSCÓPICO FLUJOS DE LAVA VOLCÁN EL REVENTADOR

Código de Muestra: REV 111	Lava: LF9
Localización: Volcán El Reventador, Napo/Sucumbíos	Fecha: 2008
Coordenadas	Z: 2267
X: 207062	Y: 9992066

Textura: Porfírica, Pilotáxica, Inequigranular (3 etapas de cristalización), Poiquítica, Sieve.

Estructura: Vesicular

Tamaño de grano: grano fino

Tipo de matriz: criptocristalina

COMPOSICIÓN MINERALÓGICA:

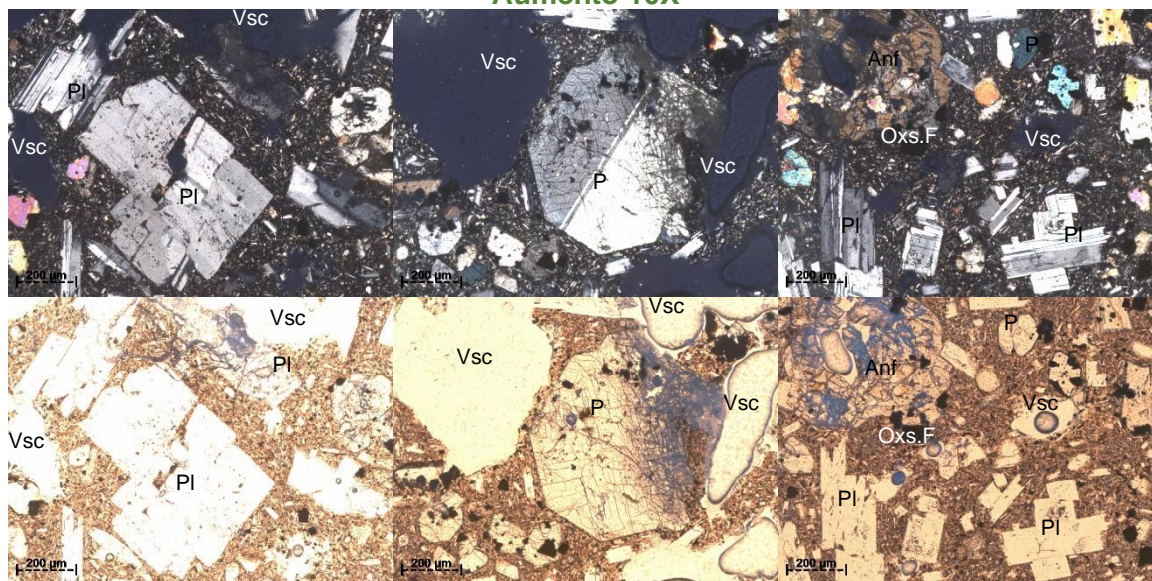
FENOCRISTALES	TAMAÑO	CARACTERÍSTICAS	PORCENTAJE
Plagioclasa	0,061 - 0,86mm	En la muestra de roca está presente 3 etapas de cristalización: la 1era y 2da como fenocristales y la 3era en la matriz. Muestra maclas: simples, polisintética (en su mayoría), Carlsbad (1%). Posee zonación en los cristales de la 1er etapa (5%). Los cristales de 1era etapa tienen forma euhedral, los de 2da etapa de forma anhedral con bordes muy irregulares. Se encuentran ligeramente fracturadas e intersticialmente poseen pequeños cristales de óxidos de Fe en su interior. Algunos cristales presentan aspecto surcado correspondiente a la Tx. Sieve.	26,92%
Piroxeno	0,17-0,6mm	Presente en 3 etapas de cristalización: la 1era y 2da como fenocristal y la 3ra en la matriz. Bordes de oxidación (2%). Su forma varía de euhedral a anhedral. Posee cristales de Óxidos de Fe intersticialmente.	5,77%
Anfibol	0,38-0,7mm	Presente en 2 etapas de cristalización: la 1era y 2da etapa como fenocristales. Posee formas subhedrales a anhedrales y cristales de Óxidos de Fe intersticialmente. Bordes de oxidación más pronunciados (2%).	9,13%
Óxidos de Fe	0,03-0,1 mm	Presentes inequigranularmente y con bordes irregulares	1,44%
Olivino	0,07	Irregular	1,92%
MATRIZ		CARACTERÍSTICAS	PORCENTAJE
Plagioclasa		Tabulares	
Piroxeno		Forma anhedral	28,85%
Vidrio		Masa marrón grisácea rodeando los cristales de plagioclasa y piroxeno	
ACCESORIOS		CARACTERÍSTICAS	PORCENTAJE
Apatito		Forma euhedral presente en los cristales de plagioclasa	0,10%
VESÍCULAS		CARACTERÍSTICAS	PORCENTAJE
Vesículas irregulares		De diversos tamaños, redondeados a angulares. Domina la roca.	25,96%
OBSERVACIONES			TOTAL
La mayoría de los cristales se encuentran con forma anhedral, hay una gran cantidad de vesículas. La muestra en lamina tiene un aspecto marrón terroso por la presencia de vidrio en la matriz. Muy alta vesicularidad.			100%

TOTAL DE COMPONENTES

TOTAL DE CRISTALES	48,19%
TOTAL DE MATRIZ	28,85%
TOTAL DE VESÍCULAS	25,96%

ESQUEMA LÁMINA DELGADA

Aumento 10X



Andesita porfírica

ANÁLISIS MICROSCÓPICO FLUJOS DE LAVA VOLCÁN EL REVENTADOR

Código de Muestra: REV 106	Lava: LF82
Localización: Volcán El Reventador, Napo/Sucumbíos	Fecha: 2008
Coordenadas	Z: 2490
X: 205212	Y: 9989115

Textura: Porfírica, Pilotáxica, Inequigranular (3 etapas de cristalización), Poiquítica, Sieve.

Estructura: Vesicular

Tamaño de grano: grano fino

Tipo de matriz: criptocristalina

COMPOSICIÓN MINERALÓGICA:

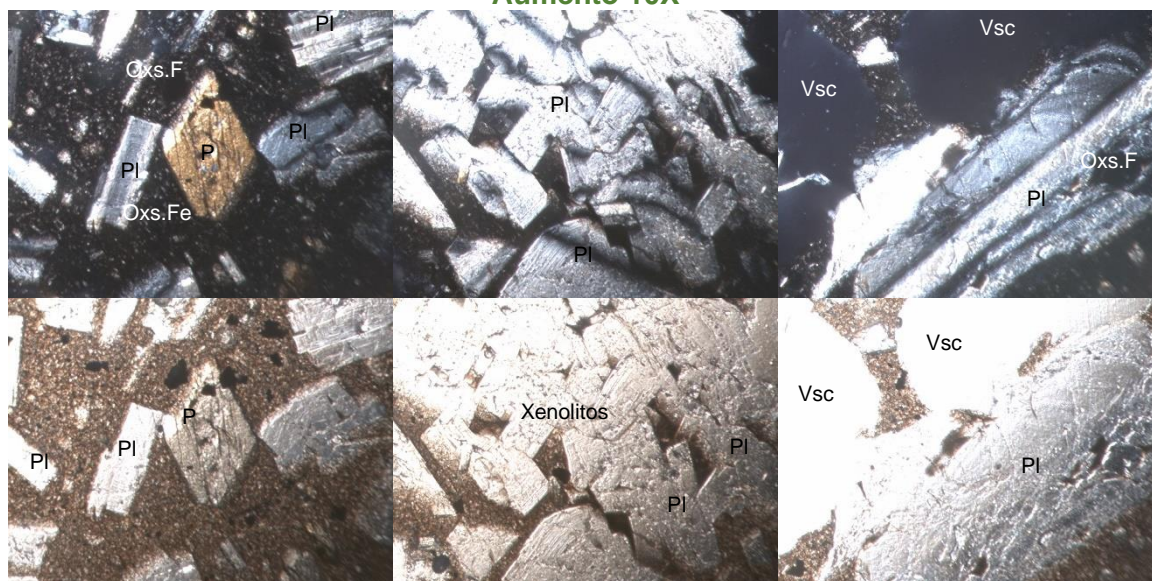
FENOCRISTALES	TAMAÑO	CARACTERÍSTICAS	PORCENTAJE
Plagioclasa	0,07 - 0,8mm	En la muestra de roca está presente 3 etapas de cristalización: la 1era y 2da como fenocristales y la 3era en la matriz. Muestra maclas: simples, polisintética (en su mayoría), Carlsbad (1%). Posee zonación en los cristales de la 1er etapa (5%). Los cristales de 1era etapa tienen forma euhedral, los de 2da etapa de forma anhedral con bordes muy irregulares. Se encuentran ligeramente fracturadas e intersticialmente poseen pequeños cristales de óxidos de Fe en su interior. Algunos cristales presentan aspecto surcado correspondiente a la Tx. Sieve.	33,30%
Piroxeno	0,15-0,43mm	Presente en 3 etapas de cristalización: la 1era y 2da como fenocristal y la 3ra en la matriz. Bordes de oxidación (2%). Su forma varía de euhedral a anhedral. Posee cristales de Óxidos de Fe intersticialmente.	3,51%
Anfibol	0,38-0,89mm	Presente en 2 etapas de cristalización: la 1era y 2da etapa como fenocristales. Posee formas subhedrales a anhedrales y cristales de Óxidos de Fe intersticialmente. Bordes de oxidación más pronunciados (2%).	5,70%
Feldespatos Alcalinos	0,03-0,1 mm	Presentes inequigranularmente y con bordes irregulares	0,40%
Óxidos de Fe	0,12-0,24	De forma subhedral a euhedral	7,09%
MATRIZ	CARACTERÍSTICAS		PORCENTAJE
Plagioclasa	Tabulares		34,21%
Piroxeno	Forma anhedral		
Vidrio	Masa marrón grisácea rodeando los cristales de plagioclasa y piroxeno		
ACCESORIOS	CARACTERÍSTICAS		PORCENTAJE
Apatito	Forma euhedral presente en los cristales de plagioclasa		0,10%
VESÍCULAS	CARACTERÍSTICAS		PORCENTAJE
Vesículas irregulares	De diversos tamaños, redondeados a angulares.		15,79%
OBSERVACIONES			TOTAL
Presencia de xenolitos			100%

TOTAL DE COMPONENTES

TOTAL DE CRISTALES	50,00%
TOTAL DE MATRIZ	34,21%
TOTAL DE VEŚÍCULAS	15,79%

ESQUEMA LÁMINA DELGADA

Aumento 10X



Traquiandesita

ANÁLISIS MICROSCÓPICO FLUJOS DE LAVA VOLCÁN EL REVENTADOR

Código de Muestra: REV 107	Lava: LF82
Localización: Volcán El Reventador, Napo/Sucumbíos	Fecha: 2008
Coordenadas	Z: 2490
X: 205212	Y: 9989115

Textura: Porfírica, Pilotáxica, Inequigranular (3 etapas de cristalización), Poiquítica, Sieve.
Estructura: Vesicular
Tamaño de grano: grano fino
Tipo de matriz: criptocristalina

COMPOSICIÓN MINERALÓGICA:

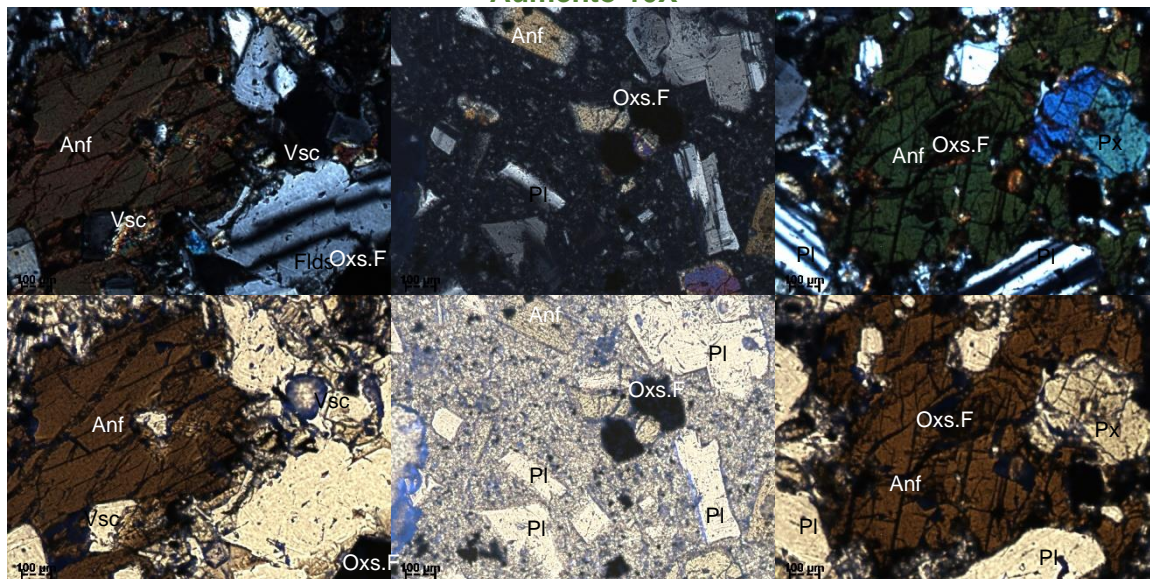
FENOCRISTALES	TAMAÑO	CARACTERÍSTICAS	PORCENTAJE
Plagioclasa	0,07 - 0,9mm	En la muestra de roca está presente 3 etapas de cristalización: la 1era y 2da como fenocristales y la 3era en la matriz. Muestra maclas: simples, polisintética (en su mayoría), Carlsbad (1%). Posee zonación en los cristales de la 1er etapa (5%). Los cristales de 1era etapa tienen forma euhedral, los de 2da etapa de forma anhedral con bordes muy irregulares. Se encuentran ligeramente fracturadas e intersticialmente poseen pequeños cristales de óxidos de Fe en su interior. Algunos cristales presentan aspecto surcado correspondiente a la Tx. Sieve.	35,29%
Piroxeno	0,15-0,6mm	Presente en 3 etapas de cristalización: la 1era y 2da como fenocristal y la 3ra en la matriz. Bordes de oxidación (2%). Su forma varía de euhedral a anhedral. Posee cristales de Óxidos de Fe intersticialmente.	1,60%
Anfibol	0,38-0,8mm	Presente en 2 etapas de cristalización: la 1era y 2da etapa como fenocristales. Posee formas subhedrales a anhedrales y cristales de Óxidos de Fe intersticialmente. Bordes de oxidación más pronunciados (2%).	5,35%
Óxidos de Fe	0,03-0,1 mm	Presentes inequigranularmente y con bordes irregulares	1,6%
Feldespato Alcalino		De forma anhedral a subhedral en la roca	9,63%
MATRIZ		CARACTERÍSTICAS	PORCENTAJE
Plagioclasa	Tabulares		32,08%
Piroxeno	Forma anhedral		
Vidrio	Masa marrón grisácea rodeando los cristales de plagioclasa y piroxeno		
ACCESORIOS		CARACTERÍSTICAS	PORCENTAJE
Apatito	Forma euhedral presente en los cristales de plagioclasa		0,02%
VESÍCULAS		CARACTERÍSTICAS	PORCENTAJE
Vesículas irregulares	De diversos tamaños, redondeados a angulares.		16,04%
OBSERVACIONES			TOTAL
Presenta xenolitos			100%

TOTAL DE COMPONENTES

TOTAL DE CRISTALES	51,88%
TOTAL DE MATRIZ	32,08%
TOTAL DE VESÍCULAS	16,04%

ESQUEMA LÁMINA DELGADA

Aumento 10X



Traquiandesita

Anexo V

VALOR DE LA VISCOSIDAD DE DIFERENTES TIPOS DE ROCA DE MUESTRAS DE VOLCANES DEL MUNDO

La presente tabla presenta los diferentes valores de viscosidad desde rocas basálticas hasta riolíticas de algunas muestras de depósitos volcánicos en el mundo. Así también, presenta los valores obtenidos en este proyecto de investigación.

	Fuente	Temperatura (°C)	Log n (Pa.s)	Roca	Volcán
1	Shaw et al. (1968)	1130	2.810	Basalto	Kilauea
2	Shaw et al. (1968)	1150	2.875	Basalto	Kilauea
3	Fink and Zimbleman (1990)	1130	1.780	Basalto	Kilauea
4	Fink and Zimbleman (1990)	1150	3.300	Basalto	Kilauea
5	Rowland and Walker (1988)	1130	2.780	Basalto	Kilauea
6	Rowland and Walker (1988)	1150	3.780	Basalto	Kilauea
7	Moore (1987)	1130	2.000	Basalto	Muna Loa
8	Moore (1987)	1150	3.300	Basalto	Muna Loa
9	Walker (1967)	1070	3.480	Basalto	Etna
10	Walker (1967)	1090	4.580	Basalto	Etna
11	Tanguy (1973)	1070	3.690	Basalto	Etna
12	Tanguy (1973)	1090	4.870	Basalto	Etna
13	Gauthier (1973)	1070	3.000	Basalto	Etna
14	Gauthier (1973)	1090	5.000	Basalto	Etna
15	Pinkerton and Sparks (1978)	1070	3.970	Basalto	Etna
16	Pinkerton and Sparks (1978)	1090	4.180	Basalto	Etna
17	Pinkerton and Norton (1995)	1070	3.140	Basalto	Etna
18	Pinkerton and Norton (1995)	1090	3.210	Basalto	Etna
19	Calvari et al. (1994)	1070	3.900	Basalto	Etna
20	Calvari et al. (1994)	1090	4.280	Basalto	Etna
21	Harris et al. (2005b)	1000	5.500	Basalto	Stomboli
22	Murase and McBirney (1973)	1000	6.500	Andesita	Moint Hood
23	Navarro-Ochoa et al. (2002)	1000	9.500	Andesita	Colima
24	McKay et al. (1998)	1000	10.500	traquita y Dacita	Karisimbi
25	Harris et al. (2004)	1000	9.500	traquita y Dacita	Santiaguito
26	Fink (1980)	1000	9.690	traquita y Dacita	Chao
27	Fink (1980)	1000	19.000	traquita y Dacita	Chao
28	Lescinsky et al. (2007)	1000	8.000	traquita y Dacita	Medicine Lake
29	Lescinsky et al. (2007)	1000	10.000	traquita y Dacita	Medicine Lake
30	Murase and McBirney (1973)	1000	10.000	Riolita	Newberry
31	Manley (1996)	1000	9.600	Riolita	Badlands
32	Pinkerton y Sparks (1978)	1086	3.970	Basalto	Etna
33	Chevrel et al. (2015)	1180	3.570	Andesita	Volcán Tungurahua
34	Chevrel et al. (2015)	1168	3.750	Andesita	Volcán Tungurahua
35	Chevrel et al. (2015)	1162	4.030	Andesita	Volcán Tungurahua
36	Chevrel et al. (2015)	1157	3.950	Andesita	Volcán Tungurahua
37	Chevrel et al. (2015)	1152	4.070	Andesita	Volcán Tungurahua
38	Chevrel et al. (2015)	1144	4.850	Andesita	Volcán Tungurahua
39	Ramirez, (2020)	1087	8.680	Andesita	Volcán Rancho Seco
40	Ramirez, (2020)	1089	8.620	Andesita	Volcán Rancho Seco
41	Ramirez, (2020)	1086	9.114	Andesita	Volcán Rancho Seco
42	Ramirez, (2020)	1089	9.114	Andesita	Volcán Rancho Seco
43	Ramirez, (2020)	1086	9.041	Andesita	Volcán Rancho Seco
44	Ramirez, (2020)	1089	9.114	Andesita	Volcán Rancho Seco
45	Ramirez, (2020)	1088	9.279	Andesita	Volcán Rancho Seco
46	Ramirez, (2020)	1065	10.600	Andesita-Dacita	Volcán Popocatepetl
47	Ramirez, (2020)	1064	10.300	Andesita-Dacita	Volcán Popocatepetl
48	Ramirez, (2020)	1071	9.500	Andesita-Dacita	Volcán Popocatepetl
49	Ramirez, (2020)	1049	11.000	Andesita-Dacita	Volcán Popocatepetl
50	Ramirez, (2020)	969	10.000	Andesita-Dacita	Volcán Popocatepetl
51	Ramirez, (2020)	925	12.100	Andesita-Dacita	Volcán Popocatepetl
52	Ramirez, (2020)	925	11.800	Andesita-Dacita	Volcán Popocatepetl

	Fuente	Temperatura (°C)	Log n (Pa.s)	Roca	Volcán
53	Reyes Guzman, (2019)	1090.5	4.677	Andesita	Malpaís de Zacapu
54	Reyes Guzman, (2019)	1141.5	3.565	Andesita	Malpaís de Zacapu
55	Reyes Guzman, (2019)	1068.7	5.440	Andesita	Malpaís de Zacapu
56	Reyes Guzman, (2019)	977	6.270	Andesita	Malpaís de Zacapu
57	Reyes Guzman, (2019)	1086.6	5.690	Andesita	Malpaís de Zacapu
58	Reyes Guzman, (2019)	1012	5.620	Andesita	Malpaís de Zacapu
59	Reyes Guzman, (2019)	1067.4	4.969	Andesita	Malpaís de Zacapu
60	Reyes Guzman, (2019)	951.5	6.480	Andesita	Malpaís de Zacapu
61	Reyes Guzman, (2019)	979.1	6.167	Andesita	Malpaís de Zacapu
62	Reyes Guzman, (2019)	1017.5	6.004	Andesita-Dacita	Malpaís de Zacapu
63	Reyes Guzman, (2019)	1080.5	5.207	Andesita-Dacita	Malpaís de Zacapu
64	Reyes Guzman, (2019)	1065	5.540	Andesita-Dacita	Malpaís de Zacapu
65	Reyes Guzman, (2019)	1071.4	5.508	Andesita-Dacita	Malpaís de Zacapu
66	Proyecto de titulación-Ivonne Marín	737	10.62	Andesita Basáltica	Volcán El Reventador
67	Proyecto de titulación-Ivonne Marín	737	10.92	Andesita Basáltica	Volcán El Reventador
68	Proyecto de titulación-Ivonne Marín	737	10.55	Andesita Basáltica	Volcán El Reventador
69	Proyecto de titulación-Ivonne Marín	737	10.88	Andesita Basáltica	Volcán El Reventador
70	Proyecto de titulación-Ivonne Marín	737	11.54	Andesita Basáltica	Volcán El Reventador
71	Proyecto de titulación-Ivonne Marín	737	10.94	Andesita Basáltica	Volcán El Reventador
72	Proyecto de titulación-Ivonne Marín	737	11.19	Andesita Basáltica	Volcán El Reventador
73	Proyecto de titulación-Ivonne Marín	737	11.45	Andesita	Volcán El Reventador
74	Proyecto de titulación-Ivonne Marín	737	12.7	Andesita	Volcán El Reventador
75	Proyecto de titulación-Ivonne Marín	757	10.06	Andesita Basáltica	Volcán El Reventador
76	Proyecto de titulación-Ivonne Marín	757	10.35	Andesita Basáltica	Volcán El Reventador
77	Proyecto de titulación-Ivonne Marín	757	10.01	Andesita Basáltica	Volcán El Reventador
	Proyecto de titulación-Ivonne Marín	757	10.32	Andesita Basáltica	Volcán El Reventador
78	Proyecto de titulación-Ivonne Marín	757	10.32	Andesita Basáltica	Volcán El Reventador
79	Proyecto de titulación-Ivonne Marín	757	10.95	Andesita	Volcán El Reventador
80	Proyecto de titulación-Ivonne Marín	757	10.38	Andesita Basáltica	Volcán El Reventador
81	Proyecto de titulación-Ivonne Marín	757	12.1	Andesita	Volcán El Reventador
82	Proyecto de titulación-Ivonne Marín	757	10.59	Andesita Basáltica	Volcán El Reventador
83	Proyecto de titulación-Ivonne Marín	757	10.84	Andesita Basáltica	Volcán El Reventador
84	Proyecto de titulación-Ivonne Marín	775.5	9.57	Andesita Basáltica	Volcán El Reventador
85	Proyecto de titulación-Ivonne Marín	775.5	9.86	Andesita Basáltica	Volcán El Reventador
86	Proyecto de titulación-Ivonne Marín	775.5	9.55	Andesita Basáltica	Volcán El Reventador
87	Proyecto de titulación-Ivonne Marín	775.5	9.83	Andesita Basáltica	Volcán El Reventador
88	Proyecto de titulación-Ivonne Marín	775.5	10.45	Andesita Basáltica	Volcán El Reventador
89	Proyecto de titulación-Ivonne Marín	775.5	9.9	Andesita Basáltica	Volcán El Reventador
90	Proyecto de titulación-Ivonne Marín	775.5	11.6	Andesita	Volcán El Reventador

Anexo VI

VALOR DEL LÍMITE ELÁSTICO DE DIFERENTES TIPOS DE ROCA DE MUESTRAS DE VOLCANES DEL MUNDO

La presente tabla presenta los diferentes valores del límite elástico desde rocas basálticas hasta traquiandesitas de algunas muestras de depósitos volcánicos en el mundo. Así también, presenta los valores obtenidos en este proyecto de investigación.

Autor	Roca	Volcán	Log Límite elástico (τ)
Chevrel et al., 2013	Basalto	(WVZ) en Islandia	3.54
Chevrel et al., 2013	Basalto	(WVZ) en Islandia	3.67
Chevrel et al., 2013	Basalto	(WVZ) en Islandia	3.32
Calderon, 2022	Basalto	Sierra Negra	3.778
Trabajo de titulación- Marín	Basalto Andesítico	Reventador	1.985
Trabajo de titulación- Marín	Basalto Andesítico	Reventador	2.752
Trabajo de titulación- Marín	Basalto Andesítico	Reventador	2.864
Trabajo de titulación- Marín	Basalto Andesítico	Reventador	3.947
Trabajo de titulación- Marín	Basalto Andesítico	Reventador	4.058
Trabajo de titulación- Marín	Basalto Andesítico	Reventador	0.43
Trabajo de titulación- Marín	Basalto Andesítico	Reventador	1.10
Trabajo de titulación- Marín	Basalto Andesítico	Reventador	0.37
Trabajo de titulación- Marín	Basalto Andesítico	Reventador	1.08
Ramirez, 2020	Andesita	Volcán Rancho Seco	3.114
Ramirez, 2020	Andesita	Volcán Rancho Seco	3.623
Trabajo de titulación- Marín	Traquiandesita	Reventador	2.99
Trabajo de titulación- Marín	Traquiandesita	Reventador	2.21

Anexo VII

TEMPERATURA DE LOS FLUJOS DE LAVA DEL VOLCÁN CAPTADOS EN IMÁGENES TÉRMICAS.

Temperatura de LF5 medida desde el vento del volcán, el cual indica la temperatura de fusión de la lava. Este valor se aplicó a todas las lavas analizadas en este trabajo.

