

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA EN GEOLOGÍA Y PETRÓLEOS

ESTUDIO PETRO-GEOQUÍMICO Y CRONOLÓGICO DE LOS FLUJOS DE LAVA EMITIDOS POR EL VOLCÁN REVENTADOR ENTRE 2002 A 2009

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA
GEÓLOGA**

MARIA FERNANDA NARANJO HIDALGO
nanda-mfnh@hotmail.com

DIRECTOR: M.Sc. PATRICIO RAMÓN
pramon@igepn.edu.ec

CO-DIRECTORA: DRA. SILVANA HIDALGO
shidalgo@igepn.edu.ec

Quito, Julio 2013

DECLARACIÓN

Yo, MARIA FERNANDA NARANJO HIDALGO, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada 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 normatividad institucional vigente.

María Fernanda Naranjo Hidalgo

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por María Fernanda Naranjo Hidalgo, bajo mi supervisión.

M.Sc. Alfonso Patricio Ramón Maldonado
DIRECTOR DEL PROYECTO

Dra. Silvana Ivonne Hidalgo Trujillo
CO-DIRECTORA DEL PROYECTO

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	i
ÍNDICE DE FIGURAS	iii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiv
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xv
RESUMEN.....	xvi
ABSTRACT.....	xvii
CAPITULO 1	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 IMPORTANCIA Y JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.....	1
1.2 ÁREA DE ESTUDIO.....	2
1.3 OBJETIVOS DEL ESTUDIO.....	3
1.3.1 Objetivo General.....	3
1.3.2 Objetivos Específicos.....	3
1.4 ALCANCE DEL ESTUDIO.....	3
1.5 METODOLOGÍA.....	4
1.6 ESTUDIOS PREVIOS	5
CAPITULO 2.	7
MARCO GEOLÓGICO DEL VOLCÁN EL REVENTADOR	7
2.1 MARCO GEODINÁMICO Y TECTÓNICO REGIONAL	7
2.2 VOLCANISMO PLIO CUATERNARIO EN EL ECUADOR CONTINENTAL	9
2.3 GEOLOGÍA DEL VOLCÁN EL REVENTADOR	11
2.3.1 Complejo Volcánico Basal (CVB).....	13
2.3.2 Volcán Paleoreventador (VPR)	13
2.3.3 Volcán El Reventador (VER).....	13
2.3.4. Las Avalanchas de Escombros	14
2.3.5 Tectónica Local.....	16
2.3.6 Características Petrográficas Y Geoquímicas	17
2.3.7 Actividad Histórica	18

CAPITULO 3.	20
CRONOLOGÍA DE LA EMISIÓN DE LOS FLUJOS DE LAVA DEL VOLCÁN EL REVENTADOR PERÍODO 2002 A 2009	20
3.1 MONITOREO VOLCÁNICO	20
3.1.1 Monitoreo Sísmico	20
3.1.2 Monitoreo Visual	27
3.1.3 Monitoreo Térmico	28
3.1.4 Monitoreo Satelital	29
3.2 METODOLOGÍA Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN EXISTENTE.....	35
3.2.1 Información Sísmica	35
3.2.2 Información de la Actividad Superficial: Observación Directa y Satelital	41
3.3 CRONOLOGÍA DE LAS ETAPAS ERUPTIVAS ENTRE 2002 A 2009.....	57
3.3.1 Determinación de Criterios para caracterizar las Etapas de Actividad Eruptiva y No Eruptiva.....	57
3.3.2 Cronología del proceso Eruptivo del volcán El Reventador entre 2002 y 2009: Etapas Eruptivas.....	63
3.2.3 Cálculo estimado de la Tasas de Emisión de los flujos de lava.....	103
3.4 SÍNTESIS DEL CAPÍTULO	106
CAPITULO 4	108
CARACTERIZACIÓN PETRO - GEOQUÍMICA DE LOS FLUJOS DE LAVA EMITIDOS EN EL PERIODO 2002-2009	108
4. 1 ESTUDIO PETROGRÁFICO	108
4.1.1 Flujos de Lava emitidos durante la Etapa Eruptiva 2002.....	109
4.1.2 Flujos de Lava emitidos durante la Etapa Eruptiva 2004 - 2005.....	112
4.1.3 Flujos de Lava emitidos durante la Etapa Eruptiva 2007.....	117
4.1.4 Flujos de Lava emitidos durante la Etapa Eruptiva 2008 - 2009.....	121
4.1.5 Composición Mineralógica	131
4.2 CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA	134
4.2.1 Elementos Mayores	136
4.2.2 Elementos En Trazas.....	142
4.3 ESTUDIO PETROLÓGICO	146
4.3.1 Síntesis del trabajo petrológico realizado en los flujos de lava emitidos entre 2002-2005 (Samaniego et al., 2008).....	146
4.3.2 Identificación de Procesos Petrogenéticos.....	148
4.3.3 Discusión	152
4.4 SÍNTESIS DEL CAPÍTULO	153

CAPITULO 5	155
RESULTADOS	155
5.1 RESULTADOS	155
5.2 DISCUSIÓN	166
CAPITULO 6	171
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	171
5.1 CONCLUSIONES.....	171
5.2 RECOMENDACIONES	173
CAPITULO 7	175
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	175
MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE LOS FLUJOS DE LAVA DEL VOLCÁN EL REVENTADOR EMITIDOS ENTRE 2002 A 2009	185
ANEXOS	187

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1. 1. Mapa de ubicación del volcán el Reventador (Fuente IG EPN)..... 2

CAPÍTULO 2

Figura 2. 1. a) Esquema que muestra las cuatro zonas de volcanismo activo en Sudamérica (Modificado de Stern, 2004); b) Marco geodinámico regional. Interacción de las placas tectónicas Nazca, Cocos, Bloque Nor-andino y Sudamericana, con sus rasgos asociados (Modificado de Gutscher 1999, en Silva, 2007). 7

Figura 2. 2. Principales rasgos tectónicos a lo largo de la falla de Cayambe-Afiladores-Sibundoy. Tasas de deslizamiento con medidas de compensación para depósitos geológicos y formas de relieve dados los diferentes períodos de tiempo: Pleistoceno tardío-Holoceno y Holoceno. (Modificado de Tibaldi, et al., 2007). 10

Figura 2. 3. Mapa de los volcanes cuaternarios del arco volcánico del Ecuador continental (Modificado de IRD-IG-EPN), y la localización del Complejo Volcánico El Reventador..... 12

Figura 2. 4. Mapa geológico del volcán el Reventador (Tomado de INECEL, 1988). 15

CAPÍTULO 3

Figura 3. 1. Ubicación de las estaciones sísmicas en el volcán El Reventador (Fuente IG-EPN).	20
Figura 3. 2. Sismograma de la señal sísmica correspondiente a un evento volcánico tectónico (VT) registrado el 02 de mayo de 2005 en el volcán El Reventador a las 14:28 (GMT). Tomado de Troncoso, 2006	22
Figura 3. 3. Sismograma de la señal sísmica correspondiente a un evento de largo período (LP) registrado el 17 de mayo de 2005 en el volcán El Reventador a las 13:35 (GMT). Tomado de Troncoso, 2005.....	23
Figura 3. 4. Sismograma de la señal sísmica correspondiente a un evento de largo período (LP) registrado el 11 de abril de 2005 en el volcán El Reventador a las 05:42 (GMT). Tomado de Troncoso, 2005.....	24
Figura 3. 5. Sismograma de la señal sísmica correspondiente a dos explosiones registradas el 19 de agosto y el 21 de septiembre de 2005 en el volcán El Reventador. Tomado de Troncoso, 2005.....	25
Figura 3. 6. Sismograma de la señal sísmica correspondiente al tremor armónico registrado el 13 de abril de 2005 en el volcán El Reventador a las 03:22(GMT). Tomado de Troncoso, 2005	26
Figura 3. 7. Sismograma de la señal sísmica correspondiente a tremor espasmódico registrado el 16 de junio de 2005 en el volcán El Reventador a las 15:46 (GMT). Tomado de Troncoso, 2005.	26
Figura 3. 8. Cronología de las visitas realizadas al volcán El Reventador desde 2002 hasta 2009.....	27
Figura 3. 9. Identificación de un campo de fumarolas hacia el flanco N del cono del edificio del volcán El Reventador el 19 de junio de 2005 (Fotografía e imagen térmica P. Ramón-IG EPN)	29
Figura 3. 10. Imágenes que combinan varios rangos infrarrojos para generar imágenes correspondientes a la emisión del 3 de noviembre de 2002.: a) HOT b) RGB; c) BAND; d) Probabilidad MWIR y e) Probabilidad LWIR. (Tomado de HIGP). La alerta termal corresponde al punto rojo.	32
Figura 3. 11. Estadísticas diarias con el número de eventos sísmicos de tipo volcánico-tectónico (VT), Largo Período (LP), Híbridos (HB), Explosiones, Tremor Armónico y Tremor Espasmódico ocurridos en el volcán El Reventador, entre el 18 de febrero de 2003 al 31 de diciembre de 2009 (IG). Las áreas coloreadas muestran los periodos durante los cuales se dispone de monitoreo satelital: en amarillo, emisiones de dióxido de azufre de OMI; en rosado, las alertas termales de MODVOLC y en naranja monitoreo satelital contemporáneo.....	37
Figura 3. 12. Estadísticas del número de eventos sísmicos en el volcán El Reventador entre 2003 a 2006.....	38
Figura 3. 13. Estadísticas del número de eventos sísmicos en el volcán El Reventador entre 2006 a 2007. La escala derecha muestra solo las explosiones.	40

Figura 3. 14. Estadísticas del número de eventos sísmicos en el volcán El Reventador entre 2008 a 2009. La escala derecha muestra solo las explosiones.	40
Figura 3. 15. Emisiones confirmadas y no confirmadas de ceniza receiptadas por la VAAC entre 2002 a 2009 producidas en el volcán El Reventador.....	43
Figura 3. 16. Imágenes esquemáticas de: a) Sector correspondiente a la región Ecuador, donde se muestran también volcanes de Ecuador y Colombia, al noroccidente de Sudamérica; b) Los volcanes ecuatorianos monitoreados por NOAA, de norte a sur: Cayambe, Reventador, Guagua Pichincha, Cotopaxi, Tungurahua y Sangay. (Tomado de OMI).	44
Figura 3. 17. Imagen generada por OMI el 11 de septiembre de 2008 donde se muestra el área de distribución para las emisiones de SO ₂ del volcán El Reventador y la influencia del centro volcánico Galeras en el valor de la masa total de la imagen, además de la grilla equivalente a 2500 km ² (Tomado de OMI).	46
Figura 3. 18. Tonelaje diario de SO ₂ determinado entre 2002 a 2009 en base a las imágenes de OMI. Datos obtenidos a partir de 2007 a 2009.....	47
Figura 3. 19. Ejemplo de las imágenes térmicas utilizadas en la delimitación de los flujos de lava del volcán El Reventador (Tomado de Vallejo, 2009).	49
Figura 3. 20. Vista desde el norte de la caldera del volcán. Flanco norte con las Lavas 9 y 13 (Fotografía tomada por F. Naranjo IG EPN).....	51
Figura 3. 21. Vista tomada el 10 de junio de 2012 desde la margen izquierda del drenaje del Río Reventador, donde yace el frente de la Lava 9. (Fotografía tomada por F. Naranjo. IG EPN).	51
Figura 3. 22. Vista desde la margen izquierda del drenaje del Río Reventador, hacia el borde norte de los flujos de lava 8 y 13. Al momento, nuevo flujo de lava sobreyaciendo los flujos anteriores (Fotografía F. Naranjo. IG EPN).....	52
Figura 3. 23. Vista panorámica al contacto entre las Lavas 1 y 4, durante el trabajo de campo el 20 de septiembre de 2012, desde donde se realizaron varias mediciones en los flujos de lava (Fotografía F. Naranjo. IG EPN).	52
Figura 3. 24. Vista desde el tope de la Lava 4, a N320° desde donde se encuentra el edificio volcánico (Fotografía F. Naranjo. IG EPN).	53
Figura 3. 25. Vista desde el frente de la Lava 11 en dirección perpendicular al viento por donde fue emitido el flujo de Lava 2. (Fotografía F. Naranjo).....	53
Figura 3. 26. a) Medición de los espesores de los flujos de lava en el volcán El Reventador (Fotografía tomada por F. Naranjo. IG EPN). b) Esquema del funcionamiento y del cálculo de las medidas que receipta el inclinómetro tras cada disparo del láser (Modificado de Manual del usuario LTI Truepulse 260/360B, 2009).	54
Figura 3. 27. Distribución de los flujos de lava del volcán El Reventador emitidos entre 2002 a 2009.	56
Figura 3. 28. Tiempo vs. Actividad interna: Estadísticas del número de eventos sísmicos ocurridos entre 2003 a 2006. De arriba hacia abajo, eventos: volcano	

tectónicos, largo período, híbridos, tremor armónico y tremor espasmódico. Las líneas rojas corresponden a los flujos de lava que descendieron desde el cráter. 58

Figura 3. 29. Tiempo vs. Actividad superficial. Datos obtenidos del monitoreo satelital entre 2003 a 2006. De abajo hacia arriba: número de eventos ocurridos de Explosiones y caídas de rocas; alertas no confirmadas y confirmadas de emisiones de ceniza; tonelaje de emisiones de SO₂ medida en imágenes OMI; número de alertas termales por conteo de pixeles y visitas de monitoreo visual y térmico. Las líneas rojas corresponden a los flujos de lava que descendieron desde el cráter..... 59

Figura 3. 30. Tiempo vs. Actividad interna: Estadísticas del número de eventos sísmicos ocurridos entre 2007 a 2009, de abajo hacia arriba: tremor espasmódico, tremor armónico, híbridos, largo período y volcano tectónicos. Las líneas rojas corresponden a los flujos de lava que descendieron desde el cráter. El sector anaranjado corresponde a los períodos de observación de coladas de lava acumulándose en el cráter. 60

Figura 3. 31. Tiempo vs. Actividad superficial. Datos obtenidos del monitoreo satelital entre 2007 a 2009. De abajo hacia arriba: número de eventos ocurridos de Explosiones y caídas de rocas; alertas no confirmadas y confirmadas de emisiones de ceniza; tonelaje de emisiones de SO₂ medida en imágenes OMI; número de alertas termales por conteo de pixeles y visitas de monitoreo visual y térmico. Las líneas rojas corresponden a los flujos de lava que descendieron desde el cráter. El sector anaranjado corresponde a los períodos de observación de coladas de lava acumulándose en el cráter. 61

Figura 3. 32. a) Columna de ceniza emitida alrededor de las 09:12 horas por el volcán El Reventador, alcanzando unos 16 a 17 km de altura, donde se observa desde Lago Agrio la erupción pliniana del 3 de noviembre de 2002 (Tomado de Hall, et al., 2004); b) Flujos piroclásticos que descienden desde el cráter por los flancos y hacia la caldera del volcán (Fotografías cortesía del personal de Techint). 65

Figura 3. 33. Imagen del TOMS el 14 de noviembre de 2002 con el rastro de la pluma de emisión producida con la erupción del volcán El Reventador el 3 de noviembre de 2002 (Tomado de OMI) b) Contenido de SO₂ del volcán El Reventador durante noviembre de 2002 (Modificado de Hall, et al., 2005)..... 66

Figura 3. 34. Distribución de las nubes de erupción registradas durante el 3 de noviembre de 2002 en las imágenes satelitales de la VAAC Washington (Tomado de Ramón et al., 2002). 67

Figura 3. 35. Primera imagen satelital de HOT SPOT (Hawaii) del volcán El Reventador registrada a las durante la erupción del 3 de noviembre de 2002 con la emisión de la columna de ceniza: a) Mapa guía con la localización del volcán; b) imagen RGB y c) imagen MWIR. Tomado de Hotspot-Hawaii. 68

Figura 3. 36. Columna de emisión y flujo de lava descendiendo por el flanco sur el 9 de noviembre 2002. **Recuadro superior**, alertas termales de MODVOLC para la misma fecha. (Fotografía tomada por Anhalzer, 2002). 69

- Figura 3. 37.** a). Frente de la Lava1 el 18 de noviembre de 2002. Fotografía tomada por Hall, M. (IG-EPN); b). Vista en planta de los flujos de lava 1 y 2 el 26 noviembre de 2002. Imagen tomada por Ramón, P. (IG-EPN). 69
- Figura 3. 38.** a) Intensa actividad fumarólica en el cráter del volcán sin presencia de domos observada el 19 Oct. 2004; b) Actividad fumarólica acompañada de la extrusión de coladas de lava que rellenaban el cráter dejado tras la erupción en 2002, observado el 10 de noviembre de 2004. (Fotografía tomada por P. Ramón. IG EPN). 71
- Figura 3. 39.** Frente del flujo de Lava 3 descendiendo por el flanco sur del volcán El Reventador (Fotografía tomada por D. Andrade, 14 noviembre de 2004). Recuadro superior: Alertas termales del mes de diciembre de 2004 (Modificado de MODVOLC). 72
- Figura 3. 40.** Imágenes del monitoreo satelital a) y b) imágenes obtenidas por OMI (Tomado de Carn et al., 2008); c) Imagen de representación de la emisión de ceniza receptada por VAAC y d) Alertas termales de MODVOLC para el mes de diciembre de 2004. 72
- Figura 3. 41.** Colada de lavas formada al interior del cráter con un diámetro de aprox. 200 m observado en el sobrevuelo del 19 de abril de 2005. Fotografía por P. Ramón (IG-EPN). 73
- Figura 3. 42.** a) Alertas termales de todo el mes de abril de 2005 (MODVOLC); b) Emisión de SO₂ correspondientes al mes de abril de 2005 (Tomado de Carn et al., 2008). 74
- Figura 3. 43.** Lavas 4 y 5 que descendieron por el flanco sur del edificio volcánico, el 18 de junio de 2005. Fotografía tomada por P. Ramón (IG EPN). 75
- Figura 3. 44.** a) Distribución de la columna de ceniza el 3 de julio de 2005 (VAAC) y b) Imagen con la emisión de SO₂ registrado por OMI en julio de 2005 (Modificado de Carn et al., 2008). 76
- Figura 3. 45.** Actividad stromboliana registrada en el volcán El Reventador. Muestra en una secuencia de imágenes fijas tomadas a intervalos de un minuto a 1.8 km del cráter (Tomado de Sean, 2005). 76
- Figura 3. 46.** a) Emisión de SO₂ detectada por OMI; b) Tonelaje de SO₂ detectadas por OMI y el conteo de eventos sísmicos durante el período Mayo - Septiembre de 2005 (Tomado de Carn et al, 2008). 77
- Figura 3. 47.** Lóbulo estancado observado el 01 de agosto de 2005, atribuido al flujo de Lava 6. (Modificado de Sean, 2005). 78
- Figura 3. 48.** Imágenes que registraron el evento de la columna de ceniza producida el 15 de septiembre de 2005. a) Imagen generada por la VAAC; b) Alertas termales obtenidas por MODVOLC; c) Sector de sensor remoto vista con las bandas RGB. 78
- Figura 3. 49.** a) Imagen en banda RGB vista con Hot spot Hawaii, alertas termales producidas entre el 30 de marzo al 9 de abril 2007 (Modificado de Hawaii-MODVOLC); b) Distribución de las emisiones de SO₂ registradas por OMI el 25 de abril de 2008 (Modificado de OMI). 81

- Figura 3. 50.** Frente de la Lava 8 observada en el sector sur de la caldera que sobreyace a la Lava 3 el 12 de abril de 2007. (Fotografía tomada por B. Christensen). Recuadro superior: alertas termales registradas durante el mes de abril de 2007 (Modificado de MODVOLC). 82
- Figura 3. 51.** Visita al campo, 2 y 3 de agosto de 2007. a) La Lava 9 cerca del borde norte de la caldera, vista hacia el W desde el pie de la caldera del volcán; b) Vista hacia el E observada desde el pie del cono volcánico. La Lava 9 rellena el cauce del río Reventador. Recuadro, vista al N y la escala del flujo de lava. (Fotografía tomada por J. Johnson). 82
- Figura 3. 52.** Acumulación de lavas al interior del cráter. Sobrevuelo de monitoreo visual y térmico realizado el 19 de julio de 2007: a) Imagen digital; b) Imagen térmica respectiva. (Fotografía tomada por P. Ramón. IG-EPN). 83
- Figura 3. 53.** Flujo de lava 10 descendiendo por el flanco norte del volcán, visto desde el borde S del flujo, el día 3 de agosto de 2007. (Fotografías tomada por J. Jonhson). 83
- Figura 3. 54.** El 5 de septiembre de 2007: a) Flanco norte del cono del Reventador: a) Parte inferior alcanzada por el flujo de Lava 10 sobre la Lava 9; b) Imagen térmica correspondiente al recuadro de la figura anterior (los colores más claros indican las temperaturas más altas). Modificado de Ramón, 2005); c) Imagen de OMI para ese día. 85
- Figura 3. 55.** Imágenes satelitales registradas el 27 de julio de 2008. a) Imagen con bandas RGB mostrando el punto caliente identificado por los sensores de Hawaii-HIPG; b) Área estimada de la distribución de la columna de emisión de ceniza identificada por la VAAC; c) Alertas termales identificadas por MODVOLC al interior de la caldera del volcán. 86
- Figura 3. 56.** Imagen de la emisión de SO₂ para el 29 de julio de 2008. (Tomado de OMI) 87
- Figura 3. 57.** Dispersión de las nubes de ceniza emitida en julio de 2008 (Modificado de VAAC en Bustillos, 2008). 88
- Figura 3. 58.** El 2 de agosto de 2008: a) alerta termal identificado por MODIS (MODVOLC), b) imagen visible del hot spot identificado en HAWAII; c) Lava 11 descendiendo por el flanco sur de la caldera y que se deposita sobre la Lava 1. Fotografía de C. Viracucha (IG EPN). 89
- Figura 3. 59.** Caldera del volcán El Reventador vista desde el SE en el vuelo de monitoreo visual y térmico realizado el 28 de agosto de 2008. Lava 11 que descendió por el flanco sur del cono del volcán. (Fotografía de P. Ramón. IG EPN). 90
- Figura 3. 60.** Imágenes de OMI correspondientes al 6 y 16 de octubre de 2008, en las que se muestran emisiones alrededor del volcán El Reventador. 91
- Figura 3. 61.** a) Imagen con la ubicación del volcán El Reventador; b) imagen RGB con alerta termal (punto amarillo), todas de la primera alerta termal identificada en Hotspots-Hawai el día 9 de noviembre de 2008. 91
- Figura 3. 62.** a) Imagen con la ubicación del volcán El Reventador; b) Imagen MWIR y c) Imagen HOT, todas de la primera alerta termal identificada (Hawaii-

- HIGP) el día 9 de noviembre de 2008; d) Imagen en el rango visible observado por NOAA; e y f) Imágenes con la dispersión de las columnas de ceniza emitidas durante la misma fecha. 92
- Figura 3. 63.** Imágenes disponibles de OMI durante los días de actividad registrada el mes de noviembre de 2008. 93
- Figura 3. 64.** a) Columna de emisiones de ceniza y gases emitidos por el volcán El Reventador el día 9 de noviembre de 2008, observado desde El Chaco; b) Lava 12 descendiendo por el flanco sur del edificio volcánico, visto desde el flanco suroriental de la caldera el 8 de noviembre de 2008 (Fotografías tomadas por C. Viracucha, IG-EPN). 94
- Figura 3. 65.** a) Alertas termales identificadas en MOLVOLC del 11 y 13 de noviembre de 2008; b) Incandescencias observadas en el flanco sur, cráter y flanco norte, evidencia de actividad stromboliana (Fotografía tomada por V. Cansino). Respectivamente, al sur la Lava 12 y al norte la Lava 13. 94
- Figura 3. 66.** Columnas de vapor, gases y ceniza producida por el volcán El Reventador el 23 de abril de 2009, vista desde la población de El Reventador (Fotografía tomada por R. Grijalva-SOTE). 95
- Figura 3. 67.** a) Imagen de OMI con la emisión de SO₂ del volcán EL Reventador, correspondiente al 1 de mayo de 2009; b) Alertas termales receptadas en MODVOLC el 15 de mayo de 2009 y asociadas a la Lava 15. 96
- Figura 3. 68.** a) Vista parcial de la Lava 14 captado por la cámara secuencial del 14 de mayo de 2009. (Modificado de Vallejo, 2009); b) Vista total del flujo de lava 15 hacia el flanco norte del cráter; c) Imagen térmica correspondiente a la Lava 15, donde CE es cumbre oriental y CW cumbre occidental (Fotografía tomada por P. Ramón, EPN). 97
- Figura 3. 69.** a) Los círculos en blanco muestran puntos calientes detectados por el sensor satelital MODIS en las fechas y horas indicadas. La figura superior izquierda indica la ubicación del volcán Reventador (Fuente HIGP) (Modificado de Ramón et al., 2009). 98
- Figura 3. 70.** a) Vista del volcán desde la población de El Reventador el 6 de agosto de 2009. Se aprecia la columna de emisión que se emite desde el cráter, así como una franja de vapor que se ubica en el flanco SE del cono, dentro de la caldera y alrededor de la cota 2400 msnm; b) Desde las inmediaciones del R. Azuela se observa la presencia de brillo en el cráter del volcán. (Tomado de Ramón et al., 2009). 98
- Figura 3. 71.** a) Imagen generada en base a observaciones satelitales con el instrumento OMI correspondiente al día 16 de septiembre 2009 (Fuente: OMI); b) Vista desde el hotel El Reventador, ubicado al NE del volcán, de la emisión continua saliendo del cono del volcán a las 8h50 (TL). (Modificado de Vallejo et al., 2009). 99
- Figura 3. 72.** Emisión de SO₂ registrada por OMI el 18 de octubre de 2009; a) registrada por VAAC y b) Registrada por OMI². 100

Figura 3. 73. Vista del flujo de lava 17 descendiendo por el flanco sur del volcán. a) Fotografía y b) Imagen térmica, respectivamente (CE cráter oriental, CW cráter occidental). (Modificado de Vallejo, 2009). 101

Figura 3. 74. Cono de escoria al interior del cráter del volcán El Reventador desarrollado desde el mes de octubre Se observan los leveés dejados por uno de los flujos que descendieron hacia el flanco sur (Fotografía P. Ramón, tomada el 31 de octubre de 2009). 102

Figura 3. 75. Esquema sobre el terreno de un flujo de lava visto de frente, con superficies lisas y espesor homogéneo. 104

Figura 3. 76. Diagrama de la longitud del flujo de lava vs. Tasa de emisión para varios volcanes, principalmente basálticos. La tasa de emisión corresponde a la TME. Modificado de Walker (1973) en Harris & Rowland (2009). 106

CAPÍTULO 4

Figura 4. 1. Mapa de distribución de las muestras recolectadas en los flujos de lava emitidos por el volcán El Reventador entre 2002-2009. Coordenadas UTM WGS84 Z 18S. 108

Figura 4. 2. Vista en sección delgada de rocas de la Lava 1, vistas con aumento de 12,5x. a), b), y e) Cristales de Anf con bordes de reacción y Plg tabulares con coronas de reacción; c) Fenocristales de Anf con bordes de oxidación, Plg prismática con textura pulvurulenta hacia el núcleo y Cpx entrecrecido con Opx, vista con nícoles; d) Vista con nícoles; f) Vista del xenolito granodiorítico que muestra la asociación mineral Plg+Cpx+Anf+Opx+óx. 110

Figura 4. 3. Sección delgada de la Lava 1 con fenocristales de Plg, Cpx, Opx, Anf y óx; vistos con un aumento óptico de 12,5x de aumento. a) Con luz blanca, se observa el fenocristal de anfíbol, con corona de reacción y micro-cristalización de Plg+Opx+Cpx. b) con luz polarizada, se distingue la extinción ondulatoria de los fenocristales subhedrales de plagioclasa; c) se observa un aglomerado de fenocristales de Plg+Cpx+Opx+óx. 111

Figura 4. 4. Sección delgada de la lava 2 con fenocristales de Plg, Opx, Anf y óx., vistos con el lente de 12,5x de aumento. Se distingue la extinción ondulatoria de los fenocristales subhedrales de Plg a) con luz blanca; b) con luz polarizada. ... 112

Figura 4. 5. Sección delgada vista con aumento de 12,5x del xenolito gabrónico en la lava 2. Se observa fenocristales de Plg, Opx, Anf y óx. 112

Figura 4. 6. a) Con el aumento de 20x, se observan microcristales de piroxeno anhedral e inclusiones de óxidos en los cristales y en la matriz; b) Reemplazamiento de fenocristales de piroxeno por aglomerados de óxidos y con bordes de reacción con la cristalización de fenocristales de Opx, Aumento óptico de 12,5x. 113

Figura 4. 7. Sección delgada de la lava 3, vista con un aumento de 12,5x. Vista con aumento óptico de 22,5x. Fenocristales de Anf donde se distinguen dos bordes de reacción: re-cristalización de Cpx, seguida de bordes de reacción e intercrecimiento de Plg. a) sin nícoles y b) con nícoles. Fenocristales de Plg con maclas compuestas, Cpx con coronas de reacción y bordes de reacción, Anf con bordes reabsorbidos. 114

Figura 4. 8. Secciones delgadas de la Lava 4 vistas con aumento de 12,5x: a) Cristales anhedrales de anfíbol con bordes de reacción con la re-cristalización de Cpx y óx., visto con luz blanca; b) con luz polarizada; c) Fenocristales de tamaños variados, principalmente cristales de plagioclasa de hábito tabular y prismático, que presentan coronas de reacción visto con luz blanca y d) visto con luz polarizada.....115

Figura 4. 9. Secciones delgadas de la Lava 5 con aumento de 12,5x vistas con luz blanca. a) Cristales de Opx de color anaranjado pálido, Cpx como aglomerados y cristales tabulares de Plg, también Plg, como aglomerados el Opx rosáceo y el Cpx verdoso. Anfíbol reemplazado por microcristales de Cpx y óx.; b) Fenocristales grandes de anfíbol de color pardusco y sus bordes de reacción blanquecinos con microcristales de Cpx y óx.....116

Figura 4. 10. Sección delgada de las rocas de la Lava 6, vista con un aumento óptico de 12,5x: a) Dos tipos de cristales de Plg: los anhedrales de mayor tamaño presentan corrosión al interior y hacia los bordes; los cristales euhedrales tabulares tienen macla tipo Carlsbad. Los fenocristales de piroxeno tienen textura ofítica y bordes reabsorbidos e inclusiones de óx., como evidencias de desequilibrio; b) Con luz polarizada; c) Los fenocristales de Anf de 12,5 mm, con bordes de reacción con recristalización de Plg, Pxo intersertal y óx., visto con luz blanca y d) Visto con luz polarizada.117

Figura 4. 11. Sección delgada de la lava 8 vista con un aumento de 12,5x; a) vesicularidad intensa con fenocristales de opx; b) se observan los cristales tabulares de Plg con coronas de reacción y los fenocristales de Anf con bordes de oxidación; c) fenocristal subhedral de opx con base octogonal e inclusiones de óxidos; y d) vista con aumento óptico de 30x a un Anf cuyos bordes de reacción tiene microcristales de Plg, Cpx y óx., además con intercrecimiento de cristales de Plg y Cpx (textura ofítica).119

Figura 4. 12. Sección delgada de la lava 9 vista con aumento óptico de 12,5x: a) Fenocristales de Anf poikilítico con cristales de Plg, bordes de oxidación, golfos de reacción e inclusiones de óxidos; se distinguen los dos tipos de fenocristales de Plg, los prismáticos zonados, con coronas de reacción y los tabulares con macla tipo Carlsbad, todo visto con luz blanca; b) Sección vista con luz polarizada.120

Figura 4. 13. Sección delgada de la Lava 10 vista con aumento óptico de 12,5x se observan grandes fenocristales de Cpx que presenta intercrecimiento de Plg+óx (textura ofítica), además de los fenocristales prismáticos-subhedrales y los tabulares de Plg que presentan coronas de reacción, evidencia de corrosión; a) Luz blanca; b) Luz polarizada.....121

Figura 4. 14. Sección delgada de la Lava 11 con aumento óptico de 12,5 mm que contiene: a) fenocristales aglomerados de tamaño 3,5 mm con Plg tabular y textura intersertal con inclusiones de óxidos. Matriz vítrea e isotrópica; b) En luz polarizada.....122

Figura 4. 15. Sección delgada de la Lava 11, vista con aumento óptico de 12,5x donde se destacan los aglomerados de fenocristales de Opx y Cpx; cristales de Anf anhedral y alargado con bordes de oxidación y entrecrecimiento de Plg; se diferencian los cristales prismáticos anhedrales de Plg zonada y con coronas de reacción y extinción ondulatoria; a) Luz blanca; b) Luz polarizada.123

Figura 4. 16. Sección delgada de la Lava 11 vista con aumento óptico de 12,5x. a) Los dos tipos de fenocristales de Plg, los subhedrales prismáticos, zonados y de extinción ondulatoria y los euhedrales, tabulares con macla tipo Carlsbad; b) Luz polarizada; c) Grandes fenocristales de Plg y Cpx, intercrecimiento de cristales de Plg, hay aglomerados de microcristales de Plg+Cpx+óx que aparentemente están reemplazando un mineral pre-existente (tipo enclave); d) Vista con luz polarizada..... 123

Figura 4. 17. Sección delgada de la Lava 11, con el aumento óptico de 12,5x. a) Visto con luz blanca, se identifica el contacto de los dos tipos de rocas existentes: material andesítico abajo y diorítico hacia arriba en: con luz natural; b) Visto con luz polarizada; c) aumento de 12,5x, el borde de contacto con cristales reabsorbidos, golfos de reacción, coronas de reacción y textura intersertal.124

Figura 4. 18. Sección delgada de la Lava 13 vista con el aumento óptico de 12,5x, en la que se distinguen los fenocristales de Plg zonados, maclados y con deformación; además de aglomerados de Opx+Cpx+Plg+óx., vistos con: a) Luz blanca; b) luz polarizada; c) se puede observar cristal de Anf con bordes de reacción, rodeado de cristales de Opx+Cpx+óx y Plg. El tamaño de este mineral es 4,5mm x3 mm; d) Luz polarizada.125

Los fenocristales de Cpx son más abundantes (15-28%) y de tamaños variados (0,5-5 mm). Los fenocristales de Opx (12-15%) alcanzan tamaños de entre 1-3 mm, son subhedrales y de hábito octogonal, algunos tienen macla de espada, inclusiones de óxidos, bordes reabsorbidos y forman aglomerados con Plg con textura ofítica (Figura 4.19.a-b-c-d)..... 125

Figura 4. 19. Sección delgada vista con el aumento óptico de 12,5x para la Lava 13 en la que se distinguen a) Plg con coronas de reacción, cristales aglomerados de opx rodeado de Cpx; b) Luz polarizada; c) Con luz blanca, cristales subhedrales de Plg. que están zonados, con maclas simples y compuestas además de deformados y presentan inclusiones de óx; otros están entrecrecidos de Plg hacia la parte superior, fenocristales de opx con macla de espada; d) Vista con luz polarizada. 125

Figura 4. 20. Sección delgada de la Lava 13, vista con el aumento óptico de 12,5x, en la que se puede observar cristal de Anf con bordes de reacción, rodeado de cristales de Opx+Cpx+óx y Plg. El tamaño de este mineral es 4,5mm x3 mm..... 126

Figura 4. 21. Sección delgada de la lámina 14 vista con el aumento óptico de 12,5x: a) cristales anhedrales de Anf reemplazados por microcristales de Cpx y óx, cristales tabulares de Plg y cristales prismáticos de Pxo; b) Luz polarizada; c) Se distingue que los fenocristales tabulares de Plg y los de los Cpx tiene tamaños superiores a 3 mm; d) Luz polarizada. 127

Figura 4. 22. Sección delgada de la lámina 16, con aumento óptico de 12,5x. a) Con luz blanca, aglomerados de Plg tabular y agregados fenocristales y microcristales anhedrales de Opx; b) Luz polarizada; c) Cristal de Anf con alteración de opacidad; d) Luz polarizada; e) Con luz blanca, aglomerados de cristales de Plg, Cpx y Opx; f) Luz polarizada; g) Reemplazamiento de fenocristales de Opx por microcristales de Cpx y óx. e ntensa vesicularidad. 129

Figura 4. 23. Sección delgada de la lámina 17, con un aumento de 12,5x. Se distingue: a) el mayor tamaño de los fenocristales de Cpx y Opx que se encuentran en la roca; b) Visión con luz polarizada; c) fenocristales grandes de Plg, sus coronas de reacción, los fenocristales de Cpx y opx y su pleocroísmo, además las inclusiones de óx. en los diferentes minerales y en la matriz; d) Vista con luz polarizada que permite distinguir la zonación y la extinción ondulatoria de los fenocristales de Plg.; además de la opacidad de un mineral subredondeado con bordes de reacción asociado a un anf.; e) fenocristales de opx y Cpx entrecrecidos y con macla tipo espada; f) Luz polarizada que facilita el reconocimiento de los minerales aglomerados y reemplazados.130

Figura 4. 24. Porcentajes de los minerales observados y descritos en las láminas delgadas analizadas en los respectivos flujos de lava emitidos entre 2002 a 2009.132

Figura 4. 25. Mapa de distribución de las muestras disponibles para los flujos de lava emitidos por el volcán El Reventador entre 2002-2009. Coordenadas UTM WGS84 Z 18S.135

Figura 4. 26. Representación del LOI vs. SiO₂ para las muestras de los productos volcánicos analizados para el volcán El Reventador.....136

Figura 4. 27. Composición de las rocas en el volcán El Reventador con los diagramas de clasificación de rocas volcánicas. a) Peccerillo y Taylor (1976), b) Le Bas et al., (1986). *La simbología en cruz (+), corresponde a los xenolitos que se obtuvieron de en la Lava 2, y que corresponden a una composición gabrónica, pero que para fines de visualización general, fueron tomados en cuenta en la clasificación de las rocas.....137

Figura 4. 28. Clasificación de andesitas a través del diagrama Harker de Gill (1981), donde se distinguen tres asociaciones de andesitas: básicas de medio y bajo K y las ácidas de alto K. La zona sombreada representa las lavas subsecuentes a 2007.138

Figura 4. 29. Diagramas Harker para elementos mayores que muestra la variación de los óxidos mayores respecto al SiO₂ (todos en % wt) en en las rocas del volcán El Reventador.....139

Figura 4. 30. Evolución de la composición porcentual absoluta y promedia (wt. %) para los elementos mayores en los flujo de lava del volcán El Reventador (entre 2002-2009 y datos históricos previos). Las líneas negras verticales corresponden a las respectivas desviaciones estándar.140

Figura 4. 31. Diagramas de variación de elementos en traza respecto al SiO₂. Todos los elementos en trazas se representan en ppm vs. SiO₂ wt %.145

Figura 4. 32. Modelos de cristalización fraccional para los magmas de El Reventador a través de los diagramas a) La/Yb y b) Sr/Y vs. Ni. La composición del cumulado es estimado por el balance de masa. M1, Modelo de cristalización fraccional con un cumulado compuesto de 55%+22%Cpx+17Ol+6%Mag. M2, Modelo de cristalización fraccional con un cumulado compuesto de 51%Pl+27%Anf+11%Cpx+5%Ol+6%Mag. Los coeficientes de partición usados para estos modelos fueron datos en Martín (1987). Marcas en el modelo representan 10% de cristalización. B. Magma basáltico primitivo. Este gráfico ha

sido modificado para complementar la información obtenida hasta 2012 con la publicada en el trabajo de Samaniego et al., 2008.....147

Figura 4. 33. Diagrama de la razón Th/Zr, Th/Zr vs. Th y Rb/Nb, Rb/Sr vs. Rb, donde los esquemas muestran una correlación teórica durante la cristalización fraccional, fusión parcial y procesos de mezcla. Recuadros: a) C^{H1} vs. C^{H2} (donde H1 y H2, son dos elementos altamente incompatibles); b) C^H/C^M vs. C^H (donde C^H , C^M , son concentraciones, donde H, altamente incompatible y M, moderadamente incompatible). Modificado de Schiano, et al., (2010).....150

Figura 4. 34. Diagramas del tipo C^I versus C^I/C^C y $1/C^I$ versus C^I/C^C según los modelos de Schiano et al., (2010), de modo que las curvas mostrarían composición de fundidos producidos por mezcla, cristalización fraccional y procesos de fusión parcial. Recuadros: a) Diagrama C^I vs. C^I/C^C ; b) Diagrama $1/C^I$ vs. C^I/C^C (donde C^I y C^C son concentraciones, donde i es incompatible y c es compatible). Modificado de Schiano et al., 2010.151

CAPÍTULO 5

Figura 5. 1. Estadísticas de la sismicidad en el volcán El Reventado durante el período de actividad 2002 a 2009. Las líneas punteadas representa el descenso del flujo de lava; el área gris, representa las fases eruptivas estudiadas; el área blanca, corresponde a las etapas no eruptivas.157

Figura 5. 2. Diagrama de los volúmenes de lava emitidos para cada flujo por el volcán El Reventador y las tasas de emisión media de los mismos, durante el período 2002-2009.158

Figura 5. 3. Diagrama de clasificación de andesitas de Gill (1981). Se distinguen tres asociaciones de andesitas: básicas de medio y alto K y las ácidas de alto K. La zona rectangular representa las lavas de la Serie 2007 y la zona sombreada representa la Serie 2002.165

Figura 5. 4. Modelos de cristalización fraccional para los magmas de El Reventador a través de los diagramas i) La/Yb y ii) Sr/Y vs. Ni. La zona sombreada corresponde a los datos obtenidos entre 2007 a 2012, usados en este estudio. (Modificado de Samaniego et al., 2008). Diagramas propuestos por Schiano et al., (2010) donde los diagramas iii) Cl vs. Ci/Cc y y iv) $1/Cl$ vs. Ci/Cc, muestran curvas con las tendencias principalmente correspondientes a los procesos de mezcla y cristalización fraccional. Los gráficos están detallados en el Capítulo 4.....167

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tasas de emisión de cada uno de los flujos de lava emitidos por el volcán El Reventador entre 2002 a 2009.....105

Tabla 2. Recopilación de los valores comparativos con otros volcanes en el mundo, similares al volcán El Reventador.....105

Tabla 3. Características generales de los flujos de lava descritos para el período eruptivo 2002-2009 en el volcán El Reventador.....159

Tabla 4. Características generales de las etapas eruptivas planteadas para este estudio.....	162
Tabla 5. Características generales de las etapas eruptivas planteadas para este estudio.....	163

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Puntos de control en el campo.....	188
Anexo 2. Herramientas de MONITOREO VISUAL.....	189
Anexo 3. Reportes de actividad stromboliana – BITÁCORA IG EP.....	190
Anexo 4. Emisión de columnas de ceniza – VAAC WASHINGTON.....	191
Anexo 5. Alertas de anomalías térmicas – MODVOLC Y HOT SPOT HAWAI.....	192
Anexo 6. Alertas de anomalías térmicas – MODVOLC Y HOT SPOT HAWAI.....	193
Anexo 7. Descripción de láminas delgadas.....	194
Anexo 8. Datos de análisis geoquímicos.....	233

RESUMEN

El volcán El Reventador, tras su reactivación en noviembre de 2002, ha mantenido un proceso eruptivo de carácter efusivo/explosivo, con la emisión de flujos de lava hasta el presente.

Este trabajo describe la actividad eruptiva durante el período 2002 – 2009. La cronología, a través de varios parámetros de monitoreo volcánico, como la estadística sísmica, la observación directa y la observación satelital. Se identificaron cuatro etapas eruptivas: 2002, 2004-2005, 2007 y 2008-2009, las cuales reflejan una buena concordancia entre la actividad interna y superficial.

Se identificaron 17 flujos de lava denominados Lava 1 a 17 y para cada una: su ocurrencia y la duración del proceso efusivo; la georreferenciación de la cartografía existente; sus características geométricas y la tasa media de emisión. El volumen total estimado de lavas es de $\sim 877 \times 10^6 \text{ m}^3$ dentro de un área de $\sim 3,6 \times 10^6 \text{ m}^2$, con una tasa media de emisión de $\sim 8,7 \text{ m}^3/\text{s}$ para todo el proceso efusivo.

Las lavas corresponden a andesitas y andesitas basálticas, de textura porfirítica seriada. Su composición mineralógica está constituida por plagioclasa, dos piroxenos, anfíbol, óxidos tipo magnetita y escaso olivino. El análisis de los datos geoquímicos, permitió establecer dos series magmáticas: la primera, para las etapas de 2002 y 2004-2005; y la segunda, para las etapas 2007 y 2008-2009. Por ello, se propone la ocurrencia de dos intrusiones magmáticas con productos iniciales con bajos contenidos de SiO_2 que se incrementan de manera sutil y progresiva en el transcurso del tiempo.

Finalmente las evidencias microscópicas observadas en los minerales y las características de los elementos en traza, sugieren la contribución de procesos de cristalización fraccional y de mezcla de magmas en la generación de los productos correspondientes a las series magmáticas definidas.

ABSTRACT

El Reventador volcano, after its reactivation in November, 2002 has maintained an effusive/explosive eruptive process, with the emission of lava flows until the present.

This study describes the eruptive activity during the period 2002-2009. The chronology has used several parameters of volcanic monitoring, such as seismic statistics, direct and satellital observation.

We identified four eruptive stages: 2002, 2004-2005, 2007 and 2008-2009, with a good relation between the internal and surface activity.

We identified 17 lava flow denominated Lava 1-17, and for each one: the occurrence and duration of effusive process, the georeference of the previous map, the geometric characteristics and the mean emission rate. The estimated total volume of lava is $\sim 877 \times 10^6 \text{ m}^3$ within an area of $\sim 3.6 \times 10^6 \text{ m}^2$ and, the mean emission rate of $\sim 8.7 \text{ m}^3 / \text{s}$ during the total effusive process.

The lavas are andesites and basaltic andesites have porphyritic and serial texture. The mineralogical composition contains: plagioclase, two pyroxenes, amphibole, oxides as magnetite and scarce olivine. The geochemical data analysis, allowed it to establish two magmatic series: the first, for the stages of 2002 and 2004-2005; and the second, for stages 2007 and 2008-2009. Therefore, we propose the occurrence of two magmatic intrusions. The initial products have low contents of SiO_2 that increases subtly and progressively over time.

Finally, the microscopic observation of minerals and the characteristics of the trace elements, suggest the contribution of fractional crystallization and magma mixing processes, in the generation of the products corresponding to the defined magmatic series.

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 IMPORTANCIA Y JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

El episodio eruptivo ocurrido el 3 de noviembre de 2002 constituyó la mayor erupción registrada en el país durante el último siglo, alcanzando un índice de explosividad volcánica VEI=4 (Delpit et. al., 2008).

Este fenómeno produjo una columna eruptiva de ~17 km de altura, la generación de flujos piroclásticos al interior de la caldera que afectaron obras importantes de infraestructura del país, tales como: el Sistema del Oleoducto Transecuatoriano (SOTE); el Oleoducto de Crudos Pesados (OCP); los Poliductos y el sistema vial Baeza - Lago Agrio, todas ubicadas en las cercanías del volcán. Las caídas de ceniza se produjeron sobre buena parte del Valle Interandino, al sector occidental del volcán. Pocos días después, el cambio del comportamiento eruptivo estuvo asociado a la emisión de flujos de lava. Las condiciones eruptivas de 2002, fueron representadas en el Mapa de amenaza volcánica del volcán El Reventador (Bourquin et al., 2011). En el consta la generación de flujos de lava que se han mantenido al interior de la caldera. Este comportamiento ha sido constante durante los episodios eruptivos producidos en el volcán El Reventador en el período 2002 a 2009.

Dadas las condiciones geográficas y climáticas, el difícil acceso al sector del volcán, no hecho que no se hayan podido llevar a cabo estudios en este volcán. Sin embargo, se tienen registrados períodos eruptivos históricos desde 1541 (Johnson et al., 2006), haciendo de este volcán uno de los volcanes más activos en el Ecuador continental pero poco estudiado.

Este trabajo es importante ya que se busca complementar el conocimiento geológico y vulcanológico a través del estudio petrográfico, geoquímico y cronológico de los flujos de lava que han sido emitidos por el volcán El Reventador desde 2002 hasta 2009.

De este modo, es justificado el interés geológico-científico a través del cual, se pretende aportar con datos que permitan un mejor entendimiento de la dinámica eruptiva del volcán El Reventador y al conocimiento vulcanológico en el Ecuador continental, especialmente debido a las repercusiones económicas y sociales que tiene una erupción que llegue a afectar infraestructura estratégica nacional como lo es el Proyecto Hidroeléctrico Coca Codo Sinclair, y parte de los tramos del SOTE, OCP, Poliductos y sistema vial ubicado en las provincias de Napo y Sucumbíos.

1.2 ÁREA DE ESTUDIO

El volcán El Reventador se encuentra ubicado en las coordenadas $0^{\circ}4'40''N$ y $77^{\circ}39'58''O$, dentro de la región amazónica; a 90 km al Este de la ciudad de Quito y a 53 Km al Noreste de Baeza, en el límite provincial entre las provincias de Napo y Sucumbíos.

El área de estudio se localiza al interior de la caldera del volcán, en los flujos de lava que están contenidos en un área aproximada a 22 km^2 .

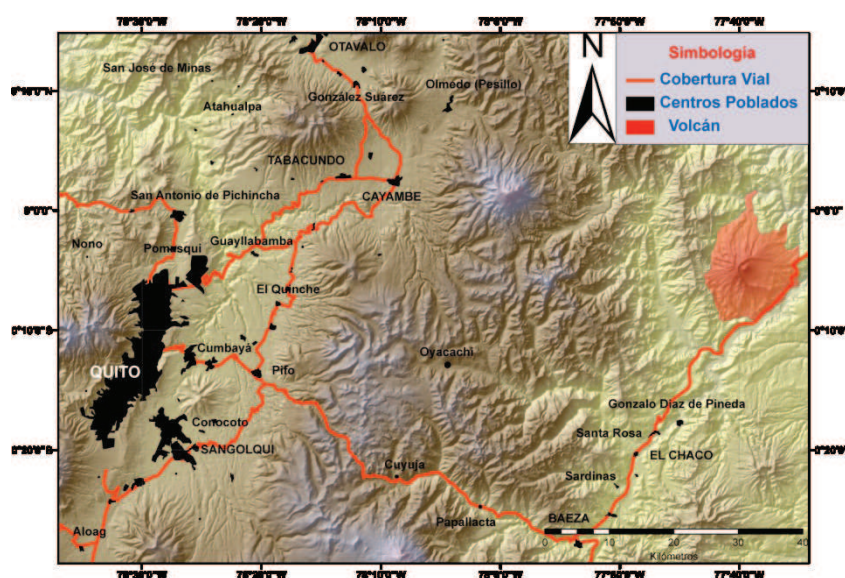


Figura 1. 1. Mapa de ubicación del volcán el Reventador (Fuente IG EPN).

1.3 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Describir la cronología y caracterizar petrográfica y geoquímicamente los flujos de lava que ha emitido el volcán El Reventador hasta 2009, tras su reactivación en 2002.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Cartografiar a escala 1:25.000 los flujos de lava emitidos al interior de la caldera del volcán El Reventador desde 2002 hasta 2009.
- Estimar el volumen de magma emitido durante la salida de los flujos de lava producidos por el volcán y su tasa de emisión promedio.
- Describir cronológicamente el proceso eruptivo del volcán El Reventador aplicando los datos del monitoreo volcánico obtenidos durante el período 2002 a 2009, conjuntamente con los resultados anteriores, caracterizando la actividad eruptiva.

1.4 ALCANCE DEL ESTUDIO

El alcance de este estudio comprende los flujos de lava emitidos por el volcán El Reventador entre los años 2002 a 2009. Este período ha sido considerado ya que no existieron flujos de lava posteriormente a 2009, hasta el momento del planteamiento de este proyecto.

Estos flujos están localizados al interior de la caldera del volcán de aproximadamente 22 km². La cartografía se representará en una escala 1:25000 a través de control de campo y de las imágenes satelitales ÁSTER disponibles.

La descripción cronológica de la emisión de cada flujo de lava, estará basada en las herramientas disponibles utilizadas en el monitoreo volcánico que realiza el IG EPN (estadísticas de sismicidad y observación directa) y de las herramientas satelitales (detección de alertas termales, emisiones de SO₂ y ceniza volcánica). La caracterización petrográfica de las muestras de mano (x10) y de las láminas delgadas (x40); y adicionalmente, de los análisis de los datos geoquímicos para

los flujos de lava disponibles. Estos últimos, han sido obtenidos gracias al convenio de cooperación entre el Instituto para la Investigación y Desarrollo de Francia (IRD) y el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IG EPN).

1.5 METODOLOGÍA

Para el desarrollo del este trabajo, se efectuó el análisis y síntesis de la información disponible en artículos científicos, libros, mapas, informes e imágenes satelitales asociados con la temática.

La revisión y análisis de la información generada con el monitoreo volcánico y proporcionada por el IG EPN. Esto, a través de la revisión de las bases de datos diarios de sismicidad estadística en registros y sismogramas generados entre febrero de 2003 a diciembre de 2009.

La actividad superficial fue evaluada en base a la compilación, organización, revisión, análisis y correlación de los registros fotográficos e información satelital. La información satelital correspondiente a datos de anomalías térmicas, emisiones de gases y columnas de ceniza producidas en el volcán a lo largo de toda su actividad eruptiva entre el 3 de noviembre de 2002 hasta el 31 de diciembre de 2009.

El trabajo de campo se llevó a cabo a pesar de las difíciles condiciones de acceso al sector. Se realizaron los trabajos de mapeo y muestreo, en el sector norte y sur de la caldera, en los flujos de lava disponibles en cada sector. El trabajo de laboratorio tuvo dos etapas, la primera, con la descripción de las láminas delgadas de las muestras a través del microscopio; y la segunda, con el análisis e interpretación de los datos geoquímicos procesados a través del software IG_PET.

Finalmente, la redacción del informe final en donde se describe en detalle el accionar de este trabajo, sus resultados, conclusiones y recomendaciones que serán expuestos a continuación.

1.6 ESTUDIOS PREVIOS

Algunos de los estudios que se han elaborado respecto al volcán El Reventador, se destacan a continuación:

El Estudio del Complejo Volcanológico El Reventador, realizado por el Instituto Ecuatoriano de Electrificación en 1988, el cual describe en escala 1:50000, la litología y propone un modelo de la evolución geológica para el volcán.

Estudios relacionados con el proceso eruptivo producido el 3 de noviembre de 2002, dentro de los que se destacan:

Hall et al., (2004), en el que se describe el proceso de la sorpresiva erupción producida el 3 de noviembre de 2002.

Samaniego et al., (2008), en los que se realiza un estudio petrogenético en los productos de la erupción del volcán El Reventador, para los flujos de lava emitidos desde 2002 a 2005.

Delpit et al., (2008), que describe varios parámetros de la dinámica eruptiva del evento producido el 3 de noviembre de 2002; en tanto que Ridolfi et al. (2008) proponen un modelo de alimentación de la cámara magmática, basados en el estudio de la textura, mineralogía y termobarometría de los productos emitidos en la erupción de 2002.

Vallejo (2010), donde a través de fotografías digitales e imágenes térmicas, se plantea un mapa que contiene 17 flujos de lava identificados desde 2002 hasta 2009.

Vallejo & Ramón (2011), proponen la importancia de la aplicación de la técnica de termografía, en la identificación de los flujos de lava, emitidos durante el proceso eruptivo comprendido entre 2002 a 2009.

Finalmente, Bourquin et al., (2011), en base al análisis y planteamiento de los diferentes escenarios eruptivos, publican el Mapa de Amenaza Volcánica de El Reventador, a escala 1:50000.

A continuación, una breve reseña del contenido de este trabajo:

El Capítulo 1, contiene las generalidades de este estudio.

El Capítulo 2, expone el contexto geodinámico regional y la geología localizada en el sector del volcán El Reventador.

El Capítulo 3, describe las herramientas de monitoreo y su aplicación al momento de elaborar la descripción cronológica del fenómeno eruptivo asociado a los flujos de lava emitidos entre 2002 a 2009. También se encuentra la caracterización individual de cada uno de los 17 flujos de lava identificados, y donde se proponen los cálculos de sus respectivas tasas de emisión.

El Capítulo 4, caracteriza petrográfica y geoquímicamente, cada uno de los flujos de lava. Contiene una reseña del trabajo de Samaniego et al.,(2008), que es comparado con la evolución petrológica a lo largo del 2002 hasta 2009 y una discusión de aquello.

EL Capítulo 5, expone los resultados obtenidos durante este estudio y finalmente, el Capítulo 6, expone las conclusiones y recomendaciones del presente trabajo.

CAPITULO 2

MARCO GEOLÓGICO DEL VOLCÁN EL REVENTADOR

2.1 MARCO GEODINÁMICO Y TECTÓNICO REGIONAL

El arco volcánico andino incluye cientos de volcanes entre activos, potencialmente activos y extintos, dispuestos en cuatro segmentos separados sobre la cordillera de Los Andes (Figura 2.1 a), conocidos como Zonas Volcánicas Norte (5°N - 2°S), Central (14 - 27°S), Sur (33 - 46°S) y Austral (49 - 55°S), y cuya actividad es producto de la subducción de las placas oceánicas Nazca y Antártica bajo la placa Sudamericana (Stern, 2004).

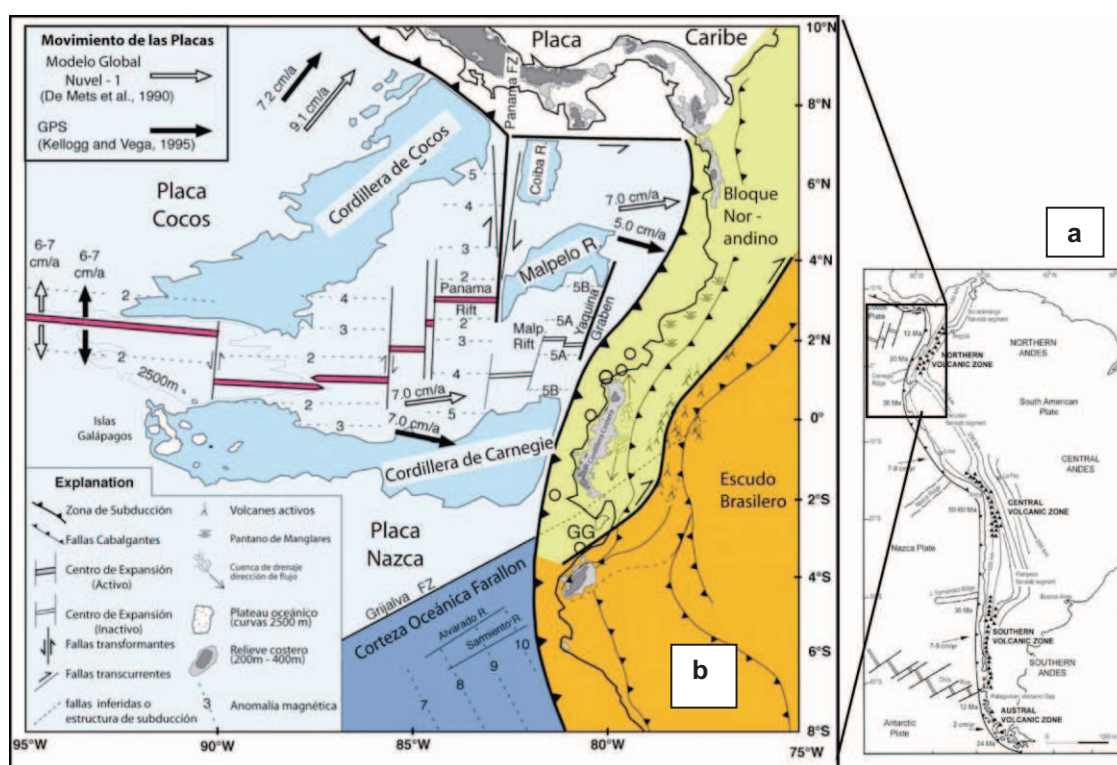


Figura 2. 1. a) Esquema que muestra las cuatro zonas de volcanismo activo en Sudamérica (Modificado de Stern, 2004); b) Marco geodinámico regional. Interacción de las placas tectónicas Nazca, Cocos, Bloque Nor-andino y Sudamericana, con sus rasgos asociados (Modificado de Gutscher 1999, en Silva, 2007).

El Ecuador se encuentra en una zona límite de placas tectónicas en convergencia, gobernada por el proceso de subducción de la placa Nazca, con un movimiento hacia el Este, una convergencia oblicua y una velocidad promedio de ~ 58 mm/año bajo la placa Sudamericana (Figura 2.1 b). Esta convergencia de placas da como resultado dos procesos diferentes: a) la acumulación de

esfuerzos a lo largo de la interfase de las dos placas, el cual es responsable de la generación de los grandes terremotos de la Costa Centro-Norte del Ecuador; y, b) la expulsión de una microplaca, el Bloque Norandino (NAB), que se mueve hacia el NE con respecto a la placa estable de Sudamérica a una velocidad de ~ 8 mm/año (Nocquet et al, 2010).

Además, el arco volcánico ecuatoriano es producto de la convergencia de la placa subductante Nazca, en dirección perpendicular a la fosa y la placa Sudamericana en dirección NNE desde al menos el Pleistoceno tardío - Holoceno (Tibaldi & Ferrari, 1992) hasta la actualidad (Kellogg & Vega 1995; Trenkamp et al., 2002). Varios autores como Pennington (1981), Kellogg et al. (1985), Soulas (1988), sugirieron ya la existencia del Bloque Norandino, el cual se encuentra limitado hacia el Este por una serie de fallas de dirección NE-SW que, proviniendo del frente oriental de la Cordillera Oriental colombiana, cortan los dos ramales de la Cordillera de los Andes en el Ecuador y penetran en el Golfo de Guayaquil hasta la fosa. Alvarado (2012) ha estudiado, condensado y redefinido la información anterior relativa a los segmentos activos del límite NAB-Sudamérica y los ha denominado como la estructura mayor Chingual-Cosanga-Pallatanga-Puná (CCPP)

Los Andes ecuatorianos se extienden por unos 650 km de longitud y unos 150 km de ancho; hacia el occidente se ubica la Cordillera Occidental; al oriente, la Cordillera Real u Oriental (Hall, et. al., 2008), y hacia el este de la Cordillera Real y la parte más occidental y proximal de la Cuenca Oriente se encuentra a zona sub-andina del Ecuador; constituida por una franja afectada por pliegues y sobrecorrimientos de retro-arco ("fold thrust belt"), en la que, la serie de cobertura del escudo guayanés se ha desprendido formando escamas, hacia el este, por efectos del empuje andino (Baby et al., 2004).

A más del límite del Bloque con la placa Sudamericana, estudios realizados en la cuenca amazónica norte del Ecuador, han determinado la presencia de tres corredores estructurales de régimen transpresivo dextral hacia el este de la CCPP, o que la incluyen en la parte Norte. Estas estructuras son: Corredor Subandino, corredor Sacha-Shushufindi y corredor Ishpingo-Tiputini, todos ellos

con dirección Norte a NNE y con evidencias de deformación en el Cuaternario (Jaillard et al, 2005). Alvarado (2012) ha llamado colectivamente a estas estructuras que evidencian el actual frente andino de deformación o crecimiento de los Andes, el Cinturón Andino Oriental (EAB).

En cuanto a la tectónica de la zona cercana al área de estudio, se describe al sistema de Fallas de Cayambe - Afiladores – Sibundoy (CASF) y se le conoce como una de las principales estructuras que limitan el bloque Nor-andino, que a su vez, se mueve hacia el NNE. Esta región ha sido estudiada por Tibaldi y otros (2007), donde basados en las observaciones, se pudo determinar desplazamientos a través de los rasgos morfológicos (Pleistoceno tardío-Holoceno) y a la actividad sísmica cortical reciente. El CASF se extiende por alrededor de 270 km a lo largo de la zona sub-andina al norte de Ecuador donde previamente, en trabajos como los de Tibaldi y Ferrari (1992) se reconoce la falla Cayambe – Chingual con desplazamiento dextral y en el trabajo de Ego et al., (1996) como la falla Chingual – La Sofía. Estos segmentos componen la CASF que continúan extendiéndose hacia el sur de Colombia, lo cual se ha logrado determinar a través de medidas sistemáticas de mecanismos focales que además han permitido estimar una tasa de deslizamiento de la falla de alrededor de 7.7 a 11 mm/a y con una magnitud de $M=7.0$ en caso de una posible reactivación de este segmento (Tibaldi, et al., 2007) como se observa en la Figura 2.2.

2.2 VOLCANISMO PLIO CUATERNARIO EN EL ECUADOR CONTINENTAL

Desde el Plioceno superior hasta la actualidad, la actividad volcánica se ha manifestado a lo largo del arco frontal, el arco principal y el tras arco (Figura 2.3).

El *arco frontal* constituido por la Cordillera Occidental con volcanes principalmente andesíticos – dacíticos tales como el Guagua Pichincha, Iliniza, Chimborazo, entre otros (Hall & Beate, 1991).

El *arco principal*, constituido por volcanes en su mayoría andesíticos, hasta riolíticos, de la Cordillera Real y del Valle Interandino. En la Cordillera Real; se menciona a los volcanes Cotopaxi y Tungurahua, con erupciones periódicas cada

100±50 años (Hall & Beate, 1991); el Cayambe y el Antisana, con una menor frecuencia eruptiva; mientras que los volcanes Sangay y El Reventador con erupciones mucho más frecuentes. En tanto que los volcanes localizados en el Valle Interandino se menciona al Ilaló, Pasochoa y Rumiñahui (Hall et al., 2008).

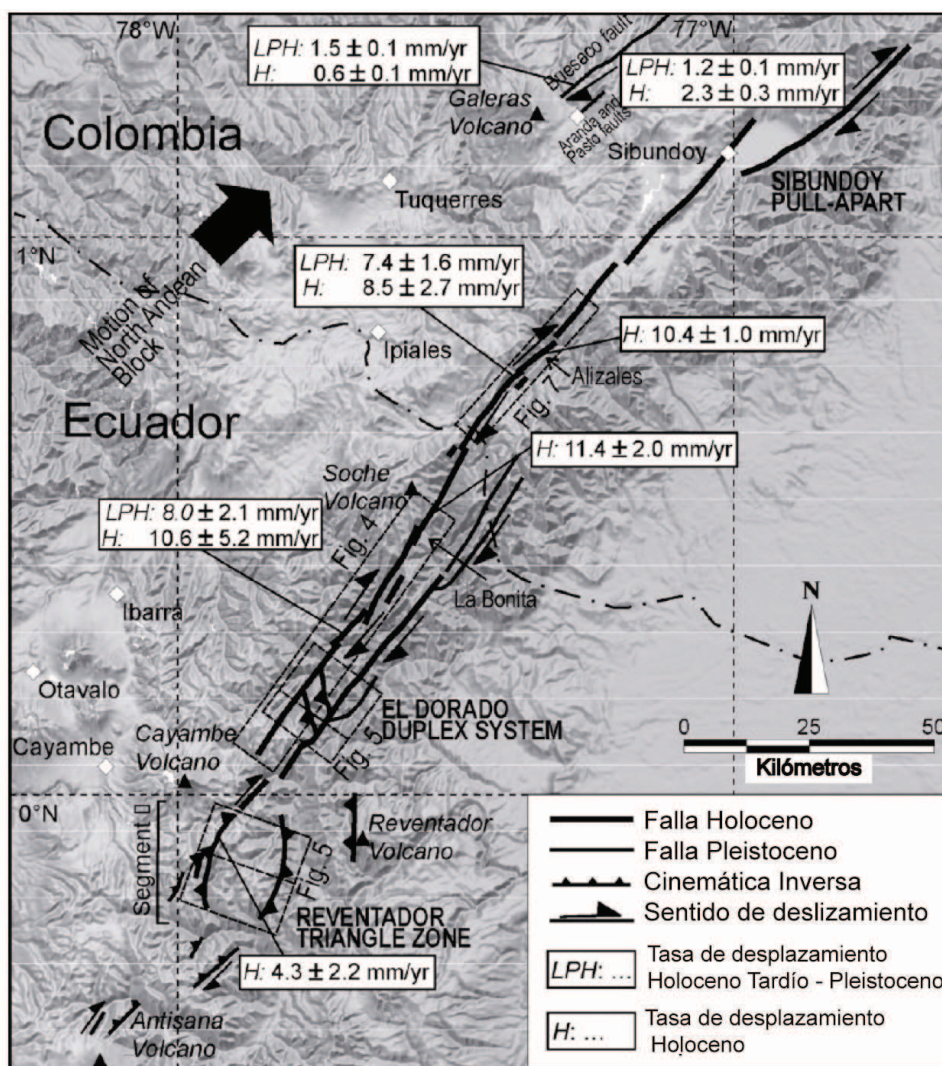


Figura 2. 2. Principales rasgos tectónicos a lo largo de la falla de Cayambe-Afiladores-Sibundoy. Tasas de deslizamiento con medidas de compensación para depósitos geológicos y formas de relieve dados los diferentes períodos de tiempo: Pleistoceno tardío-Holoceno y Holoceno. (Modificado de Tibaldi, et al., 2007).

Finalmente, la zona de *tras arco* muestra la presencia de volcanes alcalinos como el Sumaco y los Domos del Puyo, localizados hacia la parte oriental de la región amazónica (Barragán, et. al., 1998, 2005). Cada uno de ellos posee diferentes morfologías y estilos eruptivos, con diversidad petrográfica y química (Barragán, et. al., 1998; Hall, et. al., 2008).

2.3 GEOLOGÍA DEL VOLCÁN EL REVENTADOR

Dentro de los estudios que se llevaron a cabo para el Proyecto Hidroeléctrico Coca, INECEL (1988) efectuó un levantamiento geológico de la zona del volcán Reventador (Figura 2.4). Dicho estudio encontró que el volcán estaba constituido por tres unidades principales, separadas por colapsos sectoriales, las que dieron lugar a la edificación y desarrollo del centro volcánico actual. Se debe mencionar que a la fecha en que se efectuó dicho trabajo el conocimiento que se tenía de los fenómenos de grandes colapsos de edificio volcánicos era aún incipiente, no es sino a partir de la gran erupción del volcán Saint Helens, en 1980, que los vulcanólogos empezaron a profundizar sus investigaciones en ese sentido. Recientes observaciones de campo en la zona del volcán El Reventador parecerían evidenciar la existencia de una avalancha de escombros adicional (P. Ramón, comunicación personal), la misma que no fue reconocida en el trabajo de INECEI (1980), por lo que la historia geológica del volcán podría ser incompleta. A continuación se presenta un resumen del trabajo de INECEL (1988).

La serie del complejo volcánico El Reventador recubre las formaciones mesozoicas de la región del Napo y está constituida por una secuencia de productos efusivos y explosivos que alcanzan espesores de alrededor de 1000 m.

Dentro de este trabajo se distinguen tres grandes unidades correspondientes a otros edificios volcánicos que presentan las principales etapas de evolución del complejo volcánico El Reventador evidenciados en sus edificios volcánicos:

- El Complejo Volcánico Basal (CVB)
- El Volcán Paleoreventador (VPR)
- El Volcán El Reventador (VER), o cono actual.

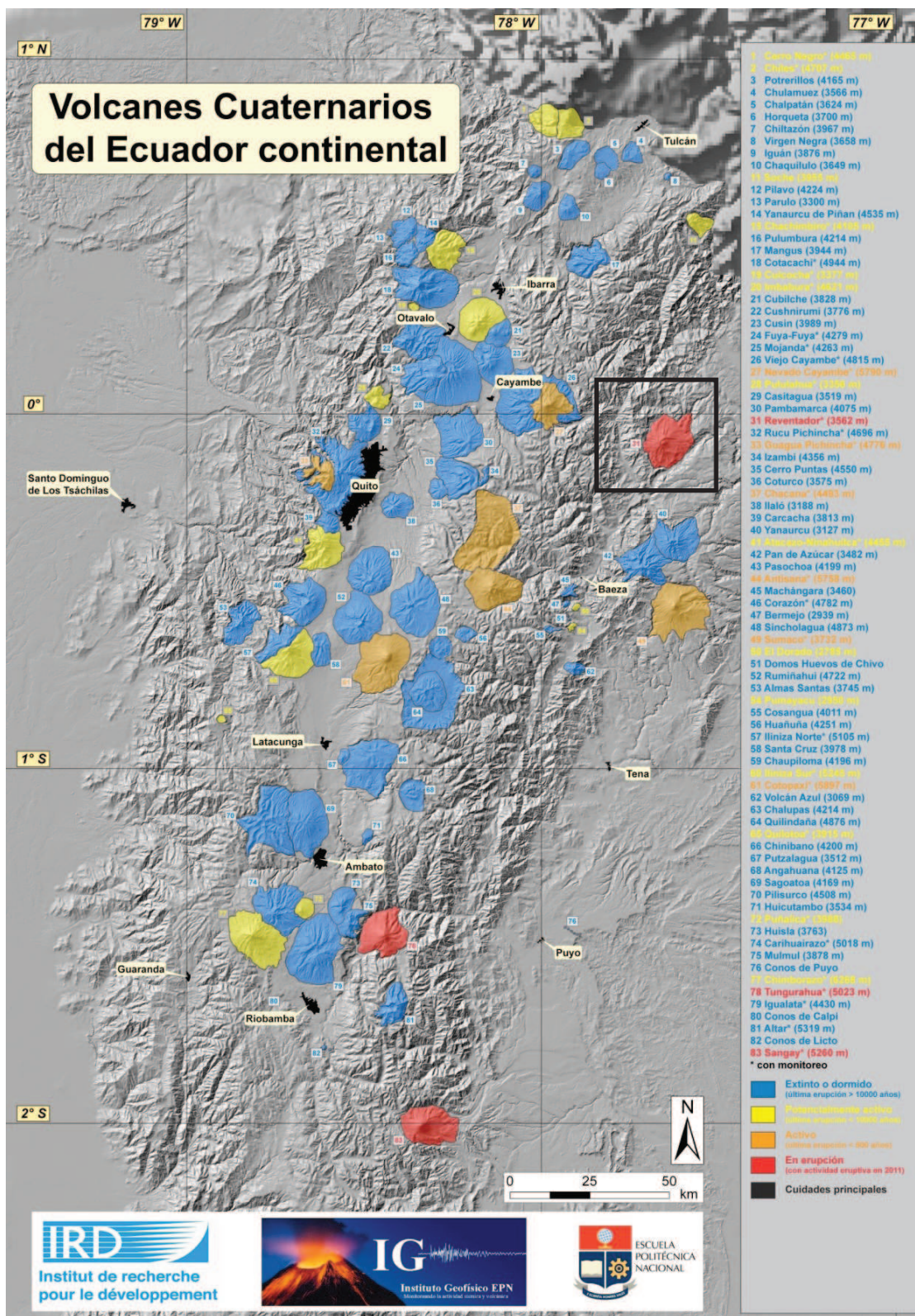


Figura 2. 3. Mapa de los volcanes cuaternarios del arco volcánico del Ecuador continental (Modificado de IRD-IG-EPN), y la localización del Complejo Volcánico El Reventador.

2.3.1 COMPLEJO VOLCÁNICO BASAL (CVB)

Aflora hacia la parte occidental y norte del actual centro eruptivo. Se muestra limitado al Este por un gran lineamiento tectónico con fallas arqueadas y alineadas en dirección N-S.

La secuencia del complejo son: ignimbritas intercaladas de surges y piroclastos de caída; lavas e intercalaciones de brechas volcánicas. También se agregan varios centros dómicos, como el cerro Copete, de composición andesítica. En la ladera norte, los aparatos dómicos de los cerros Líder y Mirador por su morfología mejor conservada parecen atribuibles a una fase tardía del CVB.

Una importante porción del edificio volcánico CVB, se presenta actualmente con un gigantesco depósito de avalancha de escombros de $\sim 20 \text{ km}^3$, subsecuente al colapso que afectó a los sectores oriental y central del antiguo volcán.

2.3.2 VOLCÁN PALEOREVENTADOR (VPR)

Los productos del CVB, están cubiertos por una secuencia mixta de productos explosivos y efusivos cuya zona de emisión estuvo ubicada más o menos coincidentemente con el cono actual.

La más importante secuencia de productos explosivos aflora en la sección más occidental del anfiteatro y en ella pueden reconocerse dos fases de actividad separadas por un paleosuelo. Fuera del anfiteatro afloran las lavas con las que, presumiblemente, concluyó la actividad del VPR, directamente por debajo de los depósitos de avalancha de escombros, o bien en el sector meridional del volcán donde han confluído las coladas recientes.

El edificio del VPR sería destruido por fenómenos de colapso y deslizamiento en masa, donde se reconocen las diversas facies: en la parte basal, media superior y terminal.

2.3.3 VOLCÁN EL REVENTADOR (VER)

El Reventador constituye un volcán dentro de una caldera en forma de herradura orientada hacia el este.

El actual cono yace hacia el sector occidental de la caldera. Su cono tiene forma regular con una altura máxima de 3450 m y un volumen total estimado de 5 km³. Presenta un pequeño cráter hacia la parte central con alrededor de 200 metros de diámetro, el cual fue destruido durante la erupción de noviembre de 2002, cuando las explosiones ocurridas volaron tercio superior superior del cono, mientras su caldera se extiende en un diámetro entre 3 a 4 kilómetros. El volcán ha generado numerosas coladas de lava, principalmente en bloques, que se han acumulado dentro de la depresión originada por la antigua avalancha producida en dirección hacia el oriente. Consecuentemente, la morfología general del edificio resulta asimétrica, pues el lado oriental ha sido el más desarrollado. En la cima, el cono actual del VER se ha formado por la actividad explosiva calificada como pliniana en base a las observaciones de su última gran erupción ocurrida el 3 de noviembre de 2002. A partir del último cuarto de 2009, el estilo eruptivo se ha caracterizado por mayor actividad explosiva dando como resultado el crecimiento de un cono interno formado sobre el cono dejado tras la erupción en 2002 (Vallejo & Ramón, 2011).

2.3.4. LAS AVALANCHAS DE ESCOMBROS

En base a lo mencionado en el informe realizado por INECCEL (1988), durante la historia eruptiva del complejo volcánico El Reventador, ocurrieron dos enormes avalanchas que provocaron la destrucción de los respectivos edificios volcánicos. El volumen total de material derrumbado ha sido estimado en 28 km³ aproximadamente.

Los dos eventos estarían separados por un importante lapso cronológico que contó con el desarrollo de una fase tectónica compresiva y por grandes variaciones estructurales, morfológicas y topográficas. Esto produce notables diferencias entre las dos avalanchas, en su volumen, composición, y desde luego el mecanismo desencadenante.

Sin embargo, hacia la época, no se tenían muchos conocimientos sobre el mecanismo y caracterización de avalanchas.

2.3.5 TECTÓNICA LOCAL

El complejo volcánico El Reventador, en su conjunto está caracterizado por una intensa fracturación que refleja una notable y persistente actividad histórica. En base a la geometría y a la distribución de las fallas y fracturas de las tres unidades vulcanológicas, se presenta una reconstrucción de los principales eventos tectónicos:

2.3.5.1 Evento CVB

El CVB está interceptado por varios sistemas de deformación frágil debido a la superposición de varios eventos tectónicos.

El sector nororiental del CVB se encuentra afectado por un enjambre de fallas NE-SW paralelas al valle del río Coca, que en los alrededores del cerro Mirador, aparecen cortando a lavas y en la zona del río Azuela, a los depósitos de avalancha de escombros. En esta zona la familia de fallas de rumbo NE-SW se cruza con otra de rumbo N-S. El sector noroccidental del CVB está afectado por una muy densa red de fallas de rumbo NNE-SSW, WSW-ENE, N-S y NW-SE, en orden lineal. Además, se tiene una lineación atravesada en sentido N-S por un alineamiento de fallas lítricas cóncavas hacia el Este. El segmento central de este sistema situado 1,5 km al oeste del actual centro eruptivo de El Reventador, representa también la superficie de desprendimiento del derrumbe que ha movilizó hacia el oriente, una gran parte desde este antiguo centro eruptivo. El sector meridional del CVB está cortado por fallas de rumbo NNE-SSW, NE-SW y NW-SE, y NE-SW.

Los eventos tectónicos gravitacionales que afectaron al CVB, estuvieron seguidos por una migración al SE del curso del río Coca y por una rápida erosión y profundización de su cauce en más de 500 m. Esto indicaría la presencia de un impulso de levantamiento de la faja subandina que, probablemente sería la causa de una parte de las deformaciones antes descritas.

2.3.5.2 Evento VPR

El aparato VPR comenzó a desarrollarse inmediatamente después de que se concluyera la fase tectónica que afectó el CVB. Las lavas emitidas por el cráter del VPR, cuya posición probablemente coincidía con la del CVB, se canalizaron siguiendo dos direcciones preferenciales: NNE-SSW y E-W.

2.3.6 CARACTERÍSTICAS PETROGRÁFICAS Y GEOQUÍMICAS

En el informe de INECEL (1988) se publica información relacionada a productos emitidos por el complejo volcánico El Reventador en el curso de su historia evolutiva han sido principalmente lavas de un ambiente calco alcalino, y que a través de la clasificación establecida en base al diagrama Sílice vs. Álcalis total (TAS, por sus siglas en Inglés, Total Alkalis-Silica), permitió utilizar la nomenclatura con la que se había trabajado para definir las características petrográficas más significativas de los productos lávicos agrupando los tipos litológicos reconocidos en las tres unidades relacionadas a las secuencias estratigráficas identificadas:

Las lavas del CVB presentan un amplio espectro de variación composicional. Su secuencia varía entre basaltos y riolitas, incluyendo andesitas basálticas, andesitas y dacitas.

Las lavas del VPR muestran una variación más limitada respecto a las de la unidad anterior, pues están representadas sólo por basaltos, andesitas basálticas y andesitas que constituyen el tipo litológico más difundido.

El espectro composicional de las lavas del cono actual, VER, es relativamente limitado. Su variación comprende entre basaltos, andesitas basálticas y andesitas ligeramente evolucionadas.

En función de los análisis geoquímicos obtenidos para las diferentes muestras del complejo volcánico El Reventador, se concluye lo siguiente:

La máxima extensión del campo de variación hacia términos ácidos, se observa en los productos del CVB que llegan hasta riolitas. La serie composicionalmente más

reducida es la de la VER con SiO_2 que oscila entre 50,3 a 60,2%. Sin embargo, se resalta que el último episodio explosivo del VPR, correspondería a una composición ácida muy evolucionada que estuvo seguida por productos más básicos de la parte más profunda de la cámara.

Los productos andesíticos del VER presentan un carácter ligeramente más potásico respecto a las andesitas más antiguas. Estas diferencias se desarrollan en un momento críticos del proceso de cristalización, caracterizado por la aparición simultánea de ortopiroxeno y anfíbol ($\text{SiO}_2=55\%$). El anfíbol se encuentra más difundido en las series del CVB y del VPR que en la serie del VER, sugiriendo probablemente una mayor participación de este mineral en el fraccionamiento de las series antiguas.

2.3.7 ACTIVIDAD HISTÓRICA

La descripción de actividad histórica es considerada como incompleta debido a la remota ubicación del volcán, su inaccesibilidad y frecuentes malas condiciones climáticas que generalmente impiden las observaciones visuales directas.

Por su difícil acceso, su aislada y lejana ubicación, el volcán fue oficialmente descubierto sólo en el año de 1931 (Paz y Miño L., et al., 1931). Sin embargo, desde 1541 hasta el presente, se han reportado al menos diecisiete períodos eruptivos que han sido identificados por las caídas de ceniza en el valle Simkin y Siebert (1994). Basados en documentos históricos esporádicos, Hall (1980), Simkin y Siebert (1994), durante el siglo XX, se consideran posible actividad en 1541,1590,1691,1748, 1797, 1802, 1842,1843, 1944, 1856, 1871, 1894, 1898-1906, 1912, 1926, 1936, 1944, 1955, 1958, 1960, 1972, 1974, 1976.

Los dos últimos períodos de actividad han permitido conocer que el cono actual se ha formado por una actividad moderadamente explosiva, identificada como stromboliana. Esta determinación, fue realizada en base a las observaciones de sus últimas erupciones ocurridas entre abril y mayo de 1976 (Hall, 1977) y la del 3 de noviembre de 2002 después de 26 años.

Esta erupción repentina y violenta, tuvo poca actividad precursora y es la más importante erupción en los últimos 150 años en Ecuador, con un índice de explosividad volcánica, VEI de 4 (Hall. et al., 2004; Ridolfi et al., 2008; Samaniego et al., 2008; Delpit, et al., 2008). Posteriormente, la caldera ha sido afectada por varios flujos tipo blocky, de lava andesítica que se acumulan y desbordan por el cráter y que han sido observados desde 2002 hasta 2013. A partir de 2010, se ha observado el desarrollo de un pequeño cono al interior del cráter y el posterior desarrollo de un domo (Ramón y Vallejo, 2011) y que continua desarrollándose hasta la actualidad.

CAPITULO 3

CRONOLOGÍA DE LA EMISIÓN DE LOS FLUJOS DE LAVA DEL VOLCÁN EL REVENTADOR PERÍODO 2002 A 2009

La actividad eruptiva del volcán es monitoreada a través de varios parámetros, entre ellos, la sismicidad, a través de una red instrumentada por el IG EPN y las alertas de anomalías térmicas, de emisiones de SO_2 y de columnas de ceniza, todas a través de sensores que monitorean permanentemente dicho parámetros volcánicos.

3.1 MONITOREO VOLCÁNICO

3.1.1 MONITOREO SÍSMICO

El estudio de una región volcánica desde el punto de vista sísmico, permite conocer diferentes aspectos del sistema volcánico a través de la aplicación de conceptos y técnicas generales de la Sismología, enfocados principalmente en la dinámica y mecanismos de transporte de fluidos, sus efectos y un posible estado de esfuerzos locales y regionales (Ibáñez y Carmona, 2000).

El monitoreo sísmico en el volcán El Reventador se inició en febrero de 2003, luego de la erupción de noviembre de 2002 con la instalación de tres estaciones sísmicas de período corto: *CHARLY*, *LAVA4* y *CONE*, dispuestas como se ve en la Figura 3.1.

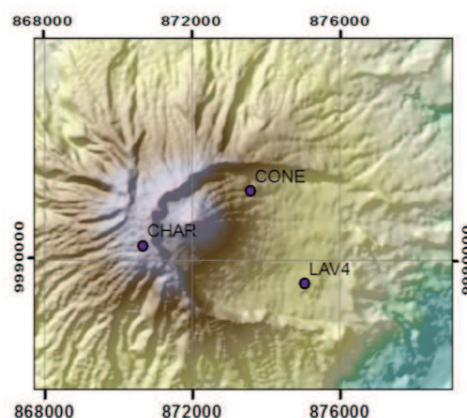


Figura 3. 1. Ubicación de las estaciones sísmicas en el volcán El Reventador (Fuente IG-EPN).

Este trabajo utiliza únicamente los datos estadísticos de sismicidad volcánica de El Reventador procesadas por el IG EPN, pues dada la distribución y el insuficiente número de estaciones, no es posible localizar los eventos sísmicos de manera rutinaria. Solamente, se realiza el conteo de ellos, lo cual se basa en la duración de los eventos sísmicos, según la caracterización planteada por Wassermann (2011). De tal manera, los eventos sísmicos identificados en los sismogramas son: eventos sísmicos transitorios, que ocurren instantáneamente, como son los eventos volcano-tectónicos (VT), los de largo período (LP), los híbridos (HB) y las explosiones (EXP); en tanto que los eventos continuos se refieren a los tremores armónico y espasmódico. Todos, caracterizados a continuación:

Los eventos **volcano-tectónicos** (VT), están generalmente asociados con la fracturación de las rocas al interior del volcán en respuesta a los cambios en los esfuerzos tectónicos asociados a la actividad magmática (Power et al., 1993; Kumagai et al., 2000; McNutt, 2002). Típicamente este tipo de eventos presentan frecuencias altas mayores a 5 Hz hasta 15 Hz (Lahr et al., 1994; McNutt, 2002; Wassermann, 2011). Su origen se atribuye al momento en el que se supera el límite de resistencia del material, donde la roca se fractura y la energía es liberada (McNutt, 2002; Troncoso, 2004; DeRoin & McNutt, 2011).

Las señales sísmicas de la estación CONE en el volcán El Reventador, presentan señales con envolventes que tienen diferente tamaño y período, asociados a la variabilidad de la cantidad de energía liberada para cada evento y su respectiva profundidad (McNutt, 2005, 2002). La ocurrencia de este tipo de eventos fue predominante a partir del inicio de la actividad eruptiva en 2002 y su ocurrencia ha ido decreciendo hacia el final de la actividad eruptiva, hasta finales de 2009, como se indicará más adelante (Figura 3.2.).

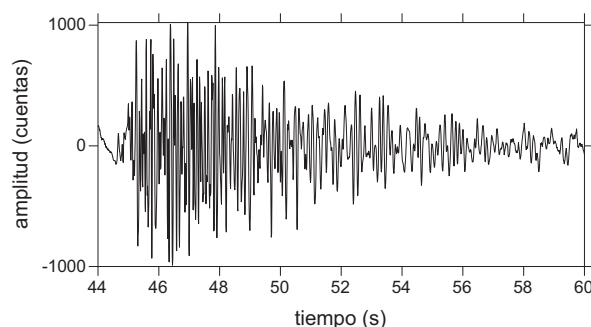


Figura 3. 2. Sismograma de la señal sísmica correspondiente a un evento volcánico tectónico (VT) registrado el 02 de mayo de 2005 en el volcán El Reventador a las 14:28 (GMT). Tomado de Troncoso, 2006

Los eventos **de largo período (LP)** o eventos de baja frecuencia, tienen duraciones desde pocos segundos hasta minutos y presentan frecuencias menores a 5Hz (Ibañez & Carmona, 2009) o entre 0,2 a 10 Hz (McNutt, 2002; Wassermann, 2011). Estos tipos de señales son identificables por su espectro y la forma de onda (McNutt R. , 2005). El origen de estos eventos está asociado, a la presión ejercida por la movilización de los fluidos al interior del volcán, donde dichos fluidos son inyectados y producen vibraciones relacionadas con el ascenso de fluidos magmáticos a través del conducto que alimenta el sistema volcánico o hidrotermal (Ibañez & Carmona, 2009; Molina, et al., 2004; Kumagai, et al., 2002; Kumagai&Chouet, 1999; Power, et al., 1993). También estas señales han sido en ocasiones asociadas al crecimiento de domos de lava (García et a., 2007; Gómez, et al., 1999).

Los sismogramas de la estación CONE, en el volcán El Reventador, presentan bajas frecuencias y una envolvente generalmente, alargada y armónica que se puede observar en los registros sísmicos (Figura 3.3); en especial a partir de 2004 ya que se intensifica su ocurrencia a partir de 2008, como se verá posteriormente.

Los **eventos híbridos (HB)** comparten características de eventos LP y VT pues se los asocia con la fracturación de roca tras la presión generada cuando los fluidos magmáticos son extruidos (Guillier et al., 2006; White et al., 1998; Lahr et al., 1994; Power et al., 1993).

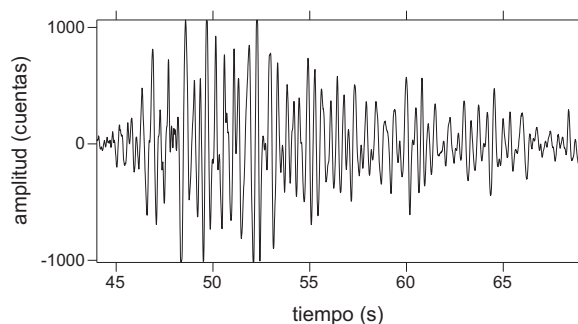


Figura 3. 3. Sismograma de la señal sísmica correspondiente a un evento de largo período (LP) registrado el 17 de mayo de 2005 en el volcán El Reventador a las 13:35 (GMT). Tomado de Troncoso, 2005.

Este tipo de señales presentan frecuencias altas (mayores a 10Hz) (Ibáñez & Carmona, 2009) y han sido asociadas al mecanismo de crecimiento de domos (Wassermann, 2011). Un ejemplo de ello lo describen Miller et al., (1998) en el volcán Soufrière Hills de Montserrat; y White et al., (1998) en volcanes como el Monte Santa Elena, Agustín y Pinatubo. También se asocian a estas señales con el proceso previo o contemporáneo al aumento de la tasa del flujo de magma (Zobin et al., 2008; White et al., 1998).

Este tipo de señales registradas en El Reventador, indican gran variedad en la forma de la envolvente de la señal de los sismogramas, correspondientes a las condiciones particulares asociadas a la magnitud, liberación de energía o mecanismo generador de la señal (Figura 3.4), debido a la combinación de varias crestas y valles en las envolventes de estos eventos (S. Vaca, comunicación personal). Al considerar a estos eventos como la combinación entre eventos LP y VT, en algún momento será más evidente el predominio de la componente generadora: 1) si es causada por fracturación, o 2) por desplazamiento de fluidos los que ejercerían presión para fracturar la roca. Sin embargo, también se deben considerar zonas de debilidad alrededor de la fuente que ejerce la presión (McNutt R. , 2005; 2002; White et al., 1998).

Respecto a los datos estadísticos revisados, durante el incremento de este tipo de señales, ocurre simultáneamente un incremento en el número de eventos tipo VT.

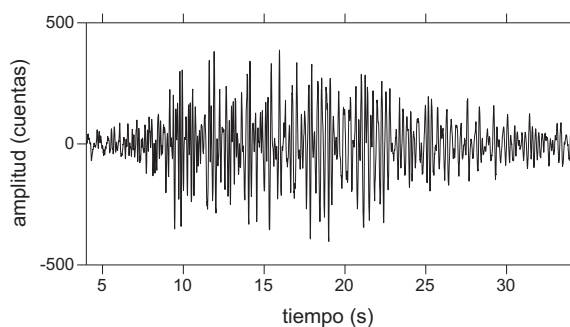


Figura 3. 4. Sismograma de la señal sísmica correspondiente a un evento de largo período (LP) registrado el 11 de abril de 2005 en el volcán El Reventador a las 05:42 (GMT). Tomado de Troncoso, 2005.

Explosión (EXP), es un tipo de señal sísmica superficial que acompaña erupciones explosivas. Este tipo de señal presenta al menos dos llegadas claras: la primera, asociada a la propagación de ondas sísmicas internas; la segunda, asociada a las ondas acústicas que viajan a través del aire con la velocidad típica del sonido (330m/s, a 20°C). Estas ondas sísmicas pueden producirse a profundidades variadas, desde cientos de metros a unos pocos kilómetros y su acústica dependerá de la cantidad de energía que se libere (Ibañez & Carmona, 2009; McNutt, 2005, 2002). En estudios recientes se establece que sistemáticamente, las explosiones son más intensas para las erupciones de fisura, erupciones freáticas y erupciones con mayor contenido de gas (McNutt, 2005).

Las explosiones que ocurren en el volcán El Reventador, muestran señales sísmicas emergentes cuya envolvente va incrementando su amplitud hacia el final del evento (S. Vaca y L. Troncoso, com. pers). La actividad eruptiva que contó ya con datos de monitoreo, registraron la ocurrencia de comportamiento explosivo desde noviembre de 2004, cuando las señales demostraron un incremento de este fenómeno durante la etapa subsecuente a la emisión de flujos de lava. Este mismo comportamiento se observó en 2005 (Figura 3.5) y se volvió predominante hacia los últimos meses de 2009. Un comportamiento similar, es descrito por Zobin et al., (2008) para el caso del volcán de Colima en México, en donde este fenómeno podría aparentemente, asociarse a un proceso de transferencia de fluido involucrado, o, el paso de una onda que puede enlazar dos procesos físicos distintos (McNutt R. , 2005).

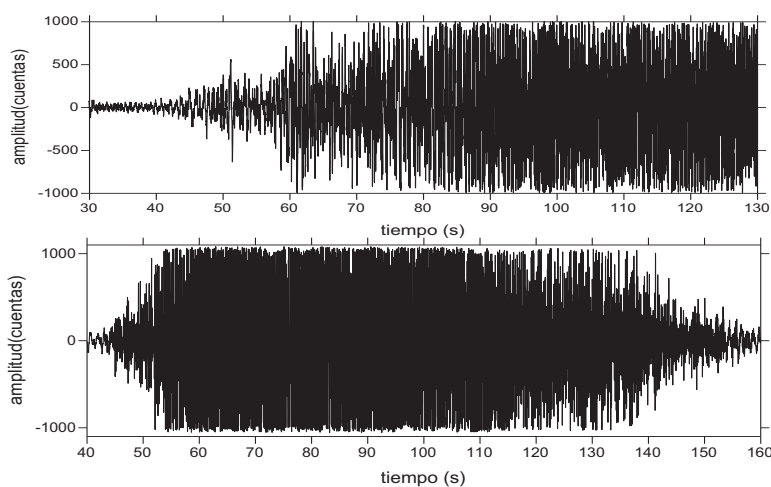


Figura 3. 5. Sismograma de la señal sísmica correspondiente a dos explosiones registradas el 19 de agosto y el 21 de septiembre de 2005 en el volcán El Reventador. Tomado de Troncoso, 2005.

El **tremor volcánico** es una señal sísmica caracterizada por mantener amplitudes constantes durante un período de tiempo que puede oscilar desde varios minutos hasta horas (McNutt R., 2005, 2002; Ibañez & Carmona, 2009). Casi todos los volcanes en el mundo muestran señales de tremor durante sus diferentes fases de actividad, y es frecuentemente asociado a alertas de una posible actividad eruptiva (Wassermann, 2011; McNutt, 2005, 2002).

El **tremor armónico** son señales que sugieren variación en la amplitud y en la frecuencia de la señal, de modo que muestran frecuencias monocromáticas acompañadas de frecuencias bajas a medianas (entre 1 y 2,5Hz), y de duración variable (McNutt, 2005; Gómez et al., 1999). Según Barboza (2001), citado en el trabajo de Troncoso (2004), este fenómeno es el resultado del movimiento de fluidos en fracturas internas del conducto magmático o de ascensos cortos de magma sin una necesaria erupción magmática.

Las señales de tremor armónico registrado en los sismogramas del volcán El Reventador, han tenido duración de unas pocas horas durante las cuales, la amplitud se incrementa de manera importante. Este fenómeno ha sido muy frecuente durante el proceso de emisión de flujos de lava, observado en los años 2005 (Figura 3.6), 2007, 2008 y 2009.

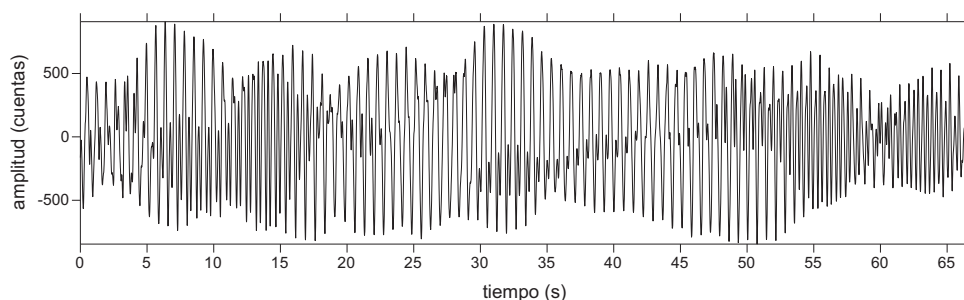


Figura 3. 6. Sismograma de la señal sísmica correspondiente al tremor armónico registrado el 13 de abril de 2005 en el volcán El Reventador a las 03:22(GMT). Tomado de Troncoso, 2005

El **tremor espasmódico** a diferencia del tremor armónico, posee frecuencias intermedias (entre 1-6 Hz), es pulsátil, irregular e intermitente. Según Ibáñez (1997) y Cruz (1999), esta señal se asocia con la desgasificación, a través de domos de lava y/o al proceso de intrusión magmática como la ocurrida en 1989-1991 en el volcán Galeras (Colombia).

Las señales de tremor espasmódico observadas en los sismogramas del volcán El Reventador, han llegado a tener una duración desde pocos minutos hasta varios días. Además, sus frecuencias y amplitudes han llegado a saturar el registro con las grandes amplitudes producidas durante todo el proceso eruptivo (Figura 3.7).

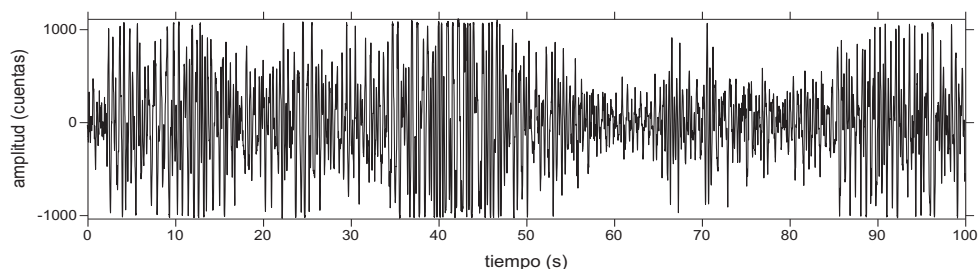


Figura 3. 7. Sismograma de la señal sísmica correspondiente a tremor espasmódico registrado el 16 de junio de 2005 en el volcán El Reventador a las 15:46 (GMT). Tomado de Troncoso, 2005.

Un tipo de señal sísmica relacionada también con procesos superficiales, son las **caídas de rocas** (CRx). Estas están asociadas al rodamiento de bloques inestables en los frentes de avance de los flujos de lava (Zobin et al., 2008; Wassermann, 2011; DeRoin & McNutt, 2011). Su registro son leves señales de impactos, aunque pueden también asociarse a la formación de domos (DeRoin & McNutt, 2011).

En el volcán El Reventador se identificaron este tipo de eventos y mostraron correspondencia con los períodos en los que se producía la emisión de flujos de lava tipo blocky que descendían por los flancos del edificio volcánico.

3.1.2 MONITOREO VISUAL

El monitoreo visual comprende las observaciones efectuadas desde tierra o desde el aire, realizadas por parte del personal del IG EPN durante el proceso eruptivo (Figura 3.8). El resultado del presente monitoreo es un amplio registro de fotografías, videos e informes de las visitas efectuadas al volcán.

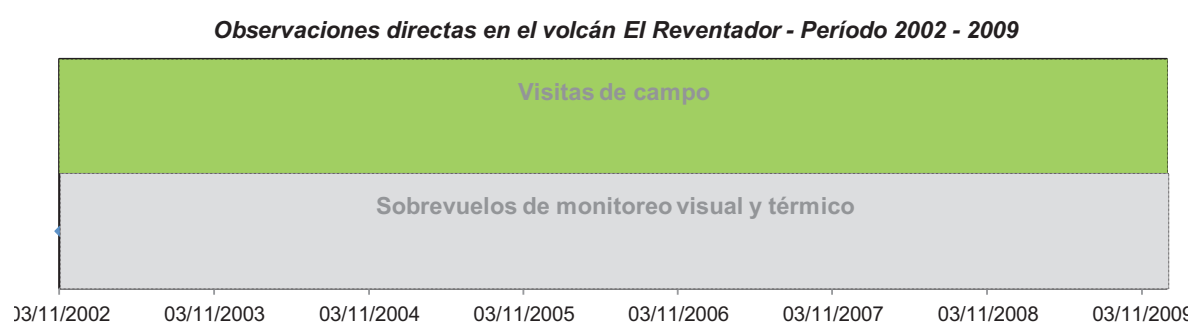


Figura 3. 8. Cronología de las visitas realizadas al volcán El Reventador desde 2002 hasta 2009.

La bitácora, es el registro escrito de los reportes visuales en los que varias personas que identificaron algún fenómeno en el volcán, han informado al IG EPN. Esta metodología ha sido implementada de manera diaria y ha estado funcionando desde el 22 de enero de 2007 hasta el presente (2013). Esta herramienta permite una fácil organización cronológica basados en varios parámetros, tales como: la fecha (año, mes, día), tipo de reporte, tipo de evento y sector (Clima, Lahar, Flujo de lava, Sísmica, Emisión de gases, Ruidos, Emisión o Caída de ceniza), el detalle del reporte, la fuente (Autoridad, Ciudadano, Técnico IG, Técnico Externo), personas del sector que colaboran con el monitoreo volcánico y el lugar de la fuente (Aeropuertos, Ciudades, Oleoducto, SOTE, etc). Toda esta información, refuerza el conocimiento acerca de la actividad superficial que se ha generado durante el período eruptivo del volcán El Reventador; y en este trabajo, han sido parte fundamental en la descripción

cronológica de la evolución de la actividad superficial durante todos los episodios eruptivos registrados, como se mostrará más adelante.

3.1.3 MONITOREO TÉRMICO

Esta actividad está a cargo del personal del área de Vulcanología del IG-EPN. Para ello, se utiliza el método de termografía infrarroja, mediante la cual se adquieren imágenes de la radiación termal de los objetos. Esta radiación es representada como la temperatura aparente de los cuerpos (Spampinato et al., 2011; Rivero, 2006; Calvari et al., 2005) y busca analizar a través de la cámara térmica, la incorporación de radiación infrarroja, en la cual, los detectores de cada pixel registran un valor único de temperatura.

La energía infrarroja es una parte del espectro electromagnético, el que incluye rayos gama, X, ultravioleta, visible, microondas y ondas de radio. Las diferentes bandas son definidas por las características de los valores de frecuencia o de su longitud de onda. Estos sensores remotos operan entre 8 y 14 μm , y son llamados también de onda larga (LV), dentro de la región del espectro electromagnético (Spampinato et al., 2011).

Esta técnica, de reciente utilización en el campo de la vulcanología, contribuye a la identificación y a la evolución de varios procesos volcánicos, como son: la actividad fumarólica, efusión y avance de flujos y domos de lava, emisiones volcánicas, flujos piroclásticos, entre otros. Además, ayuda a determinar la variación temporal y espacial de la temperatura de diferentes cuerpos, para poder relacionar las tasas de enfriamiento y de emisión de material volcánico (Harris & Rowland, Effusion rate controls on lava flow length and the role of heat loss: a review, 2009); como es el caso de trabajos en volcanes activos de Italia (Monte Etna, Vulcano y Stromboli), de Hawai (Kilohuea), en México (Colima), entre otros (Calvari et al., 2005; Harris et al., 2007; Spampinato, et al., 2011).

En Ecuador, esta herramienta ha sido aplicada exitosamente en el reconocimiento y delimitación de varios aspectos, tales como flujos de lava (Ramón & Vallejo, 2010),

acumulación de lavas, depósitos de flujos piroclásticos, material que ha rodado por los flancos del volcán y zonas o campos de fumarolas (Figura 3. 9.) alrededor del cráter y del cono volcánico. Ejemplos de similares reconocimientos se observan para el volcán El Reventador (Ramón & Vallejo, 2011), Tungurahua, Sangay y Guagua Pichincha, entre otros.

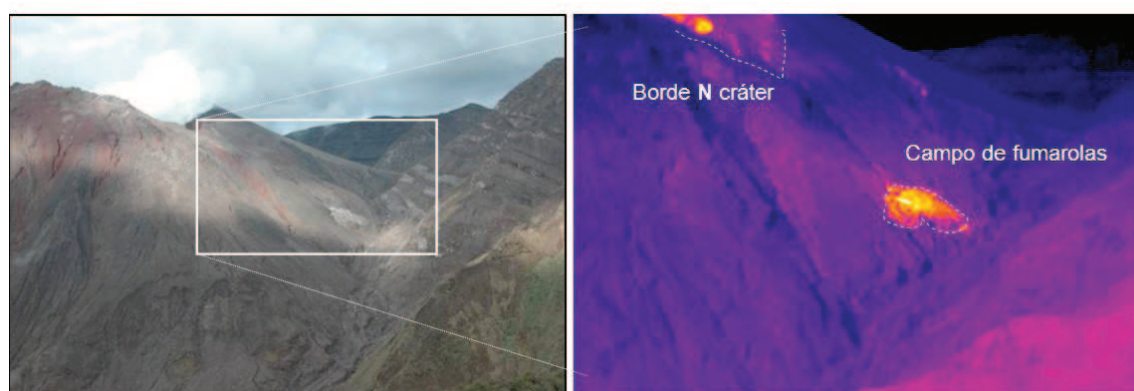


Figura 3. 9. Identificación de un campo de fumarolas hacia el flanco N del cono del edificio del volcán El Reventador el 19 de junio de 2005 (Fotografía e imagen térmica P. Ramón-IG EPN)

En el volcán El Reventador se han realizado regularmente sobrevuelos y visitas de campo entre los años 2002 a 2009 (Figura 3.8), en el que se dispone de imágenes térmicas, a excepción del año 2006.

3.1.4 MONITOREO SATELITAL

La información provista por los sensores satelitales, es en la actualidad, una herramienta clave en el monitoreo volcánico. Diferentes sensores a bordo de los satélites EOS, AQUA, TERRA y AURA, en sus diferentes órbitas, permiten conocer de manera regular las condiciones en las que se encuentra la atmósfera y la tierra (www.nasa.gov).

A través del monitoreo realizado por el Instituto Hawaiano de Geofísica y Planetología de la Universidad de Hawai (HIGP por sus siglas en inglés), se pueden detectar anomalías termales en los volcanes mediante el uso del algoritmo MODVOLC (Wright et al., 2004). Este algoritmo, identifica los puntos calientes (hot

spots), relacionados con erupciones volcánicas e incendios forestales (<http://modis.higp.hawaii.edu/>).

La NASA, por medio de diferentes sensores en los satélites EOS, monitorea las variaciones de varios parámetros volcánicos. Entre ellos, se destaca la detección de alertas termales, columnas de ceniza y emisiones de SO₂, como se describe a continuación.

3.1.4.1 Alertas termales (MODIS)

MODIS (Espectroradiómetro de Imágenes de Resolución Moderada, por sus siglas en inglés) es un instrumento clave a bordo de los satélites Terra y Aqua. Terra (EOS AM), orbita alrededor del planeta, recorriéndolo desde el norte hasta el sur, y atraviesa la zona ecuatorial en horas de la mañana; en tanto que el satélite AQUA (EOS PM), realiza su recorrido desde el sur hacia el norte, atravesando la zona ecuatorial en horas de la tarde. La frecuencia de recolección de datos para el mismo punto en la superficie de la Tierra es de 4 observaciones cada 48 horas y es adquirida a través de 36 bandas espectrales o grupos de longitudes de onda, con una resolución de 1 km por pixel (Flynn et al., 2002; Wright et al. 2005; Lyons et al., 2009).

MODVOLC es un algoritmo desarrollado en el Instituto de Geofísica y Geología Planetaria de Hawaii (HIGP), encargado de monitorear las anomalías volcánicas alrededor del mundo en más de 450 centros volcánicos. Para determinar las anomalías térmicas en los volcanes alrededor de todo el mundo, utiliza la diferencia entre la radiación de onda corta (4 μm) emitidas por depósitos volcánicos calientes (detectadas en las bandas 21 y 22) y la radiación de onda larga (11 μm, valor de fondo, banda 32) (Flynn et al., 2002; Wright et al. 2005; Lyons et al., 2009).

En el Ecuador, doce volcanes están incluidos dentro de esta red global de monitoreo: Cuicocha, Mojanda, Pululahua, Guagua Pichincha, Atacazo, Chacana, Antisana, Cotopaxi, Quilotoa, Reventador, Tungurahua, y Sangay; sin mencionar los volcanes

de Galápagos. Esta información es accesible a través de la página web: <http://modis.higp.hawaii.edu/cgi-bin/modis/modisnew.cgi>.

El mecanismo de funcionamiento cuando MODVOLC detecta una anomalía termal en un volcán, es representar de manera gráfica, en un mapa global, la ubicación y el número de alertas medidas. Esta información es contenida en un archivo de texto, que contiene 22 campos de información con los diferentes parámetros identificados. Se destaca el uso del dato registrado por las bandas 22 y 21, (<http://modis.higp.hawaii.edu>), sensibles a temperaturas de hasta $\sim 330^{\circ}\text{K}$ y $\sim 500^{\circ}\text{K}$, respectivamente.

3.1.4.2 Alertas de puntos calientes (HOTSPOTS-HIGP)

Las imágenes adquiridas para este propósito son obtenidas con intervalos de 15 minutos y actualizadas cada 10 a 30 minutos por los satélites geoestacionarios GOES 8, 9, 10 y 12; ubicado sobre el hemisferio occidental. Esto permite la observación de los puntos calientes casi en tiempo real, con las imágenes recolectadas y representadas en tres bandas espectrales diferentes. La Banda 1 corresponde a la porción visible del espectro, con longitudes de onda entre 0.55-0.75 μm , con una resolución de alrededor de 1 km. La Banda 2 corresponde a la parte del infrarrojo medio del espectro, con longitudes de onda de 3.80-4.00 μm y una resolución de 4 km. Por último, la Banda 4 corresponde a la porción del infrarrojo termal del espectro con longitudes de onda de 10.20-1.20 μm y a una resolución de 4 km (Figura 3.10).

La información de puntos calientes en el Ecuador, se incluyen dentro de la región Ecuador y Colombia, para la cual se disponen imágenes de manera continua desde agosto de 2002. Para facilitar la lectura y localización de un centro volcánico, se cuenta con un mapa guía (KEY), y dependiendo de la reflectancia de los diferentes objetos, se utiliza la combinación de las diferentes bandas espectrales (Bandas 1, 2 y

4), obteniéndose imágenes de tipo RGB, HOT, PROBABILITY, MWIR y LWIR (Figura 3.10.a-h), para facilitar la detección de las anomalías térmicas (Tomado de HIGP¹).

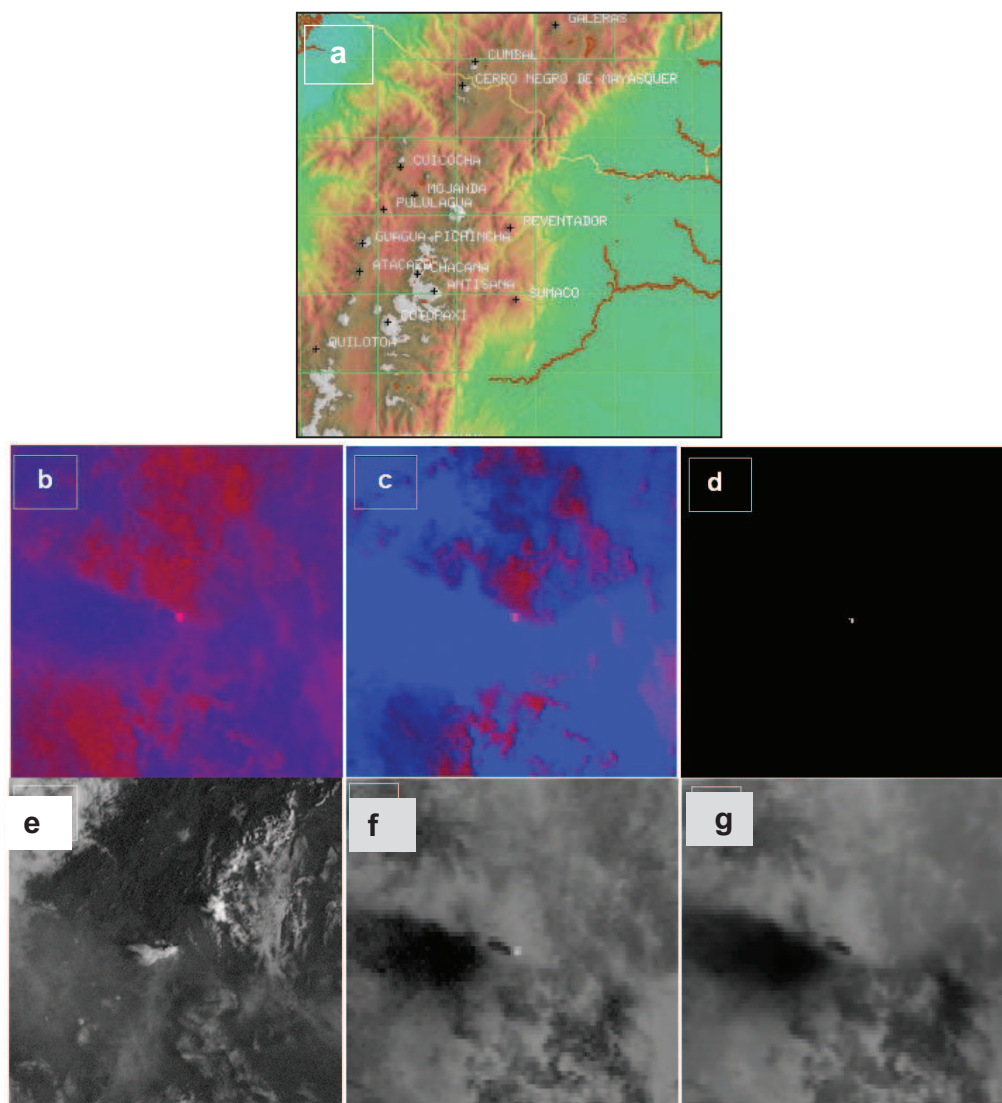


Figura 3. 10. Imágenes que combinan varios rangos infrarrojos para generar imágenes correspondientes a la emisión del 3 de noviembre de 2002.: a) HOT b) RGB; c) BAND; d) Probabilidad

¹ Webpage HIGP:

<http://goes.higp.hawaii.edu/cgiin/imageview64?zoom=1&xoffset=150&yoffset=150&xcenter=425&ycenter=507&pixrep=2&frametype1=5&frametype2=4&siteidx=36&dayidx=12&frameidx=17>¹

MWIR y e) Visible.; f) Probabilidad LWIR y g) Probabilidad VNIR (Tomado de HIGP²). La alerta termal corresponde al punto rojo.

Las principales limitantes para el óptimo funcionamiento de esta herramienta satelital son las condiciones climáticas, ya que si el área de interés presenta intensa nubosidad, es casi imposible la visualización con esta herramienta. El sector donde se encuentra el volcán El Reventador, tiene condiciones climáticas generalmente con permanente nubosidad y altas precipitaciones, que impiden la adquisición óptima de este tipo de imágenes.

3.1.4.3 Monitoreo global de ceniza volcánica (VAAC)

La Administración Nacional Oceánica y Atmosférica, (NOAA, por sus siglas en inglés), tiene a cargo el monitoreo satelital de la atmósfera, la tierra y los océanos. Dentro del área de monitoreo de la atmósfera, los avisos de la presencia de ceniza volcánica, se lo realiza a través de la VAAC (Volcano Ash Advisory Center). Ella es la encargada de identificar y localizar la distribución de las emisiones de ceniza producidas por cualquier volcán localizado dentro de su alcance. De esta manera se garantiza la seguridad en la aero-navegación alrededor del mundo. La cobertura se efectúa a nivel mundial a través de ocho sectores, y el Ecuador está localizado dentro del sector de Washington VAAC.

La información correspondiente se la obtiene a través del portal electrónico: <http://www.ssd.noaa.gov/VAAC/ARCH02/archive.html>. La información que genera y publica este organismo, incluye la fecha y hora de localización de la nube de ceniza (según el volcán), la dirección y velocidad de los vientos, su distribución y la dirección de movimiento de la columna de ceniza en la atmósfera y en el tiempo.

²Webpage HIGP:

<http://goes.higp.hawaii.edu/cgiin/imageview64?zoom=1&xoffset=150&yoffset=150&xcenter=425&ycenter=507&pixrep=2&frametype1=5&frametype2=4&siteidx=36&dayidx=12&frameidx=17>)²

3.1.4.4 Monitoreo global de dióxido de azufre (OMI)

El monitoreo satelital de dióxido de azufre se inicia con el análisis de las emisiones volcánicas a través del espectrómetro de mapeo de ozono total, TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer), en el que se registraron emisiones volcánicas de SO₂ durante su funcionamiento hasta 2005. Pero desde 2004, se implementa un nuevo sensor ultravioleta conocido como Instrumento de Monitoreo de Ozono (OMI, por sus siglas en inglés). Este sensor, es un espectrómetro ubicado a bordo del satélite AURA como parte del proyecto de la NASA llamado Sistema de Observación de la Tierra, EOS (Earth Observing System), el cual fue lanzado en julio de 2004 y empezó a recibir información a partir de agosto de 2004.

OMI, a través de su página web de monitoreo global de dióxido de azufre (Sulfur Dioxide Monitoring Home Page, de la NASA: <http://so2.gsfc.nasa.gov/>), determina treinta y dos regiones alrededor del mundo entre las latitudes aproximadas de 71°N hasta casi los 55°S y permiten reconocer tres tipos de fuentes: SO₂ volcánico diario, contaminación diaria y contaminación a largo plazo.

En el caso del Ecuador, el programa OMI considera a los volcanes Reventador, Guagua Pichincha, Tungurahua y Sangay como fuentes de SO₂ diario. OMI analiza la atmósfera mediante el uso de un espectrómetro de absorción óptica diferencial, DOAS (Differential Optical Absorption Spectrometer) para estimar la densidad de las columnas verticales de SO₂ (Slant Column Density, SCD) (Morales, 2011; Carn, et al., 2003). Esta herramienta proporciona una óptima combinación de la resolución temporal, espectral y espacial para medir las emisiones de SO₂ desde el espacio, en erupciones y durante la desgasificación pasiva de los volcanes (Morales, 2011).

3.1.4.5 Sensores Remotos - Imágenes ASTER

Los sensores remotos como las imágenes ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), constituyen un buen referente para monitorear los cambios morfológicos que se producen en la superficie terrestre (Lillesand et al., 2007). Para este trabajo, se han utilizado imágenes con resolución de 15 y 30m,

disponibles en Aster Volcano Archive (AVA), a través del portal electrónico: <http://ava.jpl.nasa.gov/ava.asp>. El único material con poca nubosidad, corresponde a las imágenes registradas el 18/11/2003, 23/11/2005 y 09/09/2010. Estas imágenes ayudaron a realizar la delimitación cartografía de los flujos de lava, para las zonas de difícil acceso en el campo.

Las imágenes ASTER descargadas desde AVA, son de tipo NVIR

3.2 METODOLOGÍA Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN EXISTENTE

3.2.1 INFORMACIÓN SÍSMICA

El proceso de identificación, clasificación, análisis y conteo de las diferentes señales que se registraban en las estaciones sísmicas ubicadas alrededor del volcán, es efectuado de manera permanente por técnicos del IG EPN. Esta información ha servido de base para formar la Base estadística de los datos de sismicidad diaria del volcán El Reventador.

El presente trabajo, fundamentalmente ha utilizado la información de la base de sismicidad estadística durante 2618 días, con datos desde el 18 de febrero de 2003 hasta el 31 de diciembre de 2009 (Figura 3.11). Adicionalmente, se efectuó la revisión de los sismogramas diarios entre los años 2003 a 2010 y 2012 (Enero - Marzo) para establecer una relación entre este tipo de datos y las manifestaciones superficiales, pero debido a que no se cuentan con similares condiciones eruptivas similares a las de épocas anteriores y a que están fuera del alcance de este trabajo, estos datos no se registran en este escrito.

Durante la revisión de los datos, se establecieron algunas limitantes relacionadas con los procedimientos rutinarios del IG EPN, se mencionan: a) la clasificación y conteo de dichos eventos sísmicos están sujetos al criterio del personal técnico encargado de realizar para esta tarea; y, b) los datos estadísticos han sido continuos, salvo casos de mal funcionamiento de la instrumentación.

En la Figura 3.11 se muestra un histograma con las estadísticas de la ocurrencia de los eventos sísmicos en el volcán El Reventador durante el período total de estudio de este trabajo (2003-2009).

El análisis de estos datos, permitió determinar asociaciones y características de las señales sísmicas que corresponderán a la actividad interna. Adicionalmente, se representaron los campos que contaron con información de las manifestaciones superficiales identificadas directamente, por el personal del IG EPN e información satelital respecto al proceso eruptivo del volcán durante el período 2003-2009.

Parte del análisis de este trabajo, fue el reconocimiento de los valores máximos o “picos” de actividad, correspondientes al mayor número de eventos sísmicos registrados en un día, durante el período indicado.

Es necesario aclarar que este tipo de datos estadísticos, no permite emitir información real del proceso eruptivo, pues eso puede ser posible cuando se cuentan con datos de parámetros como la localización, la magnitud de energía liberada por un evento, entre otros.

Bajo esta aclaración, este trabajo asume los posibles mecanismos desarrollados en el volcán, es decir, se los asocia a con eventos de fracturación y/o movilización de fluidos al interior del edificio volcánico. Por ello, se distinguen intervalos de actividad sísmica sugiriendo un mecanismo predominante (McNutt, 2002, 2005). Esta premisa permite identificar que en el año 2003, la principal actividad sísmica identificada fue el incremento en la ocurrencia de eventos de tipo VT, que se presume, corresponderían al proceso de fracturamiento de rocas.

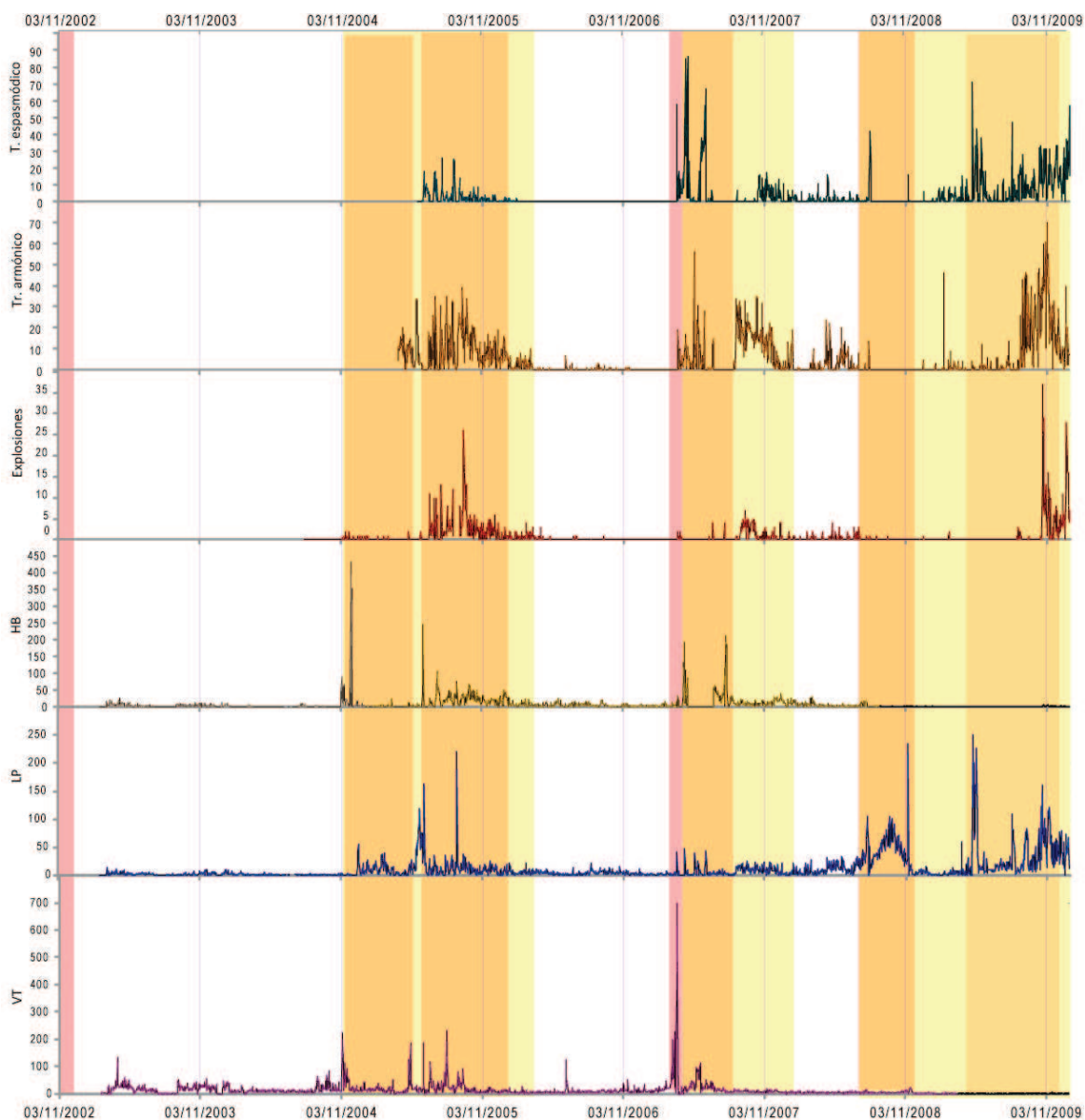


Figura 3. 11. Estadísticas diarias con el número de eventos sísmicos de tipo volcano-tectónico (VT), Largo Período (LP), Híbridos (HB), Explosiones, Tremor Armónico y Tremor Espasmódico ocurridos en el volcán El Reventador, entre el 18 de febrero de 2003 al 31 de diciembre de 2009 (IG). Las áreas coloreadas muestran los periodos durante los cuales se dispone de monitoreo satelital: en amarillo, emisiones de dióxido de azufre de OMI; en rosado, las únicas alertas satelitales registradas en esa etapa y corresponden a la alertas termal de MODVOLC; y en naranja, cuando existe monitoreo satelital contemporáneo.

Esta numerosa ocurrencia de eventos estuvo presente en el volcán, desde el 2003 hasta el 2005 (Figura 3.12), previo a la emisión de los flujos de Lava 3, 4, 5 y 6;

también antes de la salida de la Lava 8 y 9 en 2007, aunque disminuyeron drásticamente en 2009.

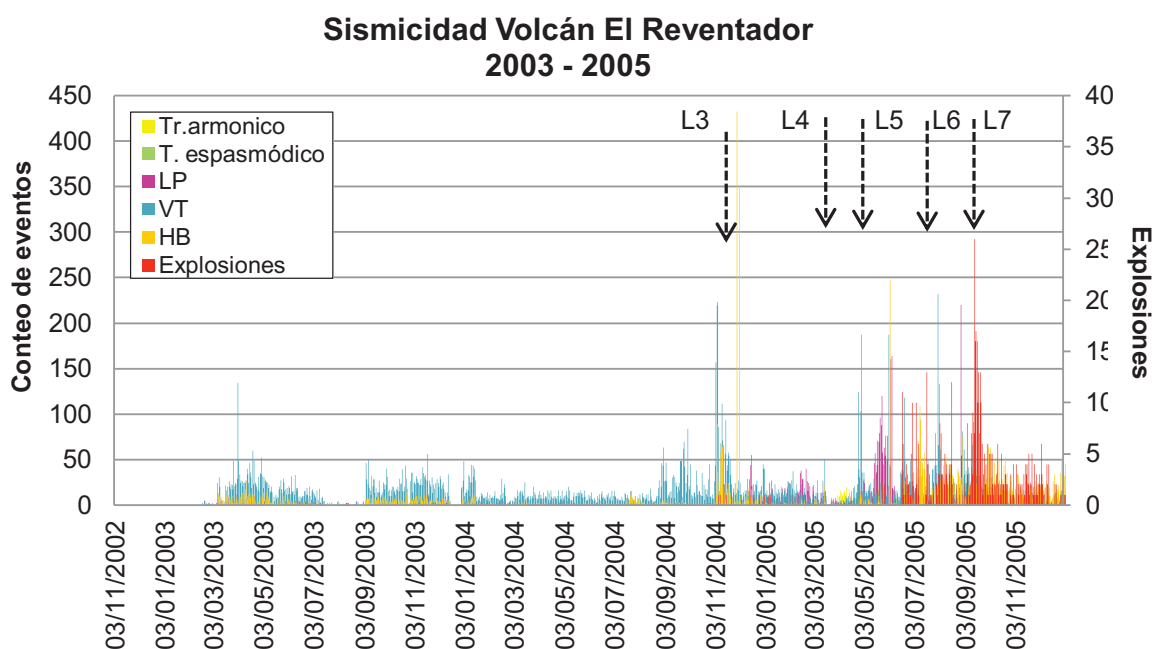


Figura 3. 12. Estadísticas del número de eventos sísmicos en el volcán El Reventador entre 2003 a 2006.

Este tipo de eventos, han sido descritos en varios procesos eruptivos. En los que la producción de este tipo de eventos han sido asociados a inyecciones de magma que al ascender, produjeron la fracturación de las rocas, de modo que actúan como sismicidad precursora, por ejemplo, en los volcanes Monte St. Helens (1980, 2004-2005), Agustín (1970-2007), Merapi (2012) o Soufriere Hills (1996) (Endo et al., 1981; White, et al., 1998; Power, et al., 2006; Power & Lalla, 2006; Zobin et al., 2008; Loughlin, et al., 2010; Costa, et al., 2012).

Otro aspecto destacado, es la ocurrencia de eventos sísmicos de tipo HB, asociados a la formación de domos, como el caso del Soufrière Hills (Montserrat), Monte St. Helens, Agustín y Pinatubo, los cuales tuvieron correlación entre este tipo de señales con el proceso de extrusión de material emitido (White, et al., 1998). En el caso del volcán El Reventador, los eventos HB aparentemente, presentan un dominio de la componente de fracturación, (Figura 3.12 y 3.13), pues la ocurrencia de estas

señales sísmicas es proporcional con la ocurrencia de eventos sísmicos de tipo VT. Esto es evidencia en los datos de sismicidad en 2003, 2005 y 2007 con el incremento de eventos tipo VT e HB, mientras que en 2009, se observa que ambos eventos disminuyen drásticamente.

La ocurrencia de eventos LP, seguidos de la ocurrencia de eventos VT, ha sido frecuente en el volcán El Reventador. Esta tendencia es similar a lo ocurrido entre mayo y junio de 2005 (Figura 3.12), enero a julio de 2008 (Figura 3.13), y entre mayo a diciembre 2009 (Figura 3.14). Este comportamiento es coherente con el mecanismo de circulación o movilización de los fluidos luego de producida la fracturación. Este proceso fue descrito para erupciones como la ocurrida en el Monte St. Helens en 1980, donde se establecieron dos tipos de señales sísmicas predominantes, entre apenas el 20 de marzo y el 18 de mayo con la ocurrencia de señales sísmicas tipo VT y subsecuentemente de LP's (Endo, et al., 1981).

Un importante componente del proceso eruptivo observado desde 2002 hasta 2009, lo constituyen la ocurrencia de explosiones. En general, en el volcán El Reventador se han registrado explosiones durante y después de la salida de lavas. Este proceso es asociado con el incremento de eventos LP, como ocurrió en el volcán Novarupta (Troncoso, 2004; Adams et al., 2006). En otros casos, como en el de los volcanes Guagua Pichincha (1999) y Redoubt (1989) la actividad eruptiva explosiva, estuvo precedido por eventos tipo LP (Chouet et al., 1994; Gómez et al., 1999; Villagomez, 2000). Este comportamiento ha sido predominante en el volcán El Reventador a partir de agosto y continuó en diciembre de 2009 (Figura 3.14). La aparente movilización del material magmático fragmentado durante el rápido ascenso por el conducto volcánico, sería el proceso productor asociado a la actividad explosiva, como lo manifiesta Zobin et al., (2008) en el caso del volcán Colima (Mexico). Sin embargo, las propuestas establecidas por la dinámica de fluidos, sugiere un lapso de liberación de la presión al interior de las burbujas de magma que se van formando de manera continua, y que a su vez representan la desgasificación y la salida de volátiles (Gonnermann & Manga, 2007).

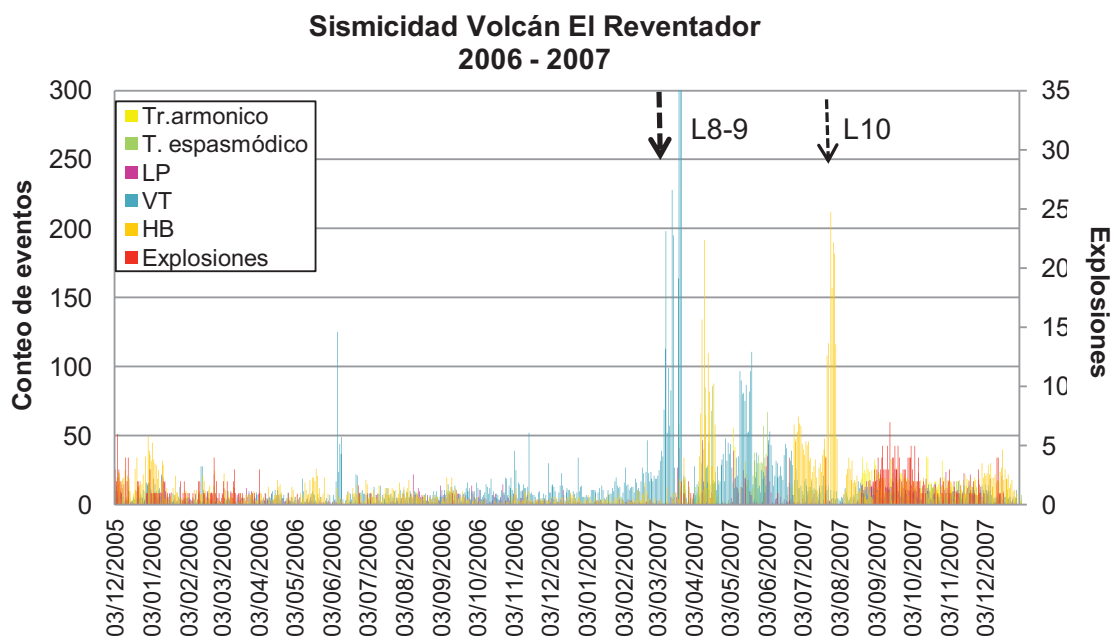


Figura 3. 13. Estadísticas del número de eventos sísmicos en el volcán El Reventador entre 2006 a 2007. La escala derecha muestra solo las explosiones.

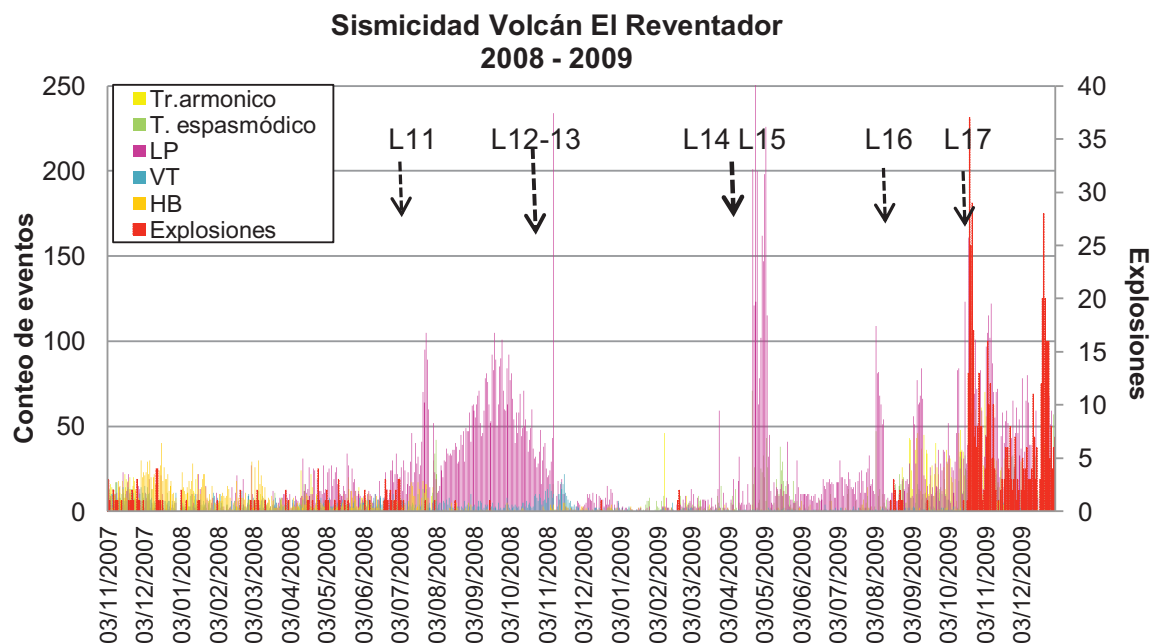


Figura 3. 14. Estadísticas del número de eventos sísmicos en el volcán El Reventador entre 2008 a 2009. La escala derecha muestra solo las explosiones.

Por lo tanto, se distinguen picos de actividad explosivo durante los meses de noviembre de 2004 hasta septiembre de 2005; entre marzo a septiembre de 2007 y desde agosto de 2008 a diciembre de 2009; en esta etapa salta a la vista el considerable incremento de eventos de tipo LP y explosiones (Figura 3.14).

3.2.2 INFORMACIÓN DE LA ACTIVIDAD SUPERFICIAL: OBSERVACIÓN DIRECTA Y SATELITAL

3.2.2.1. Alertas satelitales termales y de emisiones de ceniza

Los datos satelitales obtenidos a través de las herramientas satelitales Hot Spots (Hawai), MODVOLC y VAAC, han sido muy útiles para determinar las etapas de actividad eruptiva intensa, moderada o ausente en la superficial. La información que proporcionan las herramientas satelitales a través de registros diarios, desde el 3 de noviembre de 2002, se extienden hasta el 31 de diciembre de 2009 (ANEXOS 4, 5 y 6). Dentro del análisis e interpretación de estos datos, se hacen las siguientes consideraciones:

- Las imágenes obtenidas, tanto por MODVOLC y Hotspots (Hawai), son receptadas por el mismo satélite, pero en diferentes rangos de bandas infrarrojas. Por este motivo, la coincidencia entre estos dos datos genera una única detección bajo el principio de reconocimiento de anomalías térmicas (Wright et al., 2004; Lyons et al., 2009), y que son disponibles para todo el período 2002-2009.
- MODVOLC, permite considerar dos rangos de temperatura receptadas por los sensores: uno de 300°K y otro de 500°K. Cuando estos sensores registran valores que superan sus respectivos límites, se muestran como valores anómalos que indican la saturación del sensor. Esto, coincide mayoritariamente con otras manifestaciones superficiales o instrumentales, de modo que se puede asociar con una continua emisión de material incandescente en el volcán (Wright et al., 2004).
- El número de pixeles, en el caso en que se tengan varias medidas de uno o varios sitios y a una misma hora, puede asociarse a intensa actividad

superficial relacionada con emisión de material incandescente (Flynn et al., 2002), aunque tal vez podría reducirse el número de recepciones debido a las condiciones climáticas.

En el caso en el que se cuente con alertas de emisiones de ceniza, estos datos son aceptados e interpretados como un fenómeno que está directamente asociado a la actividad explosiva (Wassermann, 2011).

Es por ello, que se consideran parámetros que pueden restar veracidad a este tipo de manifestación eruptiva; entre ellos:

- Los reportes emitidos por la VAAC, en algunos casos, se asocian a columnas de ceniza identificadas desde los sensores satelitales, que a su vez pueden o no, coincidir con reportes de un observador en tierra. Generalmente, cuando las emisiones superan los 2 km de altura sobre el cráter. Debido a ello, si se presentan emisiones de ceniza menores a 1km, difícilmente podrán ser identificadas. Adicionalmente, no se deben descartar las condiciones de intensa nubosidad.
- La información respectiva, se encuentra disponible y ha sido considerada para el período 2002 a 2009; estando sujeta a las condiciones climáticas de la región.
- Los procesos de emisión de ceniza, estarán relacionados a procesos explosivos y efusivos, pues se denota la contemporaneidad entre estos datos y los correspondientes a las alertas termales (ANEXO 1 y 2).

Finalmente, se ha determinado episodios con ocurrencia de emisiones de ceniza en noviembre de 2002, diciembre de 2004 y enero de 2005, desde abril a noviembre de 2005, de marzo a julio de 2007, desde julio a noviembre de 2008 y desde abril hasta noviembre de 2009, como se muestra en la Figura 3.15. Dichos episodios describen ocurrencias frecuentes de emisión de ceniza en el tiempo.

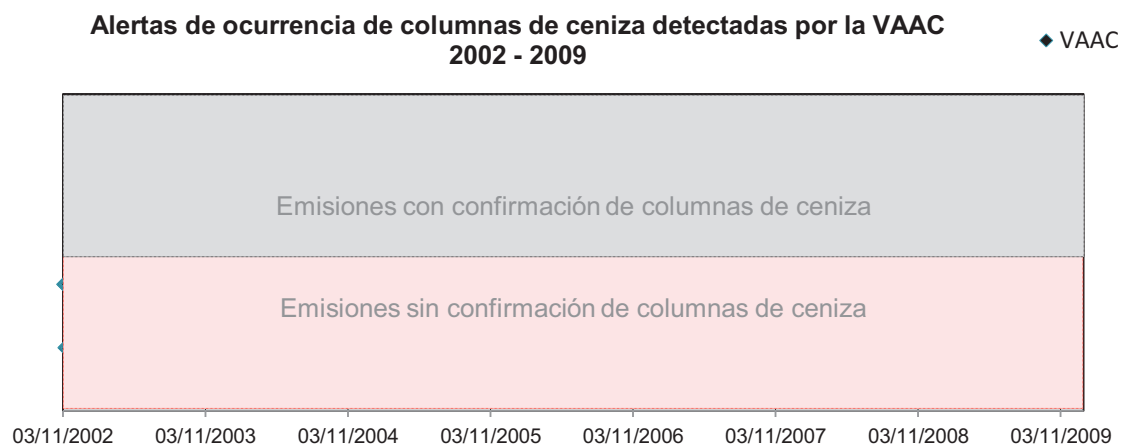


Figura 3. 15. Emisiones confirmadas y no confirmadas de ceniza reportadas por la VAAC entre 2002 a 2009 producidas en el volcán El Reventador.

3.2.2.2 Emisiones de SO₂ detectados por OMI

Las imágenes de OMI y TOMS son las herramientas usadas para el monitoreo de las emisiones de SO₂. Las imágenes de OMI, muestran imágenes que representan la correspondencia entre cada píxel y el valor de la densidad de columna vertical de SO₂ y son expresadas en unidades Dobson (DU). Estas unidades corresponden al espesor hipotético que tendría una capa con todo el SO₂ emitido por un volcán hacia la atmósfera en condiciones de la temperatura y presión estándares (S. Arellano, com. pers.).

La información obtenida para el sector del volcán El Reventador, consta dentro del área en la región denominada Ecuador, y comprende parte del territorio norte de Sudamérica (Figura 3.16.a), dentro de la que se considera la región del Ecuador continental. Esta incluye a los volcanes Cayambe, Reventador, Guagua Pichincha, Cotopaxi, Tungurahua y Sangay (Figura 3.16.b).

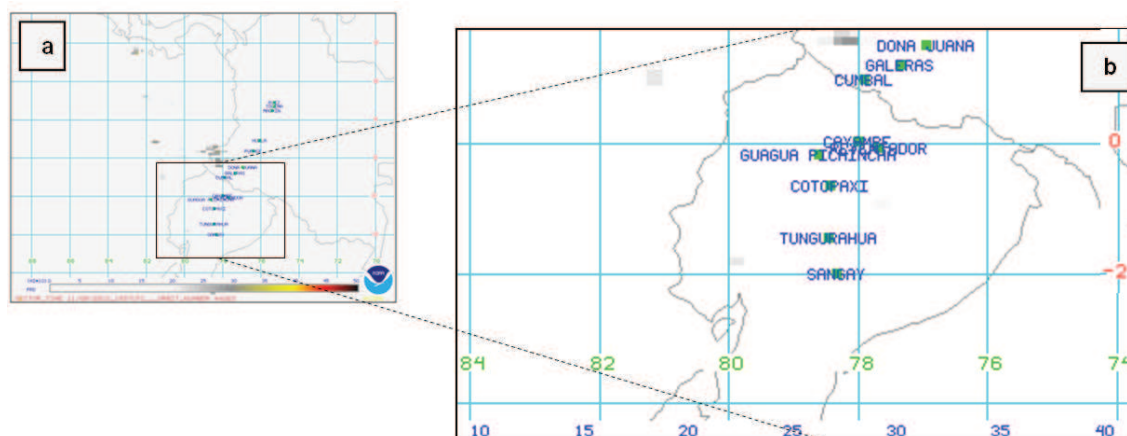


Figura 3. 16. Imágenes esquemáticas de: a) Sector correspondiente a la región Ecuador, donde se muestran también volcanes de Ecuador y Colombia, al noroccidente de Sudamérica; b) Los volcanes ecuatorianos monitoreados por NOAA, de norte a sur: Cayambe, Reventador, Guagua Pichincha, Cotopaxi, Tungurahua y Sangay. (Tomado de OMI³).

Las imágenes publicadas diariamente en la página web de OMI, permiten estimar los valores más representativos de la intensidad de las emisiones de SO₂ provenientes del volcán El Reventador. Es usualmente razonable asumir que lo que el OMI observa cada día corresponde a lo emitido durante todo el último día, es decir que el viento no ha transportado la pluma fuera del área de observación (ni muestra emisiones de más de un día) y que no ha habido reacciones químicas o deposición, etc. que modifiquen los contenidos de SO₂ (S. Arellano, com. pers.).

Sin embargo, hay numerosos factores que afectan esta interpretación de datos.

Es necesario considerar que las concentraciones de SO₂ cambian en el tiempo: si a la hora de medición del satélite, la emisión estuvo más débil; la dirección del viento que puede variar entre 5 a 15 nudos y movilizar los gases entre ~220-670 km en 24 horas (Carn et al., 2008); la permanencia de los gases en la atmósfera, la densa o ligera presencia de nubosidad, la intensidad de la radiación, la altura a la que se pueden presentar las nubes y otras condiciones meteorológicas también van a determinar una buena o mala capacidad de producir dispersión múltiple, absorción u otros procesos asociados a transporte de radiación (S. Arellano, 2012. Com. pers.).

³Web page: <http://so2.gsfc.nasa.gov>

Otra consideración importante es la influencia que ejercen otros centros volcánicos de la región. En el caso del sector de El Reventador, puede tener influencia directa por las fuertes emisiones del volcán Galeras en Colombia (Figura 3.17). Sin dejar de lado factores locales, el comportamiento de las plumas emitidas por el volcán, con frecuencia, no supera el nivel del cráter, aunque también alcanzan alturas de ~ 4 km.

Asumiendo correcciones básicas, para obtener la masa total de SO₂ representada en una imagen de OMI, se suman las DU de todos los píxeles en la imagen de acuerdo a la escala de color (obteniendo una cantidad en DU*m²) y finalmente, multiplicando este valor por el factor de conversión indicado (transformar DU a g/m² y 1 ton=10⁶g).

Este procedimiento nos permite estimar el tonelaje emitido de SO₂ para el período 2002 a 2009, de modo que se pueda identificar etapas de desgasificación observada en el volcán El Reventador.

Las consideraciones establecidas para la interpretación, se indica a continuación:

- La información disponible en el portal de monitoreo global de dióxido de azufre, contiene datos diarios: 1) día, mes, año, hora; corresponden a la toma de la imagen más representativa del día, expresado en tiempo universal (UT); 2) medidas de masa en kt, área en km²; 3) una escala de color variable de SO₂ que corresponde al valor máximo medido en unidades Dobson (DU); y 4) datos de hora promedio, latitud y longitud (Figura 3.17.).

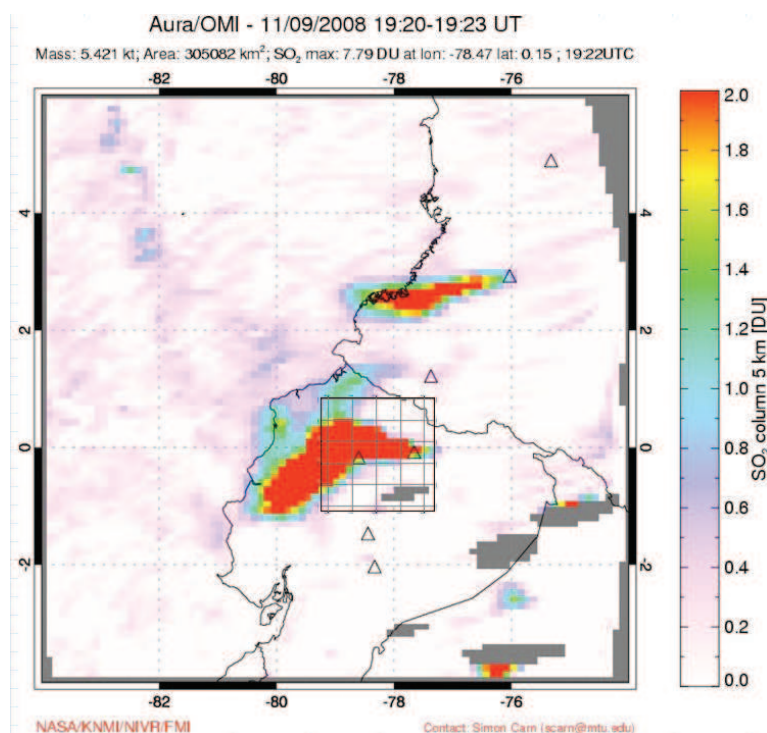


Figura 3. 17. Imagen generada por OMI el 11 de septiembre de 2008 donde se muestra el área de distribución para las emisiones de SO₂ del volcán El Reventador y la influencia del centro volcánico Galeras en el valor de la masa total de la imagen, además de la grilla equivalente a 2500 km² (Tomado de OMI⁴).

- Las imágenes para el Ecuador están disponibles a partir de 2007, y para complementar la información de este trabajo, se consideró el trabajo de Carn et al., (2008), de modo que al menos se conozcan las emisiones máximas de SO₂ durante el período septiembre 2004 a septiembre 2006.
- No se toman en cuenta las imágenes de TOMS correspondientes al 2002 y al 2003, debido a que no hay valores referentes a la concentración de SO₂.
- Las medidas que se han sido utilizadas en la interpretación de procesos asociados a la desgasificación, son únicamente aquellas cuyos valores de concentración en DU, es mayor 1, considerando la escala gráfica para cada imagen publicada por OMI.
- Propia de cada imagen, la escala gráfica se ajusta respecto al valor correspondiente a la masa de SO₂ emitido para ese día y expresado en kt. Así

⁴ Página web: <http://so2.gsfc.nasa.gov/>

mismo, las concentraciones se analizan respecto al valor máximo de SO₂ (en DU) reportado por OMI representado con la masa total dentro de toda la región Ecuador.

Estos datos, al ser representados y correlacionados con los otros datos, han permitido interpretar y diferenciar entre etapas eruptivas y no eruptivas, basados en el carácter de la desgasificación observada para el volcán (Morales, 2011). La interpretación de lo registrado en las imágenes de OMI respecto a las emisiones de SO₂ producidas por el volcán El Reventador, propone una clasificación cuantitativa basada en los valores observados en la escala gráfica y en la relación del tonelaje estimado. Este último, determinado en función de la máxima concentración de la masa de SO₂ en DU sobre la zona del volcán y el área de cobertura total en las imágenes de OMI, para establecer una relación entre dichos valores⁵ desde 2004 hasta 2009 (Figura 3.18.).

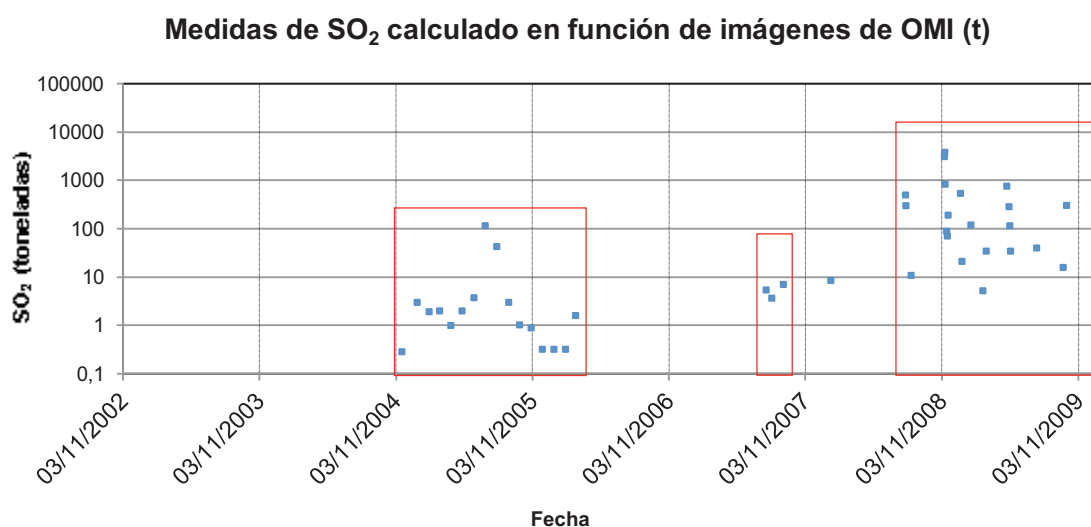


Figura 3. 18. Tonelaje diario de SO₂ determinado entre 2002 a 2009 en base a las imágenes de OMI. Datos obtenidos a partir de 2007 a 2009. Los recuadros representan tres periodos de desgasificación.

⁵ La ecuación $M=(C_{real} \cdot A)/g$; donde las masas de SO₂ (M), la concentración de SO₂ (C_{real}) establecida para el área de interés (A) y el factor de conversión g asumiendo el comportamiento homogéneo de la columna de emisión (S. Arellano, com. pers.) permite determinar una masa de SO₂ en función de la concentración medida en DU.

En base a ello, se proponen tres niveles: Emisiones a) Moderadas (0.1 a 1 t), b) Fuertes (1 a 100 t) y c) Muy Fuertes (>100 t). (ANEXO 6).

Para los datos propuestos y representados de la Figura 3.18, se plantean tres etapas en las que se tienen emisiones considerables de SO₂, posiblemente relacionado a intensa desgasificación volcánica. Es por ello que, para los casos en los que se registran importantes valores de emisión de gases y a altas tasas de emisión de SO₂, es factible interpretar esta información como la ocurrencia de procesos magmáticos que ocurren en los sistemas volcánicos, que actúan como indicadores de erupciones volcánicas (Arellano et al., 2008; Zobin et al., 2008; Morales, 2011).

En el caso del volcán El Reventador, las etapas de desgasificación observadas por los sensores de OMI, al ser comparadas con las estadísticas sísmicas, pueden asociarse al proceso de movilización de fluidos. Debido a las manifestaciones superficiales asociadas a la emisión de gases y vapor de agua, o a la posible acumulación de lavas en el cráter del volcán previo al descenso de los flujos de lava. Esto es considerado según varias observaciones en fotografías e imágenes térmicas y satelitales disponibles, es factible asumir una fuerte desgasificación para las etapas: 1) entre noviembre de 2004 a mayo de 2005; 2) septiembre a octubre de 2007 y 3) agosto de 2008 a noviembre de 2009.

3.2.2.3 Registros visuales, fotográficos, termográficos y de sensores remotos

Los registros visuales son muy importantes en la descripción cronológica del proceso eruptivo en el volcán El Reventador, en especial, para la descripción de la emisión de los flujos de lava.

En primer lugar, los datos fotográficos, térmicos e imágenes ASTER han permitido identificar y delimitar varios de los flujos de lava que descendieron por los flancos sur y norte del volcán (Figura 3.19), tal como lo presentó Vallejo (2009), que identificó 17 flujos de lava que habían descendido desde 2002 hasta 2009 y pudo obtener así una primera estimación de los parámetros geométricos (área, espesor, volumen) de cada uno de los flujos emitidos en el período mencionado.

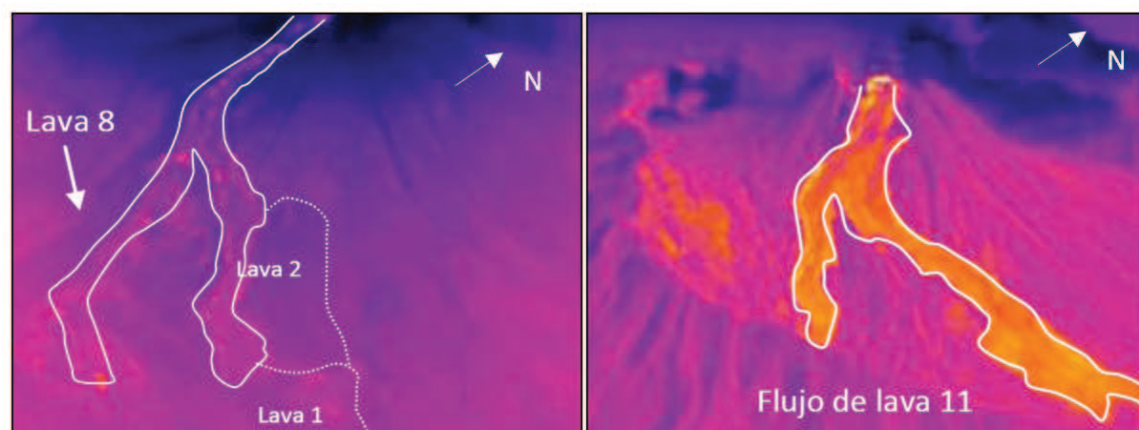


Figura 3. 19. Ejemplo de las imágenes térmicas utilizadas en la delimitación de los flujos de lava del volcán El Reventador (Tomado de Vallejo, 2009).

Por lo tanto, este trabajo busca precisar y mejorar dichos valores geométricos a través de trabajo de campo (utilizando el único mapa topográfico disponible para el área, a escala 1:50000 - IGM) e imágenes ASTER ortoreferenciadas y disponibles (AVA⁶), que permiten delimitar los flujos de lava sobre el terreno. Estas imágenes tiene una resolución de entre 30 metros (SWIR⁶) y 15 metros (Visual⁶ y VNIR⁶), hacen que la superficie esté sujeta a considerar un rango de error estándar de 15-30 m, y que al considerarlos dentro de la escala del mapa (1:25000), no representa grandes márgenes de error. La base topográfica sobre la que se representan los flujos de lava, es el modelo de elevación digital (DEM), de resolución 30x30 m por pixel, propiedad del IG EPN.

Estas herramientas ayudan a mejorar la georreferenciación de los flujos de lava, complementando el trabajo de Vallejo (2009).

3.2.2.3 Campañas de campo - Volcán El Reventador (2012)

Es importante destacar el difícil acceso que hay hacia el sector del volcán El Reventador. Las campañas de campo, se realizaron en los meses de junio y se localizaron hacia el sector del borde norte de la caldera, y en el mes de septiembre de 2012, se realizó el trabajo de campo hacia el flanco sur de la caldera. Las

⁶ AVA: Tipos de Bandas de las imágenes ASTER. http://ava.jpl.nasa.gov/about_imagery.php

condiciones climáticas fueron variadas, presentando días que iban desde soleados y despejados hasta nublados y lluviosos.

Los recorridos y puntos de control obtenidos, constan en el ANEXO 1, junto a las coordenadas respectivas. El trabajo de campo, propiamente se desarrolló al interior de la caldera del volcán El Reventador, en los flujos de lava accesibles generados entre 2002 a 2009. El mismo, estuvo principalmente dirigido con miras a complementar y mejorar la cartografía anterior. Para ello, se llevaron a cabo los siguientes objetivos:

1. Determinar puntos de control alrededor del complejo volcánico El Reventador.

Esta información permitió identificar puntos en el campo, para posteriormente compararlas dentro de las imágenes ASTER. Esto se llevó a cabo para las diferentes rutas durante el acceso hacia el sector norte y sur de la caldera y en los flujos de lava accesibles.

El mapa, resultado de este trabajo, se muestra hacia el final del texto de este trabajo y un esquema en la Figura 3.27.

2. Realizar el recorrido a lo largo de los bordes y de los frentes de los flujos de lava disponibles y accesibles.

En el sector norte: Alrededor de los flujos de lava localizados casi al borde norte de la caldera del volcán (Figuras 3.20, 3.21 y 3.22)



Figura 3. 20. Vista desde el norte de la caldera del volcán. Flanco norte con las Lavas 9 y 13 (Fotografía tomada por F. Naranjo IG EPN).

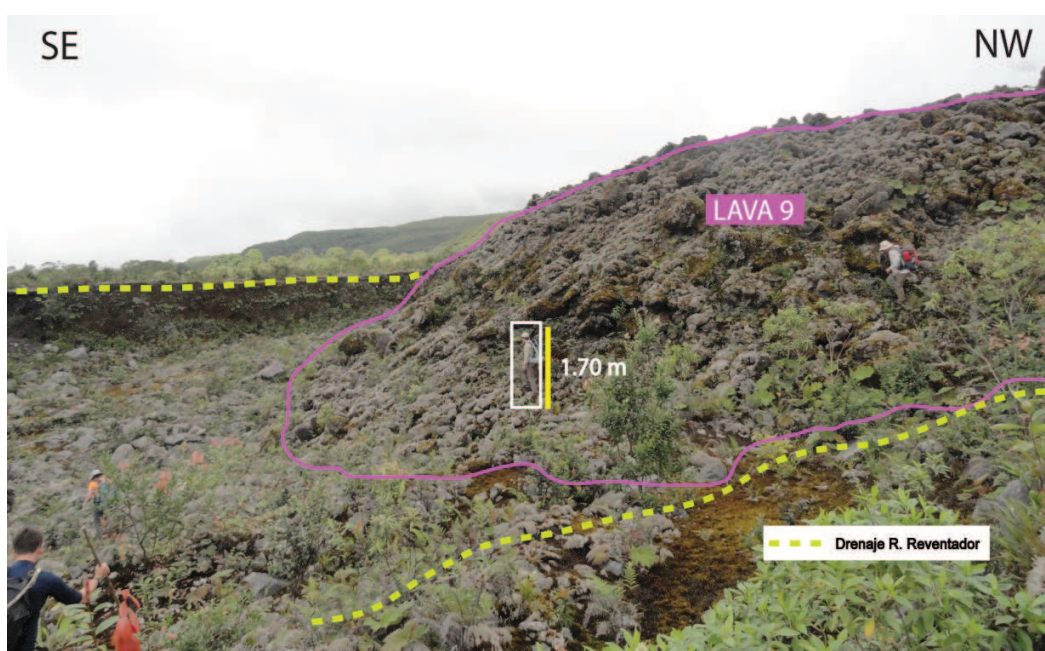


Figura 3. 21. Vista tomada el 10 de junio de 2012 desde la margen izquierda del drenaje del Río Reventador, donde yace el frente de la Lava 9. (Fotografía tomada por F. Naranjo. IG EPN).

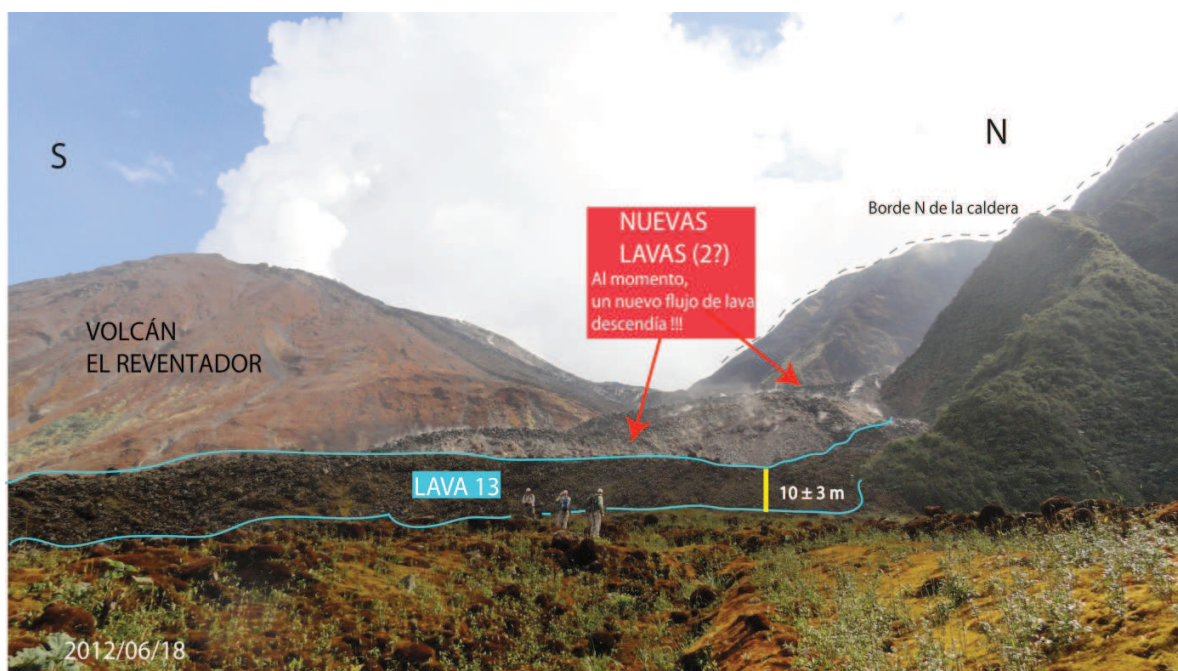


Figura 3. 22. Vista desde la margen izquierda del drenaje del Río Reventador, hacia el borde norte de los flujos de lava 8 y 13. Al momento, nuevo flujo de lava sobreyaciendo los flujos anteriores (Fotografía F. Naranjo. IG EPN).

En el sector sur: Al pie de los flujos de lava, en el sector SE, al bordear y cruzar sobre los flujos de lava en condiciones de nubosidad y lloviznas intermitentes (Figuras 3.23, 3.24 y 3.25).

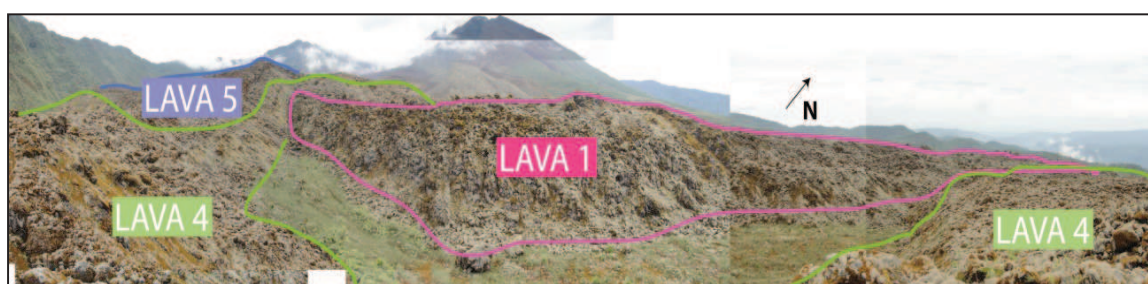


Figura 3. 23. Vista panorámica al contacto entre las Lavas 1 y 4, durante el trabajo de campo el 20 de septiembre de 2012, desde donde se realizaron varias mediciones en los flujos de lava (Fotografía F. Naranjo. IG EPN).

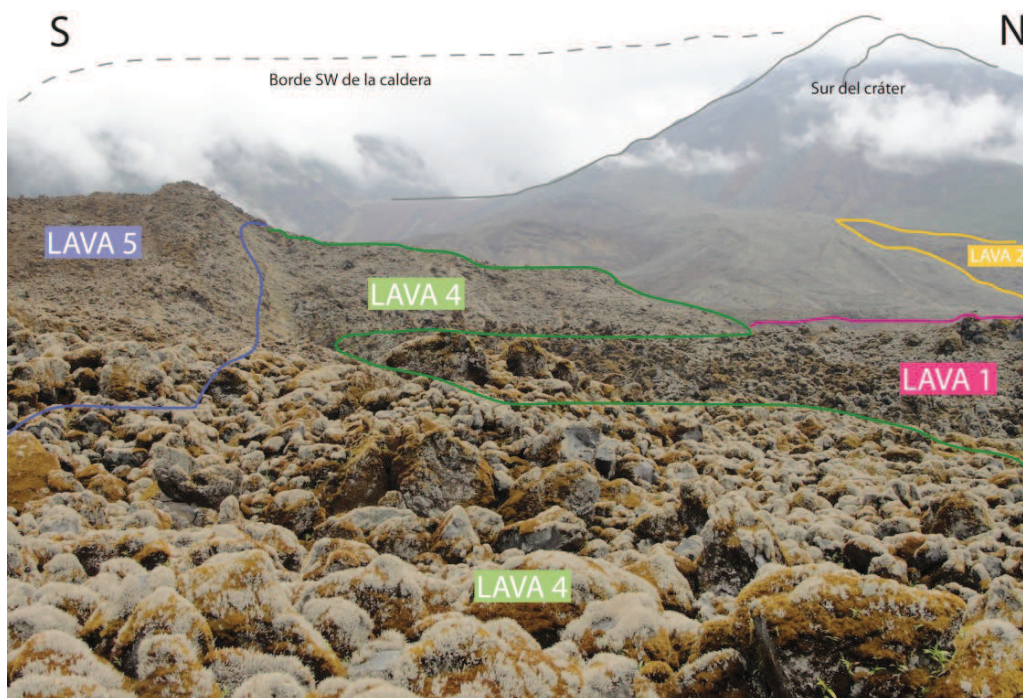


Figura 3. 24. Vista desde el tope de la Lava 4, a N320° desde donde se encuentra el cono activo (Fotografía F. Naranjo. IG EPN).

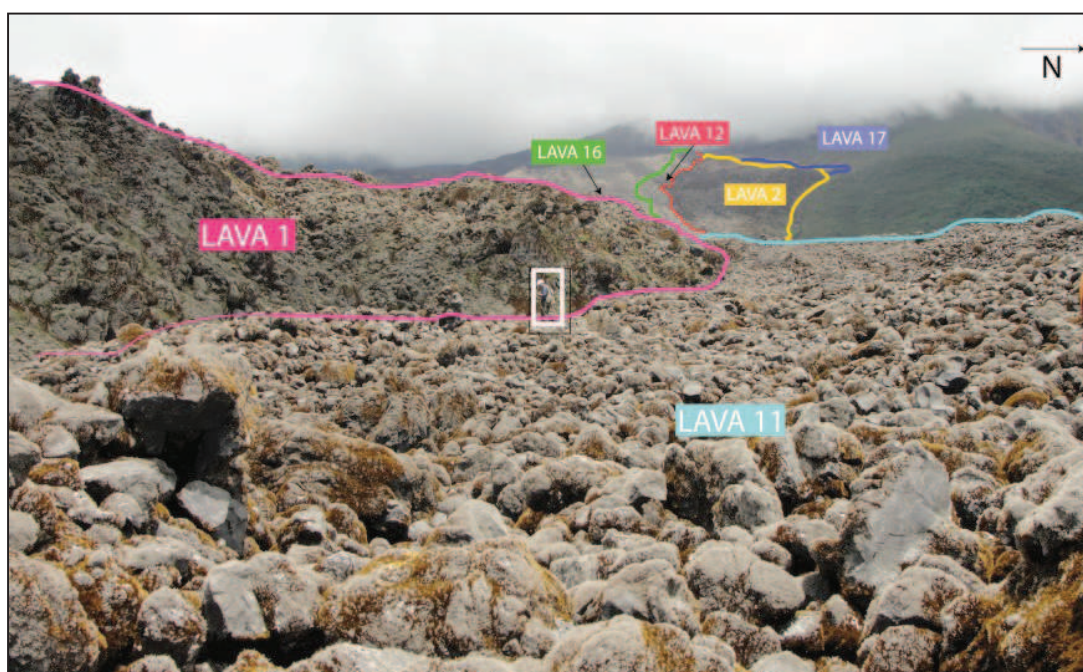


Figura 3. 25. Vista desde el frente de la Lava 11 en dirección al viento por donde fue emitido el flujo de Lava 2. (Fotografía F. Naranjo).

3. La medición de los espesores en varios puntos de los flujos, a través del uso de un distanciómetro.

En pocos casos, para varias lavas que eran difíciles de acceder, se utilizó un distanciómetro digital, con el cual se efectuaron mediciones desde un sitio con un campo de visibilidad del cuerpo rocoso medible (flujos de lava) (Figura 3.22). El procedimiento en el campo y el registro de estos datos se los encuentra en el Manual del usuario LTI Truepulse 260/360B (2009). Sin embargo, las condiciones climáticas impidieron que las medidas redujeran el margen de error, por lo que es recomendable ser cuidadoso en el manejo del instrumento para realizar los disparos de láser de manera efectiva sobre cuerpos que no se encuentren mojados.

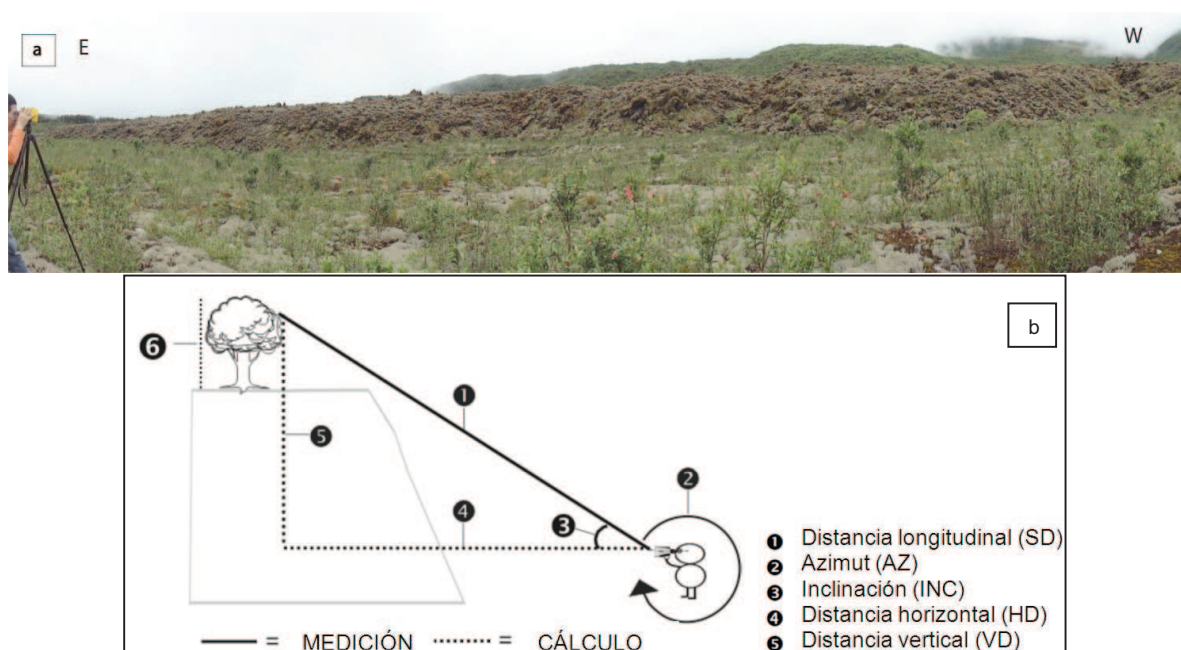


Figura 3. 26. a) Medición de los espesores de los flujos de lava en el volcán El Reventador (Fotografía tomada por F. Naranjo. IG EPN). b) Esquema del funcionamiento y del cálculo de las medidas que receipta el inclinómetro tras cada disparo del láser (Modificado de Manual del usuario LTI Truepulse 260/360B, 2009).

Entonces, la estimación de los espesores en cada flujo, fue a través de mediciones directas sobre los bordes de los flujos de lava disponibles, localizados tanto hacia la parte norte y sur dentro de la caldera del volcán (Figuras 3.21 a 3.25).

Mientras tanto, para aquellos flujos que no contaban con acceso directo, se procedió a estimarse las mediciones a través del uso del distanciómetro, cuando el clima presentaba ventanas de tiempo favorable (Figura 3.22, 3.23 y 2.24).

Para los flujos localizados hacia la parte alta del volcán, se proponen espesores de 10 m; esto considerando que las observaciones directas que se pudieron realizar en los sobrevuelos de monitoreo, permiten estimar más cercanamente las dimensiones de varios de los cuerpos localizados en la superficie e identificados en el trabajo de Vallejo (2009).

4. Realizar el muestreo pertinente de los flujos de lava.

Las campañas de campo permitieron muestrear el flujo de lava reciente generado en junio de 2012, de modo que se pueda mantener la continuidad en el estudio de la secuencia de flujos de lava producidos en el volcán, a través de la obtención de láminas delgadas y análisis geoquímicos.

5. Complementación de los datos recopilados en el campo

La localización de los puntos obtenidos con el control de campo y las imágenes ASTER disponibles, que son ortorectificadas y tienen una resolución de entre 30 a 15 m por pixel (Galería AVA⁷). De este modo, se plantea reducir el rango de error en el mapa de distribución de los flujos de lava. Las imágenes ASTER, la topografía de la zona y los puntos de control, permitieron delimitar de mejor manera el área cubierta por los flujos de lava al interior de la caldera. El rango de error total considerado en base al uso de estos sensores remotos, sería menor a 10 m (considerando que las imágenes ASTER a escala 1:25000, permiten identificar a cada pixel con una distancia de menos de 15 m) (Lillesand et al., 2007). Con estos datos, ha sido posible estimar de mejor manera la distribución de los flujos de lava (Figura 3.27), a escala 1:25000. Mientras que para aquellos sitios de difícil acceso, se tiene una mejor distribución respecto a la cartografía anterior (Vallejo, 2009).

⁷ http://ava.jpl.nasa.gov/about_imagery.php

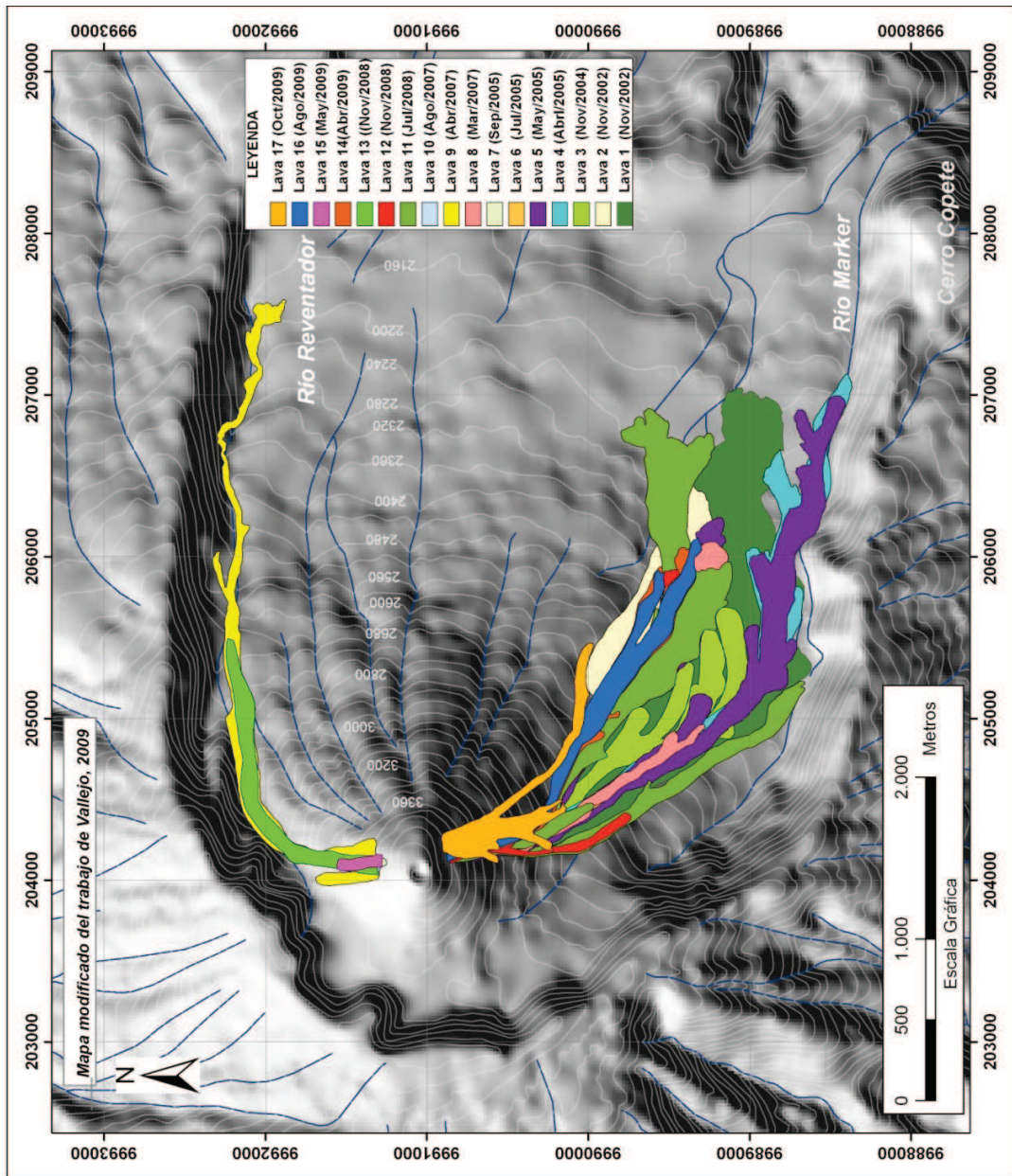


Figura 3. 27. Distribución de los flujos de lava del volcán El Reventador emitidos entre 2002 a 2009.

3.3 CRONOLOGÍA DE LAS ETAPAS ERUPTIVAS ENTRE 2002 A 2009

3.3.1 DETERMINACIÓN DE CRITERIOS PARA CARACTERIZAR LAS ETAPAS DE ACTIVIDAD ERUPTIVA Y NO ERUPTIVA.

Una **erupción volcánica** se refiere al proceso durante el cual se produce la emisión o expulsión de materiales tales como flujos de lava, flujos piroclásticos, ceniza, formación de domos, entre otros, a través de un cráter o de fisuras en la superficie de la Tierra y que posteriormente permitirán la formación de nuevos depósitos volcánicos (Rymer, 2000). Por lo tanto, las etapas en las que no se tengan estas manifestaciones superficiales, se establecerá como actividad no eruptiva (Morales, 2011).

Este trabajo considera a la información de la actividad eruptiva interna (sismicidad estadística) y de la actividad eruptiva superficial (monitoreo visual) para definir la cronología durante el proceso de emisión de los flujos de lava. Este tipo de correlaciones se han observado en volcanes como St. Helens (Power & Lalla, 2006), Merapi (Costa et al., 2012), Colima (Zobin et al., 2008), Agustín (Power et al., 2006; DeRoin & McNutt, 2011), Stromboli (Bonaccorso et al., 2003), Fuego (Lyons et al., 2009), Galera (Gil-Cruz, 1999), Soufrière Hills (Watts et al., 2012), entre otros.

Las herramientas de monitoreo han sido comparadas entre sí, de modo que se puede distinguir la relación entre la actividad interna (estadística de sismicidad) y corresponderla con actividad superficial (monitoreo visual y satelital) producida en el volcán El Reventador entre 2002 a 2009, y se presenta en las Figuras 3.28 a 3.31.

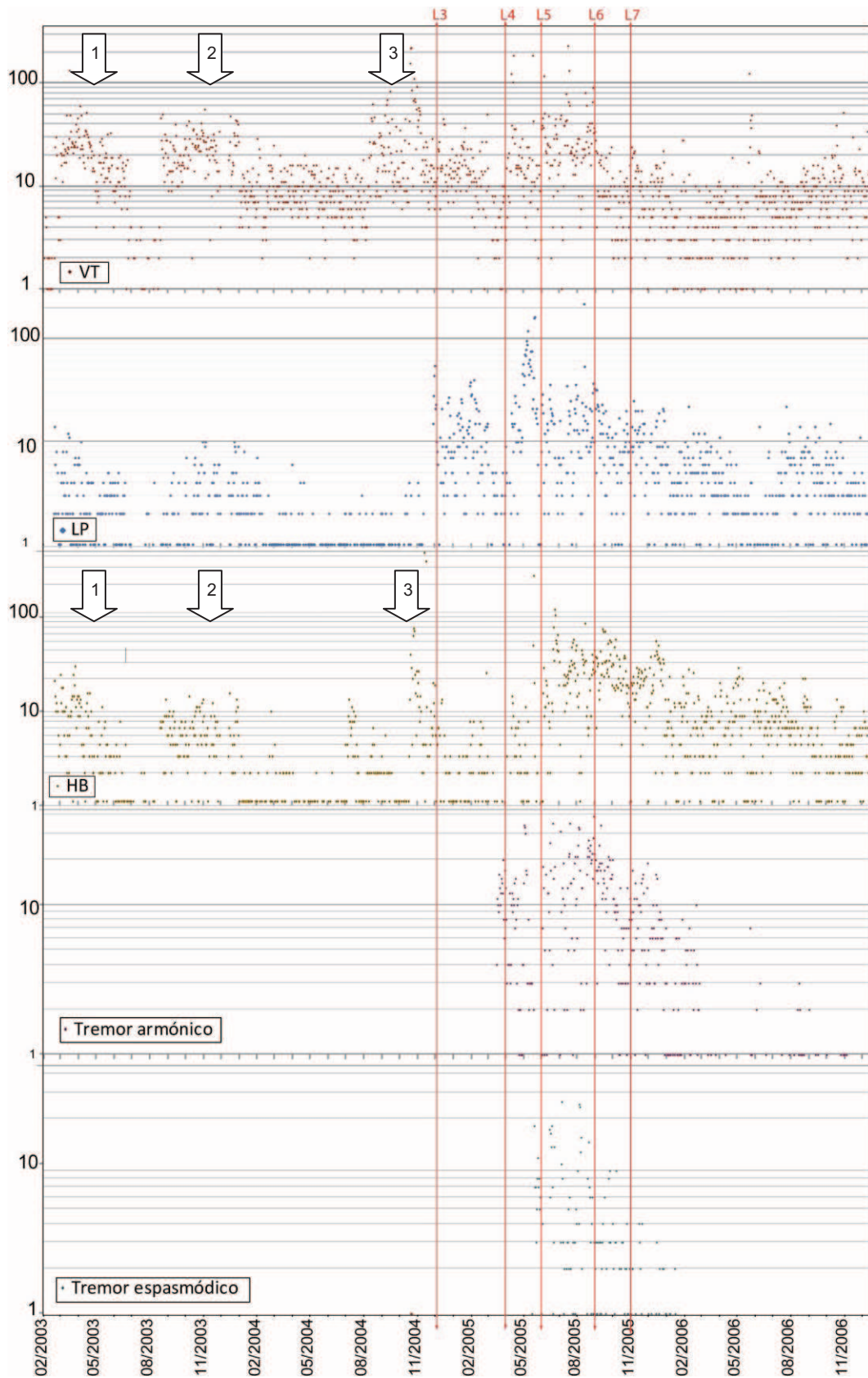


Figura 3. 28. Tiempo vs. Actividad interna: Estadísticas del número de eventos sísmicos ocurridos entre 2003 a 2006. De arriba hacia abajo, eventos: volcans tectónicos, largo período, híbridos, tremor armónico y tremor espasmódico. Las líneas rojas corresponden a los flujos de lava que descendieron desde el cráter. Las flechas indican la proporcionalidad en la ocurrencia de VT e HB.

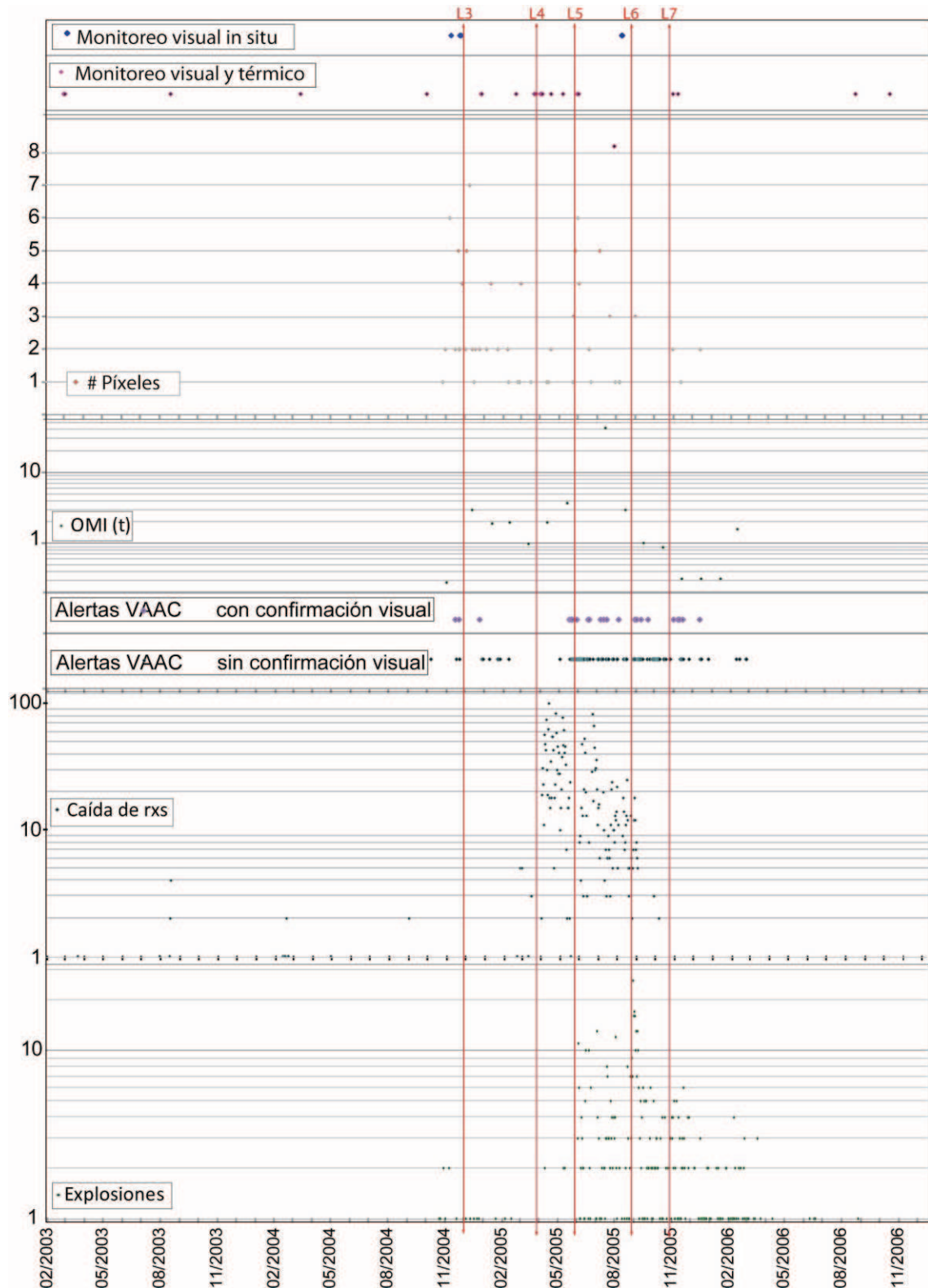


Figura 3. 29. Tiempo vs. Actividad superficial. Datos obtenidos del monitoreo satelital entre 2003 a 2006. De abajo hacia arriba: número de eventos ocurridos de Explosiones y caídas de rocas; alertas no confirmadas y confirmadas de emisiones de ceniza; tonelaje de emisiones de SO₂ medida en imágenes OMI; número de alertas termales por conteo de píxeles y visitas de monitoreo visual y térmico. Las líneas rojas corresponden a los flujos de lava que descendieron desde el cráter.

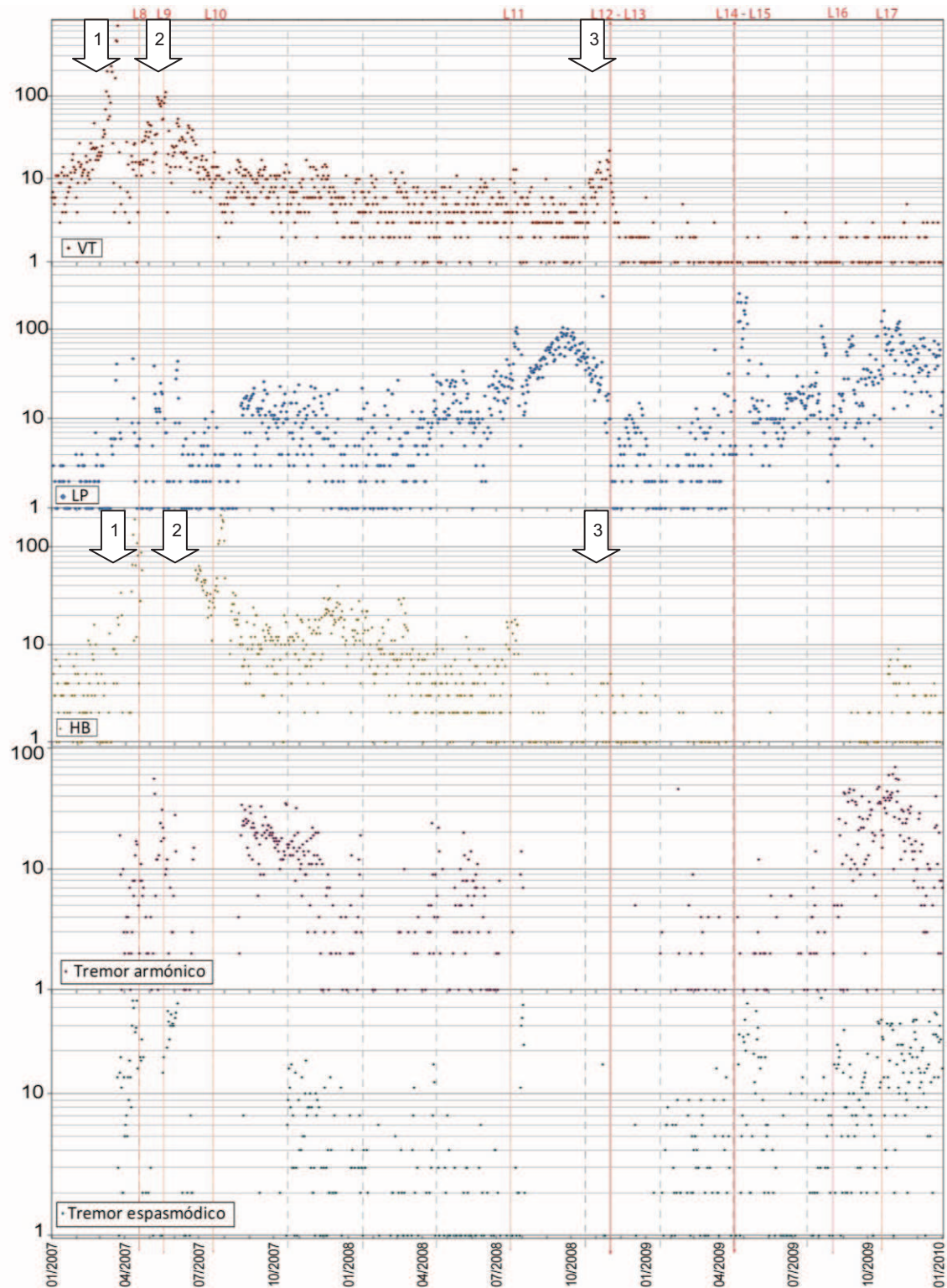


Figura 3. 30. Tiempo vs. Actividad interna: Estadísticas del número de eventos sísmicos ocurridos entre 2007 a 2009, de abajo hacia arriba: tremor espasmódico, tremor armónico, híbridos, largo período y volcano tectónicos. Las líneas rojas corresponden a los flujos de lava que descendieron desde el cráter. El sector anaranjado corresponde a los períodos de observación de coladas de lava acumulándose en el cráter. Las flechas indican la proporcionalidad en la ocurrencia de VT e HB.

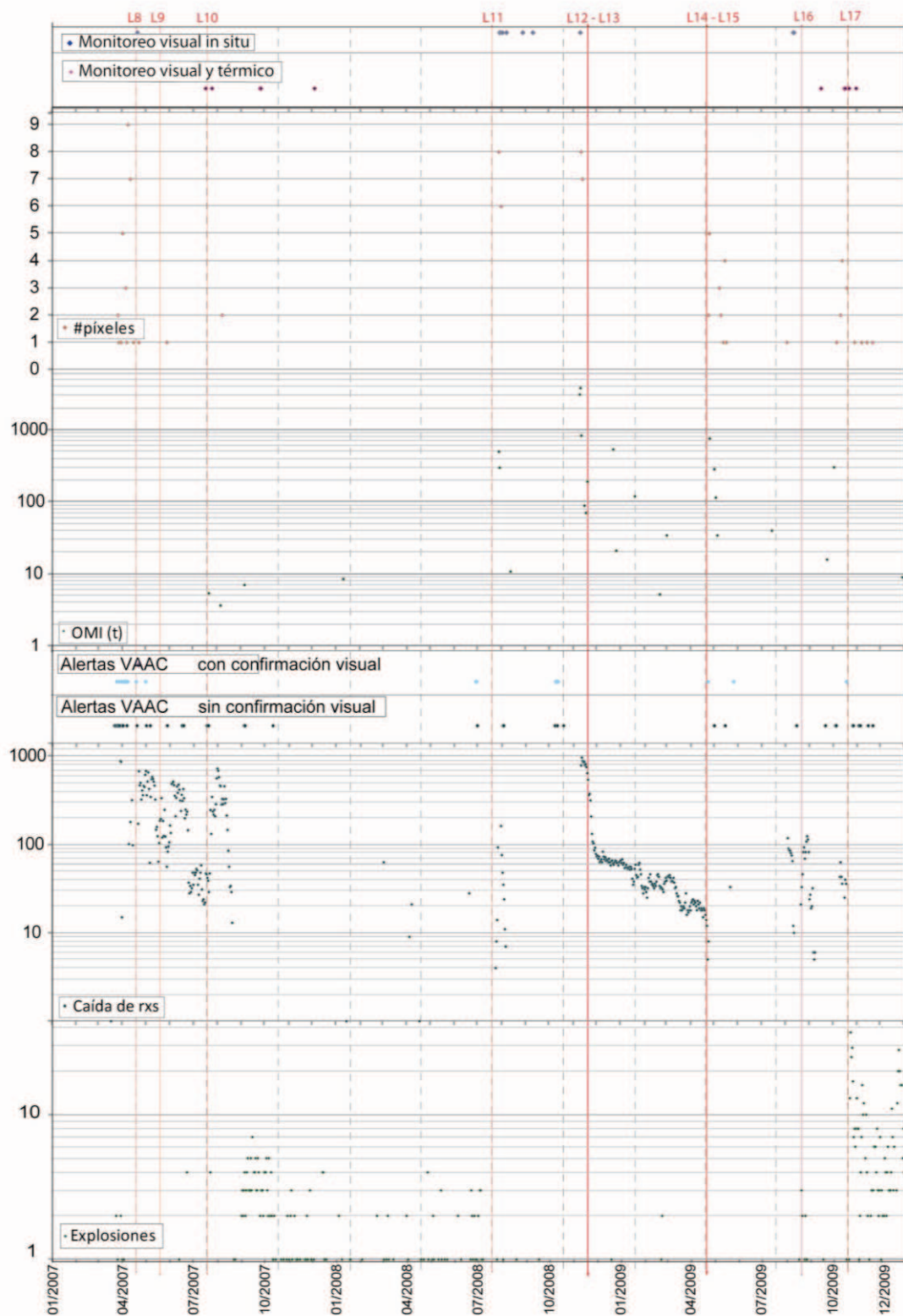


Figura 3. 31. Tiempo vs. Actividad superficial. Datos obtenidos del monitoreo satelital entre 2007 a 2009. De abajo hacia arriba: número de eventos ocurridos de Explosiones y caídas de rocas; alertas no confirmadas y confirmadas de emisiones de ceniza; tonelaje de emisiones de SO₂ medida en imágenes OMI; número de alertas termales por conteo de pixeles y visitas de monitoreo visual y térmico. Las líneas rojas corresponden a los flujos de lava que descendieron desde el cráter.

A continuación, se describe la interpretación dada en la correlación entre los datos de monitoreo volcánico. En ellos se agrupan casos con similar comportamiento, respecto a los procesos eruptivos descritos en otros volcanes, que constituyen una referencia para la interpretación que será aplicadas dentro de este trabajo.

Según lo observado en la síntesis representada en las Figuras 3.28 a 3.31, correspondientes a todo el proceso eruptivo 2002-2009 del volcán El Reventador, se plantea que los siguientes argumentos justifican una etapa eruptiva:

- La ocurrencia de las alertas termales (recepción satelital) es contemporánea a la emisión y acumulación de material incandescente desde el cráter (Wright et al., 2004) , seguido del descenso de flujos de lava por los flancos del volcán, como es el caso de lo ocurrido en el volcán Bezymianny (Carter et al., 2008, Wright et al., 2004), en el Stromboli (Adams, et al., 2006) y en el volcán de Fuego (Lyons et al, 2009).
- La emisión de columnas de ceniza, es típica durante la etapa explosiva del proceso eruptivo (Mathews et al., 1997; Dehn et al., 2002; Power, et al., 2006; Saunders et al., 2012).
- Las emisiones de SO₂ puede asociarse a la intensa actividad fumarólica durante una fase de desgasificación de las intrusiones magmáticas (Gonnermann & Manga, 2007; Zobin et al., 2008; Loughlin et al., 2010).
- Los eventos volcano tectónicos se asocian con fuentes de tensión atribuidas a fuerzas tectónicas regionales, a carga gravitacional, a efectos presión de poro e hidrofracturamiento, fuerzas térmicas y volumétrica asociada con la intrusión, retirada, enfriamiento de magma o la combinación de cualquiera o todos estos factores (McNutt, 2005). Para este trabajo, asumimos que el incremento de los eventos volcano tectónicos están asociados a intrusión de material magmático.
- La ocurrencia simultánea de LP y tremores es asociada al proceso de ascenso de material magmáticos, que pueden provocar formación de domos, como por ejemplo en el volcán Stromboli (Bonaccorso et al., 2003), el volcán Galeras (Gil-Cruz, 1999) o el Santa Elena (Power et al., 1993; 2006) o procesos de desgasificación (Gonnermann & Manga, 2007).

Por lo tanto, un proceso eruptivo representado por una etapa, constará del incremento de la actividad interna, acompañado de sus respectivas manifestaciones en superficie. Mientras tanto, que la disminución parcial a total, corresponderán la parte final de la misma (Figuras 3.28 a 3.31).

En base a ello, se plantean cuatro etapas eruptivas relacionadas con la actividad del volcán El Reventador entre 2002 a 2009, y ellas son:

1. Etapa Eruptiva 2002, tras la súbita erupción ocurrida durante el mes de noviembre de 2002. Se produjeron dos flujos de lava, Lava 1 y 2.
2. Etapa Eruptiva 2004-2005, dado que desde noviembre de 2004 a septiembre de 2005, se mantuvo la actividad eruptiva. Se produjeron cuatro flujos de lava, Lava 3 a Lava 7.
3. Etapa Eruptiva 2007, pues se produjo una nueva emisión de importantes flujos de lava, entre los meses de marzo a septiembre. Se produjeron tres flujos de lava, Lava 8 a Lava 10.
4. Etapa Eruptiva 2008 - 2009, ya que tras el inicio de la actividad en abril a noviembre de 2008, y desde abril a noviembre de 2009, se observó un cambio en el mecanismo de la sismicidad inicial, con el dominio de eventos LP y explosiones. Se produjeron siete flujos de lava, Lava 11 a Lava 17.

Finalmente, a partir de la descripción cronológica los diferentes flujos de lava, serán denominados como Lava #, respectivamente, según corresponda. La hora descrita corresponderá al tiempo local (TL).

3.3.2 CRONOLOGÍA DEL PROCESO ERUPTIVO DEL VOLCÁN EL REVENTADOR ENTRE 2002 Y 2009: ETAPAS ERUPTIVAS

3.3.2.1 Etapa eruptiva 2002

El 6 de octubre de 2002 se produjo un sismo volcano tectónico de magnitud 4.1MLv, acompañado por nueve pequeños eventos VT, cuyos epicentros se localizaron en las laderas más bajas de SW del edificio antiguo y sus hipocentros fueron colocados a profundidades de 10-11 km. (Hall, et al., 2004). Esto correspondería a la única actividad precursora conocida de la erupción del 3 de

noviembre de 2002. Ese día, a partir de las 02h00, se empezó a detectar un tremor sísmico de baja amplitud (0.7–1.0 Hz), el mismo que duró por varias horas. Alrededor de las 03h00 (TL), se detecta un enjambre de más de 100 sismos tipo VT e HB sobrepuestos a las señales de tremor sísmico. Los eventos HB tenían fases iniciales de 2-8 Hz, seguidos por fases principales de 1-2 Hz. El personal ubicados en el Campamento de San Rafael (CSR), localizado a 8 Km al Este del cráter, fueron despertados por los sismos de la madrugada. El mismo día, se notaron eventos tipo LP (1.5–1.7 Hz) y unos eventos volcano-tectónicos (2-4 y 12-14 Hz). Estos eventos, además fueron registrados en estaciones sísmicas fuera del volcán, correspondientes a las estaciones de Antisana y Cayambe. (Hall, et al., 2004).

El tremor fue una de las señales sísmicas más numerosas registradas durante la erupción del volcán El Reventador y se mantuvo ininterrumpido desde el 3 hasta el 8 de noviembre. Es muy posible que estas señales de tremor hayan estado asociadas con fenómenos superficiales tales como caídas de rocas, flujos piroclásticos, entre otros (Ramón et al., 2002), similar a lo ocurrido en otros volcanes andesíticos como Augustín, Colima, Arenal o Merapi (Power et al., 1993; 2006; Zobin et al., 2008; DeRoin & McNutt, 2011; Costa et al., 2012).

Durante la actividad eruptiva, se generaron importantes flujos piroclásticos que cubrieron la caldera, especialmente hacia el oriente del edificio volcánico (Figura 3.32.a y b).

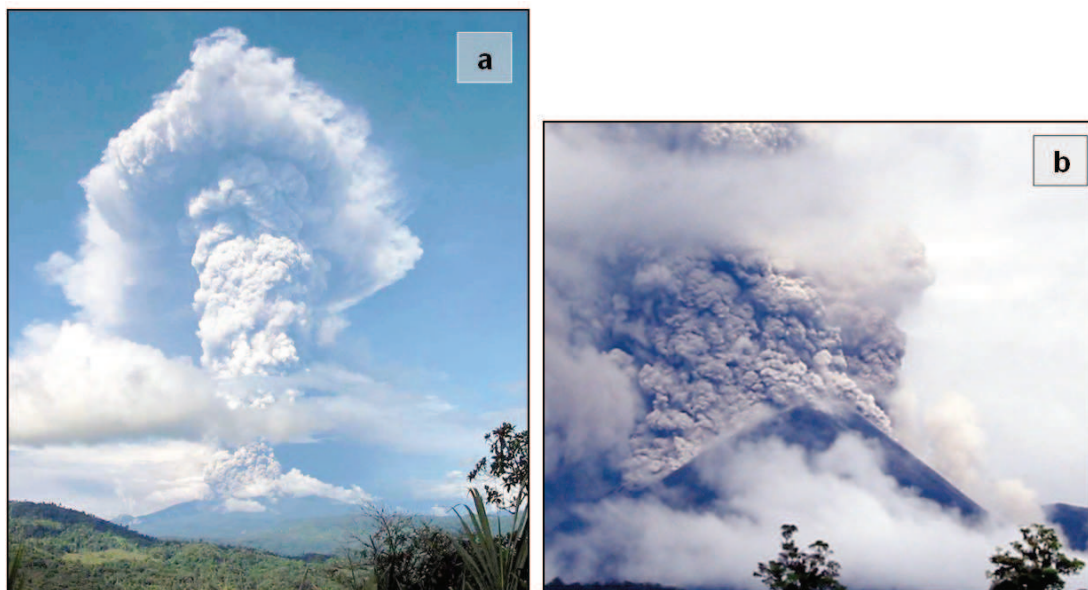


Figura 3. 32. a) Columna de ceniza emitida alrededor de las 09:12 horas por el volcán El Reventador, alcanzando unos 16 a 17 km de altura, donde se observa desde Lago Agrio la erupción pliniana del 3 de noviembre de 2002 (Tomado de Hall, et al., 2004); b) Flujos piroclásticos que descienden desde el cráter por los flancos y hacia la caldera del volcán (Fotografías cortesía del personal de Techint).

Uno de estos flujos tras tener la energía suficiente se movilizó sobrepasando el límite oriental de la caldera, bifurcándose y siguiendo el cauce del río Marker y la quebrada Montana y descendió hacia el río Coca (Hall, et al., 2004). Estos depósitos fueron descritos en el trabajo de Hall et al., (2004) y caen en la categoría de flujos de escoria, típicos de volcanes andesíticos como es el caso de El Reventador. Además, se distinguen por presentar una textura de bandeamiento insipiente (Ramón et al., 2002), asociado posiblemente a la mezcla de magmas (Llambías, 2001; Valentine & Ficher, 2000).

El 3 de noviembre, la NASA a través del sensor TOMS, pocas horas después de la erupción, midió casi 60.000 toneladas métricas de SO₂ en su paso al mediodía. El 11 de noviembre, se sintió olor a azufre hasta la ciudad de Quito (Hall et al., 2005). Al 14 de noviembre de 2002, la trayectoria de la pluma continua de emisión de SO₂, alcanzó hasta 500 km mar afuera, en el Océano Pacífico (Figura 3.33.a). Las intensas emisiones también fueron registradas el 4 hasta el 24 de noviembre (Figura 3.33.b).

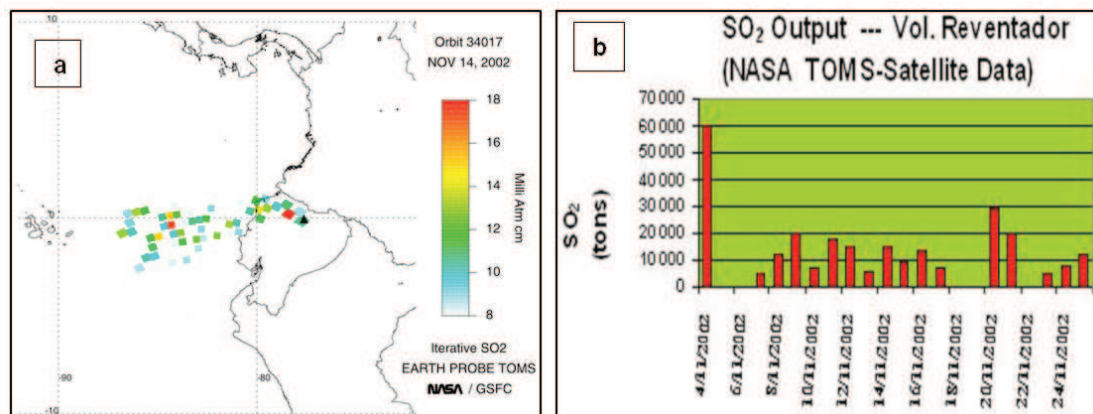


Figura 3. 33. Imagen del TOMS el 14 de noviembre de 2002 con el rastro de la pluma de emisión producida con la erupción del volcán El Reventador el 3 de noviembre de 2002 (Tomado de OMI⁸) b) Contenido de SO₂ del volcán El Reventador durante noviembre de 2002 (Modificado de Hall, et al., 2005).

Hasta el 25 de noviembre, las estimaciones de SO₂ oscilaron entre 5.000 a 30.000 toneladas métricas diarias (Figura 3.30.b), lo que implica una masa total mínima de de 260 kt. Tales volúmenes importantes pueden sugerir la presencia de un gran cuerpo de magma (Hall, et al., 2004).

Al mismo tiempo que se producían emisiones de gases volcánicos, había importantes columnas de ceniza. La VAAC Washington, informó la detección de emisiones de ceniza entre el 3 y el 25 de noviembre de 2002, que llegaron a extenderse en todas direcciones con ayuda de los vientos; principalmente hacia el W, SW y desde NE al SE, desde las primeras horas del día de la erupción, tal como se observa en la evolución cronológica de la Figura 3.34 (Ramón et al., 2002a).

⁸ Página web: http://so2.gsfc.nasa.gov/toms_1979_2005.php

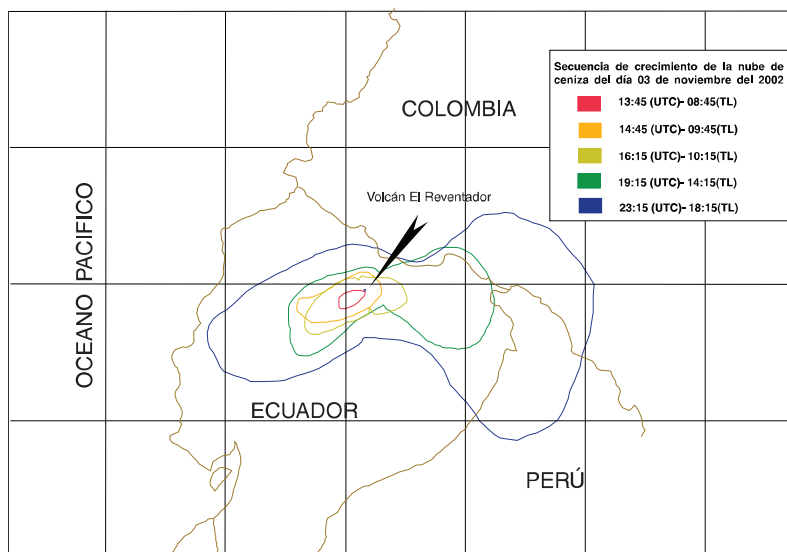


Figura 3. 34. Distribución de las nubes de erupción registradas durante el 3 de noviembre de 2002 en las imágenes satelitales de la VAAC Washington (Tomado de Ramón et al., 2002).

En un posterior estudio de las caídas de ceniza y la elaboración de mapas de isópacas, se pudo estimar un volumen de tefra de $\sim 0.28 \text{ km}^3$ (Delpit et al., 2008). Si a esto le sumamos el volumen de los depósitos de material dejado por los flujos piroclásticos, se puede llegar fácilmente a $\sim 0.282 \text{ km}^3$, considerado conjuntamente una altura de la columna eruptiva de 16-17 km. Estos parámetros correspondieron a una erupción de índice de explosividad volcánica (VEI) de 4 (Ramón et al., 2002a; Hall et al., 2005; Samaniego et al., 2008; Delpit et al., 2008).

En las imágenes de puntos calientes (Hot spots Hawaii), se observó la presencia de puntos calientes en las imágenes de manera continua desde las 17:58 hasta las 20:58 del 3 de e noviembre (TL). De esta manera, se observó la evolución de la columna eruptiva generada, obtenida del portal electrónico <http://goes.hiqp.hawaii.edu/goes/index.shtml> (Figura 3.35.a-b-c).

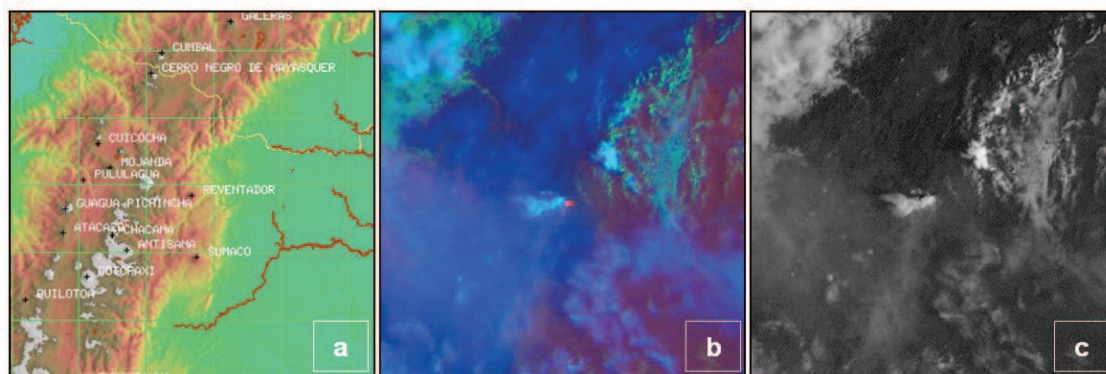


Figura 3. 35. Primera imagen satelital de HOT SPOT (Hawaii) del volcán El Reventador registrada a las durante la erupción del 3 de noviembre de 2002 con la emisión de la columna de ceniza: a) Mapa guía con la localización del volcán; b) imagen RGB y c) imagen MWIR. Tomado de Hotspot-Hawaii⁹.

MODVOLC, registró 7 alertas termales el 9 de noviembre desde las 08h50 (TL) asociadas al sector del cráter y hacia el flanco sur, probablemente debido al descenso del primer flujo de lava emitido por el volcán, el cual fue confirmado por primera vez el 9 de noviembre de 2002 (Anhalzer, com. personal en Hall et al., 2004) (Figura 3.36). De este modo iniciaba componente efusiva producida durante la etapa eruptiva de 2002, la cual es estima, inició el 6 o 7 de noviembre, según lo observado en las imágenes térmicas de NOAA a las 19h00 (TL) del día 7 de noviembre (Hall et al., 2004).

El 11 de noviembre, tras una importante liberación de SO_2 , el olor a azufre es sentido a 100 km al E del volcán, en la ciudad de Quito. En reportes de observaciones desde las cercanías al volcán, al 12 de noviembre continuaba la presencia de incandescencia en el flanco sur del volcán y de explosiones (Ramón et al., 2002). En una visita realizada por personal del IG EPN, se observa el avance de la Lava 1 (Figura 3.37.a y b).

Posteriormente, el día 18 de noviembre, se reconocieron 12 nuevas alertas termales localizadas en el sector S y SE del cráter, mientras que el 24 y 25 de noviembre, ocurrieron 11 nuevas alertas.

⁹Web page de Hot spots Hawaii de HIPG <http://goes.higp.hawaii.edu/goes/index.shtml>

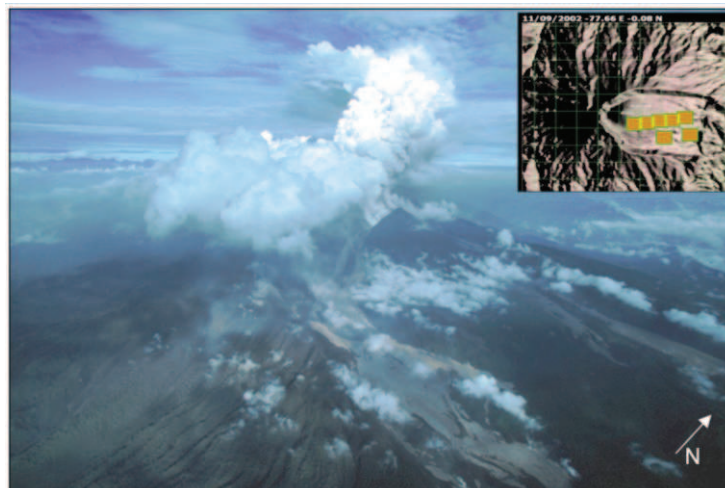


Figura 3. 36. Columna de emisión y flujo de lava descendiendo por el flanco sur el 9 de noviembre 2002. **Recuadro superior**, alertas termales de MODVOLC para la misma fecha. (Fotografía tomada por Anhalzer, 2002).

Estas últimas alertas, pueden asociarse con la salida y avance de la Lava 1 y a la subsecuente salida y avance de la Lava 2. En los días posteriores a la erupción, ocurrieron emisiones permanentes de vapor, gases y ceniza (Ramón et al., 2002). Tras el sobrevuelo de monitoreo visual y térmico efectuado el 26 de noviembre, se confirmó la presencia del segundo flujo de lava (Lava 2) que se originaba desde un ventó localizado en el sector SE del flanco sur, como se observa en la Figura 3.36 y 3.37.

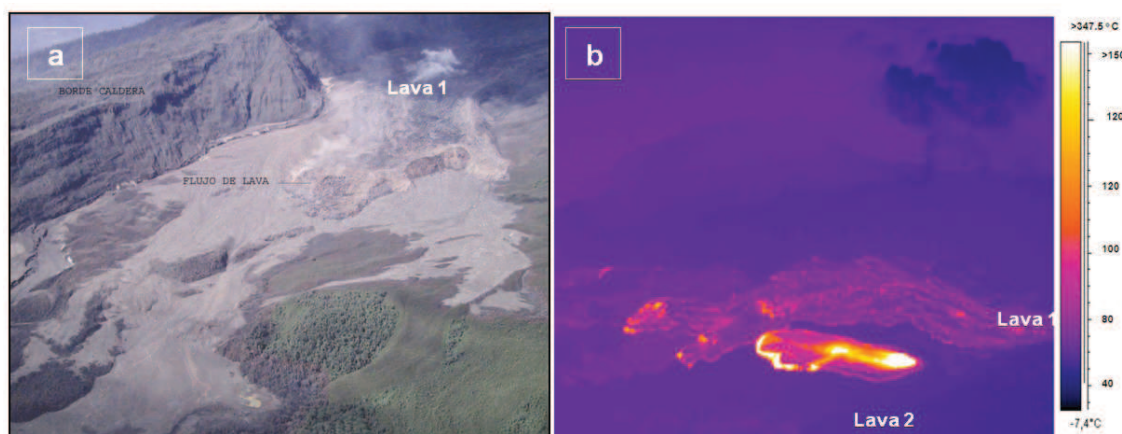


Figura 3. 37. a). Frente de la Lava1 el 18 de noviembre de 2002. Fotografía tomada por Hall, M. (IG-EPN); b). Vista en planta de los flujos de lava 1 y 2 el 26 noviembre de 2002. Imagen tomada por Ramón, P. (IG-EPN).

Esta primera fase eruptiva, termina con la disminución de la actividad tanto interna como superficial, manteniéndose un pequeño número de eventos sísmicos y leves emisiones de vapor de agua como evidencia de actividad fumarólica señal de

continua desgasificación, lo cual se considera como una etapa no eruptiva (Morales, 2011). Esto hasta que se vuelva a tener un incremento en la actividad interna y superficial.

Tras el trabajo realizado para la cartografía, se ha determinado un alcance de casi 4000 m hasta la cota de 2000 msnm para la Lava 1 y un área estimada de $1,6 \times 10^6 \text{ m}^2$; mientras que la Lava 2, alcanzó la cota 2200 msnm y recorrió una longitud máxima de 1500 m, cubriendo un área de $5,5 \times 10^5 \text{ km}^2$ (Tabla 1).

Adicionalmente, esta actividad tuvo efectos importantes en el aspecto socio-económico, tanto a nivel local como nacional.

Con la gran explosión del 2002, las intensas caídas de ceniza afectaron una buena parte del Valle Interandino y principalmente a la ciudad de Quito, ubicada a unos 100 km al Este del volcán, alcanzó coberturas de entre 1-10 mm de espesor de ceniza, (Hall et al., 2004).

Otros de las mayores afectaciones que se produjeron tras el proceso eruptivo de 2002, fueron las obras de infraestructura vitales para la economía del país, siendo gravemente afectados como el Sistema del Oleoducto Transecuatoriano (SOTE), el Oleoducto de Crudos Pesados (OCP), Poliductos y el sistema vial Baeza-Lago Agrio que quedaron inhabilitados por varios días. También se produjo el cierre de colegios, negocios y el cierre del aeropuerto de la capital por 10 días (Hall et al., 2004).

3.3.2.2 Etapa Eruptiva 2004-2005

Durante los meses de marzo a julio de 2003 y desde septiembre de 2003 a enero de 2004, se presentaron dos episodios de sismicidad con incremento gradual de eventos VT e HB, y en menor grado eventos LP. Sin embargo, no se reportaba actividad superficial, excepto gas y vapor de agua como actividad fumarólica.

A partir del incremento de la sismicidad desde el mes de septiembre de 2004 hasta el mes de marzo de 2005 (pico máximo el 6 de noviembre), para los meses de septiembre y octubre de 2004, el monitoreo visual y térmico, en el volcán mostraba un incremento en las temperaturas de las fumarolas del cráter (Ramón, 2005) aunque sin ninguna alerta termal asociada (Figura 3.38.a).

En el mes de noviembre de 2004, MODVOLC detecta las primeras anomalías térmicas asociadas a actividad eruptiva al interior del cráter. El día 10, tras un vuelo de monitoreo visual, se observa que el cráter está siendo rellenado por lavas (Figura 3.38.b), considerándose el inicio de una nueva etapa eruptiva, asociable con el incremento de la sismicidad en meses anteriores.

A partir del 21 de noviembre se registraba una señal sísmica de tipo superficial llamado caída de rocas, que posteriormente atribuida a la formación de pequeñas avalanchas asociadas con el crecimiento y avance de una nueva colada de lava desde el interior del cráter del volcán. Estos eventos se caracterizan por un rico contenido de frecuencias que no superan 10 Hz, sin un pico de frecuencia característico (Ramón, 2005). Hacia el 25 de noviembre, se receptaron alertas de emisión de ceniza no confirmada (VAAC).

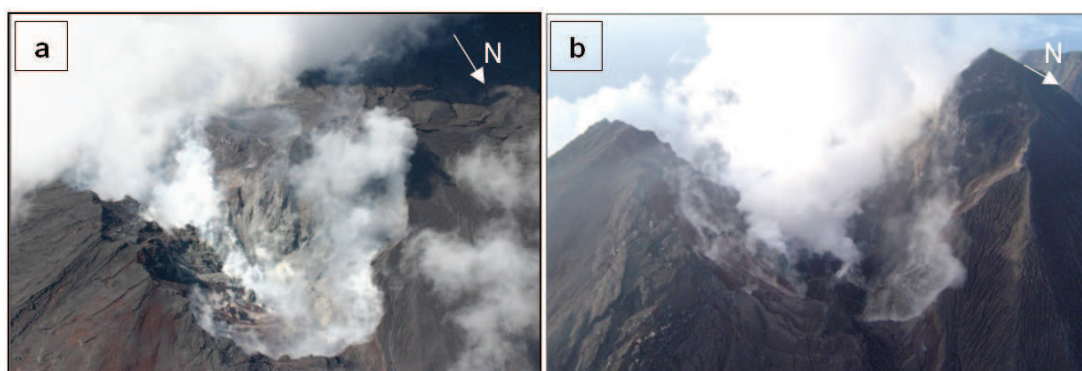


Figura 3. 38. a) Intensa actividad fumarólica en el cráter del volcán sin presencia de domos observada el 19 Oct. 2004; b) Actividad fumarólica acompañada de la extrusión de coladas de lava que rellenaban el cráter dejado tras la erupción en 2002, observado el 10 de noviembre de 2004. (Fotografía tomada por P. Ramón. IG EPN).

Los días 27 y 28 de noviembre de 2004, personal del IG EPN, confirmó la presencia de nuevas lavas al interior del cráter dejado tras la erupción de 2002 (Figura 3.39). En esta visita se observó que la velocidad de avance del frente del flujo de lava fue de ~50 m/día y presentaba un espesor de 15 m medidos desde la superficie de la Lava 1 mientras descendían por el flanco sur del cono (D. Andrade com. pers.).

La Lava 3, tuvo un espesor promedio de 11 m, un alcance de 2500 m hasta la cota de 2500 m y cubrió un área estimada de $5,97 \times 10^5 \text{ m}^2$.



Figura 3. 39. Frente del flujo de Lava 3 descendiendo por el flanco sur del volcán El Reventador (Fotografía tomada por D. Andrade, 14 noviembre de 2004). Recuadro superior: Alertas termales del mes de diciembre de 2004 (Modificado de MODVOLC).

A principios del mes de diciembre de 2004, se produjeron importantes manifestaciones superficiales, fueron registraron con numerosas alertas satelitales de MODVOLC, VAAC y OMI (Carn et al., 2008), las mismas que continuaron hasta enero de 2005 (Figura 3.40).

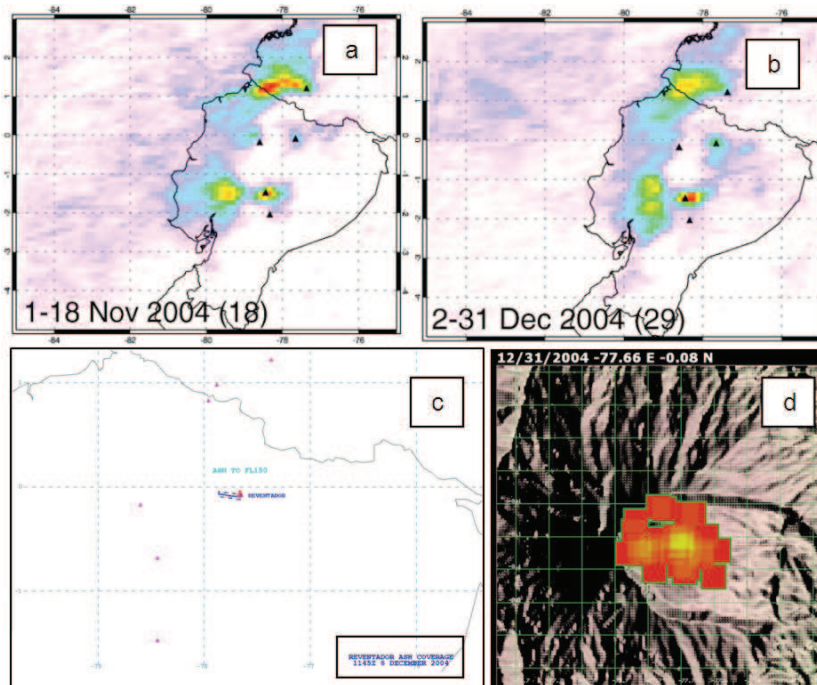


Figura 3. 40. Imágenes del monitoreo satelital a) y b) imágenes obtenidas por OMI (Tomado de Carn et al., 2008); c) Imagen de representación de la emisión de ceniza receptada por VAAC y d) Alertas termales de MODVOLC para el mes de diciembre de 2004.

A partir de abril de 2005 hasta enero de 2006, se produjo un nuevo incremento de la sismicidad asociada a eventos VT, HB y eventos LP, seguidos de episodios de tremor armónico y espasmódico; estas señales estarían más asociadas a nuevos pulsos de lava que rellenaba el cráter y se desbordaban del mismo, como se observó el 19 de abril (Figura 3.41) y el 1 de mayo de 2005 en el volcán Reventador (Troncoso et al., 2006).

La sismicidad predominante durante el mes de abril, estuvo caracterizada por la ocurrencia de eventos sísmicos de tipo VT, LP y tremor espasmódico. Entre los días 2, 27 y 30, ocurrieron alertas termales de MODVOLC, las cuales se localizaron hacia el cráter y al flanco sur del volcán.



Figura 3. 41. Colada de lavas formada al interior del cráter con un diámetro de aprox. 200 m observado en el sobrevuelo del 19 de abril de 2005. Fotografía por P. Ramón (IG-EPN)

Las alertas termales producidas durante el mes de abril de 2005 (Figura 3.42), estarían asociadas al proceso de emisión de la Lava 4, emitida desde el cráter al flanco sur del volcán y que avanzaba por el cauce del Río Marker, por sobre la Lava 3 (Vallejo, 2009). La Lava 4 alcanzó una cota inferior a los 2000 msnm, con un espesor de 12 m, una extensión de 4166 m y un área de $4,69 \times 10^5 \text{ m}^2$.

Durante el mes de mayo, se observó lo que correspondería, aparentemente al flujo de lava (Lava 4), registrado en los satélites (MODVOLC) (Figura 3,42). En tanto que, entre los días 15 al 21 de mayo, ocurrieron episodios de tremor

armónico que duraron varios minutos. Esto posiblemente relacionado al ascenso de una nueva recarga y ascenso de magma.

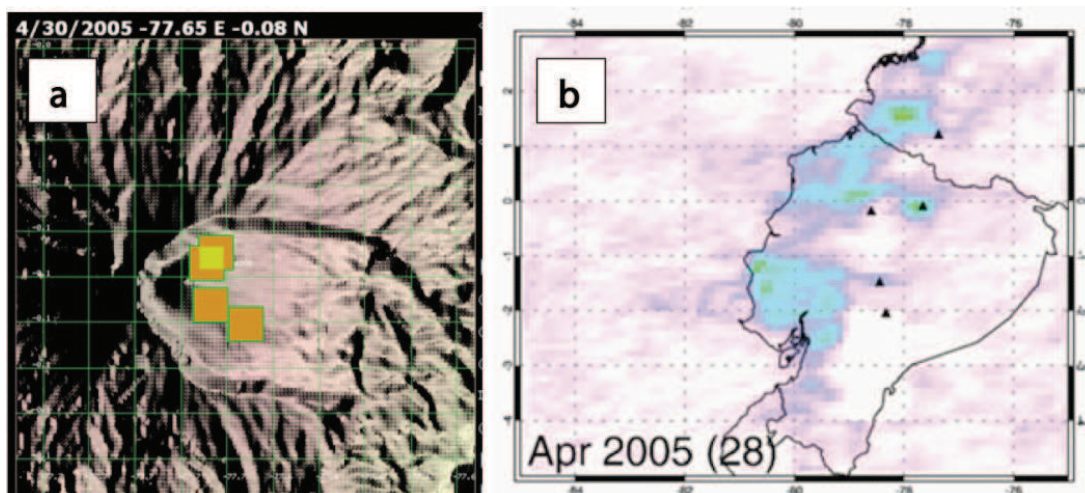


Figura 3. 42. a) Alertas termales de todo el mes de abril de 2005 (MODVOLC); b) Emisión de SO₂ correspondientes al mes de abril de 2005 (Tomado de Carn et al., 2008).

A diferencia de lo observado en abril, durante el mes de mayo, las señales de tremor, fueron registradas por los sensores sísmicos instalados en los volcanes Antisana, Cayambe, Guagua Pichincha, Cerro Negro y Cotopaxi (éste último a más de 100 km de distancia), entre los días 21 al 23 de mayo. Con el sobrevuelo realizado el día 25, se confirmó el descenso de la Lava 5 por el flanco sur del cono, y que siguió el mismo recorrido que la Lava 4, como se presenta en la Figura 3.43 (Sean, 2005; Rivero et al., 2005; Vallejo, 2009). La sismicidad del día 23, se caracteriza por la intensa ocurrencia de eventos LP, como consta en el informe de Troncoso et al., (2005) y en la sección anterior, en la descripción del monitoreo volcánico.



Figura 3. 43. Lavas 4 y 5 que descendieron por el flanco sur del edificio volcánico, el 18 de junio de 2005. Flecha indica la dirección de avance de los flujos de lava. Fotografía tomada por P. Ramón (IG EPN).

En base a la cartografía desarrollada, la Lava 5, alcanzó la cota 2000 msnm, con una longitud de hasta 4088 m y un área de $8,95 \times 10^5 \text{ m}^2$, con un espesor de 8 m (Tabla 1).

A principios de junio de 2005, inició la ocurrencia de explosiones y flujos piroclásticos que continuaron de manera intermitente hasta el mes de septiembre (Sean, 2005). La actividad stromboliana nocturna era observada por la población local durante los primeros días del mes de julio (Sean, 2005). Durante el mes de julio de 2005, un nuevo incremento de la sismicidad se puede asociar al inicio de una nueva fase eruptiva, correspondiente a la emisión de la Lava 6, que se manifestaba con columnas de ceniza de alturas variables (VAAC) y con fuertes emisiones de SO_2 (OMI) (Figura 3.44).

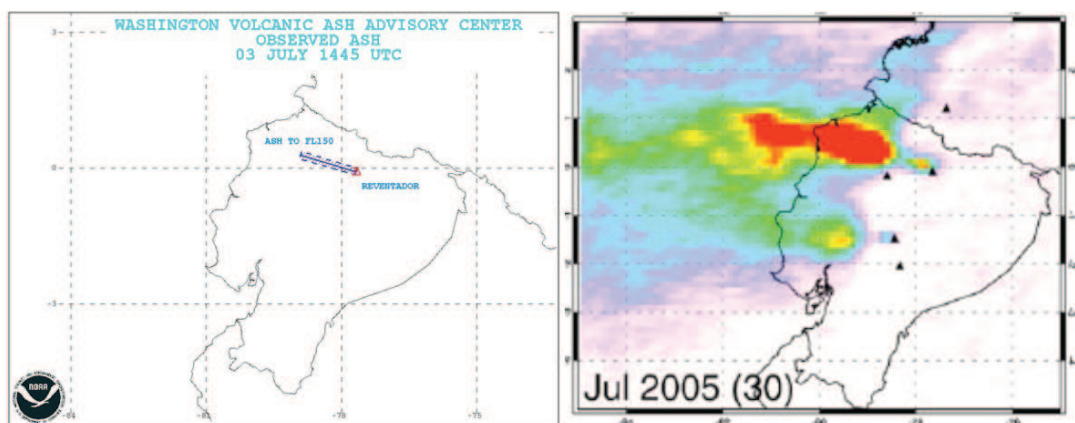


Figura 3. 44. a) Distribución de la columna de ceniza el 3 de julio de 2005 (VAAC¹⁰) y b) Imagen con la emisión de SO₂ registrado por OMI en julio de 2005 (Modificado de Carn et al., 2008).

A mediados de julio, la actividad explosiva era mínima, pero aumentó hacia el final del mes y durante todo el mes de agosto. Entre explosiones y voluminosas columnas de vapor, se escuchaban bramidos fuertes y la incandescencia era visible en el cono. Además, los períodos de inactividad eran separados por breves episodios de actividad explosiva que duraban entre varias horas a días (Sean, 2005), como se registra en la Figura 3.45.



Figura 3. 45. Actividad stromboliana registrada en el volcán El Reventador. Muestra en una secuencia de imágenes fijas tomadas a intervalos de un minuto a 1.8 km del cráter (Tomado de Sean, 2005).

En el estudio realizado por Carn et al., (2008), en la Figura 3.46, desde los primeros días de mayo hasta el final de agosto de 2005, se evidencian cuatro

¹⁰ Página web: <http://www.ssd.noaa.gov/VAAC/messages.html>

períodos con incrementos en las mediciones de SO_2 . Respectivamente, cada uno de estos períodos coincide con una disminución respecto al conteo de los eventos sísmicos; sin embargo, están precedidos por un incremento general de todos los eventos VT, HB, LP y explosiones.

Estos incrementos de los valores de las emisiones, estarían asociados al proceso de intensa desgasificación seguida a la emisión de flujos de lava (Zobin et al. 2008), especialmente para el mes de junio, julio y agosto.

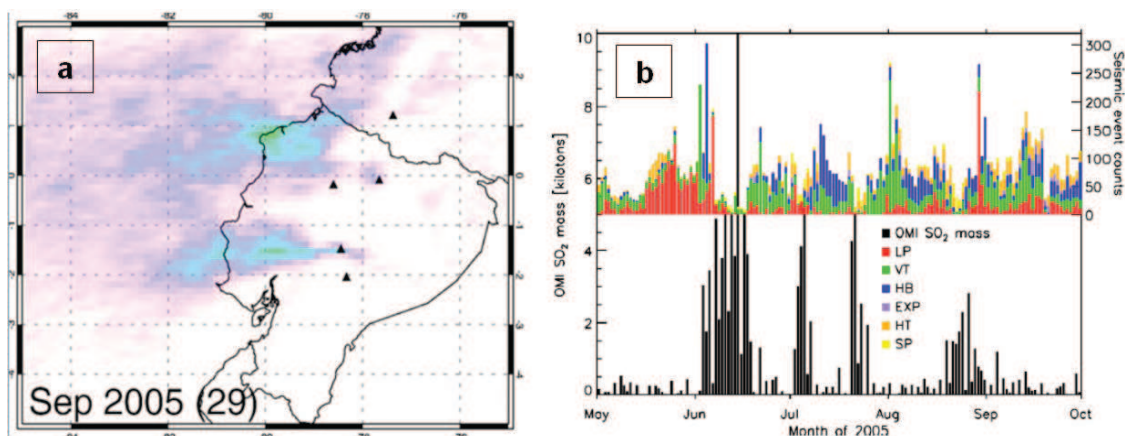


Figura 3. 46. a) Emisión de SO_2 detectada por OMI¹¹; b) Tonelaje de SO_2 detectadas por OMI y el conteo de eventos sísmicos durante el período Mayo - Septiembre de 2005 (Tomado de Carn et al, 2008).

Durante la visita realizada a la caldera del volcán El Reventador, entre el 1 al 3 de agosto de 2005, se reportó el descenso de la Lava 6, con una extensión menor a 1 km bnc que descendió por el flanco sur (Sean, 2005) (Figura 3.47). A su vez, esto sería consistente con las alertas termales de MODVOLC que ocurrieron entre el 6 al 22 de agosto de 2005.

Para la cartografía, la Lava 6 (Tabla 1), según las referencias enunciadas por Sean (2005), alcanzaría ~1 km bnc hasta la cota 2800 msnm, cubriendo un área de $4,17 \times 10^4 \text{ m}^2$, con un espesor promedio de 14 m.

¹¹ ://so2.gsfc.nasa.gov/)



Figura 3. 47. Lóbulo observado el 01 de agosto de 2005, atribuido al flujo de Lava 6. (Modificado de Sean, 2005).

Para el mes de septiembre de 2005, se intensificaron las explosiones, caracterizadas por actividad stromboliana y cortos eventos vulcanianos, que tuvieron columnas que alcanzaron los 2 km sobre la cumbre y ocasionales flujos piroclásticos pequeños (Sean, 2005). Estos eventos produjeron varias alertas de emisiones de ceniza reportadas por la VAAC Washington, a lo largo de casi todo el mes. El 15 de septiembre a las 20h58 (TL) se produjo un evento vulcaniano que generó una columna de ceniza que superó los 5 km de altura sobre la cumbre y que se movilizó hacia el WNW (Sean, 2005). Este evento fue registrado como alerta termal en MODIS y VAAC (Figura 3.48).

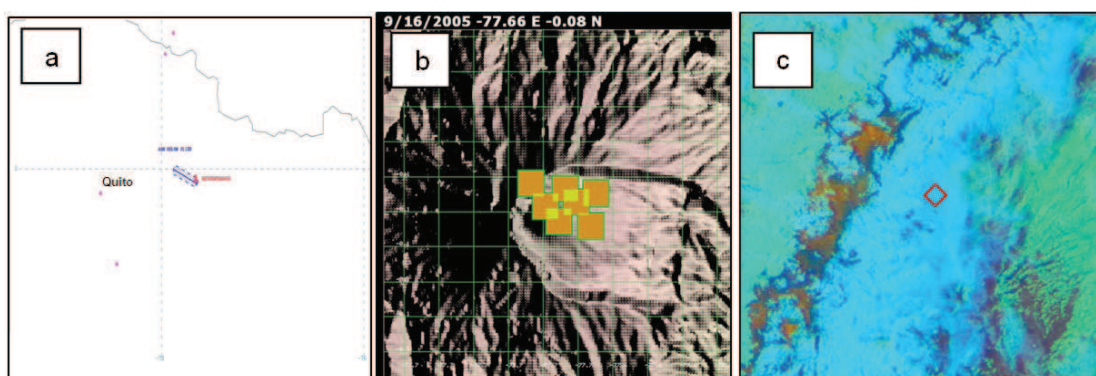


Figura 3. 48. Imágenes que registraron el evento de la columna de ceniza producida el 15 de septiembre de 2005. a) Imagen generada por la VAAC; b) Alertas termales obtenidas por MODVOLC; c) Sector de sensor remoto vista con las bandas RGB.

El mes de noviembre, tras un leve decremento de la sismicidad, se produjo el incremento de actividad explosiva y de emisión de SO_2 (OMI). Aparentemente, la actividad sísmica correspondía a la emisión de un nuevo flujo de lava (Lava 7),

reconocido en el sobrevuelo de monitoreo visual y térmico del 17 de noviembre de 2005. Este flujo tuvo un alcance de ~250 m desde el cráter y se detuvo cerca de la cota 3200 msnm. Cubrió un área de $1,24 \times 10^4 \text{ m}^2$, con un espesor ~10 m.

En el mes de diciembre, las manifestaciones superficiales continuaron, aunque se registraron menos alertas termales en MODVOLC hasta enero de 2006. Hubo reportes de VAAC Washington, asociadas a esporádicas columnas de ceniza; y emisiones de SO_2 reconocidas por OMI; todas ellas, se extendieron hasta el mes de febrero del mismo año.

Los tres primeros meses de 2006, se observó actividad sísmica de nivel moderado caracterizado por la generación de eventos de tipo LP, HB, VT, explosiones y tremores armónico y espasmódico. Para el resto del año se registraron niveles bajos de actividad eruptiva, a excepción de los primeros días de junio, que tuvo un leve incremento en el número de VTs y de señales del tipo tremor armónico. Esta actividad se mantuvo casi constante, y a pesar de que fue un período de tiempo considerado como anómalo por su corta duración respecto a los relativamente largos períodos de actividad sísmica (varios meses) , no estuvo relacionado con ningún tipo de manifestación superficial excepcional (Troncoso et al., 2006).

Por lo tanto, con la subsecuente disminución de la actividad sísmica y de las manifestaciones superficiales, se considera el final de la etapa eruptiva en septiembre de 2005.

3.3.2.3 Etapa Eruptiva 2007

Salvo el período de actividad anómala que se desarrolló durante el mes de junio de 2006 (Troncoso et al., 2006), a partir del mes de marzo de 2007, se incrementó la actividad sísmica, registrándose hasta 698, con eventos de tipo VT (el día 23) y gran número de eventos HB, seguidos de eventos de tipo LP y finalmente, un nuevo repunte en la ocurrencia de eventos de tremor espasmódico (Figura 3.13 y 3.14). Superficialmente, se reportó la presencia de incandescencia a nivel del cráter (ANEXO 3). Aparentemente, esta actividad sería la precursora de un nuevo período eruptivo del volcán El Reventador (Ramón, et al., 2007).

Desde el 26 y 27 de marzo, se registra un nuevo incremento del tremor armónico y espasmódico. El 1 de abril, ya se registrarban las primeras alertas termales localizadas hacia el sector sur del volcán, según lo observado a través de MODVOLC y Hotspot Hawai. Probablemente, relacionadas con el proceso de emisión de la Lava 8 (Figura 3.49). El día 30 de marzo (Figura 3.49.a), la alerta termal de MODVOLC, mostró actividad hacia el flanco norte. Las subsecuentes alertas (Figura 3.49.b), confirmaron días después, el descenso de la Lava 9, hacia las cercanías del cauce superior del río Reventador, en el borde norte de la caldera.

En la visita de campo realizada por el personal del IG durante los días 12 y 13 de abril se identificó la Lava 8 ya detenida en el sector sur de la caldera (Figura 3.50 y 3.51). Solo se observó incandescencia al nivel del cráter y sin actividad explosiva. Se contaron con varias alertas termales (MODIS), sin embargo, para el año 2007 no se tuvieron datos de OMI para los meses anteriores a julio (ANEXO 6).

Dentro de la caracterización geométrica de la Lava 8, se estimó un espesor medio aproximado de 12 m, alcanzó una distancia de 2710 m desde el cráter y se detuvo en la cota 2300 msnm cubriendo un área de $3,87 \times 10^4 \text{ m}^2$ en el flanco sur. Simultáneamente, descendió desde el cráter y por el flanco norte, la Lava 9 (J. Johnson, com. pers.), este flujo de lava recorrió ~4163 m para detenerse en la cota 2100 msnm. Tiene un espesor aproximado de 9 m y cubrió un área de $\sim 3,5 \times 10^5 \text{ m}^2$. Este último, es el flujo de mayor longitud en el borde norte de la caldera. (Tabla 1).

En función de las alertas termales registradas por MODVOLC y Hot Spot – Hawai, la emisión de las Lavas 8 y 9, se dio casi de manera simultánea, sin embargo, la actividad sísmica reflejó la disminución del número de eventos VT, aunque se vio incrementada la ocurrencia de eventos LP, HB y de tremor armónico y espasmódico. El monitoreo satelital registró emisiones permanentes de columnas de vapor de agua, sin ceniza, que alcanzaban hasta 2 km sobre la cumbre con dirección al SW.

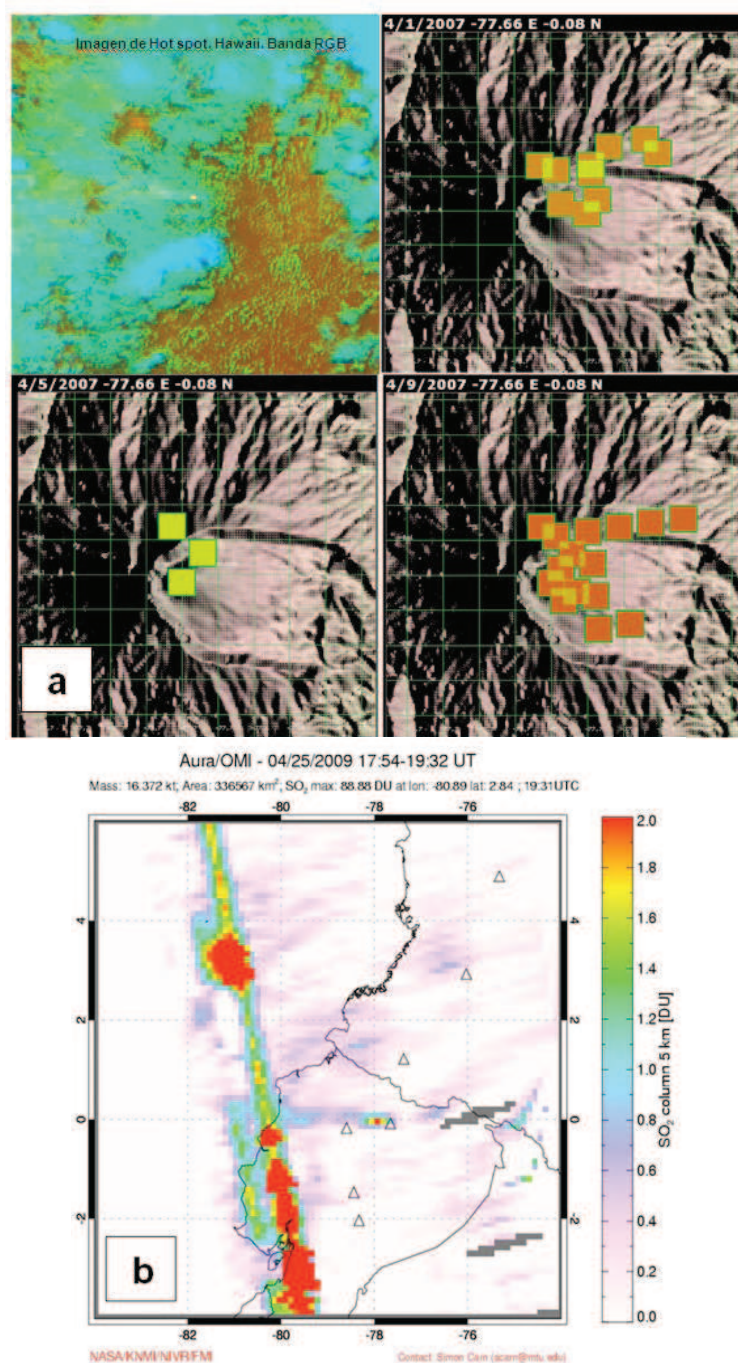


Figura 3. 49. a) Imagen en banda RGB vista con Hot spot Hawaii, alertas termales producidas entre el 30 de marzo al 9 de abril 2007 (Modificado de Hawaii-MODVOLC¹²); b) Distribución de las emisiones de SO₂ registradas por OMI el 25 de abril de 2008 (Modificado de OMI¹³).

En el mes de julio, se observó el incremento de la actividad sísmica asociada a la ocurrencia de eventos tipo VT, LP y tremor armónico y espasmódico.

¹² <http://goes.higp.hawaii.edu/cgi-bin/imageview64?zoom=1&xoffset=150&yoffset=150&xcenter=500&ycenter=500&pixrep=2&frametype1=2&ametype2=1&siteidx=36&dayidx=717&frameidx=03>

¹³ Página web: <http://so2.gsfc.nasa.gov/>

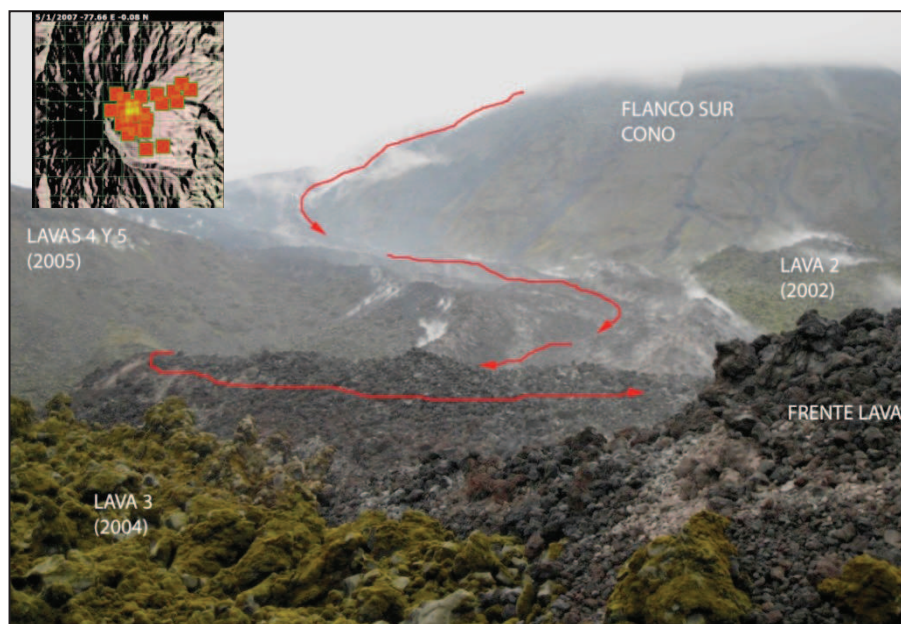


Figura 3. 50. Frente de la Lava 8 observada en el sector sur de la caldera que sobreyace a la Lava 3 el 12 de abril de 2007. (Fotografía tomada por B. Christensen). Recuadro superior: alertas termales registradas durante el mes de abril de 2007 (Modificado de MODVOLC¹⁴).



Figura 3. 51. Visita al campo, 2 y 3 de agosto de 2007. a) La Lava 9 cerca del borde norte de la caldera, vista hacia el W desde el pie de la caldera del volcán; b) Vista hacia el E observada desde el pie del cono volcánico. La Lava 9 rellena el cauce del río Reventador. Recuadro, vista al N y la escala del flujo de lava. (Fotografía tomada por J. Johnson).

Los últimos días del mes de julio, en un nuevo sobrevuelo de monitoreo visual y térmico el 19 de julio (Figura 3.52. a y b), se observó que el cráter dejado tras la erupción de 2002, continuaba siendo relleno por las Lavas 8 y 9 (Ramón et al., 2008a; Ramón, 2008b).

¹⁴ Web page de referencia :
<http://modis.higp.hawaii.edu/cgi-bin/modis/modisnew.cgi>

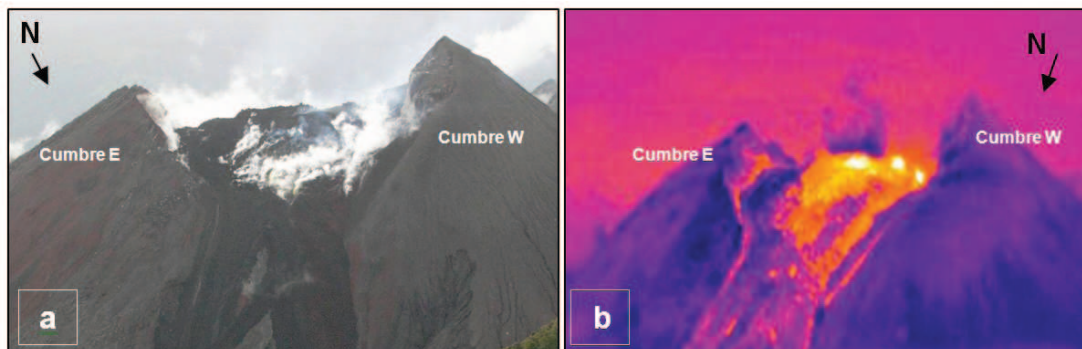


Figura 3. 52. Acumulación de lavas al interior del cráter. Sobrevuelo de monitoreo visual y térmico realizado el 19 de julio de 2007: a) Imagen digital; b) Imagen térmica respectiva. (Fotografía tomada por P. Ramón. IG-EPN).

El 27 de julio, se registró un intenso olor a azufre en los alrededores del volcán (Ramón et al., 2008a, 2008b), evidencia de procesos de inyección de magma (Zobin et al., 2008). Sin embargo, no hubo reportes en los sensores satelitales acerca de este fenómeno.

Para los días 2 y 3 de agosto, (J. Johnson, com. pers.), en la visita de campo realizada al volcán, se observó el descenso de nuevo flujo de lava (Lava 10) por el flanco norte (Figura 3.53), sobre el flujo de lava anterior (Lava 9) y localizado hacia la parte alta del cono del volcán (3377 msnm). La Lava 10, sería la actividad relacionada a las señales sísmicas identificadas por el gran número de eventos denominados caídas de rocas (Ramón, 2008b).



Figura 3. 53. Flujo de lava 10 descendiendo por el flanco norte del volcán, visto desde el borde S del flujo, el día 3 de agosto de 2007. (Fotografías tomada por J. Jonhson).

La Lava 10, alcanzó la cota de 3100 msnm. Recorrió casi 2000 m. Su espesor aproximado es de ~10 m y cubrió un área de $2,0 \times 10^4 \text{ m}^2$ (Tabla 1).

Para el mes de agosto, el día 7, a las 14h45 (TL), los sensores remotos de Hot spots-Hawai, localizan una alerta termal sobre el volcán El Reventador. Los sensores de OMI, receptan leves y esporádicas emisiones de SO_2 desde el volcán, especialmente los días 8, 11, 12, 16 y 27 de agosto.

La sismicidad a partir del día 21, se incrementó en relación a los eventos de fracturamiento (VT) y movilización de fluidos (LP y tremor armónico). Posteriormente, la actividad interna (estadísticas de sismicidad) disminuyó, aunque se mantuvieron señales de tremor armónico que se intensifican a partir del día 23, al igual que las señales de caídas de rocas.

A partir del 4 de septiembre, nuevamente se identificó una alerta térmica reportada por los sensores remotos de Hot spot-Hawai. El 5 de septiembre en un sobrevuelo de monitoreo visual y térmico, a pesar de la nubosidad a nivel del cráter, se observa un campo de fumarolas localizadas en el flanco norte del cono del volcán (Ramón, 2007). (Figura 3.54.a y b). Este día, cuenta con una imagen de OMI, donde se observa una emisión de SO_2 en el volcán (Figura 3.54.c). La actividad sísmica correspondiente, mostró un incremento respecto a la ocurrencia de señales de tipo LP, tremor armónico, explosiones y bramidos.

Las explosiones se incrementaron de manera importante entre los meses de agosto y mediados de octubre, que además contaron con esporádicas ocurrencias de emisiones de SO_2 detectadas en los sensores de OMI, a partir del mes de septiembre de 2007 en adelante.

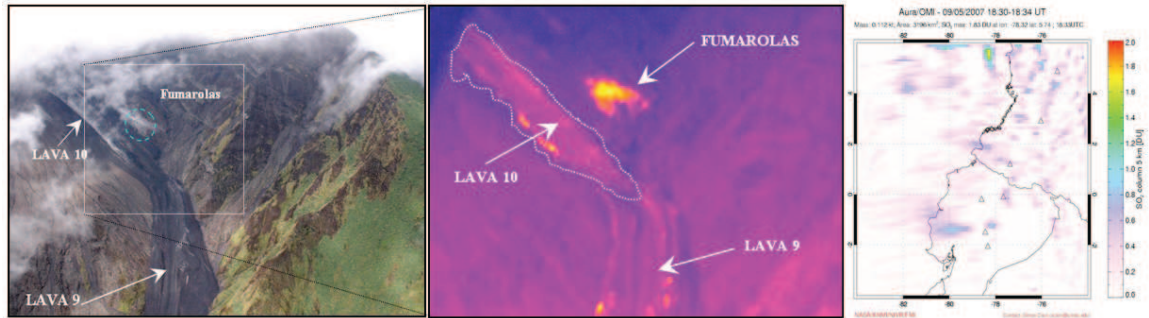


Figura 3. 54. El 5 de septiembre de 2007: a) Flanco norte del cono del Reventador: a) Parte inferior alcanzada por el flujo de Lava 10 sobre la Lava 9; b) Imagen térmica correspondiente al recuadro de la figura anterior (los colores más claros indican las temperaturas más altas). Modificado de Ramón, 2005); c) Imagen de OMI¹⁵ para ese día.

El final de esta etapa eruptiva estuvo representada por la disminución en la ocurrencia de eventos internos al volcán, estando únicamente presentes pocos eventos de tipo LP y pocas explosiones, que subsecuentemente se atenuarían (Figuras 3.13-3.14) y tampoco se registrarían manifestaciones superficiales diferentes a la desgasificación (Figuras 3.28 a 3.31), con lo cual, se considera una etapa no eruptiva, al lapso de tiempo comprendido entre octubre de 2007 a abril de 2008.

3.3.2.4 ETAPA ERUPTIVA 2008- 2009

En octubre de 2007 y abril de 2008, ocurrió un incremento de actividad sísmica asociado a eventos tipo LP, tremor armónico y espasmódico y explosiones esporádicas, que no presentaron actividad superficial destacada (Figura 3.30 y 3.31).

A inicios del mes de julio de 2008, el volcán mostró un incremento progresivo y constante respecto al número de eventos sísmicos relacionados con el movimiento de fluidos magmáticos internos (LP), registrándose la mayor cantidad de señales los días 24 y 25 de julio. A partir del 26 se registran alertas satelitales (VAAC), asociadas a la emisión de ceniza en el volcán con columnas de hasta 6 km que se elevaban sobre el cráter (Ramón & Bustillos, 2008). Además, de emisiones de SO₂ (OMI) y alertas termales sobre el cráter (MODVOLC).

¹⁵ http://so2.gsfc.nasa.gov/pix/daily/0907/ecuador_0907z.html

Desde el día 27 esta actividad sísmica mostró un cambio: a partir de las 15h00 (TL), registró una señal continuo de tremor sísmico que saturaba la amplitud de las estaciones del volcán, e inclusive se registraban en estaciones sísmicas lejanas ubicadas en los volcanes Cayambe, Antisana, Cotacachi y Guagua Pichincha (Ramón, 2008). Para ese mismo día, se registraron alertas termales (Hostspots-HIGP, VAAC y MODVOLC) (Figura 3.55.a, b y c).

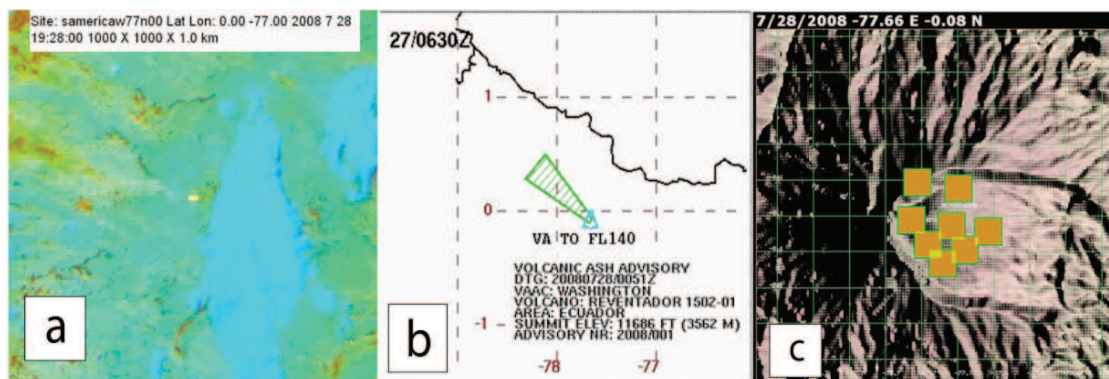


Figura 3. 55. Imágenes satelitales registradas el 27 de julio de 2008. a) Imagen con bandas RGB mostrando el punto caliente identificado por los sensores de Hawaii-HIPG; b) Área estimada de la distribución de la columna de emisión de ceniza identificada por la VAAC; c) Alertas termales identificadas por MODVOLC al interior de la caldera del volcán.

Entre el 28 al 30 de julio, personal del IG se trasladó hacia la caldera del volcán y reportó la ocurrencia de explosiones, la generación de una columna de ceniza y la salida de material incandescente que rodaba por los flancos superiores del volcán. Se encontraba descendiendo la Lava 11, por el flanco sur del cono y en dirección hacia la cabecera del río Marker (Ramón, 2008). El 29 de julio, se detectaron importantes emisiones de SO_2 asociadas al volcán, como se observa en la Figura 3.56. Este evento estuvo acompañado de olor a azufre en los alrededores del volcán (Ramón, 2008b).

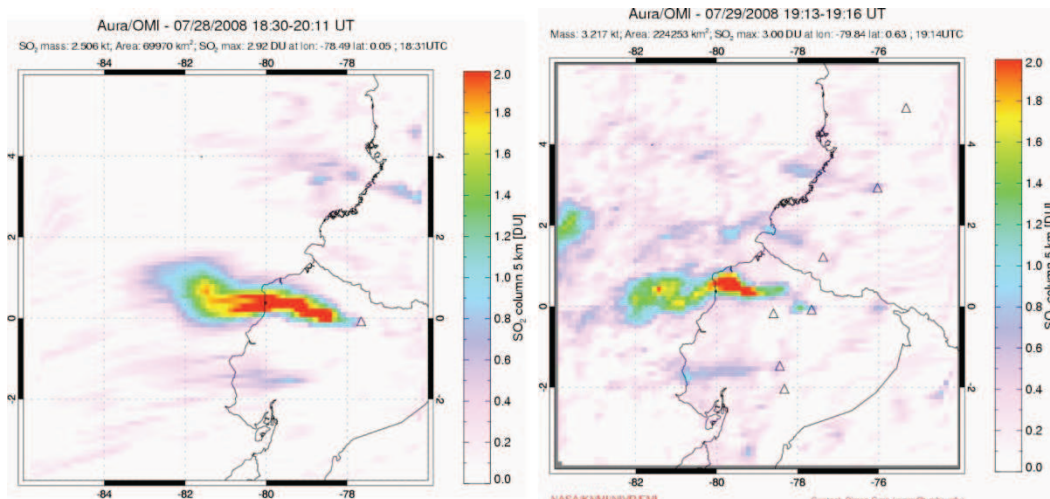


Figura 3. 56. Imagen de la emisión de SO₂ para el 29 de julio de 2008. (Tomado de OMI)

En las observaciones de la mañana y la noche del día 29, se estimó que el flujo de lava había descendido alrededor de 150 a 200 m en unas 9 horas, lo cual daría una velocidad estimada de avance del flujo de unos 400 a 500 m/día (Ramón, 2008).

Al día 31 de julio, la actividad sísmica se mantuvo en niveles bajos. Las imágenes satelitales permitieron apreciar una emisión de vapor y gases, con bajo contenido de ceniza, de dirección variable entre W y SW, las cuales no representaron riesgo de caídas de ceniza en las poblaciones cercanas al volcán (Ramón, 2008). La distribución de las emisiones de ceniza se mantuvo en las cercanías del volcán, sin embargo, la ceniza se extendió hasta la costa, principalmente entre los días 28 y 29 de julio, como lo indica Bustillos (2008), (Figura 3.57).

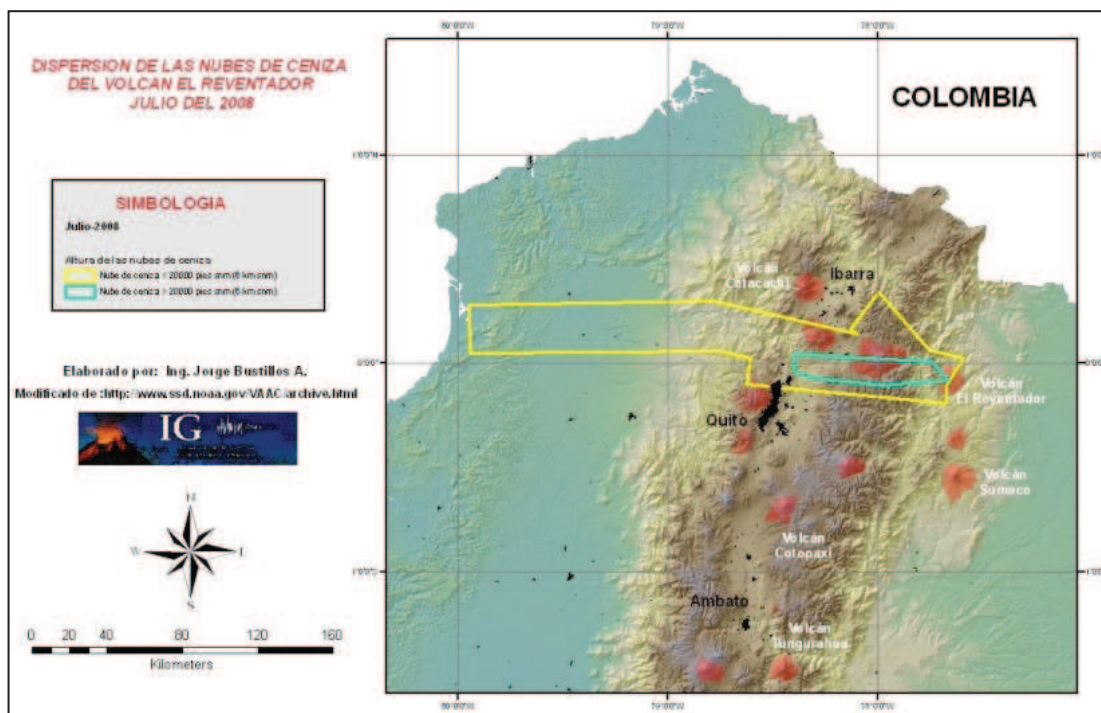


Figura 3. 57. Dispersión de las nubes de ceniza emitida en julio de 2008 (Modificado de VAAC¹⁶ en Bustillos, 2008).

El 1 de agosto, la poca actividad sísmica estuvo acompañada de anomalías térmicas localizadas en los flancos del volcán, aunque en menor número y menor intensidad que el día anterior (Figura 3.58.a y b). Las observaciones realizadas para la Lava 11, ya indicaron que sobrecorría la Lava 1 (Ramón, 2008b).

El 2 de agosto, en una visita realizada dentro de la caldera, se observó que el flujo de lava 11 aún continúa avanzando, y se encuentra sobre el frente de la Lava 2 (Figura 3.58.c).

¹⁶ Página web: <http://www.ssd.noaa.gov/VAAC/archive.html>

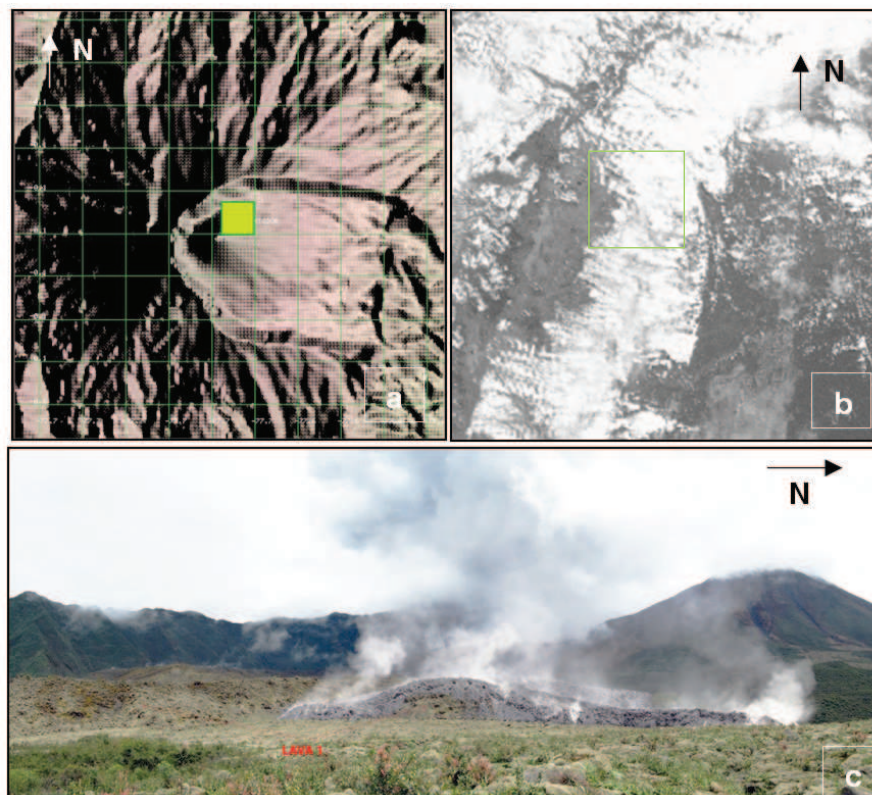


Figura 3. 58. Imágenes correspondientes al 2 de agosto de 2008: a) alerta termal identificado por MODIS (MODVOLC), b) imagen visible del hot spot identificado en HAWAII; c) Lava 11 descendiendo por el flanco sur de la caldera y que se deposita sobre la Lava 1. Fotografía de C. Viracucha (IG EPN).

Entre el 2 y 7 de agosto, se observó incandescencia al interior del cráter y en el frente del flujo de lava. Aparentemente, el flujo de lava estaba detenido o su avance era muy lento. Según los datos de GPS, se registró mediciones del 30 de julio hasta el 7 de agosto, en el frente de lava que recorrió alrededor de 3 km, deteniéndose cerca de la cota 3000 msnm.

La sismicidad durante tal período se mantuvo en niveles bajos en comparación a lo que ocurrió entre los días 27 y 30 de julio, sin embargo, no retornaba a los niveles que se tenían antes del inicio de este nuevo período eruptivo. La principal actividad sísmica que aún persistió indicaba movimiento de fluidos al interior del volcán (Ramón, 2008b).

A nivel superficial, los reportes de campo, indicaron la presencia de columnas de vapor saliendo del cráter que se dirigen hacia el W. Durante este período, la información satelital no registró anomalías termales.

El 28 de agosto, se realizó un sobrevuelo de monitoreo visual y se observó el total alcance de la Lava 11. Este flujo descendió desde el cráter hacia el flanco sur del cono y se dividió en dos ramales: el más extenso poco a poco fue virando hacia el E hasta llegar a su posición actual (cubriendo parcialmente al flujo de Lava 2 y su viento); el otro ramal de menor extensión, descendió por el sur, llegando al pie de la pared de la caldera ubicándose en la cabecera del río Marker. Este último ramal fue reportado por primera vez durante este vuelo.

La emisión de vapor de agua era continua y su contenido de ceniza era bajo, sin superar los 1000 m de altura sobre el cráter y con dirección al NNW (Figura 3.59). Sin embargo, las imágenes térmicas permitieron confirmar que no había presencia de flujos de lava que hayan descendido por el flanco norte (Ramón & Bustillos, 2008).



Figura 3. 59. Caldera del volcán El Reventador vista desde el SE en el vuelo de monitoreo visual y térmico realizado el 28 de agosto de 2008. Lava 11 que descendió por el flanco sur del cono del volcán. (Fotografía de P. Ramón. IG EPN).

Como se presenta en la Tabla 1, la Lava 11 alcanzó la cota de los 2400 msnm; recorrió una longitud máxima de 3500 m y cubrió un área aproximada de $1,0 \times 10^6$ m². Se estima un espesor aproximado de ~10-12m.

Durante los meses de septiembre y octubre de 2008, se mantuvo una tendencia creciente respecto a la actividad sísmica asociada a eventos tipo LP con pocos eventos asociados al fracturamiento de las rocas (VT). La ocurrencia de los otros tipos de eventos sísmicos, se presentaron de manera esporádica, como las

caídas de rocas al igual que alertas satelitales de OMI, identificada el 6 y 12 de octubre de 2008, en el que el nivel de emisión apenas se distingue en las imágenes (Figura 3.60).

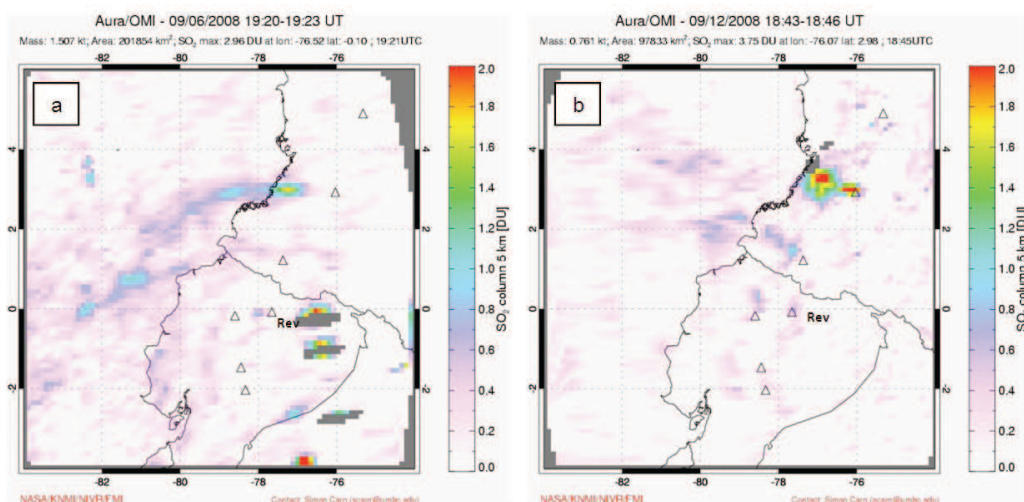


Figura 3. 60. Imágenes de OMI correspondientes al 6 y 16 de octubre de 2008, en las que se muestran emisiones alrededor del volcán El Reventador.

En el mes de noviembre, se produce nueva actividad eruptiva en el volcán El Reventador. El día 9, a partir de las 03h58 (TL), se registró la primera alerta de anomalía térmica registrada por Hot spots-Hawaii¹⁵ (Figura 3.61.a y b).

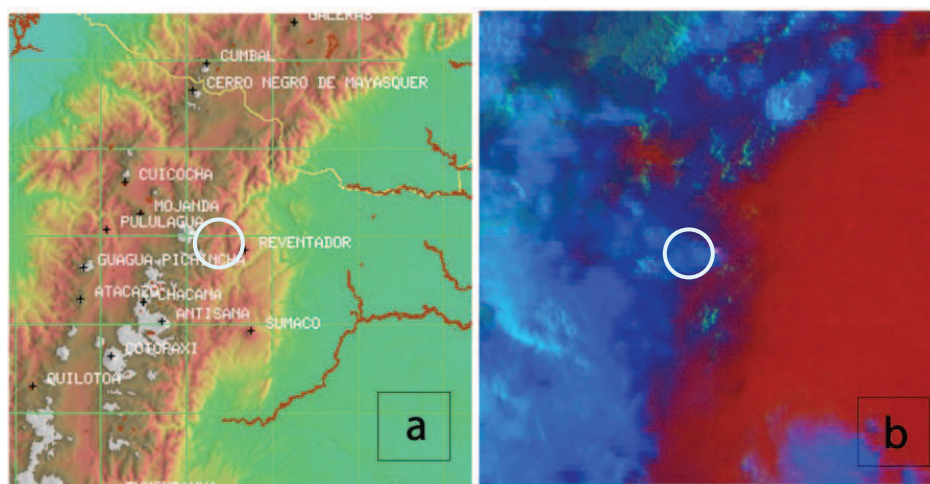


Figura 3. 61. a) Imagen con la ubicación del volcán El Reventador (círculo blanco); b) imagen RGB con alerta termal (punto amarillo), todas de la primera alerta termal identificada en Hotspots-Hawaii¹⁷ el día 9 de noviembre de 2008.

¹⁷ <http://goes.higp.hawaii.edu/cgi-bin/imageview64?zoom=1&xoffset=150&yoffset=150&xcenter=500&ycenter=500&pixrep=2&frametype1=2&ametype2=1&siteidx=36&dayidx=1882&frameidx=06>

Inmediatamente, se observó las alertas de emisión de ceniza de la VAAC (Figura 3.62.a y b) dirigiéndose en dirección al WNW de volcán. El mismo día, se tuvieron reportes que indicaban la presencia de material incandescente en el cráter del volcán (MODIS, en ANEXO 5) y en los sensores de OMI (ANEXO 6).

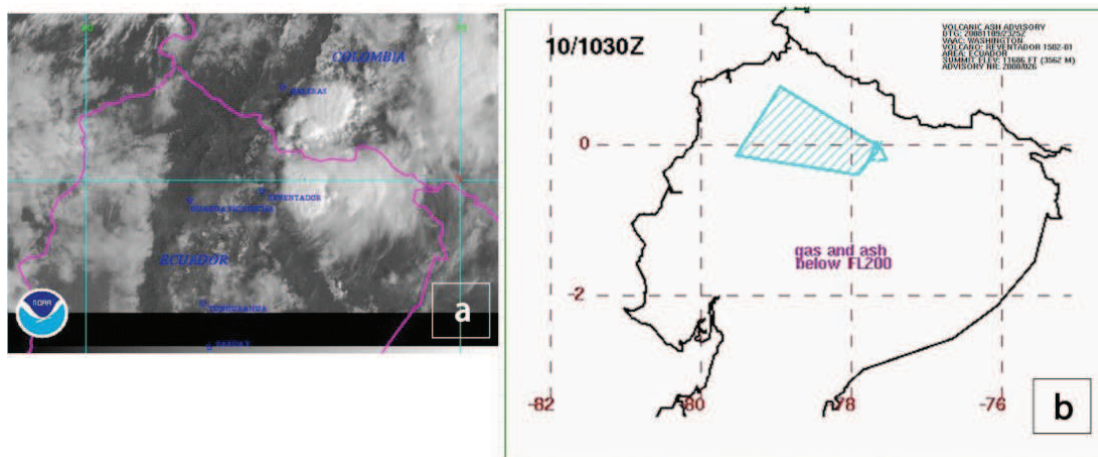


Figura 3. 62. Imágenes con la dispersión de las columnas de ceniza emitidas durante 09 de noviembre de 2008. a) Imagen con la ubicación del volcán El Reventador dentro del rango visible (NOAA); b) Imagen de VAAC, correspondiente.

Se registró la primera emisión importante de SO_2 proveniente del volcán (Figura 3.63). El 10 y 11 de noviembre, en una visita al campo realizada por personal del IG, confirmaron el descenso de un nuevo flujo de lava (Lava 12) por el flanco sur del edificio volcánico (Figura 3.64) y la ocurrencia de bramidos.

Adicionalmente, los sensores de OMI receptaron las emisiones más intensas de SO_2 , los días 10, 11 y 20. Del 11 al 13 de noviembre, se registraron además las alertas termales tanto en MODVOLC y en Hot Spot Hawaii (Figura 3.65.a y b). Esto sugería la presencia de actividad efusiva en el sector sur. Dos días más tarde se observaba incandescencias en el flanco norte del volcán (Bitácora IG). Esta actividad correspondió al descenso de las Lava 12 y Lava 13. La Lava 12, se detuvo mientras descendía por el flanco sur, alcanzando aproximadamente 2350 m de longitud hasta la cota 2300 msnm, y se extendió por un área de $1,73 \times 10^6 \text{ m}^2$. Tabla 1. La Lava 13, en cambio, recorrió una longitud de casi 2000 m por el flanco norte, hasta la cota 2800 msnm y cubrió un área de $1,85 \times 10^5 \text{ m}^2$.

En base a las estimaciones realizadas con la información satelital y de la bitácora, el lapso de tiempo de descenso de la Lava 12 serían 5 días, y el tiempo estimado para la Lava 13 sería de 3 días, según los datos obtenidos de MODVOLC.

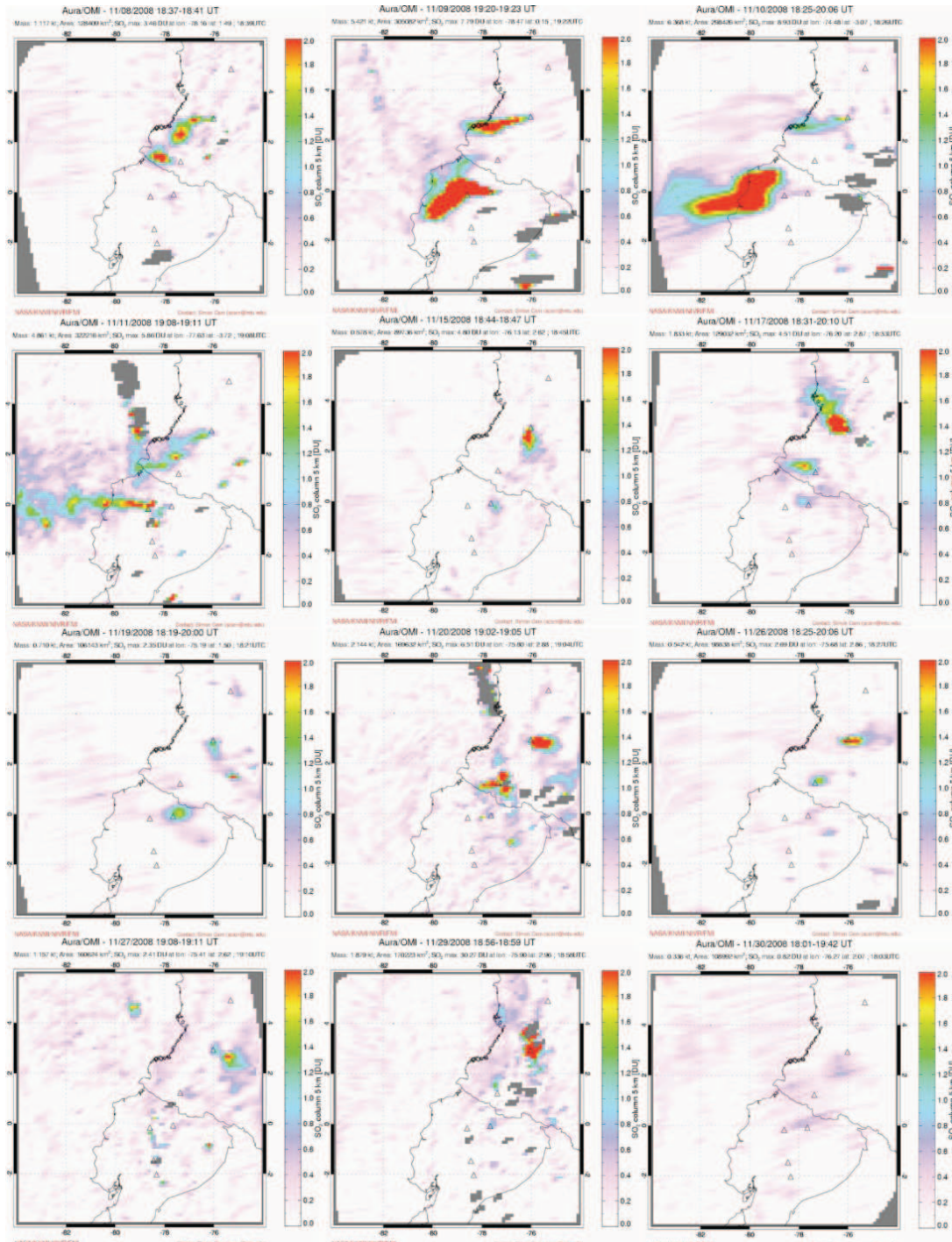


Figura 3. 63. Imágenes disponibles de OMI durante los días de actividad registrada el mes de noviembre de 2008.

El 19 de noviembre de 2008, persisten las emisiones de ceniza y de SO_2 , identificados por VAAC y por OMI, respectivamente. El 26 de noviembre, se reportó un fuerte olor a azufre en los alrededores del volcán. Luego de esta actividad, la tendencia general de todos los parámetros superficiales e internos, decrecieron notablemente. El 4 de diciembre, en un vuelo de monitoreo visual se confirmó el descenso de un flujo de lava hacia el sector sur del volcán a pesar de que las condiciones climáticas no fueron las más favorables, (Ramón & Vallejo, 2009).

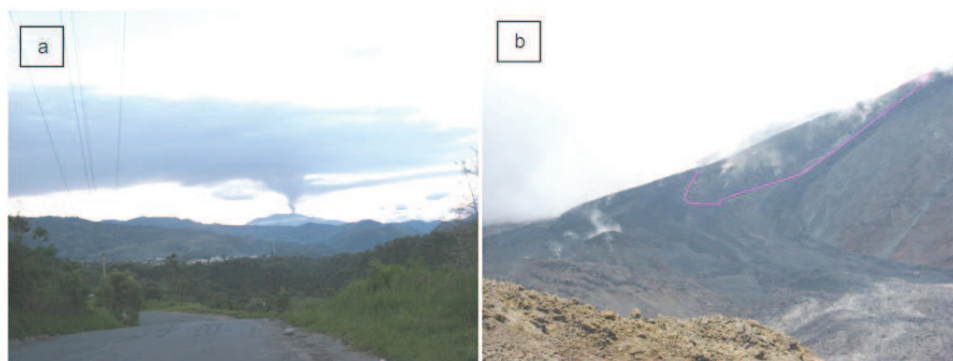


Figura 3. 64. a) Columna de emisiones de ceniza y gases emitidos por el volcán El Reventador el día 9 de noviembre de 2008, observado desde El Chaco; b) Lava 12 descendiendo por el flanco sur del edificio volcánico, visto desde el flanco suroriental de la caldera el 8 de noviembre de 2008 (Fotografías tomadas por C. Viracucha, IG-EPN).

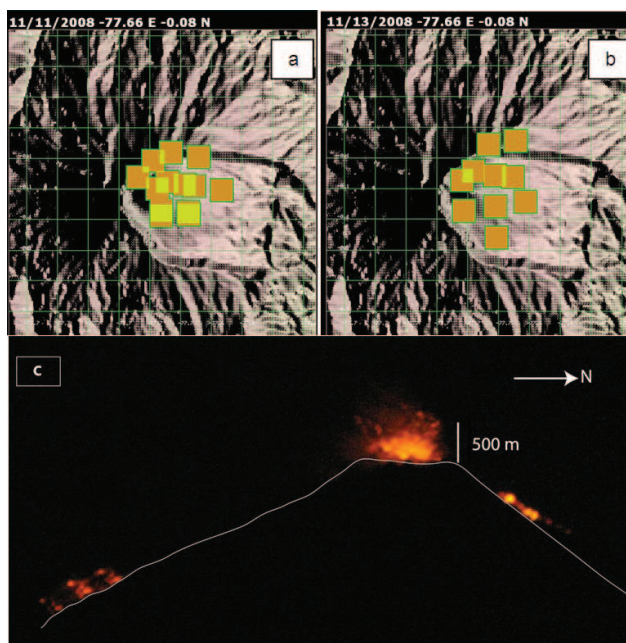


Figura 3. 65. a) Alertas termales identificadas en MOLVOLC del 11 y 13 de noviembre de 2008; b) Incandescencias observadas en el flanco sur, cráter y flanco norte, evidencia de actividad stromboliana (Fotografía tomada por V. Cansino). Respectivamente, al sur la Lava 12 y al norte la Lava 13.

Durante los meses de enero a marzo de 2009, la actividad superficial identificada en el volcán El Reventador, estuvo relacionada con las emisiones de SO₂ registradas por OMI y aparentemente, decrecía el volumen de esas emisiones. La actividad sísmica disminuyó la ocurrencia de eventos tipo VT, HB y LP, pero generalmente, precedían a los episodios de tremor (Figuras 3.14, 3.30 y 3.31).

Para el mes de abril, el día 23, la actividad del volcán registró un paulatino y constante incremento de la sismicidad. Esta actividad fue caracterizada por la generación de bandas de tremor espasmódico y armónico, con eventos de tipo LP. Estas bandas de tremor, mostraron períodos de baja y alta energía, con variaciones de amplitud que algunas veces saturaban la señal de las estaciones localizadas sobre el edificio volcánico (Troncoso et. al., 2009a). Mientras tanto, las manifestaciones superficiales a las 06h42 (TL) registradas por personal del SOTE (Figura 3.66), ubicado en la población del Reventador, señaló la presencia de una columna de emisión de vapor de agua con bajo contenido de ceniza con dirección hacia el occidente y con una altura aproximada de 2 a 3 Km (Troncoso et. al., 2009a).



Figura 3. 66. Columnas de vapor, gases y ceniza producida por el volcán El Reventador el 23 de abril de 2009, vista desde la población de El Reventador (Fotografía tomada por R. Grijalva-SOTE).

En las imágenes satelitales de Hot spot-Hawai, se pudo constatar la presencia de una anomalía térmica sobre el volcán, a partir de las 03h00 (TL) y que se mantuvo varias horas. La mayor intensidad se presentó entre las 05h00 y 07h00 (TL), que coincidieron con las mayores amplitudes del tremor y con el incremento de los ruidos provenientes del volcán El Reventador. Adicionalmente, se observó la

presencia de una columna de emisión de vapor que se dirigía hacia el SW. A las 07h15 de esa mañana, la información satelital reportada por VAAC, indicó la presencia de una columna de emisión de vapor de agua que se extendía 26 km en dirección al W-SW en el Valle Interandino.

El día 24 de abril, los reportes recibidos por el IG EPN en horas de la noche 19h51(TL), desde el sector aledaño al volcán, informan la presencia de material incandescente hacia el cráter y hacia el flanco sur (30 m bajo la cumbre), bramidos y una columna de 1,5 km de altura. Esta actividad correspondió al descenso de la Lava 14. El día 25 de abril, alrededor de las 11h15 (TL), se reportó las primeras alertas termales en MODOVLC.

El 1 de mayo, se observa la emisión de SO_2 más potente de los últimos meses, y era reportada en OMI y también por la VAAC (Figura 3.67.a). El 2 de mayo, personal del IG EPN, conoce que alrededor de las 06h49, se observó más material incandescente a nivel del cráter del volcán. El día 5 de mayo, se tuvieron los primeros reportes de alertas termales identificadas en MODVOLC, alrededor de la hora 12h00 (Figura 3.67.b).

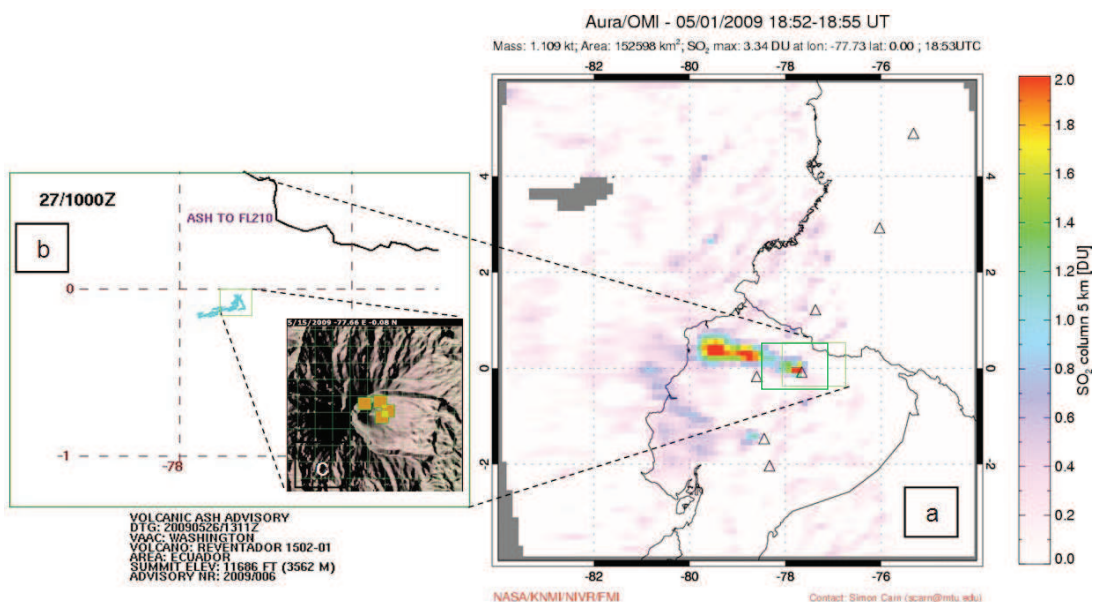


Figura 3. 67. a) Imagen de OMI con la emisión de SO_2 del volcán EL Reventador, correspondiente al 1 de mayo de 2009; b) Alertas termales receptadas en MODVOLC el 15 de mayo de 2009 y asociadas a la Lava 15.

El 15 de mayo, se reportan columnas de emisión de vapor, gases y ceniza que alcanzan los 2km de altura. Además, las alertas termales identificadas en MODVOLC, se localizaban en el cráter y aparentemente, en el flanco norte (Bitácora IG - ANEXO 3). Esta actividad se presentó conjuntamente con eventos tipo LP que se registraron a modo de enjambres y fueron seguidos de la ocurrencia de tremor espasmódico. Esto estuvo asociado a la emisión de fluidos y de la Lava 15. Este flujo y uno anterior, fueron identificados en un sobrevuelo de monitoreo visual y térmico el 31 de octubre de 2009 (Figura 3.68.a, b y c).

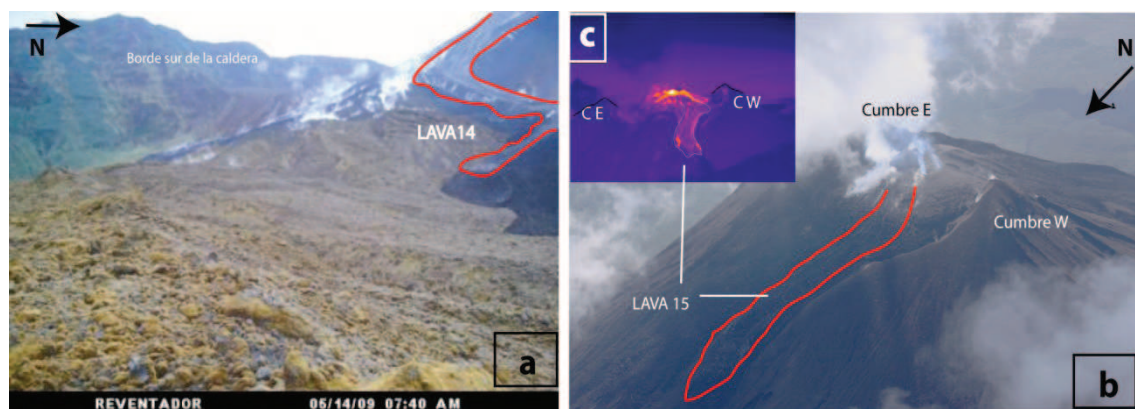


Figura 3. 68. a) Vista parcial de la Lava 14 captado por la cámara secuencial del 14 de mayo de 2009. (Modificado de Vallejo, 2009); b) Vista total del flujo de lava 15 hacia el flanco norte del cráter; c) Imagen térmica correspondiente a la Lava 15, donde CE es cumbre oriental y CW cumbre occidental (Fotografía tomada por P. Ramón, EPN).

En base a los datos mostrados en la Tabla 1, la Lava 14, cubrió un área de $\sim 2,83 \times 10^5 \text{ m}^2$, y su espesor estimado es $\sim 13 \text{ m}$. La cota alcanzada por este estuvo en los 2300 msnm. La Lava 15 en cambio, no superó la cota de 3000 msnm. El área cubierta es de aproximadamente $1,95 \times 10^4 \text{ m}^2$ y tiene un espesor estimado de 10 m.

Desde el día 1 de agosto, los sensores térmicos de MODVOLC y Hot Spot Hawaii, mostraron la presencia de puntos calientes sobre el volcán. El día 3, se detectó una anomalía térmica hacia el N del cráter del volcán, pese a las condiciones de alta nubosidad en la zona (Figura 3.69). A partir del día 4, la actividad sísmica en el volcán Reventador se incrementó significativamente en comparación a los días anteriores (Ramón et al., 2009a). El día 6, se observó la presencia de una columna de vapor de agua emitida desde el cráter y que se elevó 1200 m sobre el mismo y tenía dirección hacia el W (Figura 3.70.a).

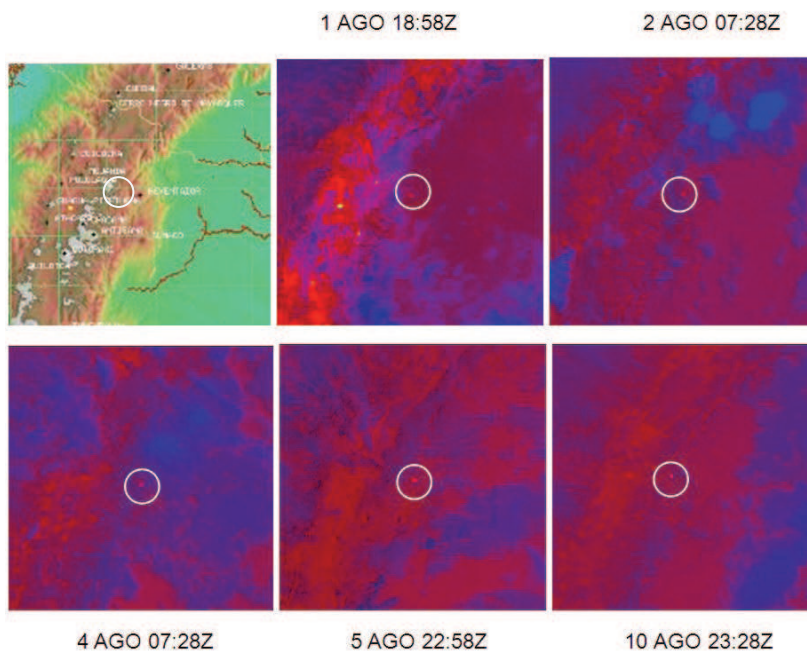


Figura 3. 69. a) Los círculos en blanco muestran puntos calientes detectados por el sensor satelital MODIS en las fechas y horas indicadas. La figura superior izquierda indica la ubicación del volcán Reventador (Fuente HIGP) (Modificado de Ramón et al., 2009a).

La presencia de una franja de vapor de agua se extendía desde el cráter hasta la cabecera del río Marker (flanco SE). Junto a ello, la presencia de brillo a nivel del cráter y la salida de bloques incandescentes que caían sobre los flancos del cono. Esto sugirió la presencia de un nuevo flujo de lava (Lava 16) (Figura 3.70.b) (Ramón et al., 2009a).

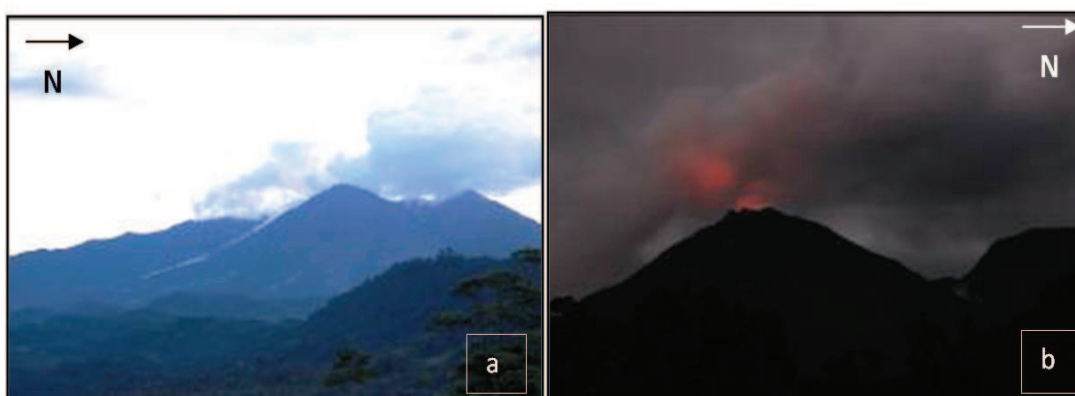


Figura 3. 70. a) Vista del volcán desde la población de El Reventador el 6 de agosto de 2009. Se aprecia la columna de emisión que se emite desde el cráter, así como una franja de vapor que se ubica en el flanco SE del cono, dentro de la caldera y alrededor de la cota 2400 msnm; b) Desde las inmediaciones del R. Azuela se observa la presencia de brillo en el cráter del volcán. (Tomado de Ramón et al., 2009b).

Desde los primeros días de septiembre 2009, se registró el progresivo incremento en la actividad sísmica del volcán. Esta actividad se caracterizó por la generación de eventos asociados con la movilización o vibración de fluidos al interior del volcán: eventos tipo LP, tremor armónico y espasmódico (Ramón et. al., 2009b). Las concentraciones de SO₂ presentes en la atmósfera y detectadas por OMI el día 16 de septiembre, mostraron un incremento respecto a los días anteriores. El 16 y 17 de septiembre, personal del IG EPN, observó y reportó la presencia de un “domo” en el cráter del volcán. Esta estructura crecía continuamente desde que fue reconocida meses atrás. Las emisiones de gases se producían con dirección al occidente y alcanzaban alturas menores a 200m sobre la cumbre. Conjuntamente, las mediciones de SO₂ realizadas el 16 de septiembre por personal del IG EPN, exponen una expulsión de entre 557 y 2220 t/día (Vallejo et. al., 2009) (Figura 3.71).

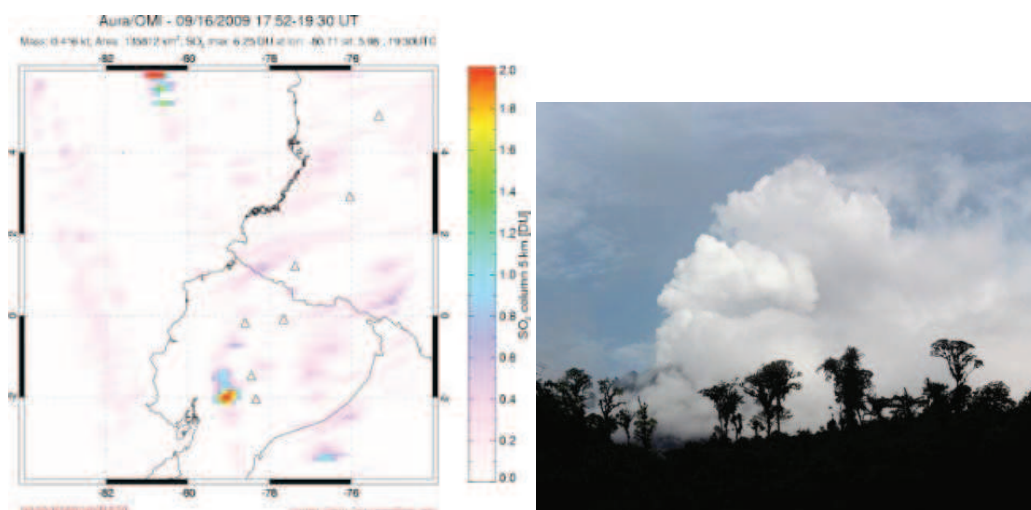


Figura 3. 71. a) Imagen generada en base a observaciones satelitales con el instrumento OMI correspondiente al día 16 de septiembre 2009 (Fuente: OMI¹⁸); b) Vista desde el hotel El Reventador, ubicado al NE del volcán, de la emisión continua saliendo del cono del volcán a las 8h50 (TL). (Modificado de Vallejo et al., 2009).

Para el mes de octubre, la sismicidad mostró un incremento de la actividad asociada con la circulación de fluidos al interior del volcán (LP y tremores armónico y espasmódico). Los primeros días de octubre, mostraban emisiones de vapor de agua, gases y poca ceniza. OMI y VAAC Washington, reportaron respectivamente, la ocurrencia de estas emisiones. El 6 de octubre, MODVOLC recepta una alerta termal alrededor de las 08h50 (TL) y, otras que continuaron los

¹⁸ Página web: http://so2.umbc.edu/omi/pix/daily/1208/ecuador_1208.html

días 11, 13, 19 de octubre. El día 15 de octubre, la ocurrencia de tremor fue registrado en las estaciones cercanas al volcán Antisana (Bitacora IG EP, en ANEXO 3). El día 16, a las 03h56 (TL) en la Bitácora, se reportó la ocurrencia de una fuerte explosión que expulsó material incandescente. Esta actividad estuvo acompañada por bramidos de variada intensidad y columnas de vapor con dirección al SW. Adicionalmente, el descenso de material incandescente por el flanco sur estaría asociado a la Lava 17. Esta actividad fue acompañada de eventos sísmicos de tremor espasmódico, de episodios de tremor armónico y esporádicas explosiones (Troncoso et al., 2009b). El día 18, se produjo una importante emisión de SO_2 y al mismo tiempo, fue también reconocida una columna de ceniza por la VAAC Washington (Figura 3.72.a-b).

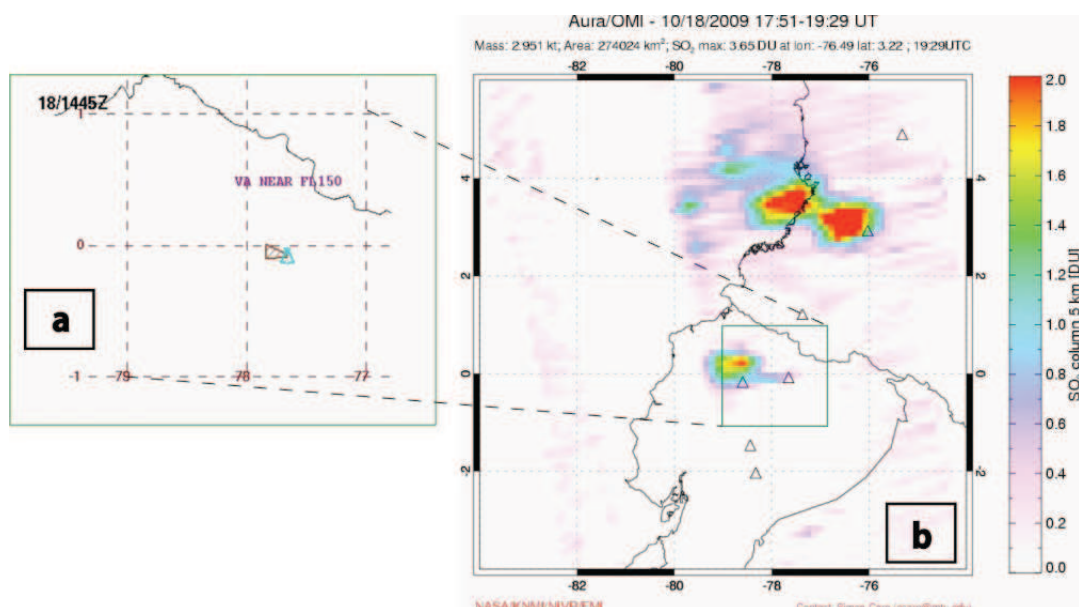


Figura 3. 72. Emisión de SO_2 y de ceniza identificada el 18 de octubre de 2009; a) registrada por VAAC y b) Registrada por OMI¹⁹¹⁸.

Desde el día 20 de octubre de 2009, a las 17h30 (TL), se registró un mayor número de eventos tipo LP, tremores y explosiones con respecto a los días anteriores. Esta actividad disminuyó hacia los días subsecuentes. Sin embargo, dichos eventos registraron una amplitud considerable para las estaciones sísmicas cercanas a los volcanes Antisana, Cayambe y Guagua Pichincha (Troncoso et al., 2009c).

¹⁹ Página web: http://so2.umbc.edu/omi/pix/daily/1208/ecuador_1208.html

Los días 20 y 21, las explosiones con cañonazos de diversas intensidades fueron escuchadas en poblaciones ubicadas cerca al volcán y generaron columnas de vapor y gases con muy bajo contenido de ceniza que alcanzaron hasta 4 km de altura. La dirección de dichas emisiones era variable, hacia el W y otras al S (Troncoso et al., 2009c).

En la mañana del día 22 y 31, se realizaron sobrevuelos de monitoreo térmico y visual (Figura 3.72). En ellos, se constató que aún se movilizaban los flujos de lava en los sectores norte y sur. El cráter lucía relleno de lavas, cuya acumulación daba el aspecto de un domo que no presentaba signos de inestabilidad dentro del cráter (Vallejo, 2009). La Lava 17, siguió la dirección de los flujos de lava anteriores y se ramificó en cuatro lóbulos (S - SE). El de mayor extensión se detuvo sobre la cota de 2500 msnm (Troncoso et al., 2009c). Esta característica puede estar asociada con un cambio en la naturaleza reológica del magma (Gonnermann & Manga, 2007), o con la tasa de emisión durante esta etapa (Walker, 1973; Harris & Rowland, 2009).

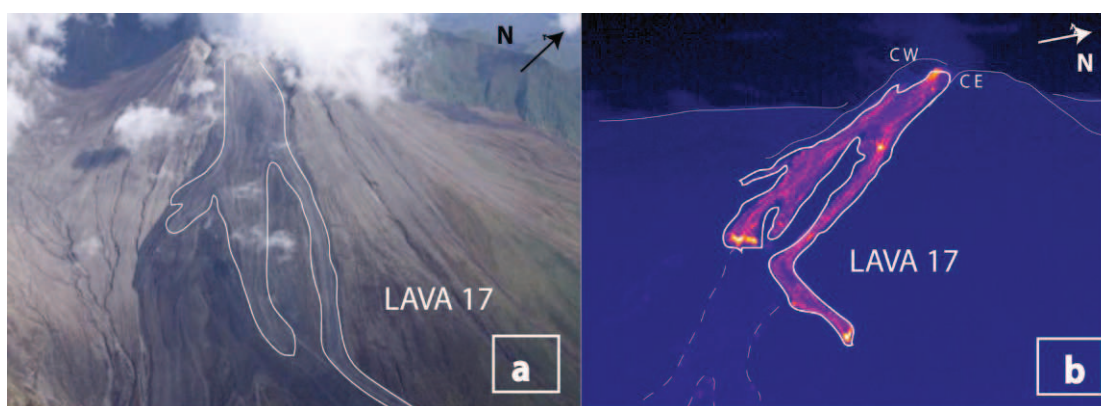


Figura 3. 73. Vista del flujo de lava 17 descendiendo por el flanco sur del volcán. a) Fotografía y b) Imagen térmica, respectivamente (CE cráter oriental, CW cráter occidental). (Modificado de Vallejo, 2009).

Como consta en la Tabla 1, la Lava 17, a pesar de sus varias bifurcaciones, alcanzó una distancia máxima de 1725 m desde el cráter y bordeó el sector NE de la parte superior de la Lava 2, de modo que ha alcanzando la cota 2700 msnm. El área cubierta por el flujo es $1,85 \times 10^5 \text{ m}^2$ y se estima un espesor promedio de 10 m.

Para los meses de octubre, noviembre y diciembre, la actividad sísmica mantuvo una tendencia creciente relacionada con la ocurrencia de eventos de tipo LP, explosiones y señales de tremor. A pesar de que continuaron las emisiones de gases desde el cráter, no se registraron emisiones importantes de SO_2 . Durante noviembre y diciembre, hubo alertas de emisiones de ceniza, para los días 3-5, 14-15 y 21 de diciembre de 2009. Ya no se observó el descenso de nuevos flujos de lava, sin embargo, tras el incremento de la actividad explosiva se observó la acumulación de material fragmentado (ceniza y bloques) al interior del cráter que ha sido rellenado por las lavas emitidas por el volcán. Esto ha construido una estructura con forma de cono de escoria (Vallejo & Ramón, 2011) hacia el interior del cráter (Figura 3.73).



Figura 3. 74. Cono de escoria al interior del cráter del volcán El Reventador desarrollado desde el mes de octubre. Se observan los leveés dejados por uno de los flujos que descendieron hacia el flanco sur (Fotografía P. Ramón, tomada el 31 de octubre de 2009).

Finalmente, esta etapa termina de manera distinta a las demás. SE produce un drástico incremento respecto al número de eventos asociados a actividad explosiva, es decir, se observa el incremento tanto de eventos de tipo LP y de explosiones. Esto se había evidenciado en las etapas anteriores, pero es mucho más intensa en esta Etapa Eruptiva 2008-2009. Mientras tanto, se observa una drástica disminución en la ocurrencia de eventos VT e HB al inicio de la etapa eruptiva como se pudo observar para la Etapa Eruptiva 2004-2005 y Etapa Eruptiva 2007.

Esto significativamente, muestra un carácter diferente respecto a lo que se venía dando en el volcán.

3.2.3 CÁLCULO ESTIMADO DE LA TASAS DE EMISIÓN DE LOS FLUJOS DE LAVA

Para este trabajo, se adopta la terminología definida por Harris et al. (2007). De manera que se considerará la tasa media de emisión (TME), como la relación obtenida entre el volumen total de lava emplazado durante un proceso eruptivo de duración conocida.

La tasa de descarga o emisión en sí misma, depende de un gran número de factores: forma del viento, sus dimensiones, la viscosidad, la cohesión y el gradiente de presión dentro del volcán (Francis, 1993; Fink & Anderson, 2000; Rosi et al., 2004; Ortiz, 2009). En el caso del volcán El Reventador, las lavas son de tipo bloque. Generalmente, las lavas tipo bloques, caen por la pendiente. Los bloques de lava se resquebrajan en lóbulos a medida que van avanzando, ruedan y rebotan pendiente abajo, de modo que también generan un tipo de autobrecha ya que continúan desintegrándose durante el descenso y colisión de los bloques (McPhie et al., 1993), como se observó directamente en 2004 (J. Johnson, com. pers.).

Tomando en cuenta los datos de monitoreo volcánico, este trabajo pudo precisar varios períodos de duración de cada evento efusivo. Para ello, se usó: 1) el monitoreo visual directo (reportes de la bitácora y visitas al campo), 2) con las estadísticas sísmicas (principalmente asociado a la ocurrencia de eventos de tremor armónico y espasmódico) y 3) con las alertas de anomalías térmicas registradas en MODVOLC (Todos estos registros constan en los ANEXOS 2, 3, 5). De esta manera se estableció una fecha tentativa del inicio de la actividad efusiva y su duración.

El trabajo de cartografía realizado, tanto en el campo y con las imágenes satelitales, permitieron determinar los aspectos geométricos de cada flujo de lava (área, espesor y volumen). Dichos valores son bastante confiables, dado que para la escala en la que se desarrolla el mapa es 1:25000, la resolución de los pixeles

en una imagen ASTER va de entre 15 a 30 m por pixel, hacen que las variaciones que se produzcan en el mapa, sean prácticamente despreciables.

Para el cálculo del volumen de cada flujo de lava, se asumió para cada flujo, superficies lisas y planas, de espesor homogéneo, que descienden por una pendiente alta en los flancos del cono y que cambia a una pendiente baja hacia la base de la caldera, según lo observado sin mayores detalles topográficos, como se representa en la Figura 3.75, donde se considera una lava que vista en planta, los puntos del techo y la base sean los mismos.

Finalmente, se establecieron dos principales cálculos: a) la tasa media de emisión de cada flujo de lava (Tabla 1) y b) la tasa media de emisión para el tiempo total de actividad efusiva (Tabla 1).

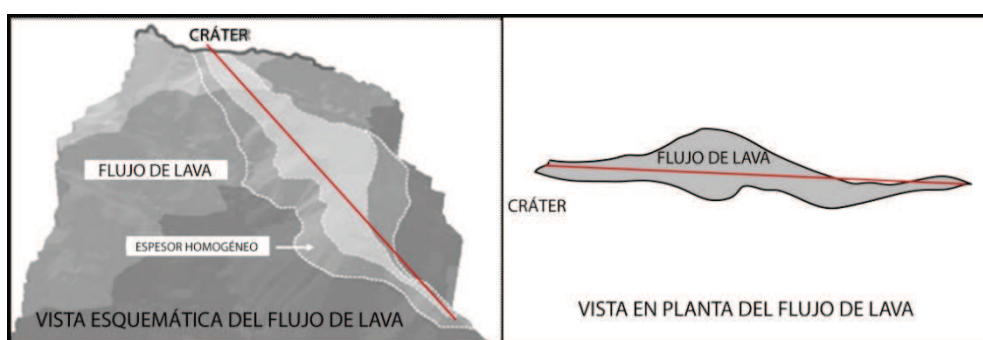


Figura 3. 75. Esquema sobre el terreno de un flujo de lava visto de frente y en planta, con superficies lisas y espesor homogéneo.

Estos valores obtenidos para el volcán El Reventador, son comparados con valores de tasas de emisión medias obtenidas a lo largo del tiempo para varios estudios en volcanes de similar composición y configuración geodinámica (Tabla 2).

Lava #	Actividad Eruptiva			Geometría de los flujos			Tasa Media de Emisión			
	Inicio		Duración	Dimensiones						
	Fecha		Tiempo t (días)	Área A (m ²)	Espesor e (m)	Volumen V x 10 ⁶ (m ³)	TME = V/t Harris et al. (2007) m ³ /día m ³ /s			
	Año	Mes	Día							
1	2002	Nov.	9	9	1640000	16	26,3	2,92E+06	33,77	
2			18	5	545000	12	6,54	1,31E+06	15,15	
3	2004	Nov.	12	8	597000	11	6,57	8,21E+05	9,51	
4	2005		Abr.	2	9	469000	12	5,63	6,25E+05	7,23
5			May.	18	10	895000	8	7,16	7,16E+05	8,29
6			Jul.	19	4	41700	14*	0,59	1,46E+05	1,69
7			Sept.	14	7	12600	10*	0,13	1,81E+04	0,21
8	2007		Mar.	25	11	387000	9	4,64	8,69E+05	10,08
9			Abr.	9	9	354000	9	3,18		
10			Ago.	2	10	20400	10	0,2		
11	2008		Jul.	28	8	1010000	14	14,1	1,76E+06	20,37
12			8	5	173000	10	1,73	3,45E+05	4	
13			Nov.	11	3	185000	10	1,85	6,15E+05	7,12
14	2009		Abr.	23	6	283000	13	3,68	6,14E+05	7,11
15			May.	2	5	19500	10*	0,2	3,90E+04	0,45
16			Ago.	4	3	280000	12*	3,36	1,12E+06	12,97
17			Oct.	2	5	185000	10*	1,85	3,70E+05	4,28
Volumen total de lava emitida entre 2002 a 2009: ~877 x 10 ⁶ m ³										
* Flujos de lava hacia la parte más alta del volcán, cuya medida fue estimada.										

Tabla 1. Tasas de emisión de cada uno de los flujos de lava emitidos por el volcán El Reventador entre 2002 a 2009.

Volcán	País	Período de erupción	Volumen	Tiempo de actividad	Tasa media de emisión	Referencia
			(x10 ⁶ m ³)	(días)	(m ³ /s)	
Ngauruhoe	Nueva Zelanda	30, Jun. 1954	0.6	4	3.5	Hobden et al., 2002
Hekla	Islandia	Enero, 1991	150	53	20 a 1	Gudmundson et al., 1992
Lonquimay	Chile	Dic. 1988 a Abr. 1989	142	28	57.9 a 11.6	Moreno & Gardeweg, 1989
Arenal	Costa Rica	1968-1980	304	4380	3 a 1	Wadge, 1983
<i>El Reventador</i>	<i>Ecuador</i>	<i>Nov. 2002 a Oct. 2009</i>	<i>877</i>	<i>117</i>	<i>8.7</i>	<i>Este trabajo</i>

Tabla 2. Recopilación de los valores comparativos con otros volcanes en el mundo, similares al volcán El Reventador.

Considerando el trabajo pionero de Walker (1973), donde se propone la existencia de una relación entre la longitud que alcanza un flujo de lava y la tasa de emisión con la que éste sale. Todos los datos considerados corresponde a eventos que no duraron menos de 30 horas ni superaron los 9 meses de actividad (Walker, 1973).

Al comparar los resultados de ambos trabajos (Figura 3.76), las TME obtenidas para el volcán El Reventador y lo publicado en el trabajo de Walker (1973) y Harris & Rowland (2009), muestran que 15 de las 17 tasas de emisión calculadas (Tabla 1) están dentro del rango propuesto por Walker (1973).

Los valores más altos, y que corresponden a las primeras lavas emitidas, es decir, al inicio de la actividad efusiva. Esto se asemejan a estudios obtenidos por volcanes de tipo andesítico (Figura 3.76) como el volcán Etna (Walker, 1973).

Sin embargo, también se observan valores similares a volcanes de tipo andesítico basáltico como el volcán Ngauruhoe (Figura 3.76, letra N), que indican distintos valores en una fase que no es la del inicio de la etapa eruptiva en el volcán EL Reventador.

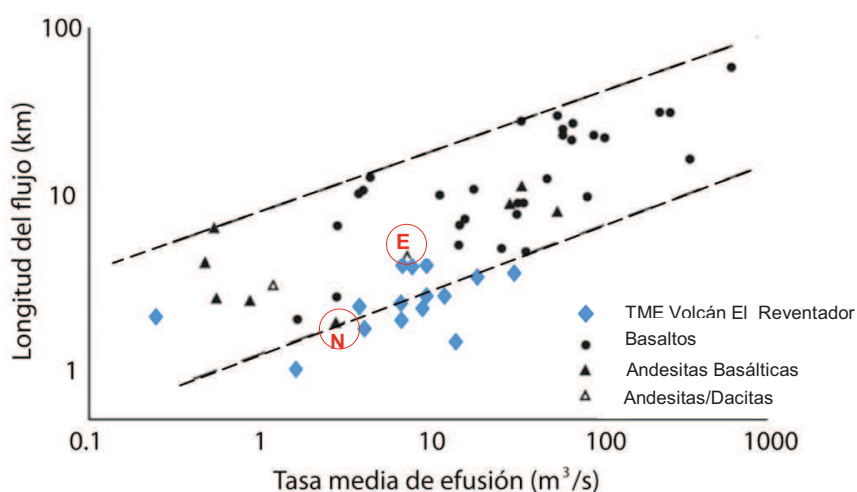


Figura 3. 76. Diagrama de la longitud del flujo de lava vs. Tasa de emisión para varios volcanes, principalmente basálticos. La tasa de emisión, corresponde a la Tasa media de emisión (TME). Modificado de Walker (1973) en Harris & Rowland (2009). E:volcán Etna, N:Volcan Ngauruhoe.

Por lo tanto, se observa una buena correspondencia entre la naturaleza de las TME del volcán El Reventador, con los valores de otros volcanes de la misma composición.

3.4 SÍNTESIS DEL CAPÍTULO

Los datos de monitoreo volcánico en el volcán El Reventador, han permitido establecer una correspondencia entre la actividad interna y superficial; es decir, la sismicidad (en términos estadísticos) respecto a lo observado sobre la superficie con el monitoreo satelital (alertas de anomalías térmicas con MODVOLC y

Hotspot Hawaii, emisiones de SO₂ con OMI y de columnas de ceniza por VAAC) y directo (monitoreo visual y térmico).

Estos datos permiten identificar actividad eruptiva de carácter stromboliano y establecer una relación que permite establecer los siguientes parámetros:

El incremento de la ocurrencia de los diferentes eventos sísmicos registrados en las estadísticas sísmicas (1) VT, 2) HB, 3) LP y tremores armónico y espasmódico) con las correspondientes manifestaciones superficiales (1) salida de lava, 2) desgasificación y explosiones emisiones de ceniza), de modo que se reconocen cuatro etapas eruptivas: 2002, 2004-2005, 2007 y 2008-2009.

La Etapa Eruptiva 2002, tuvo la emisión de las Lava 1 y 2 en noviembre de 2002, constituyendo un volumen de 32,4 m³; la Etapa Eruptiva 2004-2005, tuvo en noviembre de 2004 la salida de la Lava 3, en abril de 2005 la Lava 4, en mayo la Lava 5, en julio la Lava 6 y en septiembre la Lava 7, correspondientes a un volumen total de 20,08 m³; la Etapa Eruptiva 2007, registro la salida de las Lavas 8 y 9 en marzo y abril, y la Lava 10 en agosto, y correspondieron a un volumen total de 8,8 m³; finalmente, para la Etapa Eruptiva 2008-2009, en julio de 2008 fue emitida la Lava 11 y en noviembre las Lavas 12 y 13; en mayo de 2009 fue emitida la Lava 15, en agosto la Lava 16 y en octubre la Lava 17, y corresponden a un volumen de 26,77 m³ en esta última etapa eruptiva.

El mapa con la distribución de los flujos de lava emitidos por el volcán El Reventador entre 2002 a 2009 a escala 1:25000.

Finalmente, con la caracterización de cada flujo, se propone una tasa media de emisión de ~8,7 m³/s, que es similar a otros casos de volcanes de similares características.

CAPITULO 4

CARACTERIZACIÓN PETRO - GEOQUÍMICA DE LOS FLUJOS DE LAVA EMITIDOS EN EL PERIODO 2002-2009

4.1 ESTUDIO PETROGRÁFICO

En la primera parte, se realiza la observación y descripción de muestras de mano para varios flujos de lava, con 37 láminas delgadas proporcionadas por el Dr. Pablo Samaniego (IG-EPN - IRD), analizadas y descritas en detalle en la sección ANEXO 7, que se resume a continuación.

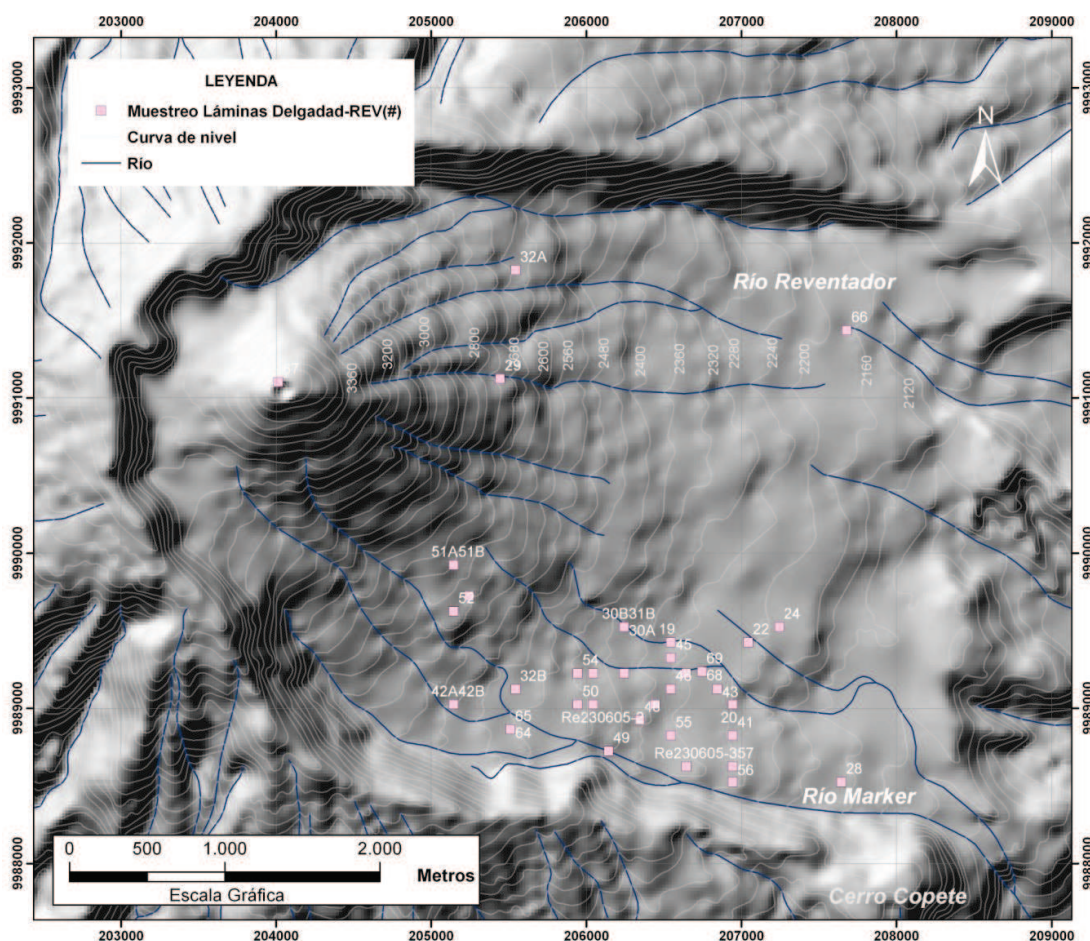


Figura 4. 1. Mapa de distribución de las muestras recolectadas en los flujos de lava emitidos por el volcán El Reventador entre 2002-2009. Coordenadas UTM WGS84 Z 18S.

Este trabajo utiliza las muestras que han sido recolectadas gracias a las campañas de campo realizadas a través del marco de cooperación entre el IG EPN y el IRD, que han permitido obtener un registro petrográfico casi completo de las lavas emitidas durante la erupción entre 2002 hasta 2009.

El contenido de los principales fenocristales, matriz y vesículas son presentados en %, de acuerdo al contenido porcentual respecto al volumen total en la roca.

La escritura de los minerales se resumirá al utilizar sus siglas: Ol=olivino, Cpx=clinopiroxeno, Opx=ortopiroxeno, Plg=plagioclasa, Anf=anfíbol; óx= óxidos metálicos.

4.1.1 FLUJOS DE LAVA EMITIDOS DURANTE LA ETAPA ERUPTIVA 2002

Los productos volcánicos producidos tras la erupción en 2002, están representados por los depósitos de flujos piroclásticos y flujos de lava. El análisis de ellos, revela una textura porfirítica, con 25-30% de su volumen como fenocristales en bloques piroclásticos y un 40% volumen en los flujos de lava (Lava1 y Lava2). La asociación mineral está representada por Plg+Cpx+Opx+Anf+Mag con escaso Ol. La textura de la matriz es vítrea en las bombas juveniles de 2002 y tiene textura intersertal; mientras que en la Lava 1 y la Lava 2, presentan una matriz criptocristalina (Samaniego et al., 2008). En los xenolitos gabróicos encontrados en la Lava 2, se tiene la misma asociación mineral Pl+Cpx+Ol+Mag±Opx±Anf, apuntando a un cumulado original (Samaniego et al., 2008). Es decir, entendiéndose como cumulado, a la roca enriquecida en minerales de cristalización temprana y que se forman hacia el fondo de la cámara magmática (Philppotts & Ague, 2009).

4.1.1.1 Lava 1

En el primer flujo de lava emitido tras la erupción de 2002, fue emitido desde el cráter. Son andesitas que se caracterizan por su textura porfirítica (fenocristales 20-30% vol.) y su asociación mineral de Plg+Cpx+Opx+Anf+óx (Fe-Ti), con escaso Ol (<1%). Su volumen estimado de vesículas, es aproximadamente 15-20%. Las principales características en los cristales son:

Los cristales de Plg, son prismáticos y tabulares, entre 3 y 1 mm. Los primeros presentan zonación, bordes reabsorbidos, núcleos de esponja, coronas de reacción y extinción ondulatoria; los segundos, presentan maclas tipo Carlsbad (Figura 4.2.a-c).

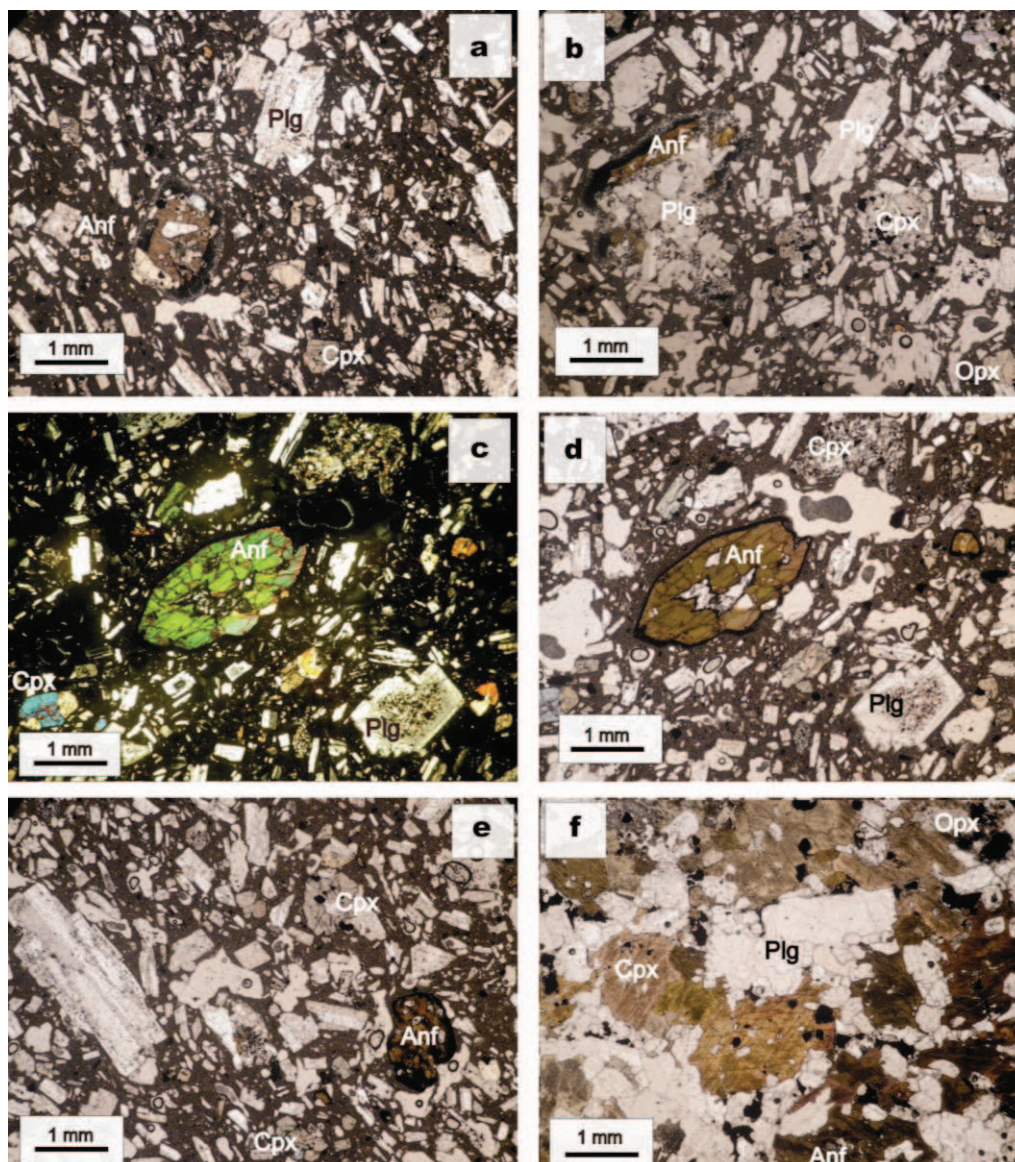


Figura 4. 2. Vista en sección delgada de rocas de la Lava 1, vistas con aumento de 12,5x. a), b), y e) Cristales de Anf con bordes de reacción y Plg tabulares con coronas de reacción; c) Fenocristales de Anf con bordes de oxidación, Plg prismática con textura pulvurulenta hacia el núcleo y Cpx entrecrecido con Opx, vista con nícoles; d) Vista con nícoles; f) Vista del xenolito granodiorítico que muestra la asociación mineral Plg+Cpx+Anf+Opx+óx.

Los cristales de anfíbol (0,5-3mm), presentan tres tipos de estructuras: bordes de reacción (Figura 4.2.c-d), bordes de oxidación (Figura 4.2.a-b) e intercrecimiento de microcristales de Plg (Figura 4.2.c). Estas características son asociadas a condiciones de inestabilidad en las que se encontró el anfíbol (Buckley et al., 2006). Tienen pequeños cristales de Cpx y Opx (0,5-2mm), con intercrecimiento de óxidos (4.2.b y f y 4.3.c).

Los cumulatos minerales (Plg+Cpx+óx), de tamaños superan los 3 mm, sin que los bordes tengan evidencia de reacción o desequilibrio con el medio (Figura 4.3.a-b)

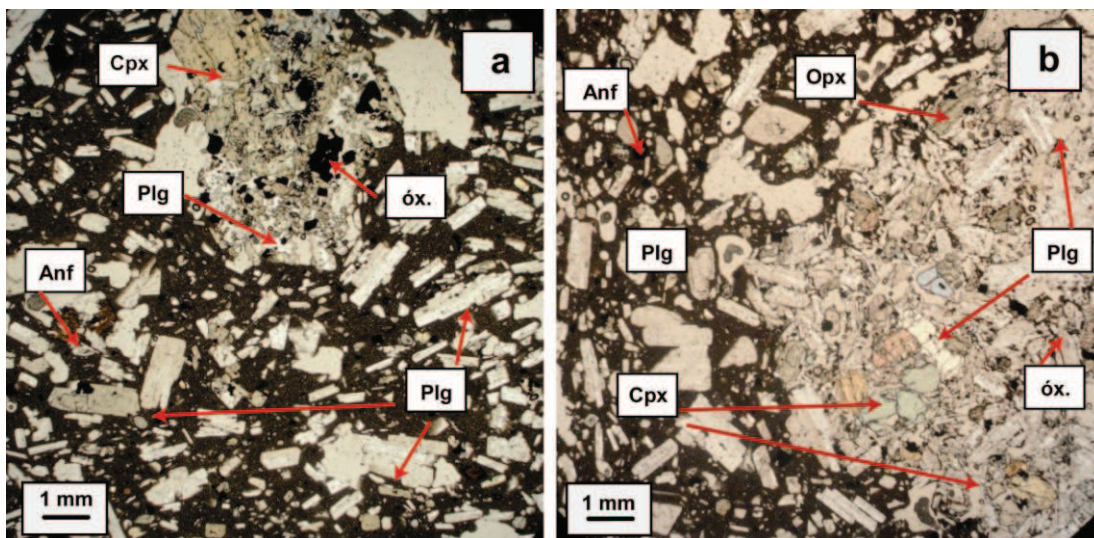


Figura 4. 3. Sección delgada de la Lava 1 con fenocristales de Plg, Cpx, Opx, Anf y óx; vistos con un aumento óptico de 12,5x de aumento. a) Con luz blanca, se observa el fenocristal de anfíbol, con corona de reacción y micro-cristalización de Plg+Opx+Cpx. b) con luz polarizada, se distingue la extinción ondulatoria de los fenocristales subhedrales de plagioclasa; c) se observa un aglomerado de fenocristales de Plg+Cpx+Opx+óx.

4.1.1.2 Lava 2

La Lava 2, particularmente, fue emitida desde un vento lateral en el sector SE del edificio volcánico. Esta roca es una andesita basáltica que presenta textura porfírica seriada y con enriquecimiento en el contenido de fenocristales (35-55% vol.), respecto a la lava anterior. Se identifica la asociación mineral: Plg+Cpx+Opx+Anf+óx y con escaso Ol. La matriz está enriquecida en microcristales (<0,3mm), principalmente de Px+Plg+Ol. El volumen de vesículas ocupa entre 25-30%.

Las principales características que se destacan, es el mayor tamaño respecto a lo observado en la anterior lava. Los fenocristales de plagioclasa, anfíbol y opx que alcanzan entre 2-3mm. Los fenocristales de plg (Figura 4.4.a-b) presentan coronas de reacción con núcleos de textura tipo colador, zonación y extinción ondulatoria (Figura 4.4). Los cristales de Anf presentan bordes oxidados, entrecrecimiento de microcristales Plg, oxidación hacia el interior del mineral e

intercrecimiento con Cpx. Los fenocristales de Ol presentan textura esquelética y los fenocristales de Cpx están entrecrecidos con Opx.

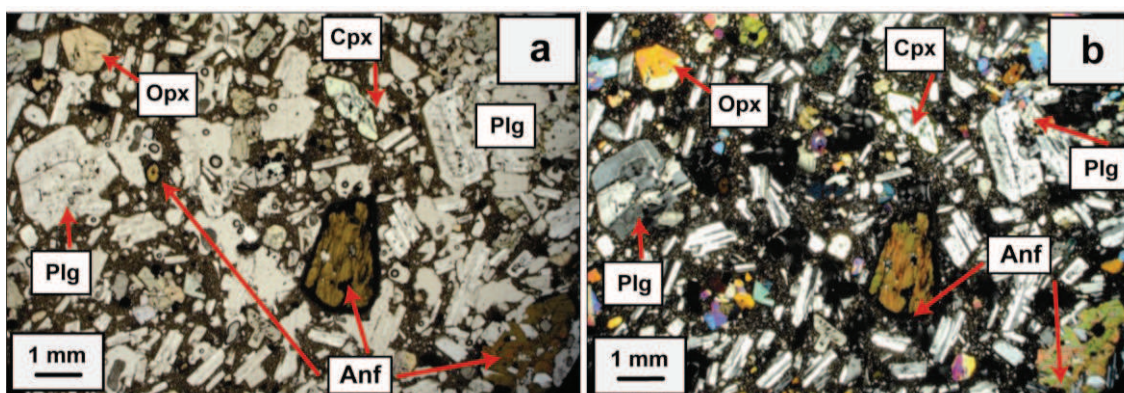


Figura 4. 4. Sección delgada de la lava 2 con fenocristales de Plg, Opx, Anf) y óx., vistos con el lente de 12,5x de aumento. Se distingue la extinción ondulatoria de los fenocristales subhedrales de Plg a) con luz blanca; b) con luz polarizada.

Además, hay que destacar la presencia de xenolitos gabróticos de textura fanerítica (Figura 4.5), compuesto de Pl+Cpx+Ol+Mag±Opx±Anf (Samaniego et al., 2008).

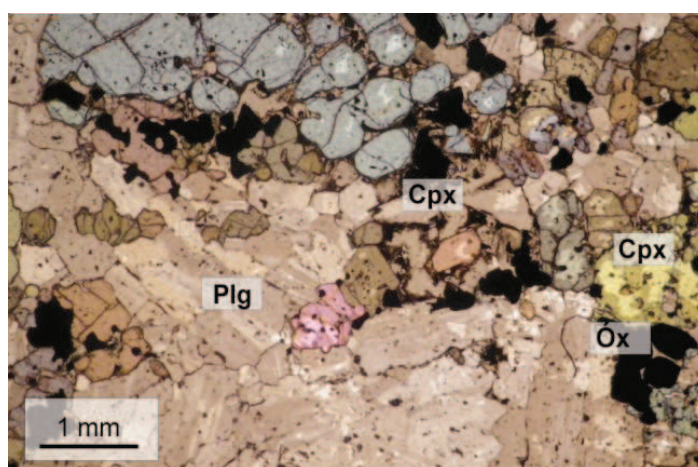


Figura 4. 5. Sección delgada vista con aumento de 12,5x del xenolito gabrótico en la lava 2. Se observa fenocristales de Plg, Opx, Anf y óx.

4.1.2 FLUJOS DE LAVA EMITIDOS DURANTE LA ETAPA ERUPTIVA 2004 - 2005

Las lavas de 2004 - 2005 (respectivamente, Lavas 3, 4, 5, 6 y 7) presentan textura porfírica, con un 30-55% fenocristales en el volumen total en la roca. Está compuesta por Plg+Cpx+Mag+Anf±Opx±Ol. En estas rocas, el Ol es común mientras que el Opx es escaso. El Anf no es tan abundante como en los

productos de 2002 y los cristales presentes exhiben bordes de reacción (con re-cristalización de microcristales de Plg+Cpx+óx) y bordes de oxidación como resultado de condiciones de desequilibrio. La matriz es rica en microcristales de Plg+Cpx que mantiene una textura intersertal (Samaniego et al., 2008).

4.1.2.1 Lava 3

La Lava 3 es una andesita basáltica de textura porfirítica seriada con 30-40% vol. de fenocristales. La matriz negra (50-60%) con microcristales de Plg+Cpx+óx (Figura 4.6.a-b), con 20% vol. vesículas de 1mm a 1cm.

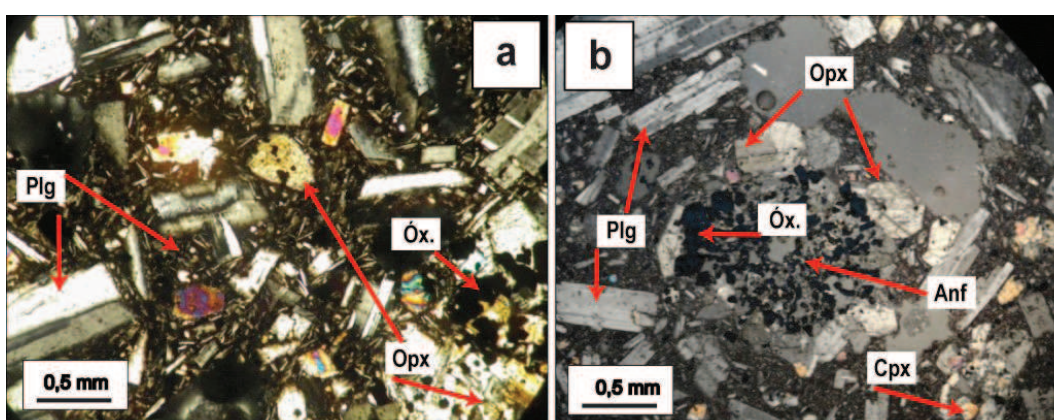


Figura 4. 6. a) Con el aumento de 20x, se observan microcristales de piroxeno anhedral e inclusiones de óxidos en los cristales y en la matriz; b) Reemplazamiento de fenocristales de piroxeno por aglomerados de óxidos y con bordes de reacción con la cristalización de fenocristales de Opx, Aumento óptico de 12,5x.

Las principales características de esta roca son los fenocristales de plagioclasa que presentan coronas de reacción, zonación, núcleos corroídos de textura poikilítica, ofítica e intergranular, maclas polisintéticas y extinción ondulante, los tabulares tienen maclas simples y compuestas (Figura 4.7.c-d). Los fenocristales octogonales de Opx (0,5-1,5mm), tienen zonación, bordes reabsorbidos, maclas tipo espada y coronas de reacción (Figura 4.7.c-d). Presentan re-cristalización de Cpx hacia los bordes. Los pequeños fenocristales de Cpx tienen textura glomerofídica. Los fenocristales de Anf (1-2 mm) presenta bordes oxidados y con bordes de reacción con microcristales Cpx y Plg (Figura 4.7.a-b). Los fenocristales de Ol tienen (<1%) textura esquelética.

4.1.2.2 Lava 4

La lava 4 presenta características de una andesítica basáltica. La muestra de mano es masiva, presenta textura porfírica, traquítica, seriada y con entre 30-40% de fenocristales. La matriz es de color gris oscuro (55-60%) donde se distingue un bandeamiento insipiente y vesículas medianas (10-15%) desde 1mm a 1cm.

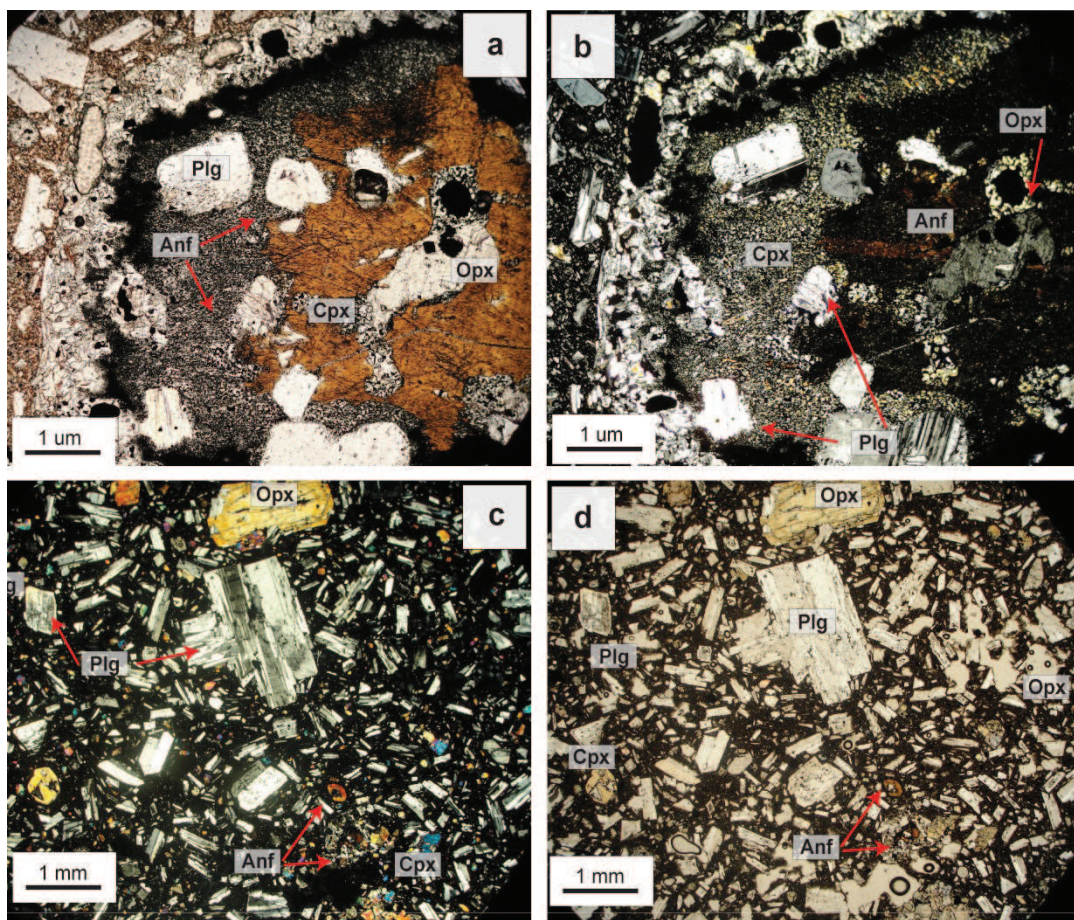


Figura 4. 7. Sección delgada de la lava 3, vista con un aumento de 12,5x. Vista con aumento óptico de 22,5x. Fenocristales de Anf donde se distinguen dos bordes de reacción: re-cristalización de Cpx, seguida de bordes de reacción e intercrecimiento de Plg. a) sin nicoles y b) con nicoles. Fenocristales de Plg con maclas compuestas, Cpx con coronas de reacción y bordes de reacción, Anf con bordes reabsorbidos.

Los fenocristales distinguibles en macro son: Plg blanca de forma tabular, entre 0,5-1mm de diámetro (10-15%); otros tienen forma redondeada, con tamaños 1-2,5 mm (4-5%) y los fenocristales de piroxeno translúcido, verdoso y de brillo vítreo, están distribuidos a modo de aglomerados que alcanzan tamaños de entre 1 a 4 mm (5-6%).

En la lámina delgada, se identifica una textura porfírica, hipocristalina y seriada, con pocos microcristales en la matriz y con una asociación mineral de Plg+Opx+óx+Cpx+Anf, que se simplifica a continuación.

Los fenocristales de Anf presentan inclusiones de Plg y piroxeno (Figura 4.8.a-b), bordes de reacción con intercrecimiento de microcristales de Cpx, Opx, Plg, óx y vidrio intersticial. Los fenocristales de Plg (Figura 4.8.a-d), tienen dos tamaños preferenciales. Los de mayor tamaño, de 2-3,5 mm, presentan coronas de reacción, maclas, zonación y textura glomerofídica con cristales de Opx y Cpx (12-15% vol.), con tamaños entre 0,5-3mm. Los óxidos (1-2%) están como cristales euhedrales e isotrópicos que se distribuyen tanto en la matriz y en inclusiones de diferentes cristales.

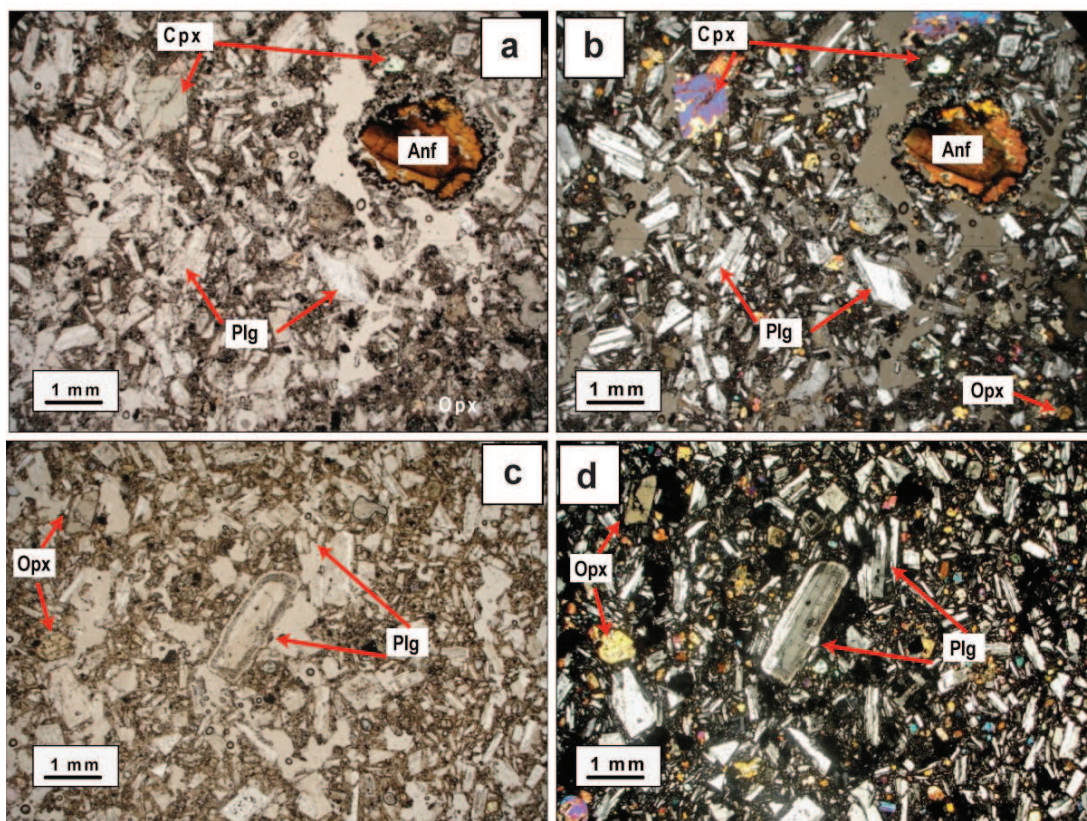


Figura 4. 8. Secciones delgadas de la Lava 4 vistas con aumento de 12,5x: a) Cristales anhedrales de anfíbol con bordes de reacción con la re-cristalización de Cpx y óx., visto con luz blanca; b) con luz polarizada; c) Fenocristales de tamaños variados, principalmente cristales de plagioclasa de hábito tabular y prismático, que presentan coronas de reacción visto con luz blanca y d) visto con luz polarizada.

4.1.2.3 Lava 5

La Lava 5 es una andesita de textura porfirítica y seriada, con fenocristales (30-35%) donde predomina la asociación mineral Plg+Cpx+Anf+óx+Opx. La matriz es de color café oscuro y tiene un bajo contenido de vesículas (20-25%).

Los fenocristales de Plg presentan coronas de reacción, maclas polisintéticas y con extinción ondulatoria. Los cristales tabulares se presenta entrecrecidos (Figura 4.9.a-b). Los fenocristales octogonales de Cpx están intercrecidos (0,5 mm). Los Opxs se presentan como aglomerados que alcanzan hasta 4 mm (Figura 4.9.b). Los fenocristales de Anf (2-4mm) presentan coronas de reacción rodeadas con cristales prismáticos de Plg (0,3-0,5 mm) y bordes de oxidación (Figura 4.9.b).

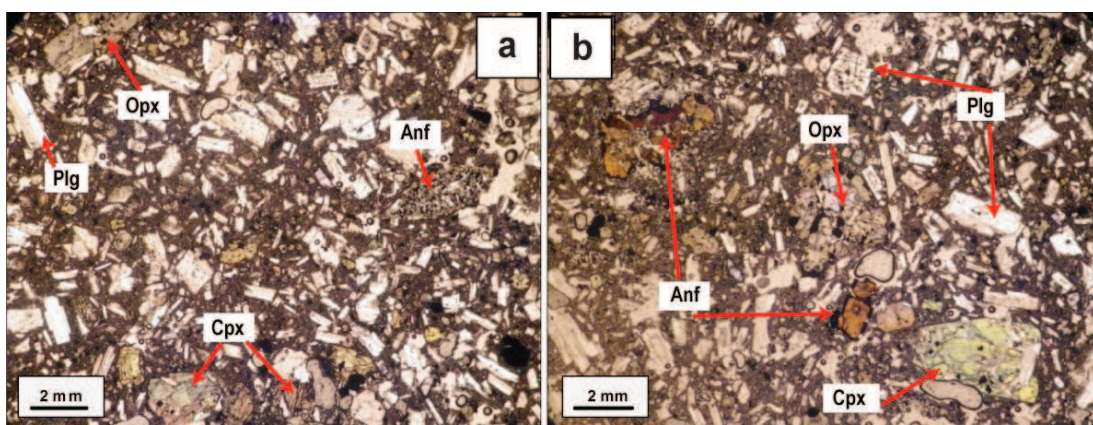


Figura 4. 9. Secciones delgadas de la Lava 5 con aumento de 12,5x vistas con luz blanca. a) Cristales de Opx de color anaranjado pálido, Cpx como aglomerados y cristales tabulares de Plg, también Plg, como aglomerados el Opx rosáceo y el Cpx verdoso. Anfíbol reemplazado por microcristales de Cpx y óx.; b) Fenocristales grandes de anfíbol de color pardusco y sus bordes de reacción blanquecinos con microcristales de Cpx y óx.

4.1.2.4 Lava 6

Esta muestra corresponde a un bloque balístico y tiene un aspecto de corrosión, principalmente para el piroxeno. La roca es una andesita de textura porfirítica, seriada e hipocristalina con matriz vítrea de color café oscuro (50-55% vol.). La vesicularidad está entre 15-20% del volumen de la roca. La asociación mineral es Plg+Cpx+Anf+óx+Opx.

Los fenocristales de Plg tienen tamaños entre 0,8-1,5mm. Presenta cristales prismáticos con zonación, golfos de reacción, bordes reabsorbidos y extinción

ondulatoria (Figura 4.10.a-b) e inclusiones de óxidos al interior de estos cristales, mientras los cristales tabulares son <1mm (Figura 4.10.c-d). Los fenocristales de Cpx son < 0,8 mm y están dispersos en la matriz y como aglomerados. Los fenocristales octogonales de Opx contienen inclusiones de óxidos y se presenta como intercrecidos con cristales de Cpx (Figura 4.10.a-d). Los fenocristales de Anf son < 0,8 mm y presenta bordes oxidados y golfos reabsorbidos (Figura 4.10.c-d).

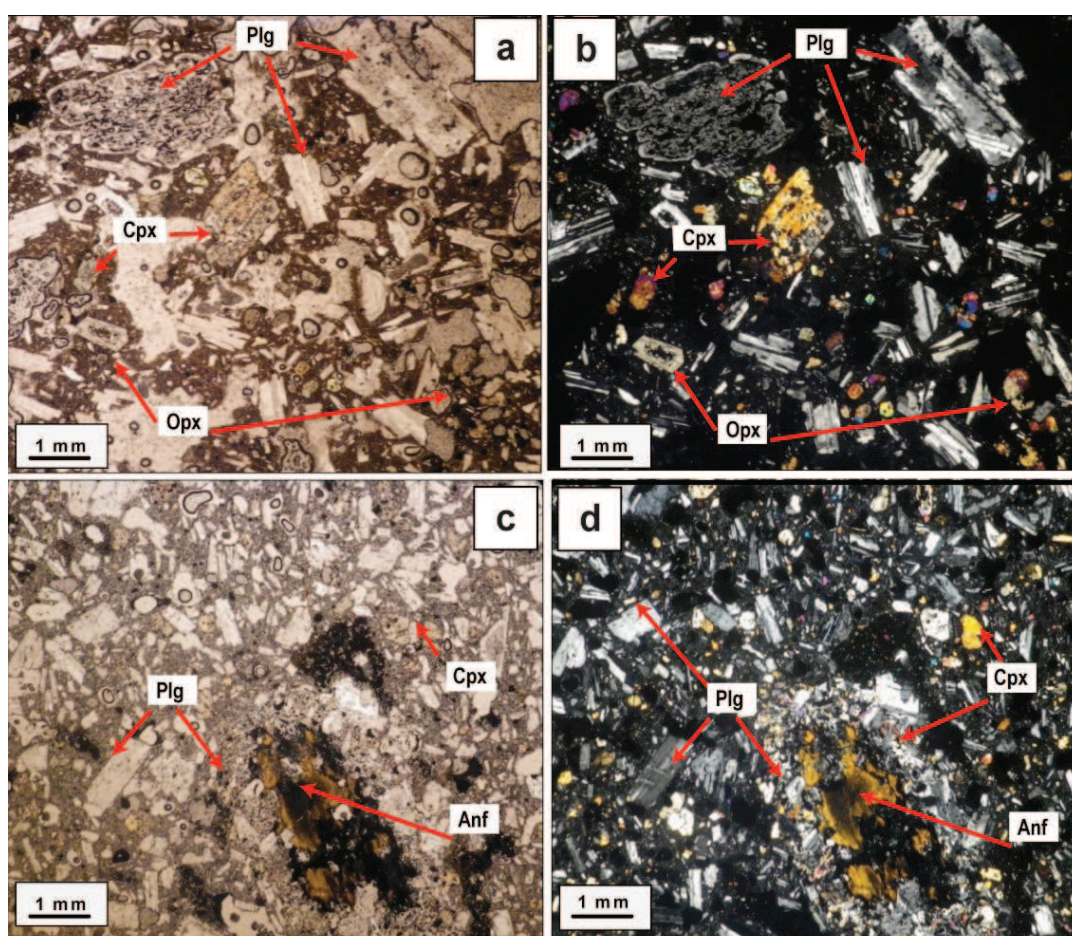


Figura 4. 10. Sección delgada de las rocas de la Lava 6, vista con un aumento óptico de 12,5x: a) Dos tipos de cristales de Plg: los anhedrales de mayor tamaño presentan corrosión al interior y hacia los bordes; los cristales euhedrales tabulares tienen macla tipo Carlsbad. Los fenocristales de piroxeno tienen textura ofítica y bordes reabsorbidos e inclusiones de óx., como evidencias de desequilibrio; b) Con luz polarizada; c) Los fenocristales de Anf de 12,5 mm, con bordes de reacción con recristalización de Plg, Pxo intersertal y óx., visto con luz blanca y d) Visto con luz polarizada.

4.1.3 FLUJOS DE LAVA EMITIDOS DURANTE LA ETAPA ERUPTIVA 2007

Las lavas de 2007, presentan mayor cantidad de vesículas que las lavas anteriores. Mantiene la textura porfírica seriada, fenocristales entre el 30-55%.

Predomina la asociación mineral de Plg+Cpx+Anf+Opx+óx y escaso Ol. La matriz es enriquecida con microcristales de Plg+Cpx+Opx.

4.1.3.1 Lava 8

La muestra de mano correspondiente a una andesita que presenta con textura porfírica traquítica, con 25-30% de fenocristales. La matriz (55-60%) masiva es de color gris oscuro con leve bandeamiento, donde están presentes microcristales de Plg y piroxeno al interior de los mismos. Las vesículas (15-25%) tienen tamaños entre 1mm-1,5cm. Los principales fenocristales son de Plg blanca, unos de hábito tabular (12-15%), tamaño entre 0,5-1mm de diámetro y otros subredondeados, anhedrales (4-5%), con tamaño entre 1-2,5 mm. La paragénesis mineral está constituida por Plg+Cpx+Opx+Anf+Óx. También hay fenocristales translúcidos de piroxeno verdoso con brillo vítreo (5-6%). Estos desarrollan aglomerados que alcanzan tamaños de entre 1 a 4,5 mm. Finalmente, el Anf (1%) es de color negro y subhedral de 1mm de diámetro.

En la lámina delgada, se distinguen la textura porfírica, seriada, hipocristalina a holohialina. Los fenocristales muestran bordes reabsorbidos, corona de reacción, zonación, macla de Carlsbad y con extinción ondulatoria (de interior al exterior), golfos de reacción y maclas polisintéticas y de tipo microclina. Los otros cristales son subhedrales, tabulares, maclados y zonados y de tamaños de hasta 1,5 mm (Figura 4.10.b).

Los fenocristales octogonales de Opx (1-2mm) y subhedrales de Cpx (0,5-2mm) tienen entrecrecimientos con otros cristales similares, presentan textura intergranular y glomerofídica, maclas de espada, bordes reabsorbidos e inclusiones de óxidos (Figura 4.11.c). Los fenocristales de Anf (Figura 4.11.d) desarrollan reemplazamiento parcial y total del mineral debido a que los bordes de reacción presentan el crecimiento de microcristales de Cpx desde los bordes hacia el interior del mineral, tiene bordes oxidados y golfos de reacción alrededor de los cristales. Los óxidos son de forma subhedral y tamaños muy variables, se encuentran hacia el interior de los minerales y en la matriz.

Además, tiene moderada cantidad de vesículas (30-45%), comparable con una escoria (Figura 4.11.a-b-c).

4.1.3.2 Lava 9

La lava 9 es una andesita basáltica. La roca tiene textura porfirítica (7-10%) con cristales subhedrales redondeados y euhedrales tabulares, ambos con diámetros entre 1 a 3 mm, de color blanco. Los cristales de piroxeno son de color verde, translúcido y vítreo de tamaños hasta 1,5 mm, y se encuentran como aglomerados con tonalidad dorada evidencia de oxidación.

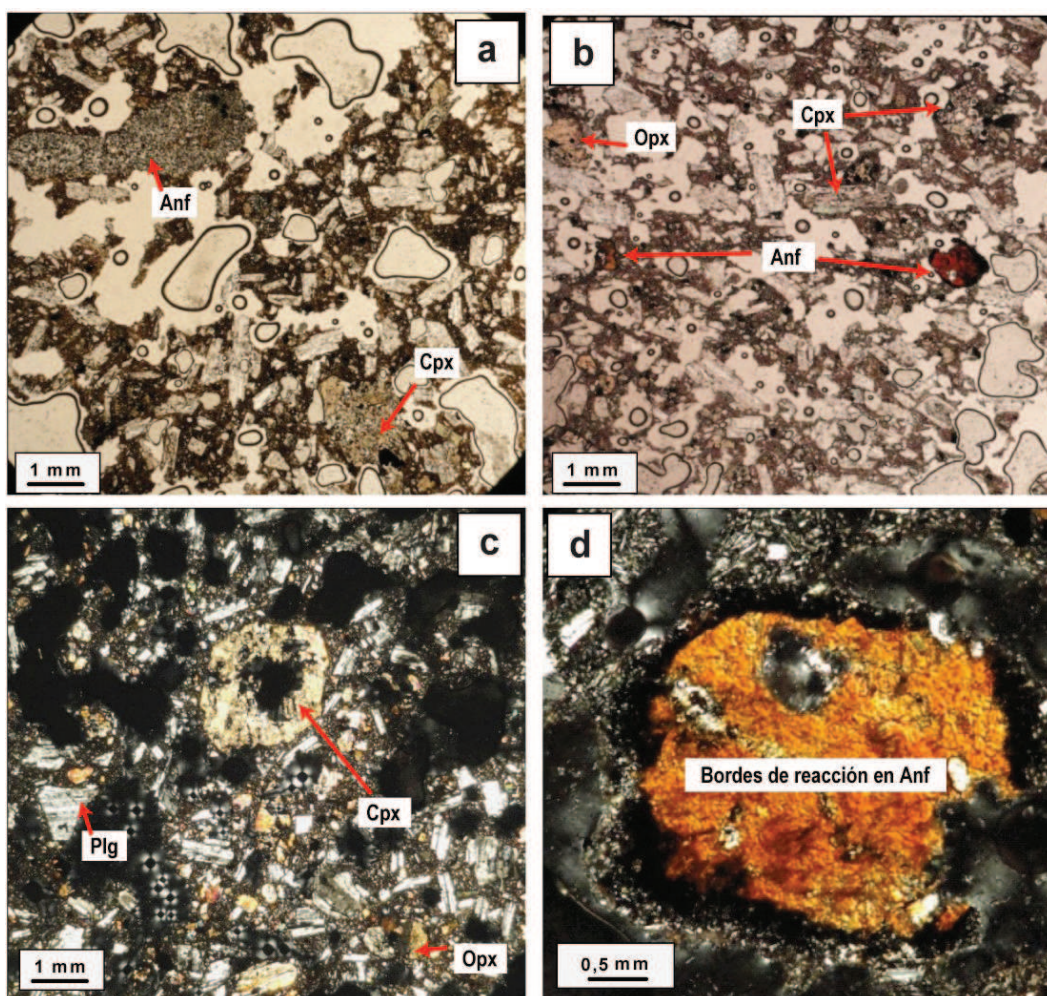


Figura 4. 11. Sección delgada de la lava 8 vista con un aumento de 12,5x; a) vesicularidad intensa con fenocristales de opx; b) se observan los cristales tabulares de Plg con coronas de reacción y los fenocristales de Anf con bordes de oxidación; c) fenocristal subhedral de opx con base octogonal e inclusiones de óxidos; y d) vista con aumento óptico de 30x a un Anf cuyos bordes de reacción tiene microcristales de Plg, Cpx y óx., además con intercrecimiento de cristales de Plg y Cpx (textura ofítica).

La matriz es de color gris oscuro con un aspecto bandeado con diferente coloración, y con vesículas con tamaños variados desde 0,3mm hasta 1 cm.

Al microscopio, se distingue la textura porfírica, seriada e hipocristalina que tiene la roca. Los fenocristales presentan las siguientes características que se puede observar en la Figura 4.12.a-b): la Plg (20-25% vol.) tiene tamaños entre 1-1,5 mm; tiene bordes reabsorbidos, corona de reacción, zonación, macla de Carlsbad y con extinción ondulatoria (de adentro hacia afuera), golfos de reacción y maclas tipo microclina. Los otros cristales tabulares están maclados y zonados. Los fenocristales de Cpx están rodeando a cristales de Opx e inclusiones de óxidos. Los fenocristales octogonales de Opx son de tamaño <1 mm, tienen macla de espada y bordes de oxidación. Los fenocristales de Anf (<1mm), presentan evidentes bordes de oxidación y golfos reabsorbidos. Se observan pequeños cristales de Ol con textura esquelética.

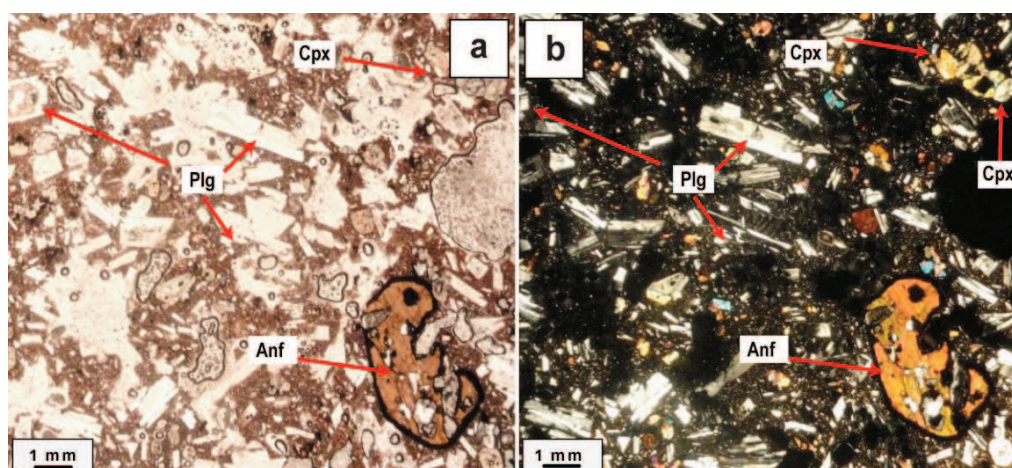


Figura 4. 12. Sección delgada de la lava 9 vista con aumento óptico de 12,5x: a) Fenocristales de Anf poikilitico con cristales de Plg, bordes de oxidación, golfos de reacción e inclusiones de óxidos; se distinguen los dos tipos de fenocristales de Plg, los prismáticos zonados, con coronas de reacción y los tabulares con macla tipo Carlsbad, todo visto con luz blanca; b) Sección vista con luz polarizada.

4.1.3.3 Lava 10

La Lava 10 es una andesita basáltica, caracterizada por tener una textura porfírica seriada fuertemente vesiculada (50-60%) y de tipo escoria. Tiene fenocristales euhedrales, tabulares y prismáticos de color blanco de hasta 0,5 mm de Plgs (5-10%); acompañados de piroxenos aglomerados, de color verde, translúcido de brillo vítreo de tamaños hasta 1,5 mm (3-5%). La matriz es de color gris oscuro (30%).

Como se observa en la Figura 4.13.a-b, en el microscopio se distingue una textura porfírica, seriada e hipocristalina; la matriz (40-50%) es de color café oscuro, contienen pocos microcristales y vesicularidad moderada (30-35%). Los fenocristales prismáticos de Plg presentan cristales entre 1 a 2 mm. Se observan maclas tipo Carlsbad, zonación, coronas de reacción, bordes reabsorbidos y extinción ondulatoria; los fenocristales de piroxenos presentan tamaños mayores a los observados en las lavas anteriores. Se tiene la presencia de dos piroxenos (15-20%), Cpx y Opx. Los primeros alcanzan dimensiones 1,5-3 mm y con macla simple, Los segundos se presentan como aglomerados y tienen tamaños entre 0,8-1,5 mm. Los fenocristales de Anf (<1%) son anhedrales, de color café oscuro, tamaño menor a 1mm, presenta evidentes bordes de oxidación color negro del tipo opaco (Figura 4.13. a y b).

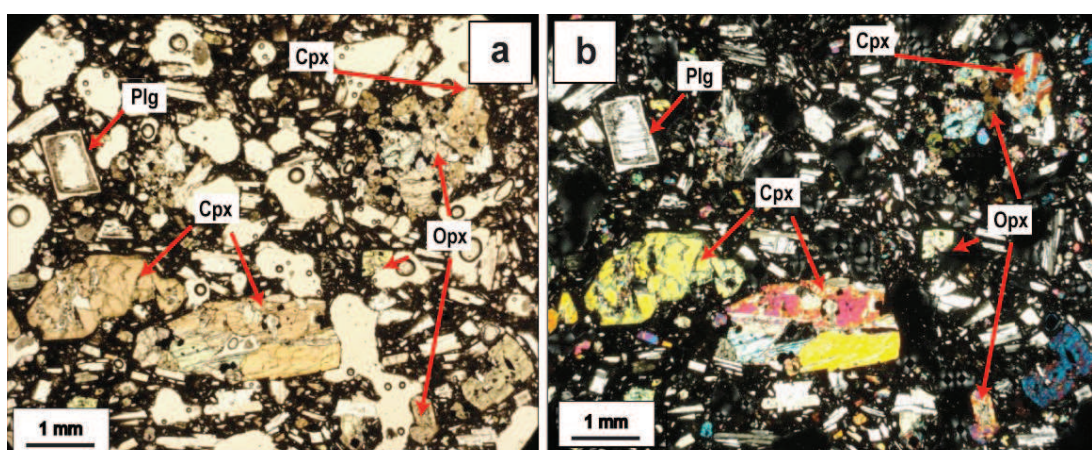


Figura 4. 13. Sección delgada de la Lava 10 vista con aumento óptico de 12,5x se observan grandes fenocristales de Cpx que presenta intercrecimiento de Plg+óx (textura ofítica), además de los fenocristales prismáticos-subhedrales y los tabulares de Plg que presentan coronas de reacción, evidencia de corrosión; a) Luz blanca; b) Luz polarizada.

4.1.4 FLUJOS DE LAVA EMITIDOS DURANTE LA ETAPA ERUPTIVA 2008 - 2009

Las lavas de 2008 - 2009, (respectivamente, Lavas 11,12, 13, 14, 15, 16 y 17) son altamente porfírica (55-30%), con una mineralogía compuesta de Pl+Cpx+Opx+Mag+Anf+Ol. En estas rocas, el Ol es muy poco común, el clinopiroxeno y el Opx son abundantes. El Anf no es tan abundante en comparación con los productos de 2002, más bien es similar a lo observado durante 2004-2005 y todos los cristales exhiben bordes de reacción y

características de desequilibrio. La textura de la matriz es más vidriosa para las últimas lavas aunque también presentan textura intersertal.

4.1.4.1 Lava 11

El flujo de Lava 11, es una andesita basáltica, se caracteriza por la presencia de cristales tabulares y euhedrales de Plg (10-15%) de color blanco, que oscilan entre 1 y 2mm. También están presentes fenocristales subhedrales de piroxeno (3-5%) de color verdoso dorado y con tamaños entre 1-2mm que se presentan como aglomerados. La matriz (20-30%) es de color gris oscuro y contiene vesículas (50-60%) de 2-5mm de diámetro.

Vista en el microscopio, se determina la textura porfírica, seriada e hipocristalina; una matriz (50-60%) de color café oscuro, con una vesicularidad moderada con el contenido mineral descrito a continuación:

Los fenocristales de Plg (25-30%) tienen hábito prismático y tabular, con tamaños entre 1-4mm, zonados, extinción ondulatoria, entrecrecidos, con coronas de reacción e inclusiones de óxidos. Muy buen desarrollo de maclas tipo Carlsbad textura intersertal, ofítica y glomerofídica (Figura 4.14. a y b).

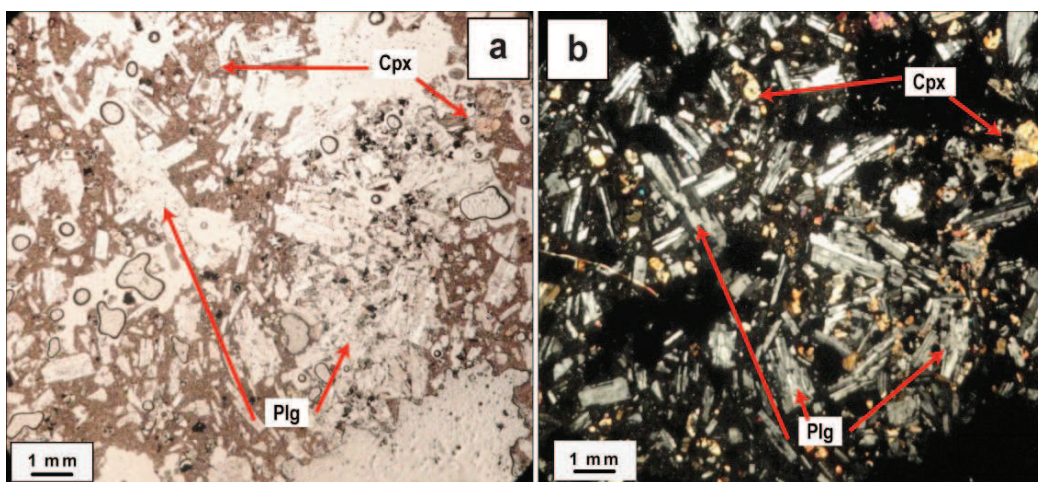


Figura 4. 14. Sección delgada de la Lava 11 con aumento óptico de 12,5 mm que contiene: a) fenocristales aglomerados de tamaño 3,5 mm con Plg tabular y textura intersertal con inclusiones de óxidos. Matriz vítrea e isotrópica; b) En luz polarizada.

Existen abundantes fenocristales de clinopiroxeno de tamaños variables (0,5-3mm) distribuidos individualmente y como aglomerados (Figura 4.15.a-b). Los fenocristales de Opx tienen hábito octogonal que alcanzan tamaños entre 1-1,5

mm. Los fenocristales de Anf, son escasos (2-3%), alargados, con bordes de reacción y con tamaños variados. Los bordes de reacción tiene cristales de Plg y piroxeno de hasta 1mm (Figura 4.16.c-d) y total reemplazamiento de Anf por cristales de Cpx y Opx.

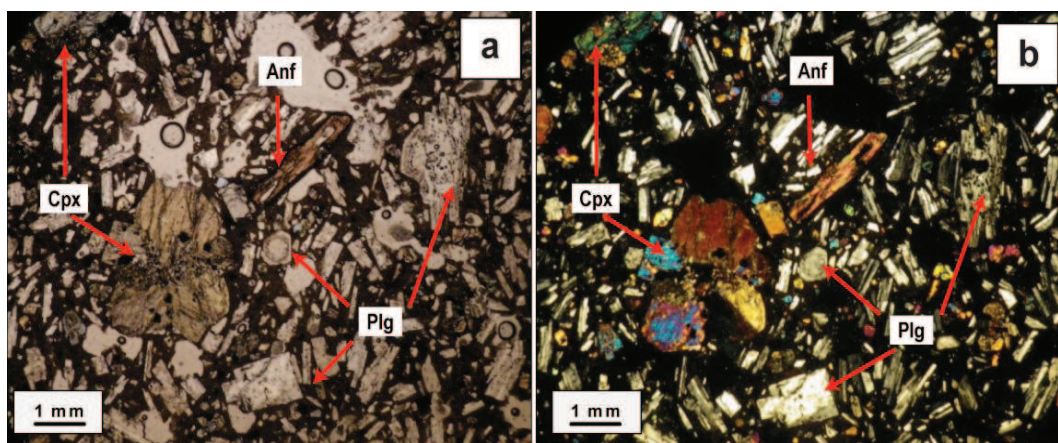


Figura 4. 15. Sección delgada de la Lava 11, vista con aumento óptico de 12,5x donde se destacan los aglomerados de fenocristales de Opx y Cpx; cristales de Anf anhedral y alargado con bordes de oxidación y entrecrecimiento de Plg; se diferencian los cristales prismáticos anhedrales de Plg zonada y con coronas de reacción y extinción ondulatoria; a) Luz blanca; b) Luz polarizada.

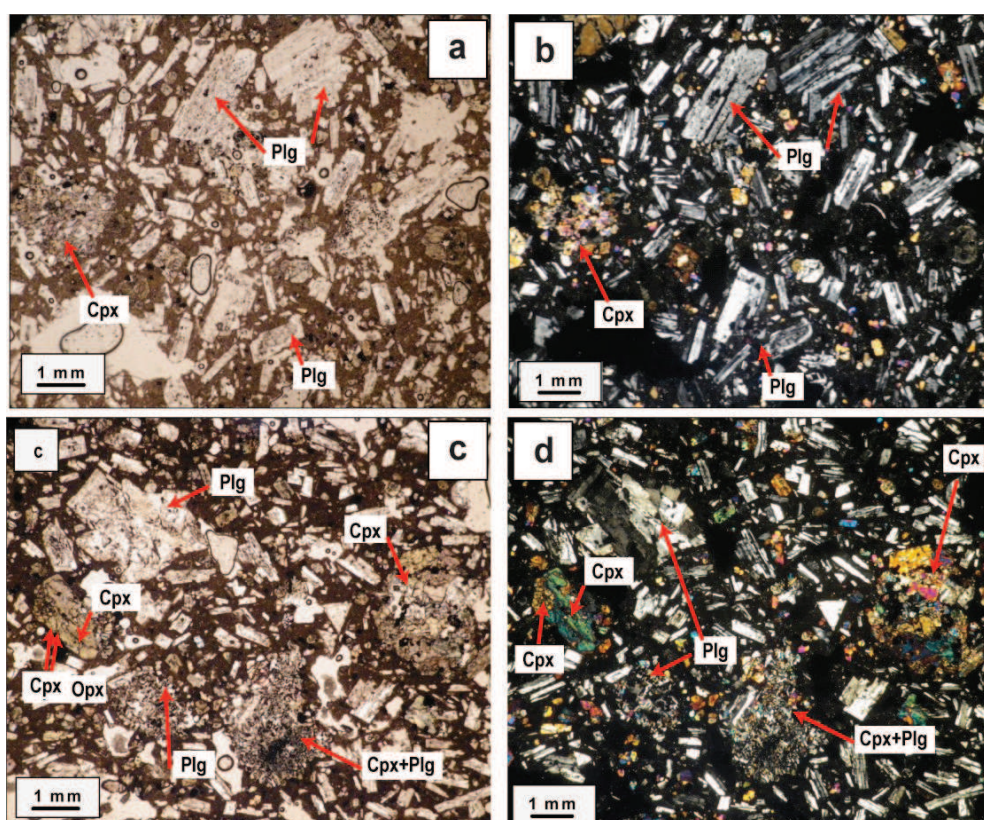


Figura 4. 16. Sección delgada de la Lava 11 vista con aumento óptico de 12,5x. a) Los dos tipos de fenocristales de Plg, los subhedrales prismáticos, zonados y de extinción ondulatoria y los euhedrales, tabulares con macla tipo Carlsbad; b) Luz polarizada; c) Grandes fenocristales de Plg

y Cpx, intercrecimiento de cristales de Plg, hay aglomerados de microcristales de Plg+Cpx+óx que aparentemente están reemplazando un mineral pre-existente (tipo enclave); d) Vista con luz polarizada.

Además, se encontraron dos tipos de rocas que están en contacto y que reflejan un posible enclave de material granodiorítico cuya mineralogía está constituida por Plg, piroxeno y Anf. Esto en contacto directo con la matriz y cristales de composición andesítica. Los bordes de contacto muestran textura intersertal e intergranular (Figura 17. a y b).

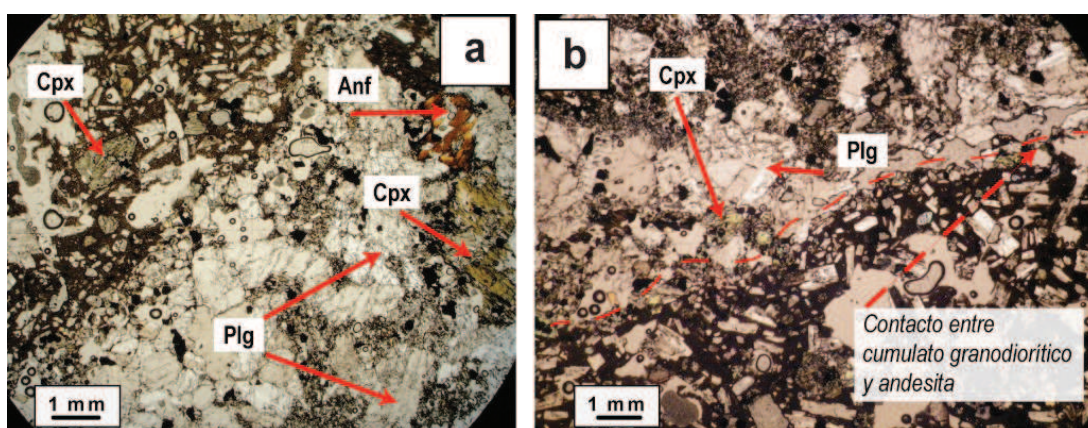


Figura 4. 17. Sección delgada de la Lava 11, con el aumento óptico de 12,5x. a) Visto con luz blanca, se identifica el contacto de los dos tipos de rocas existentes: material andesítico abajo y diorítico hacia arriba en: con luz natural; b) Visto con luz polarizada; c) aumento de 12,5x, el borde de contacto con cristales reabsorbidos, golfos de reacción, coronas de reacción y textura intersertal.

4.1.4.2 Lava 13

La Lava 13, es una andesita que en la muestra de mano tiene textura porfirítica de grano medio, con fenocristales de Plg primordialmente (20-25%) de hábito tabular y redondeado, de color blanco y con tamaños entre 1-3 mm; los fenocristales de piroxeno (3-5%), son de color verde oscuro, de brillo vítreo y que se presentan como aglomerados. Además La matriz (40-50%) es de color negra a gris oscuro y con pequeñas vesículas (20-30%) de entre 1 a 5 mm de diámetro.

En el microscopio, se identifica la textura porfirítica con granos gruesos, seriada e hipocristalina. Los fenocristales de Plg con hábito tabular superan los 3,5 mm y tiene maclas tipo Carlsbad; los cristales prismáticos son de mayor tamaño (1,5-4mm), y es típica en ellos la zonación, extinción ondulatoria, maclas tipo Carlsbad y polisintéticas e inclusiones de piroxeno y óxidos (Figura 4.18.a-b). Estos cristales se los encuentra en la matriz y algunos están alrededor de los

fenocristales anhedrales de Anf, similares a agregados minerales (Figura 4.18.a-b).

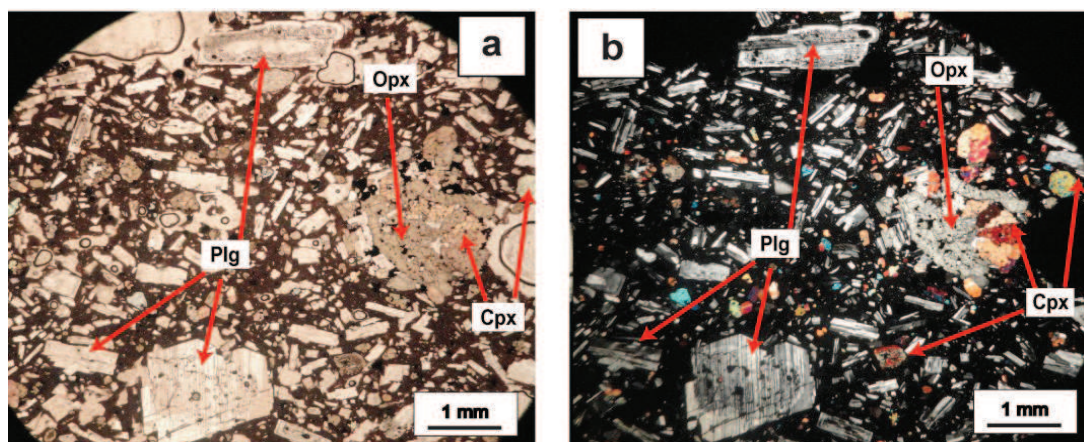


Figura 4. 18. Sección delgada de la Lava 13 vista con el aumento óptico de 12,5x, en la que se distinguen los fenocristales de Plg zonados, maclados y con deformación; además de aglomerados de Opx+Cpx+Plg+óx., vistos con: a) Luz blanca; b) luz polarizada; c) se puede observar cristal de Anf con bordes de reacción, rodeado de cristales de Opx+Cpx+óx y Plg. El tamaño de este mineral es 4,5mm x3 mm; d) Luz polarizada.

Los fenocristales de Cpx son más abundantes (15-28%) y de tamaños variados (0,5-5 mm). Los fenocristales de Opx (12-15%) alcanzan tamaños de entre 1-3 mm, son subhedrales y de hábito octogonal, algunos tienen macla de espada, inclusiones de óxidos, bordes reabsorbidos y forman aglomerados con Plg con textura ofítica (Figura 4.19.a-b-c-d)

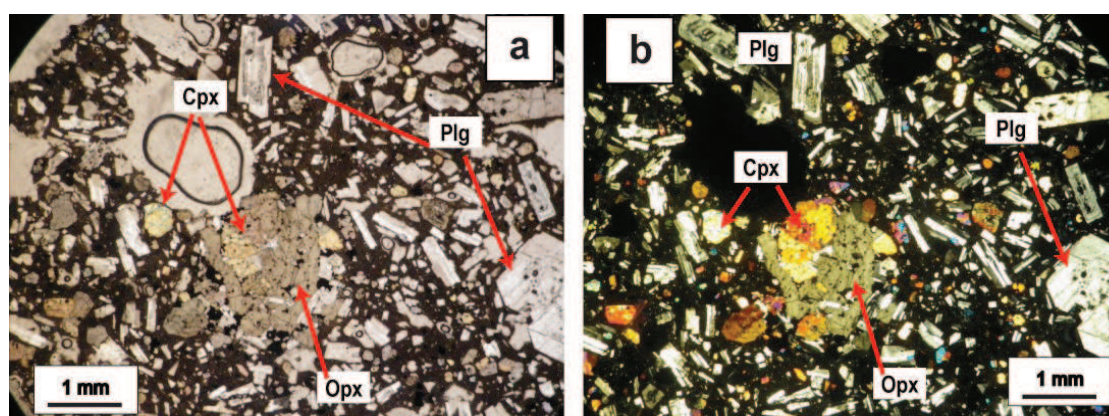


Figura 4. 19. Sección delgada vista con el aumento óptico de 12,5x para la Lava 13 en la que se distinguen a) Plg con coronas de reacción, cristales aglomerados de opx rodeado de Cpx; b) Luz polarizada; c) Con luz blanca, cristales subhedrales de Plg. que están zonados, con maclas simples y compuestas además de deformados y presentan inclusiones de óx; otros están entrecrecidos de Plg hacia la parte superior, fenocristales de opx con macla de espada; d) Vista con luz polarizada.

Los fenocristales de Anf (2-3%) son anhedrales, presentan bordes de reacción con cristales de Plg que alcanzan hasta los 3 mm y cristales de Opx tabular y microcristales intersertales (Figura 4.20.a-b). La matriz es vítrea, de color café oscuro y enriquecida en microcristales Plg y piroxeno (<0,2mm). La vesicularidad es considerable, pues es aproximadamente entre el 30-35% del volumen total en la roca.

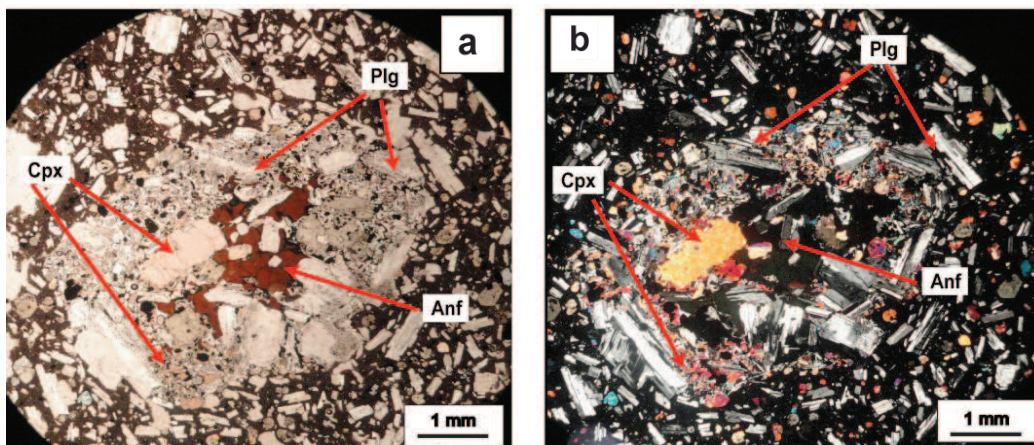


Figura 4. 20. Sección delgada de la Lava 13, vista con el aumento óptico de 12,5x, en la que se puede observar cristal de Anf con bordes de reacción, rodeado de cristales de Opx+Cpx+óx y Plg. El tamaño de este mineral es 4,5mm x3 mm.

4.1.4.3 Lava 14

La Lava 14, es una andesita, que en la muestra de mano, presenta textura porfírica seriada, estructura masiva. Contiene fenocristales euhedrales, tabulares y blancos e incoloros de Plg (15-20%), cuyos tamaños están entre 1 hasta 2 mm. Los fenocristales de piroxeno (5-8%) son de color verde oscuro a claro, con tonalidad dorada, cuyos tamaños oscilan entre 1 a 3 mm. La matriz (60-70%) es negra, y presenta poca vesicularidad (15%).

En el microscopio, se puede reconocer la textura porfírica de grano grueso, seriada e hipocristalina; matriz (45-60%) de color café oscura, con menor cantidad de microcristales de piroxeno y Plg (0,3-0,5 mm). La vesicularidad es moderada (15-40%) y la cantidad de fenocristales (30-40%) de dos tamaños diferentes, unos que superan los 3 mm y otros menores a 1,5 mm.

Los fenocristales de Plg (22-30%), presentan dos tipos de hábito tabular y prismático. Los tabulares son de tamaños entre 1-3 mm, con maclas tipo Carlsbad

y entrecrecimientos (Figura 4.21.a-b). Los fenocristales prismáticos varían entre 2-3,5mm, con coronas de reacción, zonación, maclas tipo Carlsbad y polisintéticas e inclusiones de óxidos en el núcleo. (Figura 4. 19 c y d). Se observan grandes fenocristales de Cpx (3-5 mm), presentan bordes de reacción con el intercrecimiento de microcristales de Plg y cristales medianos (1-1,5 mm) de Opx e inclusiones de óxidos, además de múltiples maclas tipos espada, lo cual aparentemente correspondería a la deformación por efecto térmico (Vernon, 2004). Los fenocristales de Opx son de color amarillo pálido, octogonales, tamaños de 1-1,5 mm; presentan macla de espada y como aglomerados irregulares que superan los 3 mm (Figura 4.21.a-b-c-d). El Anf es <0,5 mm y de aspecto totalmente oxidado (Figura 4.21.a-b).

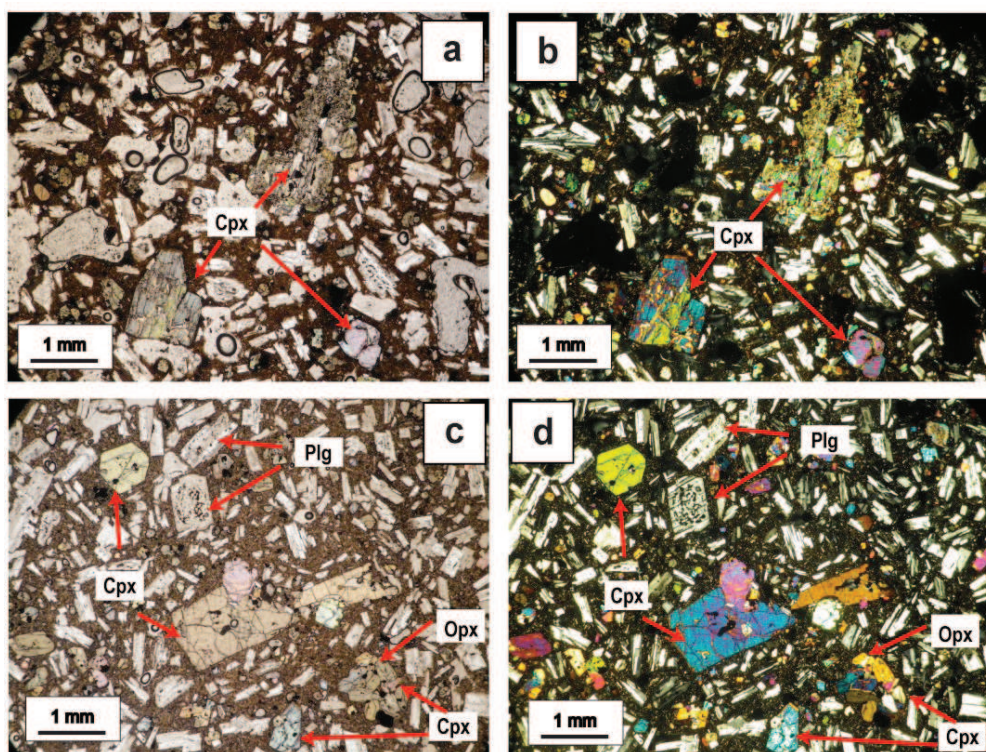


Figura 4. 21. Sección delgada de la lámina 14 vista con el aumento óptico de 12,5x: a) cristales anhedrales de Anf reemplazados por microcristales de Cpx y óx, cristales tabulares de Plg y cristales prismáticos de Pxo; b) Luz polarizada; c) Se distingue que los fenocristales tabulares de Plg y los de los Cpx tiene tamaños superiores a 3 mm; d) Luz polarizada.

4.1.4.4 Lava 16

La Lava 16, corresponde a una andesita vesicular. En la muestra de mano se puede reconocer la textura porfírica de grano medio, masiva y con pocas vesículas. Los fenocristales euhedrales, tabulares, blancos y de tamaños entre

0,8 a 1,5 mm de Plgs y otros fenocristales de color verde oscuro a negro, de brillo vítreo y que se presentan como aglomerados de hasta 1 cm.

En el microscopio, se puede reconocer la textura porfirítica de grano grueso, seriada e hipocristalina; se reconocen los fenocristales de Plg (10-15%), Cpx (10-15%), Opx (3-5%) y Anf (1-2%). La matriz (18-25%) es de color café oscuro, con mínima presencia de microcristales en ella y con muchas vesículas (55-65%). Las principales características de los diferentes fenocristales en esta roca son la importante presencia de cristales grandes de Plg (2-3mm), de hábito prismático, con coronas de reacción, bordes reabsorbidos e inclusiones de óxidos en los núcleos de los cristales (Figura 4.22.a-b). Los fenocristales de Cpx (12-18%) tienen colores entre rosado a verdoso pálido; sus tamaño van entre 1- 3 mm y tienen textura glomerofídica, con bordes reabsorbidos, golfos de reabsorción e inclusiones de óxidos (Figura 4. 22. a-b-e-f). Los fenocristales de Opx (8-12%), tienen hábito octogonal, bordes de reacción con intercrecimiento de microcristales de Plg y Cpx, a modo intersetal e inclusiones de óxidos (Figura 4.22.a-b-c-d-e-f). La presencia de fenocristales de Anf es reducida, unos tiene bordes oxidados, coronas de reacción con intercrecimiento de Cpx+Opx+Plg+óx (Figura 4.22. a, b, c y d).

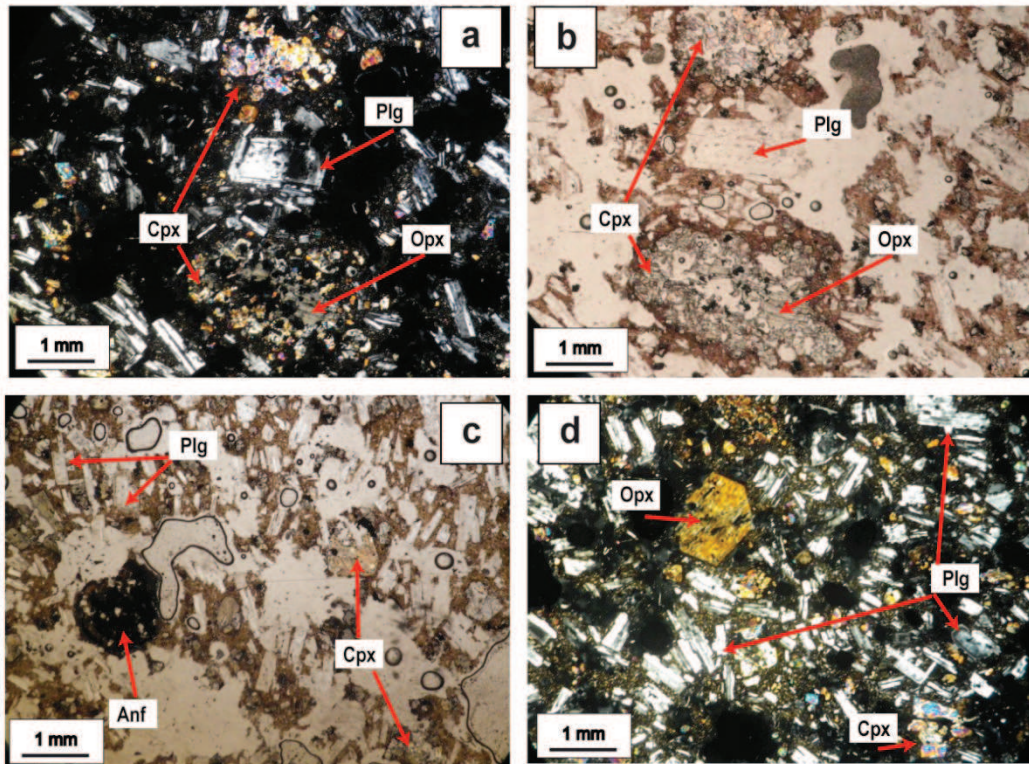


Figura 4. 22. Sección delgada de la lámina 16, con aumento óptico de 12,5x. a) Con luz blanca, aglomerados de Plg tabular y agregados fenocristales y microcristales anhedrales de Opx; b) Luz polarizada; c) Cristal de Anf con alteración de opacidad; d) Luz polarizada; e) Con luz blanca, aglomerados de cristales de Plg, Cpx y Opx; f) Luz polarizada; g) Reemplazamiento de fenocristales de Opx por microcristales de Cpx y óx. e ntensa vesicularidad.

4.1.4.5 Lava 17

La Lava 17 corresponde a una andesita. En muestra de mano, presenta textura porfírica seriada con la matriz (20-30%) de color café oscura con poco contenido de microcristales y moderada vesicularidad (30-40%). Los fenocristales que lo componen son Plg de color blanco (25-30%) y piroxeno (15-20%) con cristales de color verdoso oscuro. Respectivamente, los minerales muestran formas euhedrales a subhedrales y hábito tabular.

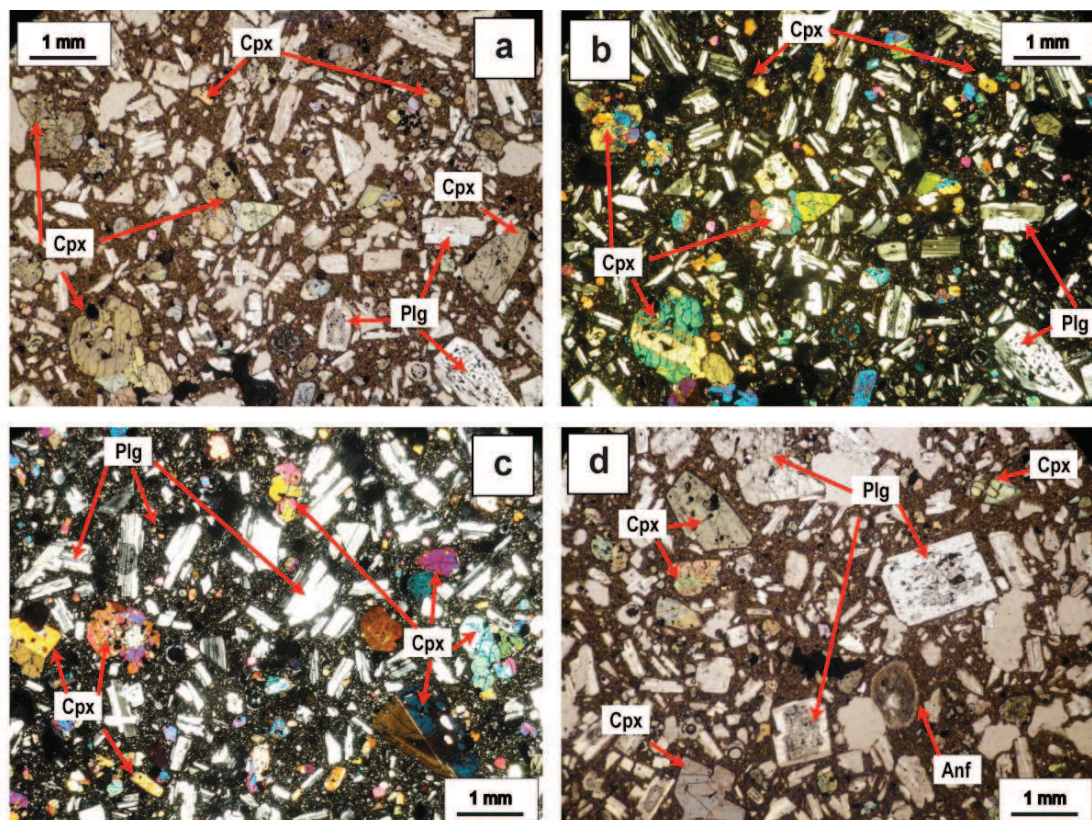


Figura 4. 23. Sección delgada de la lámina 17, con un aumento de 12,5x. Se distingue: a) el mayor tamaño de los fenocristales de Cpx y Opx que se encuentran en la roca; b) Visión con luz polarizada; c) fenocristales grandes de Plg, sus coronas de reacción, los fenocristales de Cpx y opx y su pleocroísmo, además las inclusiones de óx. en los diferentes minerales y en la matriz; d) Vista con luz polarizada que permite distinguir la zonación y la extinción ondulatoria de los fenocristales de Plg.; además de la opacidad de un mineral subredondeado con bordes de reacción asociado a un anf.; e) fenocristales de opx y Cpx entrecrecidos y con macla tipo espada; f) Luz polarizada que facilita el reconocimiento de los minerales aglomerados y reemplazados.

En el microscopio, se observa una textura porfirítica de grano medio, seriada, hipocristalina e inequigranular. Los fenocristales de Plg (25-30%), son grandes (2-3mm), prismáticos, zonados, tienen entrecrecimientos, maclas de Carlsbad y también maclas tipo Albita, estas últimas presentan un borde o zona a modo de coronas de reacción con aspecto pulvurulento y otros similares a un panal, extinción ondulatoria, bordes reabsorbidos e inclusiones de óxidos (Figura 4. 23 a -d).

Otra población son los cristales de menor tamaño (1-1,5 mm), tabular, con maclas simples y múltiples y entrecrecimiento con otros cristales similares. Los fenocristales de Cpx (12-18%) son grandes (1-3 mm), octogonal, están como aglomerados de dos o más cristales, tienen bordes y golfos de reabsorción e inclusiones de óxidos (Figura 4.23.a-b-e-f). Los fenocristales de Opx (8-12%) se

muestran entrecrecidos con Plg y Cpx (1-3 mm), con textura intersertal e inclusiones de óxidos (Figura 4. 23.a-b-e-f); y textura de corrosión en varios cristales (Figura 4.23.c-d). El Anf (1-2%) tiene textura ofítica, sus cristales <1mm con bordes oxidados y sus coronas de reacción con intercrecimiento de microcristales de Cpx. Opx, Plgs y óxidos (Figura 4.23.a-b-e-f).

4.1.5 COMPOSICIÓN MINERALÓGICA

Los cambios observados en el contenido mineral de las rocas, se sintetizan de manera esquemática a continuación, de modo que se presenta la evolución respecto al contenido de cada fase mineral para cada flujo de lava (Figura 4.).

4.1.5.1 Fase Plagioclasa

Como se describe en el trabajo de Samaniego et al. (2008), los minerales analizados hasta el período 2005, representan la fase de fenocristales más abundante (5-20 % vol.). Los cristales son generalmente euhedrales y muestran un amplio rango composicional desde An_{89} a An_{37} (Samaniego et al., 2008). Las altas composiciones de Na y K (An_{27-37} , Or_{6-10}) fueron obtenidas en algunos núcleos de fenocristales y la mayoría de ellos están zonados.

Los productos piroclásticos de 2002 (An_{77-46}), a pesar de las zonas concéntricas con núcleos pulvulentos y ricos en Ca, mostraron composiciones superiores a An_{80-88} .

En cuanto a su comportamiento a partir de 2007, estos cristales siguen manteniendo sus características. En las subsecuentes lavas se observa un mayor desgaste de los cristales prismáticos, un aumento en el tamaño de los cristales tabulares y la formación de pequeños minerales en la matriz.

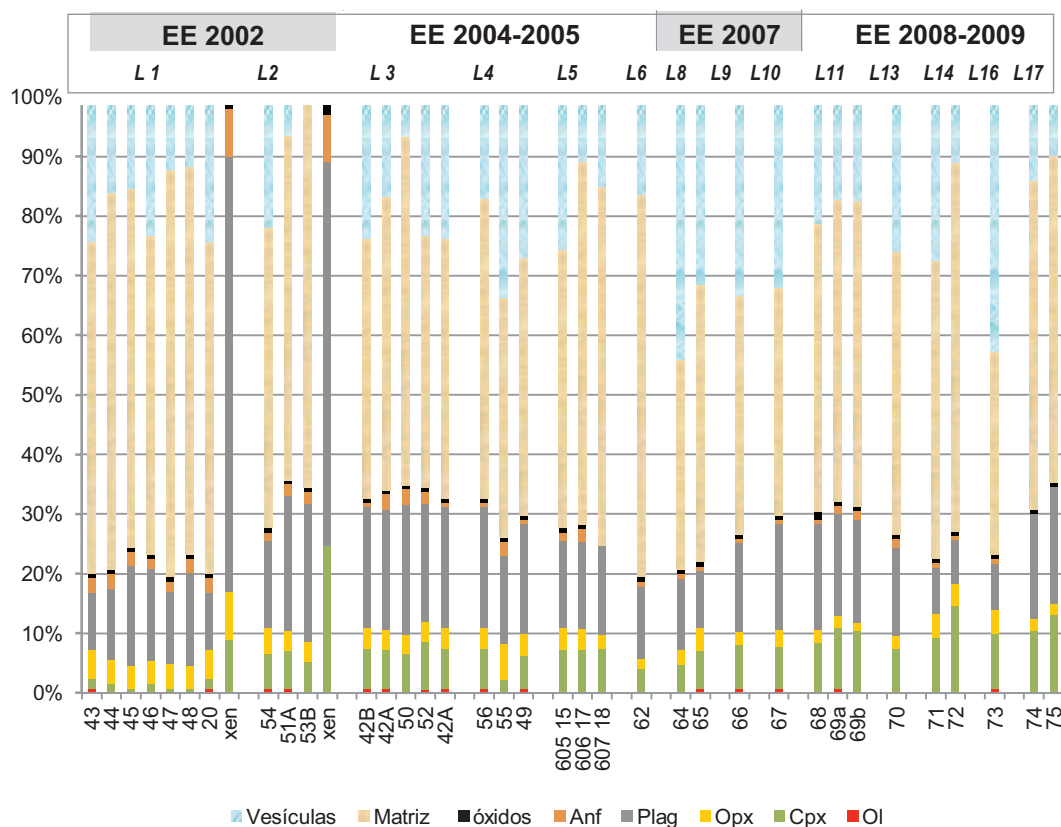


Figura 4. 24. Porcentajes de los minerales observados y descritos en las láminas delgadas analizadas en los respectivos flujos de lava emitidos entre 2002 a 2009.

4.1.5.2 Fase Clinopiroxeno

Hasta el análisis realizado en el período 2005, esta fase ocurre sobre el 5% en las muestras de ambos episodios eruptivos y exhibe composición de diópsido y de augita. Fenocristales euhedrales a subhedrales que tienen un #Mg que varía entre 84 a 73 (Samaniego, et al., 2008).

Desde 2007 en adelante, se reporta el aumento del tamaño de estos cristales, maclas tipo espada y zonación, especialmente hacia las últimas lavas. Adicionalmente, el porcentaje del contenido de este mineral se incrementaba en cada lava subsecuente, oscilando entre 5-15% vol.

4.1.5.3 Fase Ortopiroxeno

En el análisis realizado hasta 2005 por Samaniego et al. (2008), esta fase mineral es descrita como de un mineral accesorio en la andesita basáltica correspondiente a la Lava 2, así como en la fase efusiva de 2004-2005. Esto

contrasta con las andesitas silíceas de los depósitos de los flujos piroclásticos expulsados en 2002 y en el flujo de lava 1 cuando era más abundante (2-4% vol.). En estas rocas ocurren fenocristales euhedrales de enstatita (En_{66-72} , #Mg 70-76) con ligera zonación normal e inversa.

Desde 2007 en adelante, se observa un sutil incremento del tamaño de estos minerales, sin embargo, su contenido decrece hacia las lavas subsecuentes, sin superar el 5%.

4.1.5.4 Fase Anfíbol

Está ampliamente distribuido en los productos de 2002 (2-4% vol.), pero es raro en las lavas de 2004-2005. La mayoría de los fenocristales exhiben hábitos prismáticos y formas euhedrales aunque muy comúnmente con bordes de reacción, rodeados por cristales de clinopiroxeno y Ol. Hay dos tipos de alteraciones identificadas, la principal es la de bordes de reacción compuesto por $\text{Opx}+\text{Cpx}+\text{Plg}+\text{Mag}$ (alteración tipo gabroica). El otro tipo, está ampliamente distribuido en las lavas de 2002 como resultado del reemplazamiento de Anf por agregados criptocristalinos de óxidos de Fe-Ti y de piroxenos (alteración del tipo negro u opaco), como se indica en el trabajo de Samaniego et al., (2008).

La variación en los contenidos de aluminio (10-14% wt. Al_2O_3) permite distinguir dos tipos de poblaciones de anfíboles. La composición en el Anf en los productos piroclásticos de 2002 cubren un rango composicional amplio, mientras que en las lavas de 2002 solo se encontraron cristales ricos en Al (Samaniego et al., 2008). Todos los cristales de Anf en las lavas de 2004-2005, exhiben bordes de reacción correspondientes con ambos tipos de composiciones, alto y bajo Al.

Desde 2007 en adelante, se puede reportar los mismos procesos de alteración, salvo que se observa una reducción en el porcentaje de esta fase mineral hacia las últimas lavas. Adicionalmente, se mantiene dos tipos de evidencias del desequilibrio de este mineral: bordes oxidados y bordes de reacción. Se destaca la ocurrencia en enclaves de dioritas ($\text{Plg}+\text{Cpx}+\text{Opx}+\text{óx}$) desarrollados en la Lava 11.

4.1.5.5 Fase Olivino

Es una fase accesoria en los productos piroclásticos de 2002 (<1%). Se presenta como cristales subhedrales a anhedrales con características de desequilibrio (como bordes reabsorbidos y con reacción) y con un rango de composición estrecha de Fo₇₀₋₈₁. En las lavas de 2004-2005, los cristales de olivino (3-4%) con un rango de composición de Fo₈₁₋₆₆, que se extiende con zonación normal, según se indica en el trabajo de Samaniego et al. (2008).

Desde 2007, en las lavas 8, 9 y 10 se pudo observar nuevamente la aparición de este mineral, aunque su ocurrencia es mínima en las lavas subsecuentes y presenta textura esquelética.

4.1.5.6 Óxidos de Fe y Ti

Estos aparecen como microcristales y microlitos (<1-2% vol.) así como inclusiones en fenocristales de piroxenos, anfíbol y plagioclasa. Ellos corresponden a magnetita y titano-magnetita (5-14% TiO₂), pero escasamente exsuelta en bandas de ilmenita (40% wt. TiO₂) usualmente son encontrados en fenocristales de magnetita, indica Samaniego et al. (2008), según lo analizado en las lavas emitidas entre 2002-2005.

Desde 2007, se mantienen invariables las características de esta fase de minerales (asumiendo que sigan siendo óxidos de Fe y Ti), pues aparecen como el relleno de la textura poikilítica en muchos cristales y en la matriz.

4.2 CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA

Este trabajo contó con 68 análisis geoquímicos realizados en roca total. Varios de estos análisis también constan en trabajos previos como el de Samaniego et al., (2008) junto a otros correspondientes a los análisis obtenidos a través del convenio IRD - IG EPN. Estos datos se muestran dentro del ANEXO 8.

La localización de cada una de las muestras recolectadas en campañas de campo, se muestran en el mapa de la Figura 4.25. De estos análisis, 8 corresponden a eventos eruptivos históricos y 68 análisis correspondientes a los depósitos de flujos piroclásticos de 2002 y a los flujos de lava emitidos desde 2002 hasta 2009, junto al dato adicional obtenido en 2012.

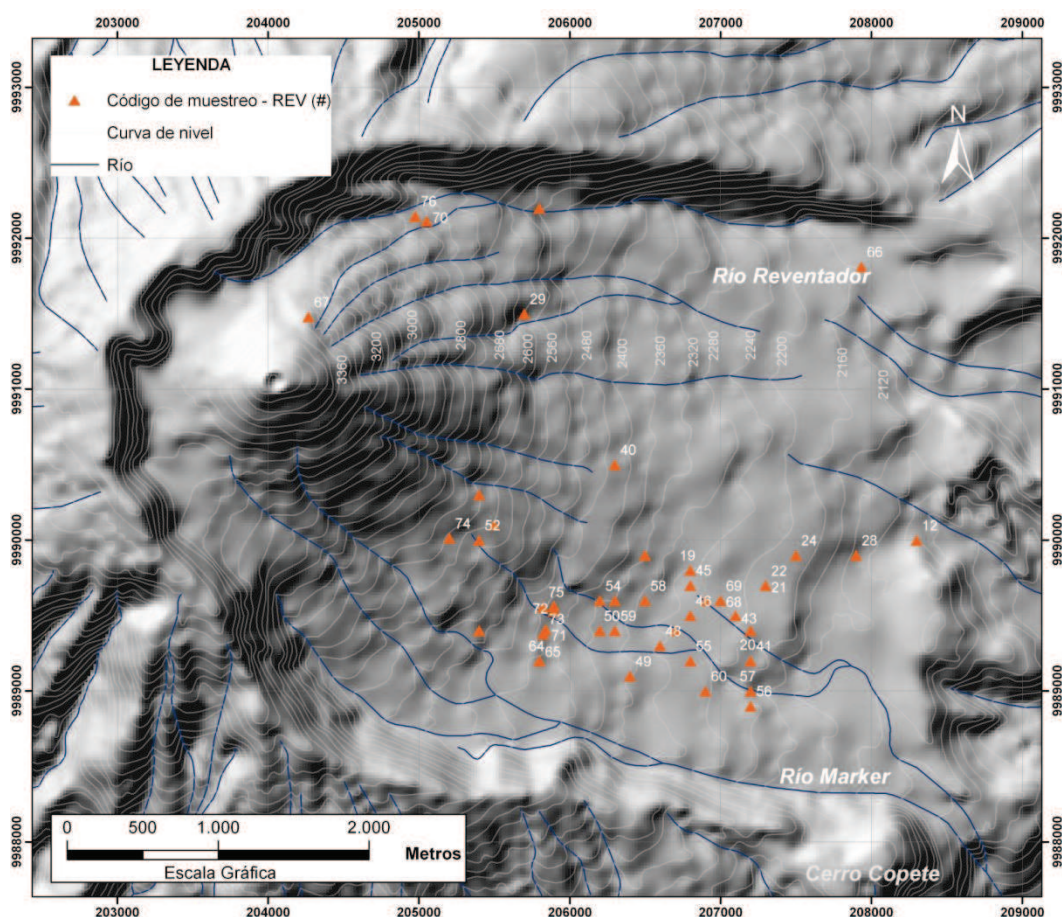


Figura 4. 25. Mapa de distribución de las muestras disponibles para los flujos de lava emitidos por el volcán El Reventador entre 2002-2009. Coordenadas UTM WGS84 Z 18S.

Dentro del análisis, se ha realizado la selección de elementos mayores y elementos traza en roca total de las erupciones de 2002, 2004-2005, 2006-2007, 2008-2009. Como se ha indicado en el trabajo de Samaniego et al., (2008), se realizaron análisis de elementos mayores (% peso) y elementos traza (ppm) en la universidad de Bretaña Occidental, Brest (Francia) mediante el método de espectroscopía de emisión acoplada al plasma atómico (ICP-AES) por sus siglas en inglés. Con excepción del Rb, que fue determinado a través de espectroscopía de emisión de flama atómica. La desviación estándar relativa es ca. 1% para el

SiO₂ y 2% para los elementos mayores excepto por los valores bajos (*b* 0,5% óxido). Para los elementos traza, la desviación estándar es ca. 5% excepto para el Er (ca. 20%). El hierro total está expresado como Fe₂O₃.

Se considera también el LOI (Loss on ignition), que es un parámetro que proporciona una idea sobre el nivel de alteración que pudieron haber tenido las muestras analizadas, pero que en rocas frescas, se obtienen valores bajos, debido a la poca cantidad de volátiles, materia orgánica y carbonatos que estuvieron presentes en ella (Figura 4.26).

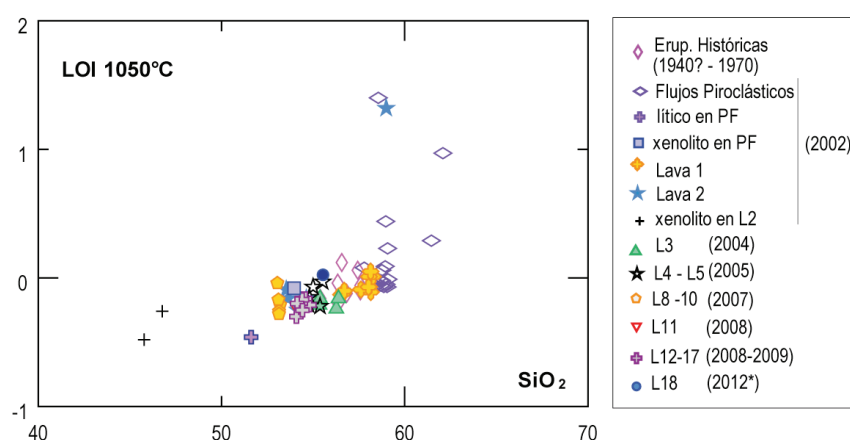


Figura 4. 26. Representación del LOI vs. SiO₂ para las muestras de los productos volcánicos analizados para el volcán El Reventador.

4.2.1 ELEMENTOS MAYORES

Los elementos mayores han sido utilizados en los diagramas de clasificación y contenido de estos elementos. Estos valores han sido reportados en base anhidra y normalizados al 100 wt%.

Los óxidos dentro de este trabajo corresponden al Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, K y P. La clasificación química de las rocas, tal como se muestra en la Figura 4.25, usando los diagramas K₂O vs. SiO₂ de Pecerrillo y Taylor (1976) y K₂O+Na₂O vs. SiO₂, de Le Bas et al. (1986) muestran que las lavas del volcán El Reventador son andesitas y andesitas basálticas, justamente distribuidas entre el límite entre las series calco alcalina de medio y alto K (Figura 4.27.a). Los productos gabróricos como xenolitos en muestras de la Lava 2, pertenecen a la serie de bajo K. Con el diagrama de Le Bass (1986), denotan el componente más básico correspondiente a los basaltos, aunque en realidad se refieren a su equivalente intrusivo, gabro

(45,8-46,8 wt% SiO₂; 0,2-0,3 wt% K₂O). Otras dos tendencias composicionales que se observan son la de traqui-andesitas (53,1-59,9 wt% SiO₂; 1,5-1,8 wt% K₂O) y a traqui-andesitas basálticas (55,4-62,1 wt% SiO₂; 1,7-2,4 wt% K₂O), como se observa en la Figura 4.27 b.

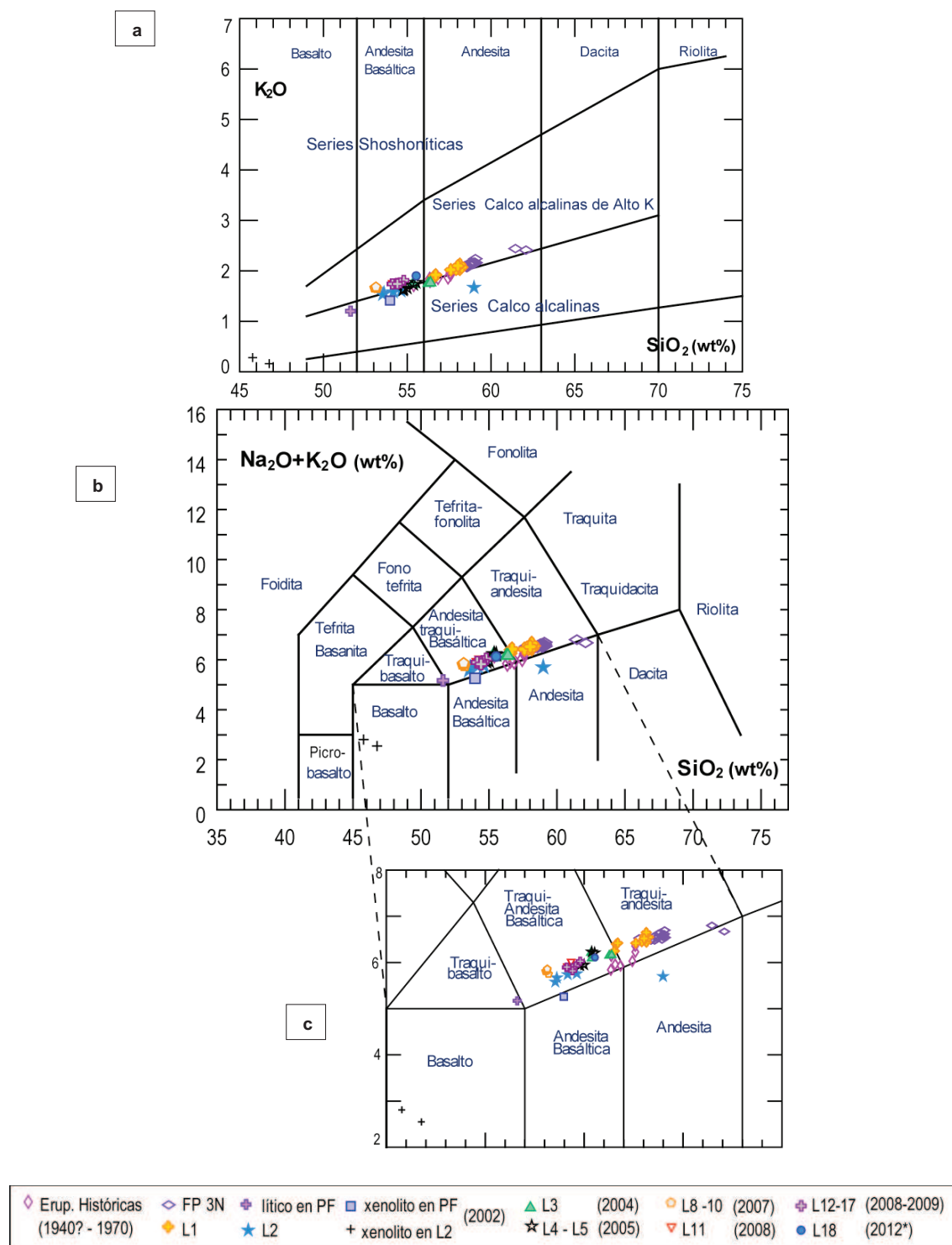


Figura 4. 27. Composición de las rocas en el volcán El Reventador con los diagramas de clasificación de rocas volcánicas. a) Peccerillo y Taylor (1976), b) Le Bas et al., (1986). *La

simbología en cruz (+), corresponde a los xenolitos que se obtuvieron de en la Lava 2, y que corresponden a una composición gabrítica, pero que para fines de visualización general, fueron tomados en cuenta en la clasificación de las rocas.

De manera general, con el diagrama de Gill (1981), (modificad de Le Bas, 1986) (Figura 4.28), se determina una clasificación de andesitas. Por ello, las rocas del volcán El Reventador se muestran en tres grupos: las básicas de medio y alto K y las ácidas de alto K. Las lavas ácidas de alto K están representadas por las lavas históricas y los productos piroclásticos y Lava 1 de 2002; las andesitas básicas de medio K están representadas con las Lavas 2, 3, 4, 5; y finalmente, las andesitas básicas de alto K emitidas a partir de 2007 (hasta 2012*).

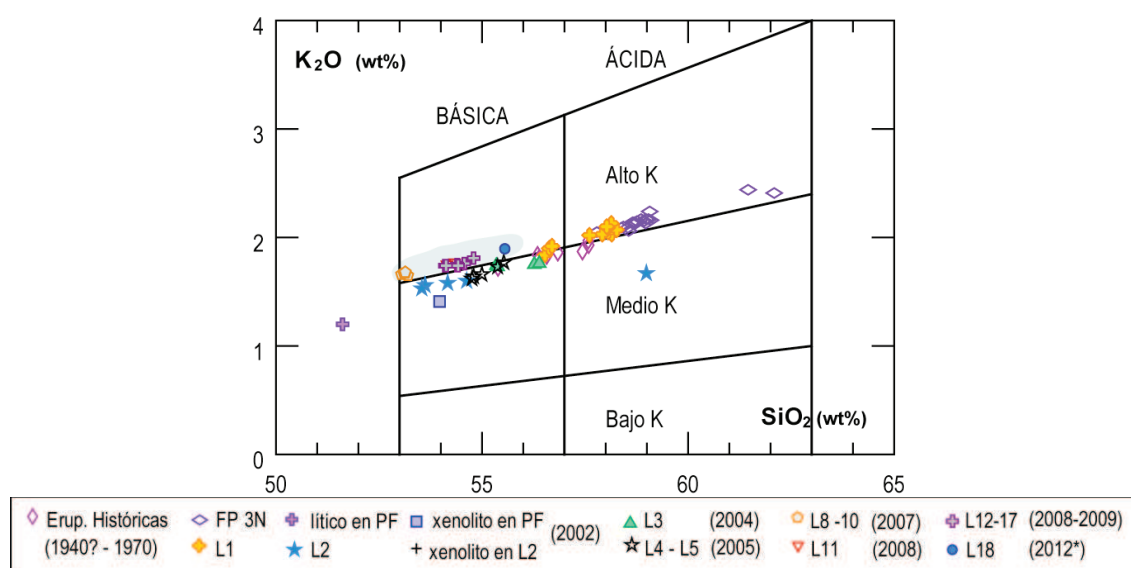


Figura 4. 28. Clasificación de andesitas a través del diagrama Harker de Gill (1981), donde se distinguen tres asociaciones de andesitas: básicas de medio y bajo K y las ácidas de alto K. La zona sombreada representa las lavas subsiguientes a 2007.

Los diagramas Harker, permiten definir una correlación positiva entre SiO_2 y K_2O y Na_2O ; mientras que entre SiO_2 y Fe_2O_3 , CaO , TiO_2 , MnO , MgO , Al_2O_3 , P_2O_5 , se presenta una correlación negativa, aunque el P_2O_5 , presenta mayor dispersión (Figura 4.29). La muestra del xenolito gabrítico, presenta un enriquecimiento en óxidos de Fe_2O_3 , CaO , MgO , Al_2O_3 y un empobrecimiento en minerales alcalinos (K_2O , Na_2O), y un constante contenido de TiO_2 .

Los productos generados a partir de 2007 (Lava 8, 9 y 10) muestran una tendencia paralela a los productos generados de manera previa, como se observa en el diagrama SiO_2 vs. K_2O de las Figuras 4.27 y 28.

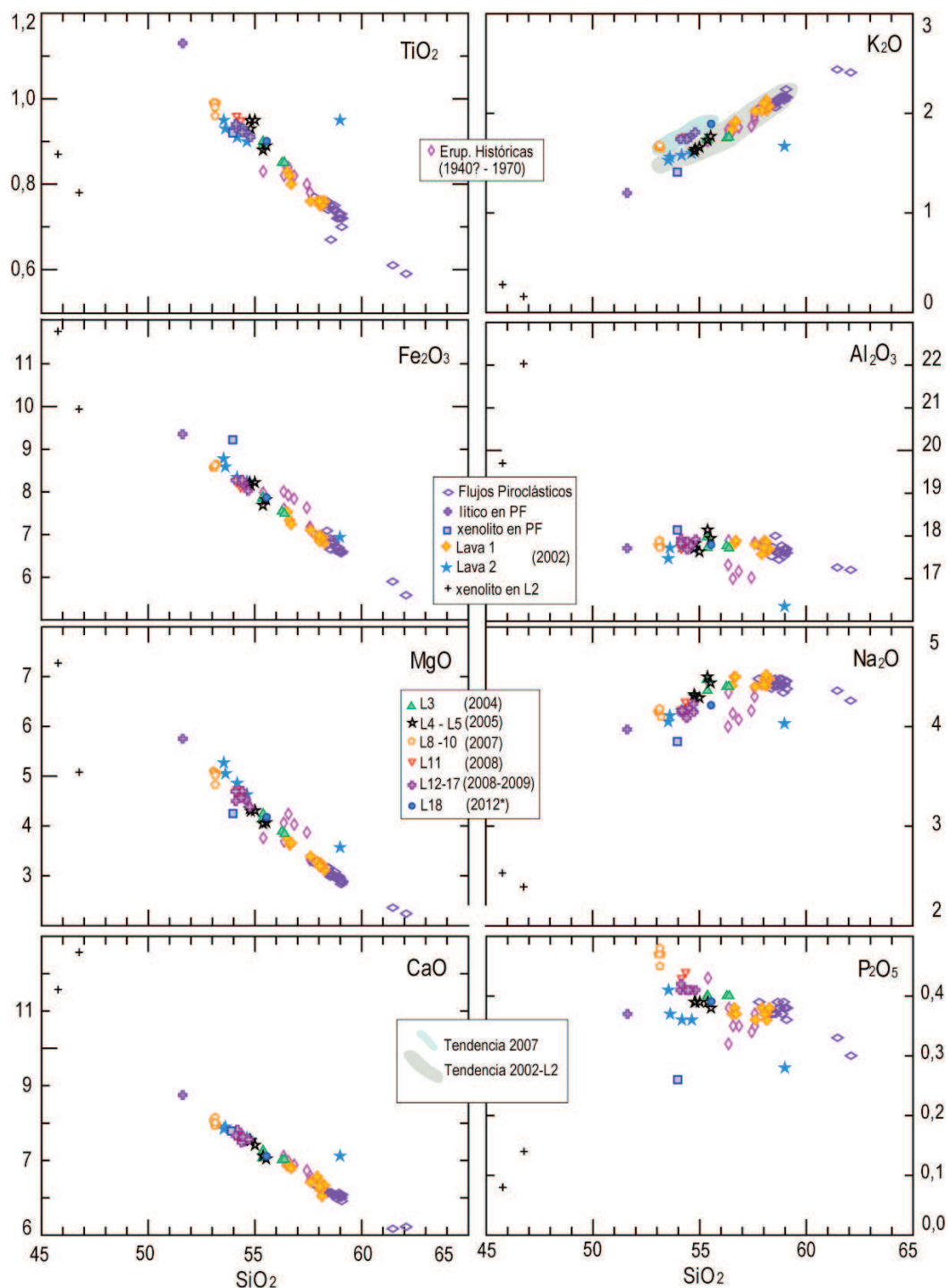


Figura 4. 29. Diagramas Harker para elementos mayores que muestra la variación de los óxidos mayores respecto al SiO₂ (todos en % wt) en en las rocas del volcán El Reventador.

En el diagrama de la Figura 4.30, se representa la evolución de los elementos mayores respecto al tiempo, que de manera general, muestran los cambios composicionales producidos durante el proceso eruptivo que empezó en 2002 y que continuó hasta 2009.

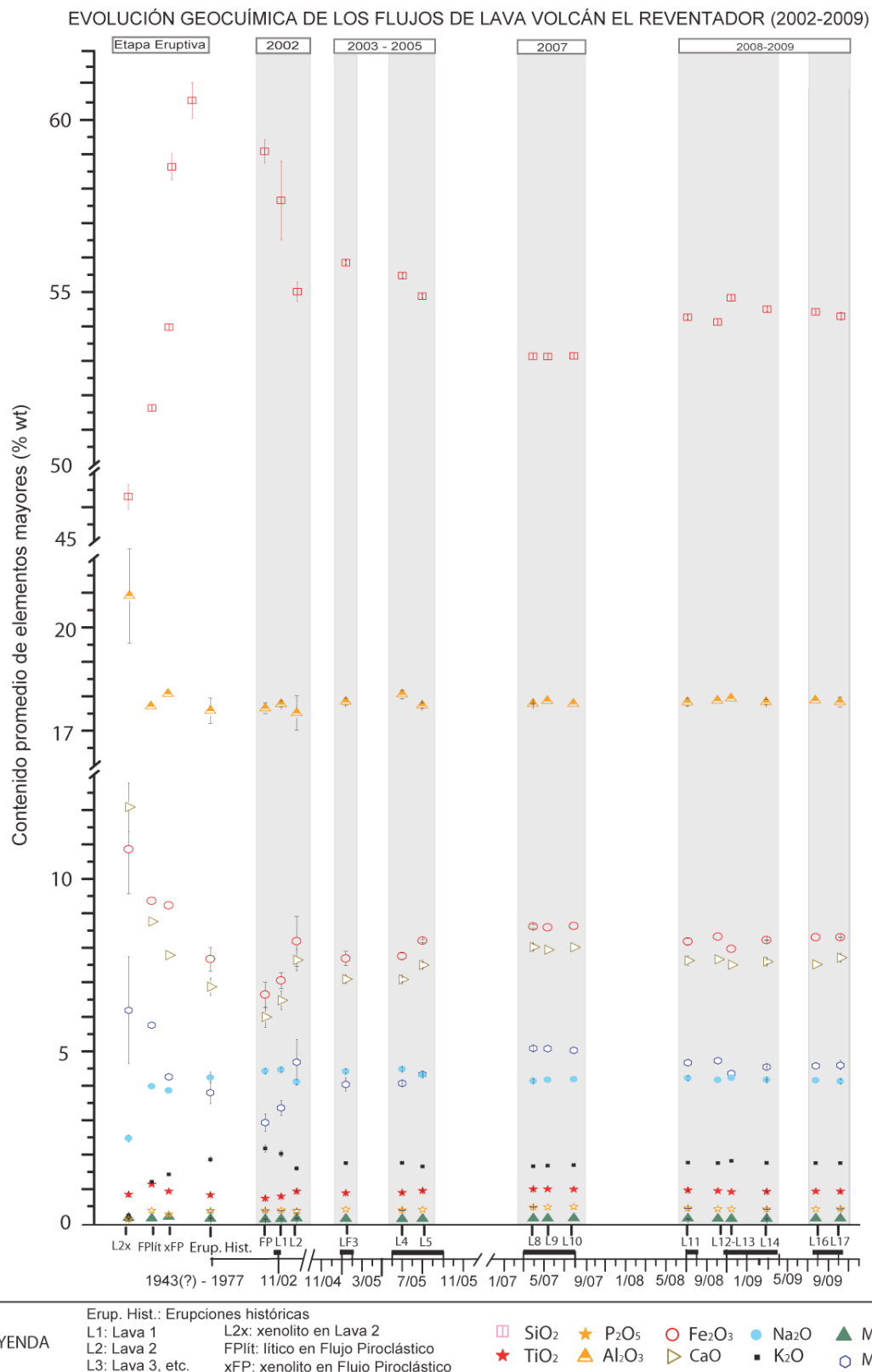


Figura 4. 30. Evolución de la composición porcentual absoluta y promedio (wt. %) para los elementos mayores en los flujo de lava del volcán El Reventador (entre 2002-2009 y datos históricos previos). Las líneas negras verticales corresponden a las respectivas desviaciones estándar.

Esta representación en el tiempo muestra los valores promedios y sus respectivas desviaciones estándar. Esto provee un mejor rango de variabilidad en el caso en que se cuentan con más de una muestra. De modo individual, se ven los cambios para cada flujo de lava en el tiempo, su desviación estándar según el número de análisis por cada flujo, y esto afecta la percepción global del proceso eruptivo.

En base al análisis de estos datos, se establecen tendencias con respecto a los elementos mayores y a la variación de su contenido a lo largo de cortos lapsos de tiempo en los que se establecen las diferencias o similitudes para las etapas eruptivas propuestas en el Capítulo 3, y que se describen a continuación:

Durante la etapa eruptiva 2002 (Figura 4.30), se produjo la emisión de dos flujos de lava, casi simultáneamente (Figura 4.27 y 4.28). Este evento cuenta con 16 análisis geoquímicos que muestran leves diferencias respecto al rango de sus valores. Esto sugiere que el magma extruido fue afectado por importantes cambios durante el proceso de emisión. El flujo de Lava 1 y los productos piroclásticos expulsados en la erupción de noviembre de 2002, son productos de composición ácida de alto K y de valores similares a los registrados para los eventos históricos analizados (Samaniego et al., 2008). En tanto que las características geoquímicas de la Lava 2, muestran composición básica de medio K y corresponden a un nuevo magma más básico (Samaniego et al., 2008).

Dentro de la etapa eruptiva 2004-2005, se cuenta con un total de 9 análisis geoquímicos. La Lava 3, muestra una composición y una variación intermedia con respecto a los valores reportados para la Lava 1 y a la Lava 2. Esto puede sugerir un comportamiento de magma mezclado o como vestigio del magma anterior. La composición química varía ligeramente con el tiempo, aunque es similar a la de la Lava 1 (53,05 – 53,20 wt% SiO₂; 1,65 - 1,68 wt% K₂O).

Las Lavas 4 y 5, que fueron emitidas casi contemporáneamente, muestran una tendencia que se asemeja a la de la Lava 2. Esto sugiere la hipótesis de que la Lava 4 podría corresponder a remanentes de la Lava 3 y estar asociada a un magma más básico. Adicionalmente, las características petrográficas y las evidencias de desequilibrio de los minerales, son coherentes con estas hipótesis y este tipo de texturas se puede generalizar para los subsecuentes flujos de lava

(McPhie et al., 1993; Alpaslan & Temel, 2000; Vernon, 2004; Buckley et al., 2006; Chiaradia et al., 2011).

Para la etapa eruptiva 2007, se observan valores muy similares entre las lavas 8, 9 y 10 (con 4 análisis). Aparentemente, todas las lavas estarían asociadas a un magma similar. Las evidencias petrográficas demuestran que los minerales de estas rocas presentan intensas condiciones de desequilibrio en los cristales.

La etapa eruptiva 2008-2009, presenta valores similares para los flujos de lava 11, 13, 15, 16 y 17, considerando un total de 9 análisis geoquímicos. La tendencia en la variación de los valores es similar observada durante la etapa 2004-2005. Los valores del contenido de álcalis muestran un incremento continuo (54,1 - 54,8 wt% SiO₂; 1,7 - 1,8 wt% K₂O). Este incremento podría estar relacionado con la formación de minerales enriquecidos en álcalis, como por ejemplo, las plagioclasas. Este mineral constituye la más importante población durante esta etapa eruptiva, y a su vez, se podría asociar a un proceso de diferenciación magmática que ocurriría en el volcán, debido a la zonación observada en los cristales (Philppotts & Ague, 2009).

Adicionalmente, se incluye los análisis geoquímicos obtenidos para el flujo de lava emitido en junio de 2012 (*). Su composición tiene 55,6 wt% SiO₂ y 1,9 wt% K₂O, y aparentemente, conserva la tendencia presente a partir de 2007.

4.2.2 ELEMENTOS EN TRAZAS

La composición de los elementos en trazas es reportada en los diagramas de variación con respecto al SiO₂. De manera general se muestra que entre SiO₂ y los elementos de transición (Ni, Co, Cr, V, Sc), los HREE (Dy, Er, Yb) y los MREE (Sm, Eu, Gd), LILE (Sr) y LREE (Nd) presentan todos, correlación negativa respecto al SiO₂; en cambio los HFSE (Zr, Nb, Th), junto a los LILE (Rb, Ba), y LREE (La, Ce) presentan una correlación positiva (Figura 4.31).

Los elementos de transición (Ni, Co, Cr, V, Sc), muestran una tendencia negativa, cuyas concentraciones respecto al SiO₂, son máximas en las lavas de 2007 (Lava 8 -10) y disminuye para los productos piroclásticos de la erupción de 2002 y de la

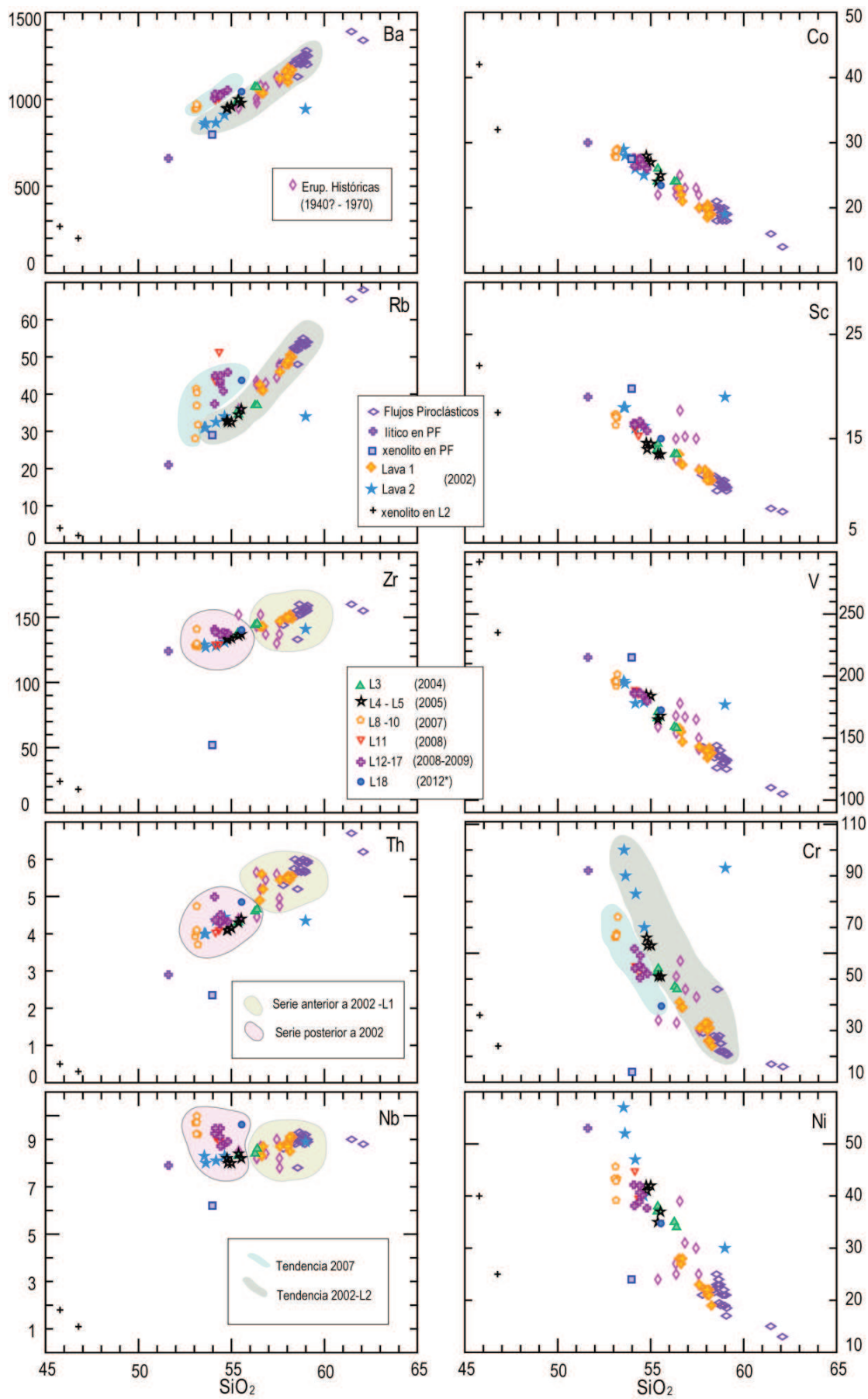
Lava 1. Los elementos Cr y Ni, tienen una mayor dispersión, aunque para el Cr aparece una serie paralela a partir de las lavas que salieron a partir de 2007. La distribución que muestran los elementos en trazas, en la Figura 4.31 presenta las siguientes características:

En el caso de los HREE (Dy, Er, Yb), MREE (Sm, Gd) e Y, permiten distinguir dos series paralelas: 1) relacionada a los productos de erupciones históricas, a los flujos piroclásticos y al primer flujo de lava asociados a la erupción en 2002; 2) todas las lavas subsecuentes a 2002 (Lava 2-18). Ambas mantienen una correlación negativa respecto al contenido de SiO_2 ; y se destaca el mayor empobrecimiento del Er respecto al SiO_2 para las lavas de 2007.

Para los LREE (Nd, Ce, La), aunque menos evidente en el Nd, se distinguen dos series con tendencias diferentes: la una con tendencia positiva para los productos históricos y para las etapas de 2002 a 2005, mientras que se ve una tendencia negativa para las lavas posteriores a 2007.

Para los LILE (Sr, Rb, Ba), aunque más disperso en el Sr, se distingue una tendencia positiva respecto al SiO_2 para las dos series paralelas: la una corresponde a los productos emitidos a partir de 2007 y la otra, a los productos expulsados tras la erupción de 2002 y a las lavas históricas.

Por tanto, la tendencia general que se observa es el empobrecimiento de elementos compatibles y el enriquecimiento de los elementos incompatibles, a lo largo de la emisión de los diferentes flujos de lava, que aparentemente desarrollan dos series paralelas que inician en 2002 (Lava 2) y en 2007 (Lava 8, 9 y 10).



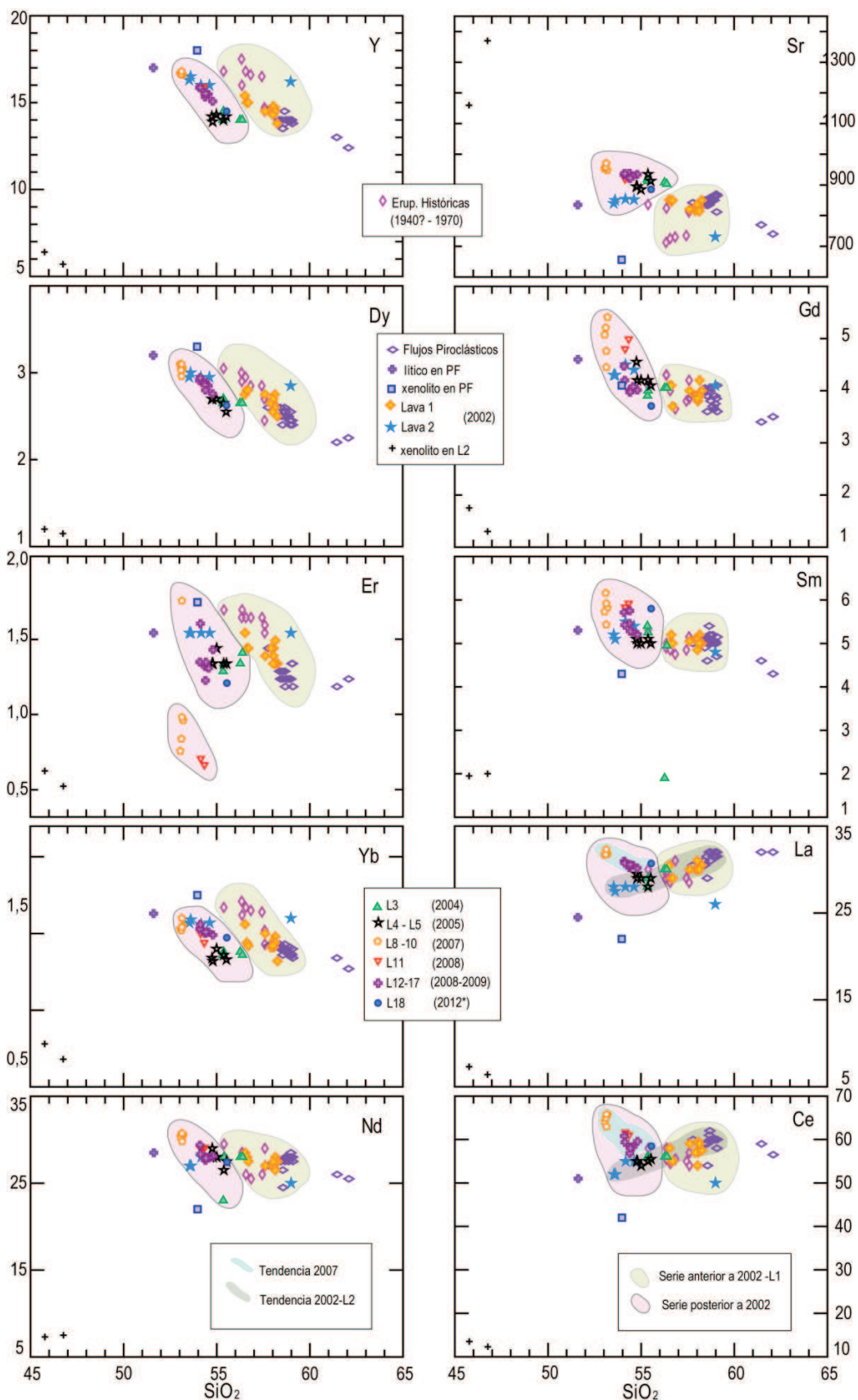


Figura 4. 31. Diagramas de variación de elementos en traza respecto al SiO_2 . Todos los elementos en trazas se representan en ppm vs. SiO_2 wt %.

4.3 ESTUDIO PETROLÓGICO

4.3.1 SÍNTESIS DEL TRABAJO PETROLÓGICO REALIZADO EN LOS FLUJOS DE LAVA EMITIDOS ENTRE 2002-2005 (SAMANIEGO ET AL., 2008)

En el trabajo de Samaniego et al., (2008), las observaciones de campo y los estudios realizados respecto a la erupción de 2002, se destaca la ocurrencia de dos episodios magmáticos y volcánicos hasta 2005.

El episodio de 2002 empezó con una fase explosiva que removió un reservorio de magma andesítico, el que fue seguido de actividad efusiva relacionada a lavas de composición andesítica y andesítica basáltica. En contraste, durante la mayoría del episodio efusivo entre 2004 a 2005, solo se emplazaron flujos de lava de andesitas basálticas.

Los cálculos del balance de masa basados en los análisis realizados en el vidrio de la matriz de las bombas de los flujos piroclásticos y en las inclusiones atrapadas en vidrio dentro de los fenocristales, sugieren un contenido que alrededor de 80 kt de SO_2 y 280 kt de HCl fueron expulsados tras la intensa desgasificación producida durante la fase paroxismal de la erupción de 2002. El carácter altamente explosivo de esa erupción sería efecto del alto contenido de agua (y otras especies volátiles) en el magma previo a la erupción. El freatomagmatismo probablemente fue un factor importante en el incremento de la explosividad, como lo sugieren algunas observaciones geológicas. Adicionalmente, un régimen de desgasificación en un sistema cerrado, es consistente con el rápido incremento de la intensidad de la erupción y comprende una alta magnitud de la configuración explosiva inicial (en este caso, VEI 4).

Ambos episodios magmáticos producidos en 2004 y 2005, fueron largamente controlados por dos procesos de cristalización fraccional (Figura 4.32). La evolución magmática de basaltos a andesitas basálticas fue principalmente controlada por el fraccionamiento de $\text{Pl}+\text{Cpx}+\text{Ol}+\text{Mag}$, seguido por la reacción del Ol y Cpx con el magma que produjo anfíbol, cuyo subsecuente fraccionamiento produjo magmas más evolucionados.

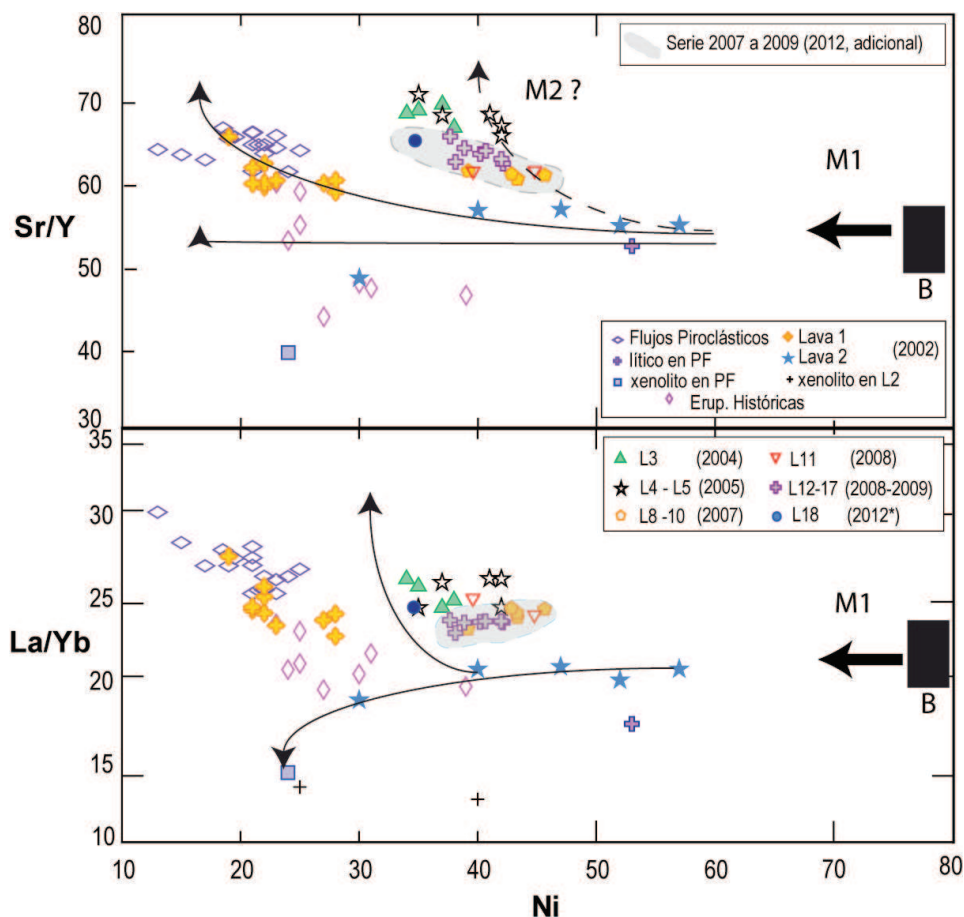


Figura 4. 32. Modelos de cristalización fraccional para los magmas de El Reventador a través de los diagramas a) La/Yb y b) Sr/Y vs. Ni. La composición del cumulado es estimado por el balance de masa. M1, Modelo de cristalización fraccional con un cumulado compuesto de 55%+22%Cpx+17Ol+6%Mag. M2, Modelo de cristalización fraccional con un cumulado compuesto de 51%Pl+27%Anf+11%Cpx+5%Ol+6%Mag. Los coeficientes de partición usados para estos modelos fueron datos en Martín (1987). Marcas en el modelo representan 10% de cristalización. B. Magma basáltico primitivo. Este gráfico ha sido modificado para complementar la información obtenida hasta 2012 con la publicada en el trabajo de Samaniego et al., 2008.

El trabajo de Samaniego et al., (2008) propone un modelo dinámico del sistema magmático del volcán El Reventador usando datos petrológicos. Propone que, previo a la erupción de 2002, se plantea la presencia de un cuerpo de magma andesítico presente debajo del volcán, a una profundidad de 10 km. Este cuerpo fue perturbado por la recarga de magmas básicos y ricos en volátiles que ascendían desde el reservorio. Por ello, el arribo de este magma básico e hidratado indujo la cristalización de anfíbol, así como la fuerte convección en el reservorio somero. Un segundo e incipiente magma cristalizado y fundido ascendería posteriormente desde la profundidad del reservorio y produjo las lavas de 2004 y 2005.

Las recargas magmáticas relacionadas a las erupciones de 2002, 2004 y 2005 y el hecho de que las erupciones históricas de El Reventador han ocurrido tras un lapso de 26 años (desde su última reactivación en 1976), sugieren un mecanismo común que conduce a erupciones muy frecuentes.

Por otro lado, la cristalización de anfíbol en las etapas tempranas de la diferenciación representa un aspecto distintivo y único del volcán El Reventador, pues que en comparación con otros volcanes del Ecuador, donde en la mayoría de casos, el anfíbol solo ocurre en series silíceas de andesitas y dacitas más evolucionadas, como es el caso del Cotopaxi (Hall & Mothes, 2007), Tungurahua (Hall et al., 1999) o Sangay (Monzier et al., 2007), como se menciona en el trabajo de Samaniego et al., (2008). Finalmente, se propone que una temprana cristalización de anfíbol, está relacionada con el enriquecimiento en volátiles de los magmas primitivos en el volcán El Reventador.

4.3.2 IDENTIFICACIÓN DE PROCESOS PETROGENÉTICOS

En los trabajos de Schiano et al. (2010), Shaw (2007), y Rollinson (1993) y Samaniego et al., (2008), se establecen relaciones entre los elementos compatibles e incompatibles, a través de las cuales se pueden proponer arreglos que permitan distinguir procesos petrogenéticos. El comportamiento que presentan los elementos en traza en los sistemas magmáticos, permiten entender que su distribución está relacionada al control que pueda ejercer un cierto proceso petrogenético (Rollinson, 1993).

Samaniego et al. (2008), en su trabajo considera los diagramas Harker con el uso de las relaciones Sr/Y y La/Yb vs. Ni, como buenos indicadores petrogenéticos (Figura 4.32). Esta relación al mantener al Ni como índice de diferenciación, permite destacar la correlación negativa de los datos y destacar la presencia de dos series magmáticas.

Schiano et al. (2010), toma como ejemplo a los volcanes Pichincha, Iliniza y Tungurahua para identificar procesos de mezcla simple en los magmas en Ecuador. En su trabajo plantea la aplicación de varios modelos que asocian el comportamiento de elementos compatibles e incompatibles para discriminar entre procesos de fusión parcial, cristalización fraccional y mezcla de magmas.

Su trabajo propone que al utilizar dos elementos altamente incompatibles (a los que llama H1 y H2), producidos por diferentes grados de cristalización fraccional, se define una correlación lineal de tipo $C_0^{H1} / c_0^{H2} = \gamma^{H2}$, que pasa por el origen 0 (Figura 4.29.a). En el caso contrario, con el proceso de mezcla de dos miembros finales la representación será a través de una curva hiperbólica en el diagrama C^H versus C^H/C^M , en el cual la cristalización fraccional en cambio, producirá una línea casi horizontal (Figura 4.29.b).

El diagrama (a) C^I/C^C versus C^I (donde I es elemento incompatible, así como H y M; y C es elemento compatible) (Figura 4.30.a) y el diagrama (b), C^I/C^C versus $1/C^C$ (Figura 4.30.b), respectivamente, indican que el proceso de mezcla producirá una curva hiperbólica en el diagrama (a) y una tendencia lineal en el diagrama (b). En contraste, el proceso de fusión parcial, se generará como una línea recta en el diagrama (a), pero como una curva hiperbólica en el diagrama (b). Sin embargo, si se observarán dos curvas para ambos diagramas, será correspondiente con el proceso de cristalización fraccional.

Para este estudio, se han aplicado los diagramas para los análisis de las lavas del volcán El Reventador y han obtenido las siguientes relaciones, descritas a continuación.

Para el diagrama C^H/C^M versus C^H , se obtiene una tendencia lineal que no pasa por el origen, como se observa en las relaciones Rb vs. Rb/Nd, Th vs. Th/Nd y Th vs. Th/Nd; es más afín al proceso de mezcla de magmas, aunque para la relación Rb vs. Rb/Sr, se presenta una línea que cruza por el origen, que podría indicar también un proceso de cristalización fraccional (Figura 4.31).

Para el diagrama C^I/C^C vs. C^I , al representar Th/Co vs. T, Ba/Cr vs. Ba y Rb/V vs. V, se observa una tendencia de la curva hiperbólica mostrando afinidad a los procesos de mezcla de magmas y/o cristalización fraccional reflejada para los productos previos a los emitidos en 2007, aunque en los productos posteriores se observa una serie paralela a la anterior. Con el diagrama C^I/C^C vs. $1/C^C$, al representar Th/Co vs. $1/Th$ y Ba/Cr vs. $1/Cr$, se distingue una tendencia lineal asociada al proceso de mezcla de magmas; mientras que al representar Rb/V vs. $1/V$, se distinguen dos series, aparentemente, con la tendencia hiperbólica, un

proceso de cristalización fraccional para todos los productos volcánicos emitidos previo a 2007; mientras que una tendencia lineal apoya un proceso de mezcla de magmas para los productos posteriores a 2007 (Figura 4.32).

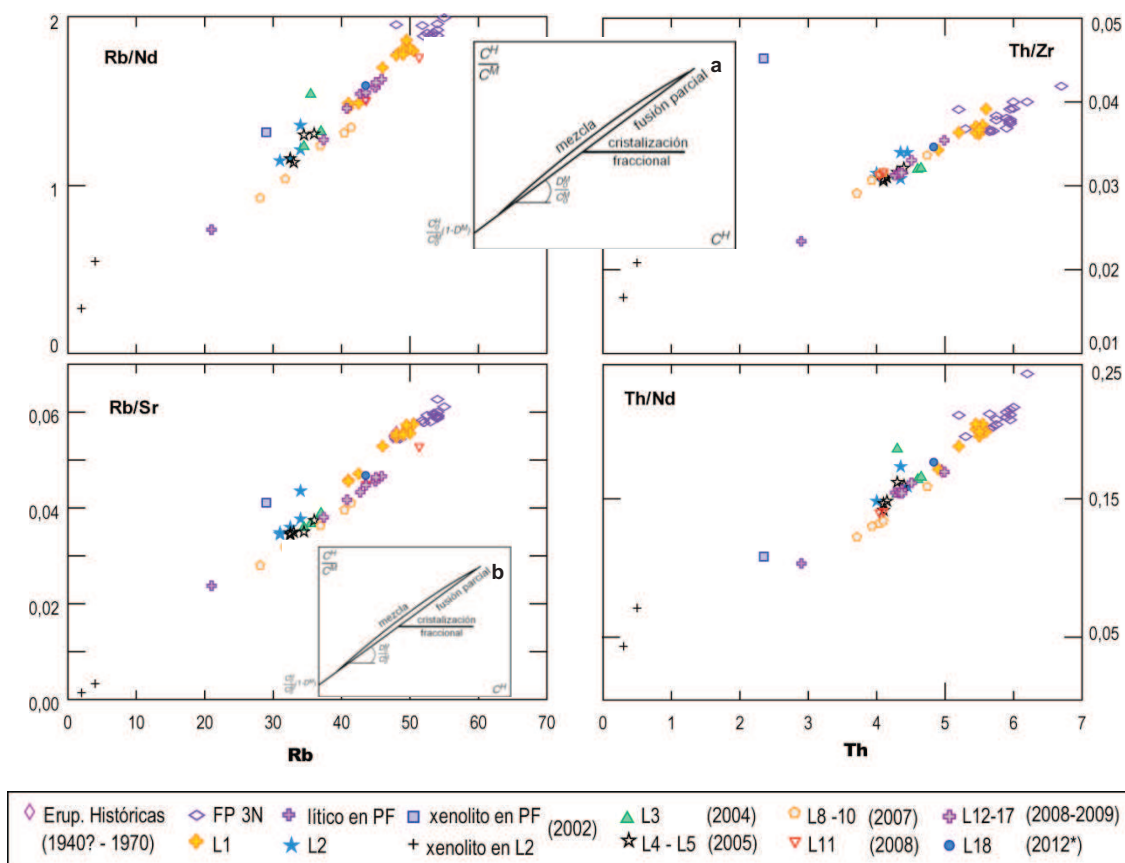


Figura 4. 33. Diagrama de la razón Th/Zr, Th/Zr vs. Th y Rb/Nb, Rb/Sr vs. Rb, donde los esquemas muestran una correlación teórica durante la cristalización fraccional, fusión parcial y procesos de mezcla. Recuadros: a) C^{H1} vs. C^{H2} (donde H1 y H2, son dos elementos altamente incompatibles); b) C^H/C^M vs. C^H (donde C^H , C^M , son concentraciones, donde H, altamente incompatible y M, moderadamente incompatible). Modificado de Schiano, et al., (2010).

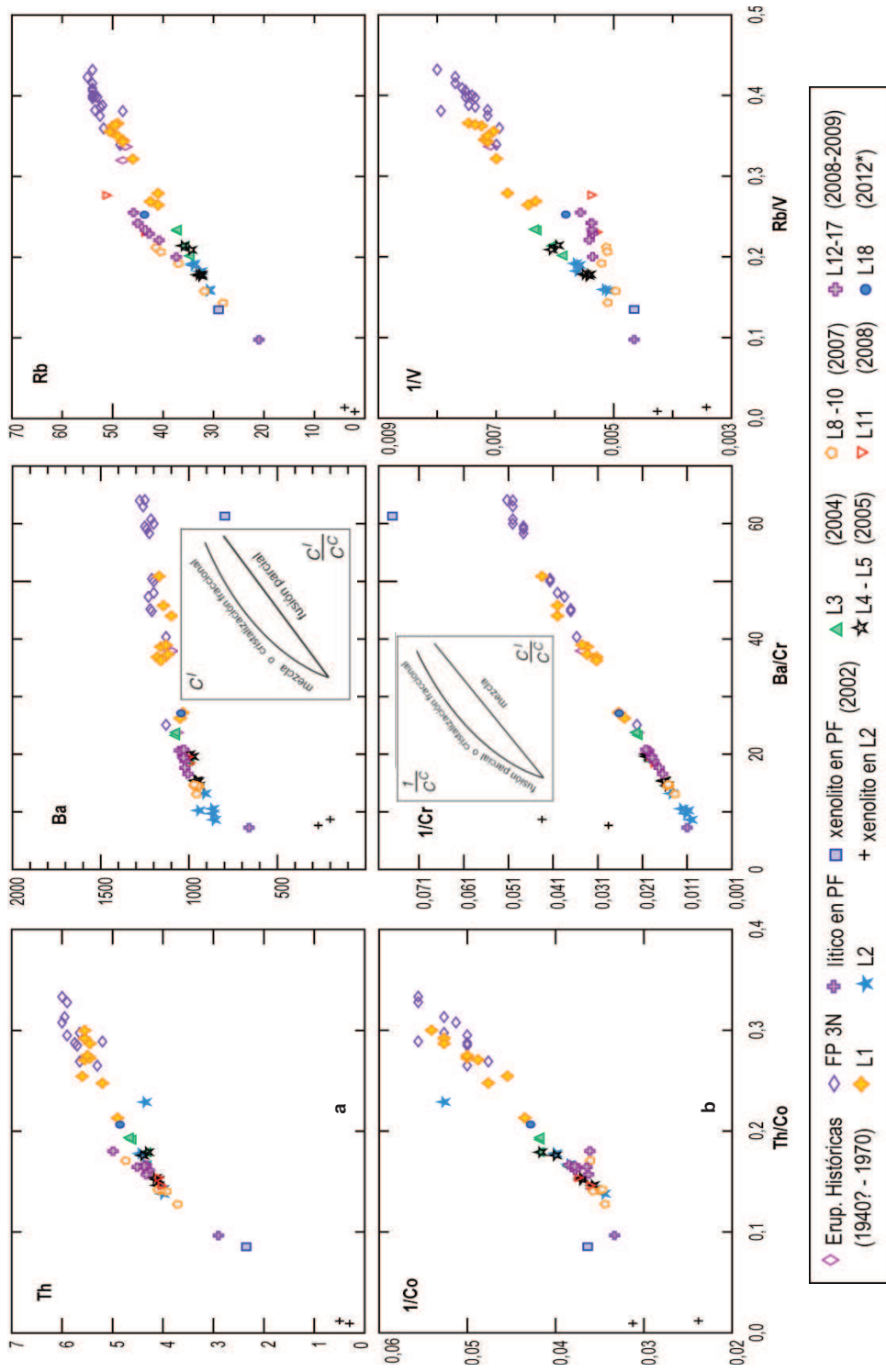


Figura 4. 34. Diagramas del tipo C^l versus C^l/C^c y $1/C^l$ versus C^l/C^c según los modelos de Schiano et al., (2010), de modo que las curvas mostrarían composición de fundidos producidos por mezcla, cristalización fraccional y procesos de fusión parcial. Recuadros: a) Diagrama C^l vs. C^l/C^c ; b) Diagrama $1/C^l$ vs. C^l/C^c (donde C^l y C^c son concentraciones, donde i es incompatible y c es compatible). Modificado de Schiano et al., 2010.

4.3.3 DISCUSIÓN

Las emisiones de los flujos de lava observados en el volcán El Reventador a lo largo del período 2002 hasta 2009, estarían asociados a un mecanismo común.

La petrografía, con el análisis de láminas delgadas y el análisis geoquímico, han permitido relaciona elementos compatibles e incompatibles para distinguir una tendencia respecto a los procesos magmáticos presentes (Shaw, 2007; Schiano, et al., 2010). En el caso de El Reventador se distingue la tendencia correspondiente a la cristalización fraccional y a la mezcla de magmas. Sin embargo, se observa una sola tendencia, aunque en los diagramas Harker que utiliza al SiO_2 como índice de diferenciación, se distinguen dos series magmáticas: 1) Las lavas emitidas a partir de 2002 hasta 2005 (Lava 1, 2, 3, 4, 5) que mantienen una tendencia positiva de los elementos mayores y en los elementos en traza (Figuras 4.28 y 4.30), por lo que, junto a lo observado en el trabajo de Samaniego et al., (2008), el proceso magmático asociado es la cristalización fraccional; 2) las lavas emitidas en 2007 (Lavas 8, 9 y 10) y hasta 2009 (Lavas 11 a 17). Los datos geoquímicos, denotan un carácter más básico respecto a las lavas precedentes, emitidas desde 2002.

Este comportamiento podría corresponder a una inyección de magma más básico en la cámara magmática (Samaniego et al., 2008) o en el conducto magmático (Chiaradia et al., 2011). Conjuntamente, las lavas emitidas en 2008 (Lava 11 a 13), 2009 (Lavas 14 a 17) y en 2012 (Lava 18*), todas presentan una tendencia positiva en el tiempo respecto a su índice de diferenciación (SiO_2).

Cuando se utilizan relaciones como Sr/Y y La/Yb vs. Ni , como se propone en el trabajo de Samaniego et al., (2008), se pueden observar dos tendencias muy claras, y que se mantiene hasta 2012. Esto es aparentemente coherente con lo observado en la petrografía.

Sin embargo, al compara el comportamiento efusivo del volcán con otros, como para el caso del volcán Arenal (Costa Rica), en el que cambios en las fases minerales minerales como el clinopiroxeno, se asocia a la interacción de magmas andesíticos

basálticos con magmas más basálticos de la corteza continental parcialmente fundida (Malavassi, et al., 2002). Otro caso es el volcán Soufrière Hills (Montserrat) o en el Monte Taranaki (Nueva Zelanda), donde se sugiere que minerales como el anfíbol presenta evidencias de deshidratación como las coronas de reacción, asociadas a inyecciones de magmas con componente basáltico (Buckle, et al., 2006; Wadge, et al., 2010; Turner et al., 2011; Costa, et al., 2013; (Schiano, Monzier, Eissen, Martin, & Koga, 2010) Saunders, et al., 2012).

En el caso del volcán El Reventador, los cristales de plagioclasa, ortopiroxeno y de anfíbol, presentan similares texturas de desequilibrio, por lo que podría producirse frecuentes inyecciones de magma de composición más básica. Estas interacciones podrían producirse ya sea a nivel de la cámara magmática o a lo largo del conducto magmático, como lo describe Chiaradia et al., (2011) en su modelo para las andesitas basálticas del volcán Pilavo (Ecuador). También se establecen estas propuestas para el caso de la variabilidad de las andesitas en el Monte Taranaki (Nueva Zelanda) planteado por Turner et al., (2011), lo ocurrido en 2010 en el volcán Merapi (Indonesia), descrito en el trabajo de Costa et al., (2012), o la patogénesis en el volcán Ruapehu (Nueva Zelanda) como lo describe Price et al., (2012).

Estas pautas, nos permiten considerar la presencia de una cámara magmática, o más de una, que alimente al conducto magmático a través de pulsos de magma más básico y tal vez más profundo que en el tiempo, tiende a incrementar su contenido de álcalis.

4.4 SÍNTESIS DEL CAPÍTULO

La lavas emitidas por el volcán El Reventador corresponden petrográficamente a andesitas y andesitas basálticas que presentan la siguiente composición mineralógica: plagioclasa (12-35 % vol.), clinopiroxeno (5-15 % vol.), ortopiroxeno (5-6 % vol.), anfíbol (1-5 % vol.), óxidos metálicos dentro de la matriz y de los minerales (1% vol.) y escaso olivino (2-3 % vol.).

Los análisis geoquímicos de los flujos de lava, mostraron contenidos de entre 53,11 a 58,99 % wt. SiO_2 . En los diagramas Harker, al considerar al SiO_2 como índice de diferenciación, se observó una correlación positiva con K_2O y Na_2O y para los elementos en traza incompatibles; mientras que para los óxidos de Fe_2O_3 , CaO , TiO_2 , MnO , MgO , Al_2O_3 , P_2O_5 se presentó una correlación negativa, similar a lo observado en los elementos en traza compatibles.

El aspecto petrológico, el trabajo de Samaniego et al. (2008), y al utilizar los diagramas del trabajo de Schiano et al. (2010), se establecieron relaciones entre los elementos en traza de modo que se pudo reconocer y asociar procesos de cristalización fraccional y una probable mezcla de magmas durante el período eruptivo 2002 a 2009.

Adicionalmente, las evidencias petrográficas y geoquímicas, nos permiten sugerir la ocurrencia de dos intrusiones de material más básico: 1) en 2002 y 2) en 2007. El contenido de silica en el material que era emitido a continuación a las dos etapas, aumenta sutilmente en el tiempo.

En un dato adicional obtenido para uno de los flujos de lava emitidos en 2012, los análisis geoquímicos mantienen la tendencia observada a partir de 2007.

CAPITULO 5

RESULTADOS

5. 1 RESULTADOS

En este capítulo se ponen de manifiesto los resultados obtenidos a través del análisis de todos los datos utilizados en este trabajo.

Los datos relacionados con el monitoreo volcánico diario, durante el período eruptivo 2002 a 2009 han permitido establecer cuatro etapas eruptivas, basados en la combinación entre la actividad interna y superficial manifestada en el volcán El Reventador. Estas etapas eruptivas son: 2002, 2004-2005, 2007 y 2008-2009.

La actividad interna del volcán descrita en este trabajo, está asociada con la sismicidad estadística. De esta manera, se considera que la ocurrencia de los diferentes eventos sísmicos (VT, LP, HB y tremores) está relacionada el inicio y duración del proceso eruptivo debido a la similitud observada respecto a la ocurrencia de los diferentes eventos sísmicos que se han asociado con ciertos mecanismos identificados dentro de la sísmica volcánica (McNutt R. , 2005).

Por lo tanto, cada etapa eruptiva representa en el tiempo, se tuvieron incrementos en la ocurrencia de los eventos, asociados con: 1) el fracturamiento interno de la roca (tipo VT), 2) la movilización de fluidos al interior (tipo LP), 3) la combinación entre las componentes de fractura y movilización de fluidos (tipo HB) y 4) la movilización de fluidos que generan vibración a lo largo del conducto volcánico durante la salida del material (tipo tremor armónico y espasmódico). Siendo este el comportamiento general durante los cuatro etapas eruptiva consideradas; excepto hacia el final de la etapa 2008-2009, ya que allí se la ocurrencia de la secuencia 1), 2) y 3) disminuye, mientras se ve incrementado del parámetro 4).

En superficie, la actividad fue identificada con técnicas de monitoreo volcánico basados en la observación directa (reportes de la actividad eruptiva instantánea), a través de imágenes térmicas y con la identificación a nivel de sensores satelitales de

los aspectos asociados con un proceso eruptivo (alertas de anomalías térmicas con MODVOLC y Hot Spot Hawaii; de emisiones de SO₂ con OMI y de columnas de ceniza volcánica por VAAC). Estos datos muestran además coincidencia con los relacionados a eventos sísmicos superficiales, tales como las caídas de rocas y las explosiones.

En el volcán El Reventador, predomina la actividad de tipo stromboliana, la que estuvo caracterizada por la emisión de columnas de vapor, gases y ceniza, flujos piroclásticos esporádicos, explosiones, salida de bloques incandescentes y flujos de lava.

Todos estos fenómenos monitoreados se muestran en la Figura 5.1, y corresponde a todo el período 2002 – 2009. En base a estos parámetros, se han obtenido los siguientes resultados (Tabla 5.1).

- La identificación de al menos 17 flujos de lava, que han sido denominados como Lava 1 hasta Lava 17.
- Los flujos fueron emitidos desde el cráter del volcán, a excepción de uno, Lava 2, que se originó desde un vento lateral localizado en el sector suroriental del cono activo que estuvo activo únicamente durante el proceso eruptivo de 2002.
- La definición de la fecha más probable de la salida de cada flujo de lava.
- El tiempo de duración del correspondiente al proceso efusivo en el que se produce la salida, avance y detención de cada flujo de lava.
- La cartografía georreferenciada del Mapa de distribución de los flujos de lava emitidos por el volcán El Reventador entre 2002 a 2009; a escala 1:25000, complementando el trabajo de Vallejo (2009).
- La medición in situ, de los espesores de los flujos de lava accesibles en el flanco norte y sur, dentro de la caldera del volcán.
- La limitación del área de cada flujo de lava utilizó imágenes ASTER disponibles (NVIR-15m/pixel), y con el respectivo trabajo de campo.

- El cálculo de los valores estimados de la tasa media de emisión para cada flujo de lava emitido entre 2002 a 2009, así como de una tasa media de emisión anual. Estos datos están lo más cercanamente obtenidos en base al monitoreo con observaciones directas al volcán.

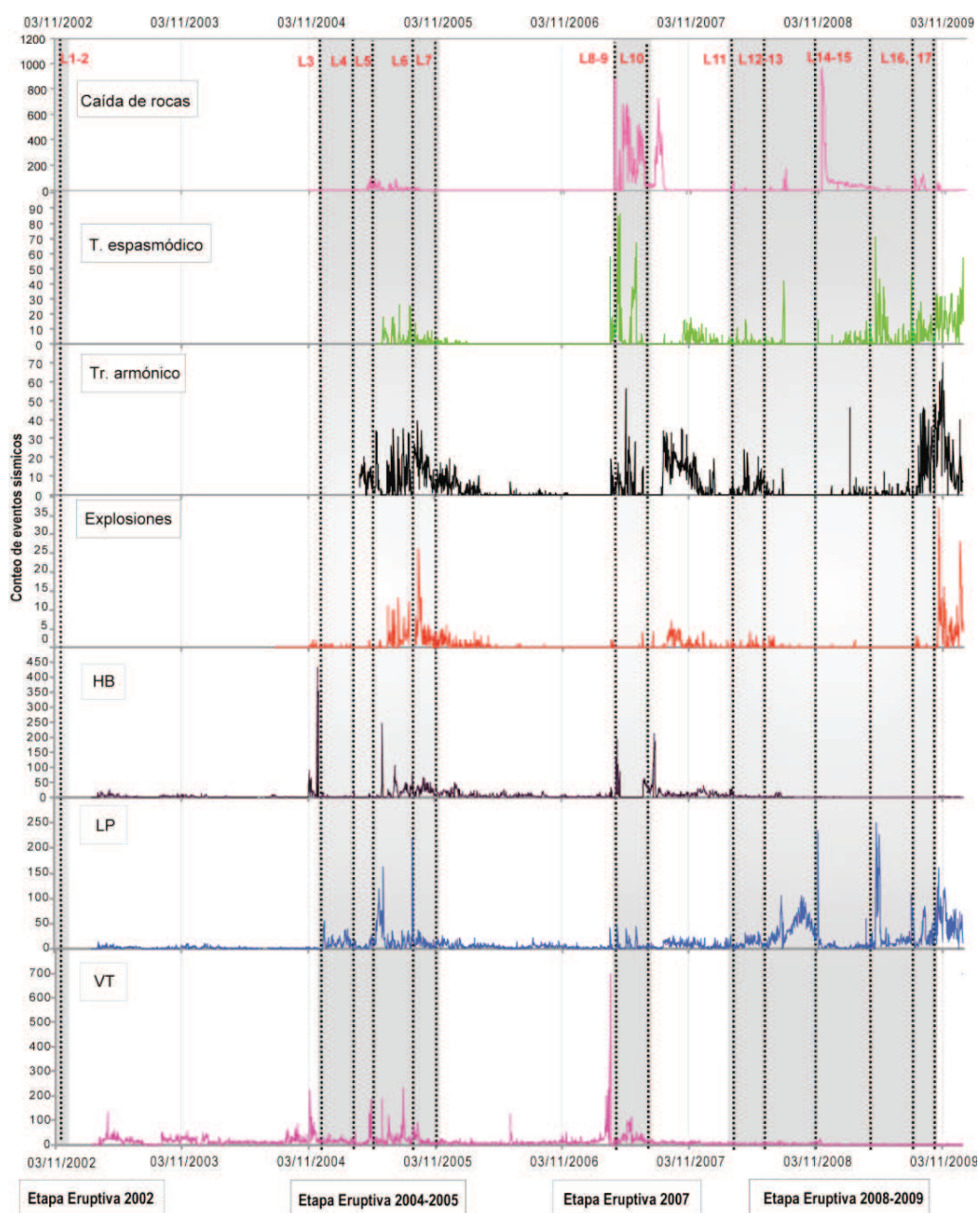


Figura 5. 1. Estadísticas de la sismicidad en el volcán El Reventado durante el período de actividad 2002 a 2009. Las líneas punteadas representa el descenso del flujo de lava; el área gris, representa las fases eruptivas estudiadas; el área blanca, corresponde a las etapas no eruptivas.

Dentro de las etapas eruptivas establecidas se destacan los siguientes aspectos:

- El inicio de cada etapa eruptiva está acompañado de la salida de los mayores volúmenes, las más altas tasas de emisión y el máximo alcance de los flujos de lava, desarrollan una tendencia decreciente el tiempo (Tabla 5.1 y Figura 5.2), tanto para el volumen, la TME y la longitud que alcanza cada flujo.
- El valor de las tasas de emisión de los flujos de lava, es proporcional al valor de volumen estimado y a la longitud que alcanzada dichos flujos por los flancos del volcán.
- La actividad explosiva ocurre de manera contemporánea a la emisión de los flujos de lava y tiende a incrementarse al final de la extrusión, tal como se observa en 2005, 2007 y que es más notorio en 2009.

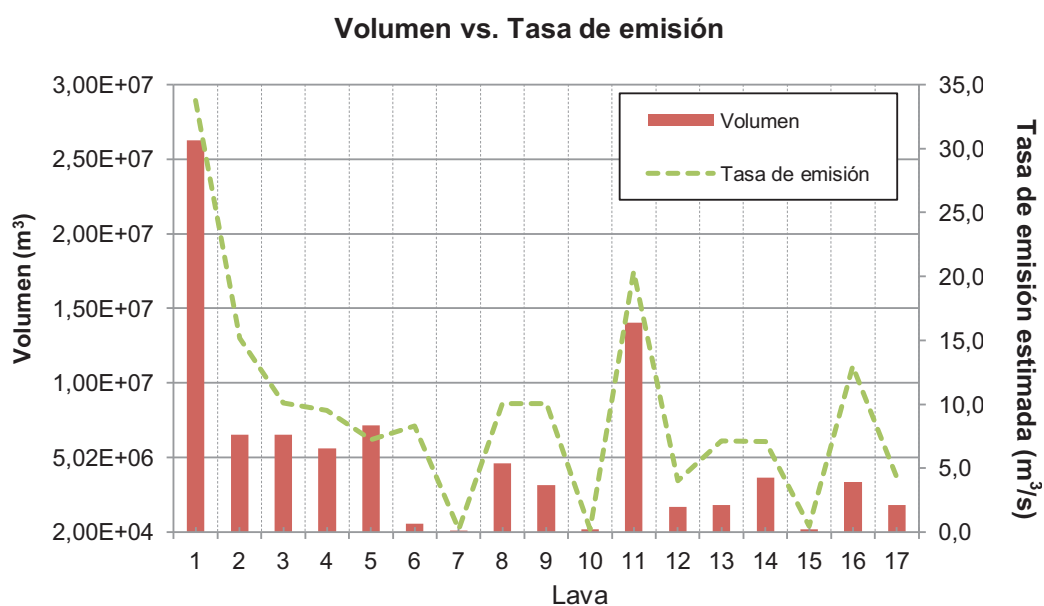


Figura 5. 2. Diagrama de los volúmenes de lava emitidos para cada flujo por el volcán El Reventador y las tasas de emisión media de los mismos, durante el período 2002-2009.

CRONOLOGÍA, GEOMETRÍA Y TASAS DE EMISIÓN DE LOS FLUJOS DE LAVA EMITIDOS ENTRE 2002 A 2009 VOLCÁN EL REVENTADOR													
EE	Lava #	ACTIVIDAD EFUSIVA			ALCANCE		GEOMETRÍA			TASA MEDIA DE EMISIÓN			
		FECHA DE INICIO		DURACIÓN	COTA	LONG. MÁX.	ESPESOR	ÁREA	VOLUMEN	INDIVIDUAL	ANUAL		
	Año	Mes	Día	(días)	(msnm)	(x10 ³ m)	(m)	(m ²)	(x10 ⁶ m ³)	(m ³ /día)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	
2002	1	2002	9	9	2100	3,72	16	1,64E+06	26,3	2,92E+06	33,77	27,15	
			18	5	2200	1,44	12	5,45E+05	6,54	1,31E+06	15,15		
2004-2005	3	2004	21	8	2500	2,29	11	5,97E+05	6,57	8,21E+05	9,51	9,51	
			2	9	1900	4,17	12	4,69E+05	5,63	6,25E+05	7,23		
	4	2005	18	10	1900	4,09	8	8,95E+05	7,16	7,16E+05	8,29	5,21	
			19	4	3200	0,98	14*	4,17E+04	0,59	1,46E+05	1,69		
	5	2005	14	7	3300	0,26	10*	1,26E+04	0,13	1,81E+04	0,21	0,21	
			25	11	2300	2,71	9	3,87E+05	4,64	8,69E+05	10,08		
	6	2007	9	9	2000	4,16	9	3,54E+05	3,18	2,04E+04	0,24	3,43	
2			10	2200	2,01	10	2,04E+04	0,2	2,04E+04	0,24			
2008-2009	7	2008	28	8	2300	3,52	14	1,01E+06	14,1	1,76E+06	20,37	12,79	
			8	5	2300	2,35	10	1,73E+05	1,73	3,45E+05	4		
	8	2009	11	3	2300	1,93	10	1,85E+05	1,85	6,15E+05	7,12	7,12	
			23	6	2300	2,45	13	2,83E+05	3,68	6,14E+05	7,11		
	9	2009	2	5	3300	0,3	10*	1,95E+04	0,2	3,90E+04	0,45	5,54	
4			3	2300	2,71	12*	2,80E+05	3,36	1,12E+06	12,97			
10	2009	2	5	2700	1,73	10*	1,85E+05	1,85	3,70E+05	4,28	4,28		

Área total cubierta por los flujos de lava dentro de la caldera: $3,6 \times 10^6$ m².

Volumen total emitido: 877×10^6 m³.

Tasa media de emisión entre 2002 a 2009: 8,7 m³/s

EE = Etapa Eruptiva. * Flujos de lava de la parte alta del volcán con espesores estimados.

El rango de error, se considera mínimo debido a la delimitación del área con imágenes ASTER con resolución de 30 a 15 m por pixel.

Tabla 3. Características generales de los flujos de lava descritos para el período eruptivo 2002-2009 en el volcán El Reventador

A continuación, se resumen las principales características del proceso eruptivo del volcán El Reventador para cada etapa definida:

La etapa eruptiva 2002 inició el 3 de noviembre de 2002 y se extendió durante todo el mes. Esta etapa se caracterizó por el episodio violento y repentino el 3 de noviembre de 2002, que produjo una fuerte actividad explosiva. Se produjeron grandes columnas eruptivas, flujos piroclásticos, emisión de tefra, gases y ceniza con un volumen de $2.82 \times 10^8 \text{ m}^3$ durante la erupción (Hall et al., 2005; Samaniego et al., 2008; Ridolfi et al., 2008; Delpit et al., 2008). Este evento explosivo correspondió a una erupción pliniana con un VEI=4 (Ramón et al., 2002; Hall et al., 2004; Delpit et al., 2008, Samaniego et al., 2008). Finalmente, a pocos días después del evento paroxismal, las condiciones eruptivas cambiarían a un carácter stromboliano con el emplazamiento de dos flujos de lava con $32,8 \times 10^6 \text{ m}^3$ de lava (Lavas 1 y 2) al interior de la caldera. Estas lavas descendieron hasta 3,7 km. Tras un rápido proceso efusivo, se establece el fin de la actividad efusiva casi de manera inmediata.

La etapa eruptiva 2004-2005 comprende desde noviembre de 2004 hasta septiembre de 2005. Esta etapa se caracterizó por la presencia de fuerte actividad fumarólica acompañada por la extrusión de lava que rellenaba el cráter (octubre de 2004) dejado tras la explosión de 2002. Los parámetros de monitoreo (sismicidad estadística de la sismicidad y actividad superficial), permitieron proponer movilización de magma y fluidos al interior del edificio. Posteriormente, en un marco de actividad de carácter stromboliano se incluían cortos episodios vulcanianos durante el mes de septiembre de 2005 (Sean, 2005). Adicionalmente, se observó la salida de nuevos flujos de lava, Durante esta etapa se generaron 5 flujos de lava (Lava 3-7) y pequeños flujos piroclásticos (Troncoso et al., 2005; Ramón, 2005), Todos depositados dentro de la caldera del volcán. Estos flujos de lava alcanzaron desde kilómetros (Lavas 3, 4 y 5) en el flanco sur y hasta unos pocos cientos de metros (Lavas 6 y 7) por el flanco norte. El volumen extruido durante esta etapa fue de $\sim 20 \times 10^6 \text{ m}^3$.

La etapa eruptiva 2007, se extendió entre marzo y septiembre de 2007. La actividad eruptiva se caracterizó por un gran número de eventos sísmicos, principalmente de señales de tipo tremor espasmódico y armónico. En los meses

de marzo y agosto, las manifestaciones superficiales mostraban actividad tipo fuente de lava con material incandescente en el cráter. Además, la actividad de desgasificación era de gran importancia, pues hasta se registró olor a azufre en las cercanías del volcán. Se identificaron columnas de emisión de ceniza con alturas que no superaron 1km snc asociadas a explosiones y columnas de vapor y gases (L. Troncoso, com. pers.), típicas para la actividad stromboliana del volcán, acompañada de explosiones durante la extrusión de dos nuevos flujos de lava (Lava 8 y 9). El descenso de estos flujos fue casi simultáneo, por lo que se destaca la alta tasa de emisión con la que fueron extruidos ($\sim 10 \text{ m}^3/\text{s}$). El primero por el flanco norte y el segundo por el flanco sur, y tuvieron un alcance de $\sim 4 \text{ km}$ bajo el nivel del cráter. Luego de casi 4 meses, se produjo un nuevo flujo de lava (Lava 10) que descendió por el flanco norte y alcanzó los 2 km. El volumen total emitido de esta etapa fue $\sim 8,9 \text{ m}^3$.

La etapa eruptiva de 2008-2009, se estima entre abril a noviembre de 2008 y marzo a noviembre de 2009. Las principales características de esta etapa es la gran ocurrencia de eventos relacionados a la movilización de fluidos dentro del volcán, representados con el gran numero de eventos sísmicos de tipo LP y tremor armónico y espasmódico que se podían registrar a distancias superiores a 100 km (Ramón, 2008). La actividad superficial mostró una importante desgasificación durante la erupción: 1) olor a azufre en alrededores del volcán (Ramón, 2008); 2) el material particulado recorrió casi 200 km hasta la costa, aunque la caída de ceniza predominó en los alrededores del volcán (Bustillos, 2008); 3) las emisiones de vapor de agua, ceniza y gases eran reportados por sensores satelitales que indicaban dispersión de estos los productos hacia el sector occidental del volcán (VAAC, OMI) y 4) la ocurrencia de alertas de anomalías térmicas detectadas por MODVOLC y Hot Spot Hawai.

Desde julio de 2008 se observó el inicio de nueva actividad efusiva, con la Lava 11 que descendió por el flanco sur. Estuvo asociada con la ocurrencia de bramidos y explosiones que incrementaban su intensidad hacia el final del proceso. Luego de 4 meses, en el mes de noviembre, se produjo la emisión de dos nuevos flujos de lava (Lava 12 y 13) que descendieron simultáneamente por los flancos sur y norte respectivamente.

Tras un leve período de ausencia de manifestaciones superficiales, en abril de 2009, se produjo un nuevo episodio efusivo con actividad stromboliana que culminó con la extrusión de 4 flujos de lava (Lava 14 a 17) durante los meses de abril, mayo, agosto y octubre. Los flujos de lava descendieron por el flanco sur, a excepción de la Lava 15, que descendió por el flanco norte.

La actividad eruptiva durante esta última etapa, se caracterizó por mostrar un repunte de la actividad sísmica, esta vez, relacionada a la ocurrencia de eventos asociados con la movilización de fluidos al interior del volcán (LP y tremor amónico y espasmódico). La actividad superficial registraba bramidos, columnas de emisión de vapor de agua y de ceniza, las cuales alcanzaban hasta 2 km sobre el cráter. El volumen de material lávico extruido durante esta etapa fue de $\sim 26,8 \text{ m}^3$.

El valor de las tasas de emisión producida para los flujos de lava durante cada etapa eruptiva es proporcional al valor de volumen total estimado (Tabla 4), y muestra los valores más altos para la etapa eruptiva 2002, seguida de la etapa eruptiva 2008-2009. Estos datos son similares a lo descrito anteriormente, respecto a fuertes episodios eruptivos.

Etapa Eruptiva		2002	2004-2005	2007	2008-2009
Período de actividad		Nov.	Nov. 04 -Sept. 05	Mar. a Sept.	Abr. 08 - Nov. 09
Número total de flujos de lava		2	5	3	7
Actividad efusiva (días)		14	38	30	35
Volumen de lavas ($\times 10^6 \text{ m}^3$)		32,4	20,08	8,8	26,77
Tasa media de emisión	($\times 10^6 \text{ m}^3/\text{día}$)	2,31	0,53	0,29	0,76
	($\times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$)	26,79	6,12	3,4	8,85

Tabla 4. Características generales de las etapas eruptivas planteadas para este estudio.

Las tasas de emisión (TME) calculadas para el volcán El Reventador, presentan datos que son coherentes con otros resultados obtenidos en otros volcanes alrededor del mundo, según lo obtenido por Waker (1973). Se observan casos similares en otros volcanes de composición basáltica y andesítica, según los valores de la TME (Figura 3.76), donde se puede tener una variación importante durante el proceso efusivo con la emisión de lavas (Tabla 4).

La caracterización de los flujos de lava, la petrografía y la geoquímica, nos permiten destacar los siguientes aspectos:

- Las lavas emitidas por el volcán El Reventador son andesitas y andesitas basálticas.
- La vesicularidad observada en las rocas, es muy baja, en general, las rocas han sido principalmente masivas.
- Las rocas tienen textura porfírica, hipocristalina, seriada e inequigranular de grano medio a fino.
- La asociación mineral comprende fenocristales de plagioclasa (20-35% vol.), clinopiroxeno de tipo augita (3-15% vol.), ortopiroxeno de tipo hiperstena (3-10% vol.), anfíbol de tipo hornblenda (2-5% vol.), olivino (1-2%). Como minerales accesorios estarían los óxidos metálicos, como lo indica Samaniego et. al., (2008) titanomagnetita (1% vol.) (Tabla 5.3)
- La matriz es principalmente afanítica (45-60% vol.), ocasionalmente, criptocristalina y excepcionalmente, muestran una microestructura fluidal.

EE	Lava #	Composición mineralógica (%)						MATRIZ (%)	# Láminas disponibles
		OI	Cpx	Opx	Plg	Anf	Óx.		
2002	1	1,0	1,6	5,3	16,6	2,7	1,0	71,9	7
	xenolito L1	-	9,0	8,0	73,0	8,0	1,0	-	1
	2	1,0	8,7	5,3	30,0	2,7	1,0	51,3	3
	xenolito L2	-	25,0	-	65,0	8,0	2,0	-	1
2004 - 2005	3	1,0	10,4	5,0	30,6	2,6	1,0	49,4	5
	4	1,0	7,0	6,0	25,3	1,7	1,0	58,0	3
2007	5	-	10,0	4,3	20,0	2,5	1,0	62,2	3
	6	-	5,5	2,5	15,0	1,0	1,0	75,0	1
2007	8	1,0	8,0	5,0	12,0	1,0	1,0	72,0	1
	9	1,0	10,0	3,0	20,0	1,0	1,0	64,0	1
	10	1,0	10,0	4,0	25,0	1,0	1,0	58,0	1
2008 - 2009	11	1,0	14,0	2,7	25,0	1,7	1,3	54,3	3
	13	-	10,0	3,0	20,0	2,0	1,0	64,0	1
	14	-	16,0	5,0	10,0	1,0	1,0	67,0	2
2009	16	1,0	12,0	5,0	10,0	1,0	1,0	70,0	1
	17	0,0	17,5	3,0	27,5	-	1,0	51,0	2

EE=Etapa Eruptiva

OI=olivino, Cpx=clinopiroxeno, Opx=ortopiroxeno, Plg=plagioclasa, Anf=anfíbol; óx= óxidos metálicos.

Los % mostrados en la tabla corresponden a valores promedio.

Tabla 5. Características generales de las etapas eruptivas planteadas para este estudio.

Durante el análisis de las láminas delgadas, se destacan además aspectos particulares en varios de los cristales de los minerales de estas lavas:

- Las plagioclasas, presentan al menos 3 generaciones de formación de cristales:
 - La Primera Generación (1°G), muestra fenocristales subhedrales, con una evidente zonación y de tamaño grande (3.5-2.0 mm). Esto podría corresponder a una etapa de estabilidad del magma que permitió el desarrollo de los cristales (Philpotts & Ague, 2009).
 - La Segunda Generación (2°G), presenta fenocristales euhedrales a subhedrales, de tamaño mediano (2-1 mm), maclas del tipo Carlsbad y algunos de ellos con zonación. Esto, posiblemente asociado a condiciones de ascenso más rápido que la primera generación (Philpotts & Ague, 2009).
 - La Tercera Generación (3°G), muestra microcristales aciculares (<0,5mm), principalmente reconocidos en las Lavas: 2, 3,4, 9 y 10. Posiblemente correspondería a una tasa de enfriamiento rápido del magma.

- Principalmente los fenocristales de plagioclasa (1°G) y anfíbol, presentaron evidencias de desequilibrio. La plagioclasa presentó corrosión en los bordes y extinción ondulatoria. Esta última asociada a la deformación debido a la interacción a altas temperaturas (Punin et al., 2009). Los anfíboles, mostraron coronas de reacción y bordes de oxidación. Esto podría sugerir que estos minerales mantienen la evidencia de un posible contacto con un magma de mayor temperatura (Buckle, et al., 2006; Wadge, et al., 2010; Turner et al., 2011; Costa, et al., 2013; Saunders, et al., 2012).

- Los fenocristales de piroxeno son subhedrales a euhedrales, y de tamaños variados (2.0 a 5 mm). Su contenido se incrementa hacia las últimas lavas durante una etapa eruptiva. Presenta intercrecimientos de los cristales, por lo que es muy frecuente observarlo formando aglomerados.

- Los fenocristales de anfíbol, son frecuentes en las Lava 1, 2, 3, 4 (Etapa eruptiva 2002 y 2004-2005) y en la Lava 13 (Etapa eruptiva 2008-2009) y en todas se presenta como fenocristales anhedrales con bordes de reacción y con bordes oxidados.

Los datos geoquímicos realizados para la roca total, permiten evidenciar los sutiles cambios producidos en la evolución de los óxidos mayores y elementos en traza en el tiempo. Lo más representativo se enuncia a continuación.

- En la clasificación de Peccerillo & Taylor (1976), las lavas del volcán El Reventador están en el límite entre la serie calco alcalina de medio y alto K. En la clasificación de Le Bas (1986), modificada por Gill (1981), identifica: 1) andesitas ácidas de alto K a las lavas históricas, a los productos piroclásticos y a la Lava 1 extruidos en 2002; 2) andesitas básicas de medio K a las Lavas 2, 3, 4, 5; y 3) andesitas básicas de alto K a las Lavas 8 a Lava 17, incluido el dato correspondiente a la Lava 18, emitida en 2012.

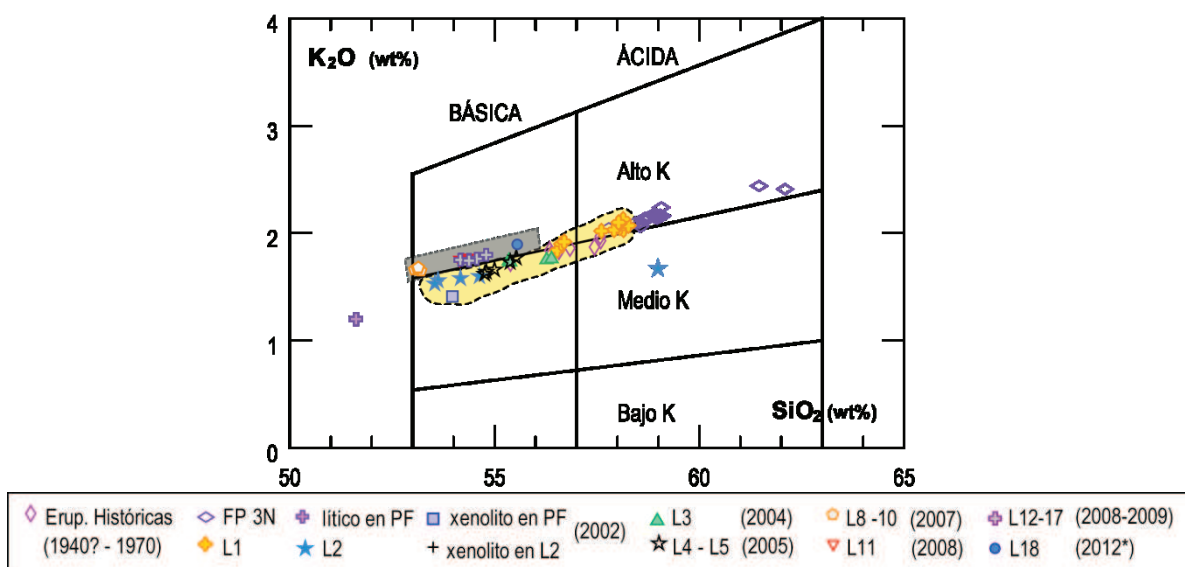


Figura 5. 3. Diagrama de clasificación de andesitas de Gill (1981). Se distinguen tres asociaciones de andesitas: básicas de medio y alto K y las ácidas de alto K. La zona rectangular representa las lavas de la Serie 2007 y la zona sombreada representa la Serie 2002.

- Al representar el contenido de SiO_2 como índice de diferenciación, se observa una correlación positiva respecto a los álcalis.
- El contenido de álcalis muestran una tendencia de incremento continuo en el tiempo, considerando como puntos de partida a la Lava 2 emitida en 2002, y a las Lavas 8, 9 y 10 emitidas en 2007.
- Las lavas correspondientes a las emisiones producidas en 2002 (Lava 2) y 2007 (Lava 8,9 y 10), muestran los menores contenidos de SiO_2 a lo largo de todo el proceso eruptivo.

- Las lavas de 2002 y 2007, corresponderían a dos series magmáticas de composición ligeramente más básico, pero que mantienen una misma tendencia. La Serie de 2002 es más empobrecida en SiO_2 que la Serie 2007.

Adicionalmente, las relaciones que se producen entre los elementos compatibles e incompatibles permiten determinar sistemas magmáticos asociados a procesos petrogenéticos. Al utilizar los modelos propuestos por Schiano et al., (2010) y Samaniego et al., (2008), el resultado fue una tendencia relacionada con la cristalización fraccional para todos los productos volcánicos emitidos entre 2002 a 2005 (Samaniego et al., 2008) y para las lavas desde 2007 hasta 2012, se muestra una tendencia hacia el proceso de mezcla de magmas.

Estos procesos magmáticos propuestos, tienen soporte con las evidencias observadas en las láminas delgadas, observando rocas con textura porfirítica y seriada; la zonación presente en los cristales de plagioclasa y piroxenos; cambio en las condiciones de temperatura y presión, cuyas evidencias de desequilibrio son claras en los cristales sensibles al cambio de estos parámetros, como es el caso del anfíbol (Buckley et al., 2006; Philippotts & Ague, 2009; Chiaradia et al., 2011; Costa et al., 2012).

5.2 DISCUSIÓN

La hipótesis de este trabajo estuvo relacionada con que las emisiones de los flujos de lava que se han producido en el volcán El Reventador a partir de 2002, estén asociadas a inyecciones de magma.

Para poder enfocarnos en el tema, partiendo del estudio realizado por Samaniego et al., (2008), en los flujos de lava emitidos entre 2002 hasta 2005, dicha propuesta comprende una inyección en la cámara magmática a una profundidad estimada de 7-12 km, lo cual sería la causa de la erupción en 2002.

La evidencia, el estudio petrológico en los minerales de las lavas, determinaron un proceso de mezcla y de cristalización fraccional debido a la interacción de dos magmas.

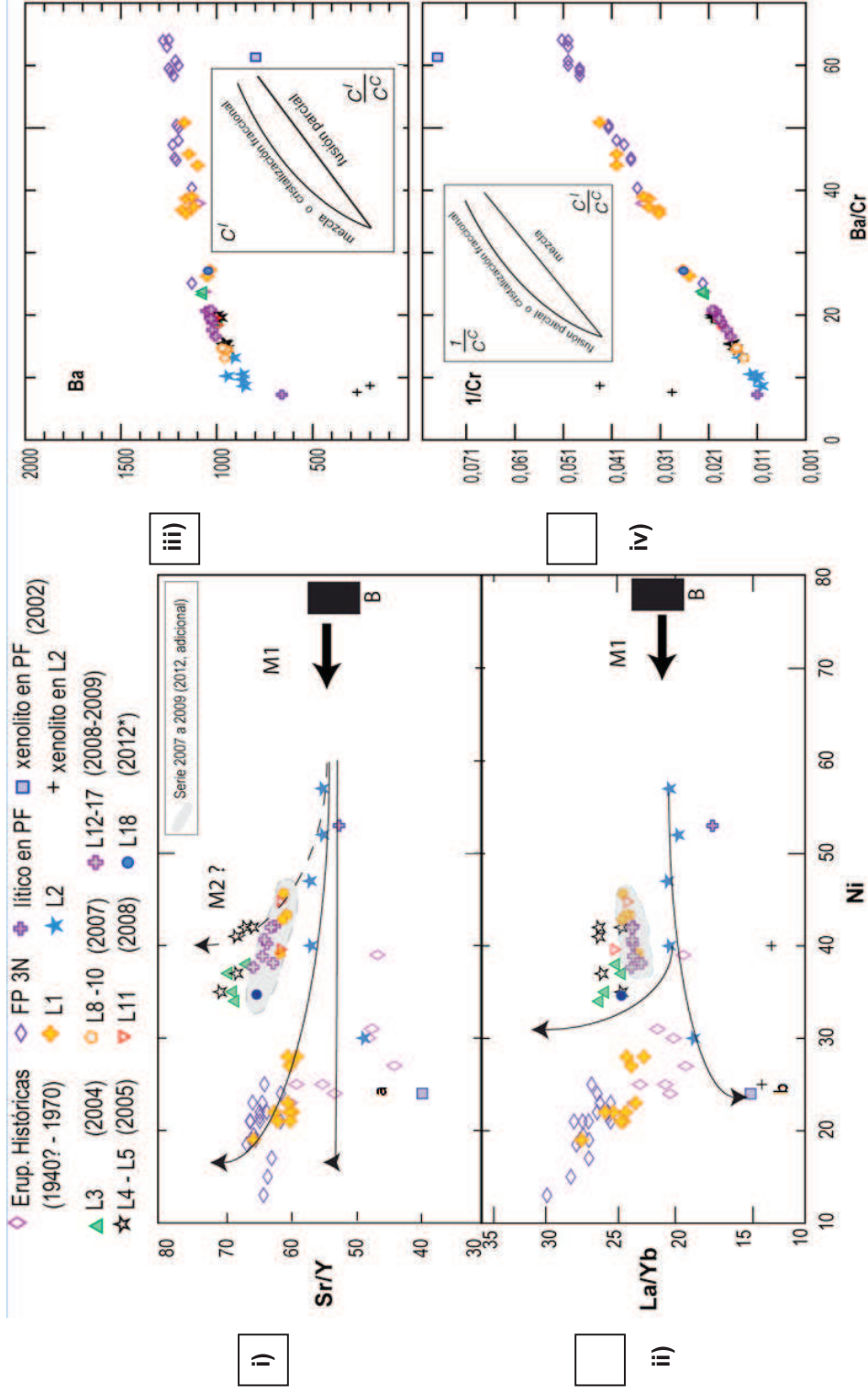


Figura 5. Modelos de cristalización fraccional para los magmas de El Reventador a través de los diagramas i) La/Yb y ii) Sr/Y vs. Ni. La zona sombreada corresponde a los datos obtenidos entre 2007 a 2012, usados en este estudio. (Modificado de Samaniego et al., 2008). Diagramas propuestos por Schiano et al., (2010) donde los diagramas iii) Cl vs. Ci/Cc y iv) 1/Cr vs. Ci/Cc, muestran curvas con las tendencias principalmente correspondientes a los procesos de mezcla y cristalización fraccional. Los gráficos están detallados en el Capítulo 4.

El enfoque de este trabajo al caracterizar los diferentes flujos de lava que han sido emitidos por el volcán, tanto a nivel cronológico mediante el uso de algunos datos de monitoreo volcánico y a nivel de sus características petro-geoquímicas.

La petrografía, no muestra importantes cambios en la composición mineralógica. Prima la asociación mineral de plagioclasa + clinopiroxeno + ortopiroxeno + anfíbol + escaso olivino + óxidos tipo magnetita.

Se debe destacar la ausencia casi total de anfíbol hacia las últimas etapas eruptivas y el incremento en el contenido de cristales de clinopiroxeno. Por lo tanto, esta puede ser la evidencia de un cambio de condiciones de estabilidad original en la que se formaron los minerales ((McPhie et al., 1993; Alpaslan & Temel, 2000; Vernon, 2004; Buckley et al., 2006; Chiaradia et al., 2011).

Los diagramas Harker identificaron una misma tendencia para la evolución de los óxidos mayores y elementos en traza, pero con dos series correspondientes a los productos emitidos en 2002 y en 2007. Sin embargo, al relacionar las características mineralógicas y la actividad superficial observada en el volcán a través del monitoreo volcánico, se destacan episodios de fuerte desgasificación (olor a azufre en las cercanías del volcán), durante los episodios de 2002, 2005, 2008 y 2009. Esto podría corresponder a una fuerte evidencia de entrada de magma (Wallace & Anderson, 2000; Vernon, 2004). Para estos mismos episodios, se registraron señales de tremor amónico a distancias superiores a ~100 km (Ramón, 2007; Ramón, 2008), lo cual sugiere una fuente profunda de actividad volcánica (Power et al., 2006; Zobin et al., 2008). Además, la actividad superficial presentó columnas eruptivas de ~17 km de altura en 2002 (Hall et al., 2004) y de hasta ~6 km en 2008 (Bustillos & Ramón, 2008).

Al referirnos al aspecto relacionado con el monitoreo volcánico, es oportuno destacar un cambio que se produce con respecto a la ocurrencia de eventos sísmicos. Para tres de las cuatro etapas eruptivas propuestas (2004-2005, 2007 y 2008-2009) y que contaron con monitoreo volcánico, se observa una diferencia respecto a la secuencia de eventos sísmicos reconocidos en el volcán: 1) VT, 2) HB, 3) LP y 4) Tremores armónico y espasmódico, para las etapas 2007 y 2008-9; sin embargo, hacia el final del año 2009: la disminución de la ocurrencia de

eventos asociados a un mecanismo de fractura (disminución de eventos tipo VT) y a los mecanismos compuestos representados por eventos de tipo HB. Esto además muestra un drástico incremento de los eventos asociados al mecanismo de movilización de fluidos (eventos LP y tremores). A su vez, coincidente con el incremento drástico del carácter explosivo (gran número de explosiones) que se registran al final de la emisión de flujos de lava. Por lo tanto, como lo manifiesta Walker (1973) y (Harris & Rowland, 2009), con un material más viscoso, se pueden generar una mayor formación de lóbulos como aparentemente se observa en la Lava 17 y que estuvo acompañada del mayor incremento de eventos explosivos, y que representaría un cambio importante respecto al comportamiento eruptivo observado a partir de 2010. Sin embargo, la actividad explosiva ha estado presente durante la parte final de las etapas eruptivas, subsecuentemente a la salida de los flujos de lava.

Para continuar refiriéndonos a los valores registrados respecto a la tasa media de emisión (TME), calculada para los flujos de lava del volcán El Reventador, (Figura 3.76) y comparada por el trabajo de Walker (1973). Entonces 15 de los 17 flujos de lava, están dentro de los rangos definidos en sus campos; y adicionalmente con esto, es evidente una relación que muestran una tendencia proporcional entre la tasa media de emisión, el valor del volumen de las lavas y en la distancia que alcanzan los flujos de lava.

Considerando además, una clasificación respecto al el carácter efusivo que presentan varios centros volcánicos (emisiones fisurales, desde el cráter, entre otras), el el emplazamiento múltiple de flujos de lava, se considera como un denominado campo de lavas. Pese a la gran diferencia entre el comportamiento de volcanes como el Monte Etna y el volcán El Reventador, se puede considerar al volcán ecuatoriano, como una potencial campo de lavas, pero con evidentes diferencias de las dimensiones generales de la actividad efusiva en el volcán El Reventador.

A nivel microscópico, la presencia de cristales de plagioclasa y piroxenos a modo de aglomerados, es una característica frecuente durante el proceso de cristalización fraccional (Vernon, 2004; Philpotts & Ague, 2009), esto ha sido algo recurrente según lo identificado en el volcán El Reventador.

Otras características microscópicas lo constituye la presencia de evidencias de desequilibrio observada en varios minerales (McPhie et al., 1993; Alpaslan & Temel, 2000). Entre las principales se destacan las coronas de reacción en plagioclasas y en anfíboles.

Las plagioclasas presentan un aspecto pulverulento (“dusty”) (Seaman, 2000; Vernon, 2004; Punin et al., 2009); mientras que para los anfíboles, se observan bordes de reacción alrededor de los cristales (Buckley et. al., 2006; Chiaradia et al., 2009). Los clinopiroxenos y las plagioclasas en cambio, presentan maclas múltiples (Punin et al., 2009). Por lo tanto, según lo manifiestan varios trabajos como Buckley et. al., 2006; Chiaradia et al., 2009 y Punin et al., 2009), todas estas características corresponden a evidenciar una posible interacción de un magma con otro más básico, o al menos de temperatura mayor. La presencia de cumulos dioríticos a modo de xenolitos, permite considerar la participación o estancia en la cámara magmática (Philppotts & Ague, 2009) o en el conducto magmático (Chiaradia et al., 2009, Costa et al., 2012) durante el proceso de ascenso de los flujos, aunque esta evidencia, únicamente, se tiene para los flujos de lava emitidos en 2002. Sin embargo, no se puede descartar la posibilidad de que el magma inyectado entre 2007 a 2009, haya ocurrido a niveles profundos, posiblemente, desde la cámara magmática.

Los períodos de actividad no eruptiva, pueden considerarse como las etapas de tiempo en la que los magmas permanecen en condiciones de equilibrio en la cámara magmática (Zobin et al., 2008; Costa et al., 2012) o, a su vez, el sistema se recarga con nuevos magmas (Chiaradia et al., 2010), de modo que se produzcan interacciones con magmas más básicos en niveles más profundos (Streck et. al., 2002).

CAPITULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Los datos obtenidos del monitoreo volcánico en este trabajo, han sido realmente muy útiles. Han permitido realizar las siguientes acciones:

- La descripción cronológica del proceso eruptivo relacionado con la emisión de los flujos de lava que han sido emitidos por el volcán El Reventador, durante el período 2002-2009. A pesar de no conocer la localización de los eventos sísmicos, las estadísticas de sismicidad en el volcán y los reportes de monitoreo volcánico permanente, evidencian fuertes episodios eruptivos en 2002, 2004, 2005, 2007, 2008 y 2009.
- Luego de la erupción del volcán el Reventador en noviembre de 2002, se determina que el carácter eruptivo predominante, ha sido la actividad Stromboliana, durante la cual han ocurrido al menos 14 episodios efusivos hasta 2009.
- Se obtuvieron rangos de actividad efusiva que va desde los 3 hasta 11 días, teniendo mayor duración los primeros flujos de lava que eran emitidos hacia el inicio de la actividad efusiva.
- Se identificaron cuatro etapas eruptivas: 2002, 2004-2005, 2007 y 2008-2009, se caracterizan por los siguientes factores: 1) el incremento de actividad sísmica 2) la presencia de manifestaciones superficiales; 3) la generación de flujos de lava con volúmenes, tasas medias de emisión y alcances máximos al inicio del proceso, que a medida que continúa el proceso eruptivo, va disminuyendo; 4) la ocurrencia de episodios explosivos durante la emisión de los flujos de lava, que se incrementan especialmente hacia el final de la erupción.
- El mecanismo asociado a la producción de estos eventos eruptivos, aparentemente ha sido común y recurrente en el volcán, de modo que las manifestaciones superficiales observadas en el volcán y que han reportado emisiones con olor a azufre, pueden sugerir inyecciones o pulsos de

magma (tal vez profundo), como se ha observado para los episodios 2002, 2005, 2007, 2008 y 2009.

Los valores de la tasa media de emisión (TME), van desde valores altos ($\sim 33,77 \text{ m}^3/\text{s}$) hasta bajos ($\sim 0,21 \text{ m}^3/\text{s}$), pero que al ser comparados con los otros valores en volcanes similares, únicamente se puede observar un comportamiento de altas tasas y grandes distancias, con grandes volúmenes de material lávico, lo cual ocurre hacia el inicio de la actividad efusiva. La tasa media de emisión propuesta para el volcán El Reventador, es de $\sim 8,7 \text{ m}^3/\text{s}$ para todo el proceso eruptivo de carácter efusivo entre 2002 a 2009.

El control de campo y los sensores remotos, son una muy buena manera de obtener resultados al momento de identificar rasgos topográficos y morfológicos sobre un área, sin embargo, la principal función de ellos en este caso, fue la delimitación de los flujos de lava de la superficie, ya que otro tipo de estudio con sensores remotos requiere una metodología completa.

La cartografía cubre un área aproximada de $\sim 3,6 \times 10^6 \text{ m}^2$ dentro de la caldera del volcán, y corresponden a un volumen total de material lávico emitido de aproximadamente $877 \times 10^6 \text{ m}^3$.

La composición mineralógica contiene $\text{Plg} + \text{Cpx} \pm \text{Opx} \pm \text{Anf} + \text{óx}$ con escaso Ol . Esta asociación se mantiene para todas las lavas durante todo el período eruptivo 2002 - 2009.

Las andesitas y andesitas basálticas del volcán El Reventador, muestran textura porfirítica. Adicionalmente al estudio petrográfico, los análisis geoquímicos, evidencian la ocurrencia de cristalización fraccional y mezcla de magmas, manteniéndose lo propuesto en el trabajo de Samaniego et al., (2008). En este trabajo, al considerar los análisis geoquímicos a lo largo de 2002 hasta 2012, se establecen dos series magmáticas: 1) a partir de 2002 hasta 2005 y 2) otra entre 2007 y 2009, y que aparentemente, continúa hasta 2012. La Serie Magmática 2002, muestra un gran desarrollo de los cristales de plagioclasa, clinopiroxenos alrededor de cristales de anfíbol; en tanto que para la Serie Magmática 2007, se destaca el desarrollo en el tamaño y en la cantidad de fenocristales de clinopiroxeno respecto a las lavas anteriores

Las herramientas satelitales usadas para el monitoreo volcánico, como el algoritmo de Modis, MODVOLC, presenta un muy buen nivel de resolución (hasta 0.1x0.1 km por pixel) sobre la superficie del volcán, considerándose una de las herramientas satelitales más confiables para el monitoreo, considerando las condiciones de difícil acceso a la zona.

Las emisiones de SO₂ detectadas por OMI, suelen ser mostradas casi en tiempo real, aunque la escala en la que se presentan los datos (1:1000000) y únicamente permite percibir emisiones con altas tasas de emisión e intensa concentración de gases. Pese a ello, los datos permiten tener un registro de la evolución del monitoreo de SO₂ a nivel regional (área de Ecuador – Colombia. Similares condiciones se observan para el caso de las emisiones de ceniza que puedan ser identificadas por VAAC, pues se reconocen columnas de emisión cuando la altura es superior a 1 km y/o su carga de ceniza es moderada a alta. Sin embargo, se debe destacar que el factor climático es predominante en la efectividad de este tipo de imágenes.

5.2 RECOMENDACIONES

- ❖ Continuar con el mapeo de los flujos de lava que se han producido desde 2012 hasta la fecha, de modo que se pueda tener un completo estudio de la actividad eruptiva del volcán El Reventador. Esto, con el fin de mejorar el conocimiento geológico y vulcanológico uno de los volcanes más activos del país.
- ❖ Se recomienda también, realizar análisis de micro sonda electrónica para los flujos de lava emitidos a partir de 2007, de modo que se pueda establecer con mayor detalle las características de los procesos petrogenéticos de los magmas del volcán El Reventador.
- ❖ Es conveniente establecer un sistema de monitoreo que cuente con redes instrumentales dispuestas estratégicamente que incluya: estaciones sísmicas de distribución adecuada que permite realizar las localizaciones de los

eventos sísmicos propios del volcán; medidores permanentes de emisiones de SO₂; redes de GPS e inclinómetros de modo que se pueda evaluar oportunamente la deformación del volcán; y finalmente, el control térmico pertinente.

- ❖ Los sistemas de monitoreo dan buenos resultados, y con la atención adecuada, permitirán mejorar la respuesta durante la evolución y evaluación de la actividad eruptiva, como se ha visto en varios volcanes a nivel mundial, como es el caso de los volcanes Colima, Merapi, Etna, Agustín, Arenal, Lascar, Redoubt, Soufrière Hills, St. Helens, Tungurahua, entre otros. Esto, considerando que en las cercanías del volcán se encuentran varios proyectos e infraestructura de suma importancia socio-económica, como lo son el Sistema del Oleoducto Transcuatoriano (SOTE), Oleoducto de Crudos Pesados (OCP), Poliductos, Sistema vial Baeza-Lago Agrío como una de las principales entradas para el turismo de la región amazónica y el Proyecto hidroeléctrico Coca Codo Sinclair.

- ❖ La actividad multidisciplinaria que se pueda llevar a cabo en el volcán El Reventador, permitirán mejorar los niveles de comprensión de los fenómenos volcánicos y su dinamismo eruptivo.

CAPITULO 7

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adams, N., Houghton, B., Fagents, S., & Hildreth, W. (2006). The transition from explosive to effusive eruptive regime: The example of the 1912 Novarupta eruption, Alaska. *Geological Society of America Bulletin*. Vol. 118 No. 5-6 , 620-634.

Alpaslan, M., & Temel, A. (2000). Petrographic and Geochemical Evidence for Magma Mixing and Crustal Contamination in the Post-Collisional Calc-Alkaline Yozgat Volcanics, Central Anatolia, Turkey. *internatinal GEology Review*, Vol. 42 Iss. 9 , 850-863.

Alvarado, A. (2012). Néotectonique et cinématique de la déformation continentale en Equateur. *Néotectonique et cinématique de la déformation continentale en Equateur* . Université de Grenoble, 259 p., Grenoble, Francia: Université de Grenoble, 259 p.

Alvarado, A. (2012). *Néotectonique et cinématique de la déformation continentale en Equateur. Néotectonique et cinématique de la déformation continentale en Equateur*. Grenoble, Francia: Université de Grenoble.

Arellano, S., Hall, M., Samaniego, P., Le Pennec, J. L., Ruiz, A., Molina, I., et al. (2008). Degassing patterns of Tungurahua volcano (Ecuador) during the 1999–2006 eruptive period, inferred from remote spectroscopic measurements of SO₂ emissions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* , 1-12.

Baby, P., Rivadeneira, M., & Barragán, R. (2004). La Cuenca Oriente: Geología y Petróleo. "Travaux de 'Institu t Fruncaís d'Études Andines" Tomo 144 , (ISSN 0768-424X).

Barragán, R., Baby, P., & Duncan, R. (2005). Cretaceous alkaline intra-plate magmatism in the Ecuadorian. *Earth and Planetary Science Letters* 236 , 670–690.

Barragán, R., Baby, P., & Duncan, R. (2005). Cretaceous alkaline intra-plate magmatism in the Ecuadorian Oriente Basin: Geochemical, geochronological and tectonic evidence. *Earth and Planetary Science Letters* 236 , 670–690.

Barragán, R., Geist, D., Hall, M., Larson, P., & Kurz, M. (1998). Subduction controls on the compositions of lavas from the Ecuadorian Andes. *Earth and Planetary Science Letters* 154 , 153-166.

Baumann, P. (2008). *HISTORY OF REMOTE SENSING, SATELLITE IMAGERY*. Retrieved 01 08, 2013, from <http://www.oneonta.edu/faculty/baumanpr/geosat2/RS%20History%20II/RS-History-Part-2.html>

Bonaccorso, A., Calvari, S., Garfi, G., Lodato, L., & Patane, D. (2003). Dynamics of the December 2002 flank failure and tsunami at Stromboli volcano inferred by volcanological y geophysical observations. *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, VOL. 30 , 1-4.

Bourquin, J. (n.d.). Mapa de amenaza volcánica de El Reventador. Marco de cooperación IG-EPN – IRD – CERG. Escala 1 :50000. 2011 . Quito, Pichincha, Ecuador: IG-EPN – IRD – CERG.

Buckley, Sparks, & Wood. (2006). Hornblende dehydration reactions during magma ascent at Soufrière Hills Volcano, Montserrat. *Springer-Verlag Contrib Mineral Petrol* 151 , 121–140.

Bustillos, J. (2008). *Distribución de ceniza entre julio y agosto de 2008*. Quito: IG EPN.

Calvari, S., Spampinato, L., Lodato, L., Harris, A., Patrick, M., Dehn, J., et al. (2005). Chronology and complex volcanic processes during. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 110* , 1-23.

Carn, S. A., Krueger, A. J., Arellano, S., Krotkov, N. A., & Yang, K. (2008). Daily monitoring of Ecuadorian volcanic degassing from space. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 176 , 141–150.

Carn, S., & Prata, F. (2010). Satellite-based constrains on explosive SO₂ release from Soufrière Hills Volcano, Monserrat. *Geophysical Research Letters Vol. 37* , 15-19.

Carter, A., Girina, O., Ramsey, M., & Demyanchuk, Y. ((2008)). ASTER and field observations of the 24 December 2006 eruption of Bezimianny Volcano, Russia. *Remote Sensing of Environment* 112 , 2569–2577.

Chiaradia, M., Muntener, O., & Beate, B. (2011). Enriched Basaltic Andesites from Mid-crustal Fractional Crystallization, Recharge, and Assimilation (PilavoVolcano, Western Cordillera of Ecuador). *JOURNAL OF PETROLOGY Vol 52* , 1107-1141.

Coombs, M., Bull, K., Vallance, J., Schneider, D., Thoms, E., Wessels, R., et al. (2006). Timing, Distribution, and Volume of Proximal Products of the 2006 Eruption of Augustine Volcano. In J. Power, M. Coombs, & J. Freymueller, *The 2006 Eruption of Augustine Volcano, Alaska* (pp. 145-185). Alaska: U.S. Geological Survey Professional Paper 1769.

Costa, F., Andreastuti, S., & Maisonneuve, C. B. (2012). Petrological insights into the storage conditions, and magmatic processes that yielded the centennial 2010 Merapi explosive eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research (2013)* , doi: 10.1016/j.jvolgeores.2012.12.025.

Costa, F., Andreastuti, S., de Maisonneuve, C. B., & Pallister, J. (2013). Petrological insights into the storage conditions, and magmatic processes that yielded the centennial 2010 Merapi explosive eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research VOLGEO 5055* , doi: 10.1016/j.jvolgeores.2012.12.025.

De la Cruz, S. (2004). *Volcanes, Peligro y Riesgo volcánico en México*. México: CENAPRED.

Dehn, J., Dean, K., Engle, K., & Izbekov, P. (2002). Thermal precursors in satellite images of the 1999 eruption of Shishaldin Volcano. *Bull Volcanol* 64 , 525-534.

Delpit, S., Le Pennec, J.-L., 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.

DeRoin, N., & McNutt, S. (2011). Rockfalls at Augustine Volcano, Alaska: The influence of eruption precursors and seasonal factors on occurrence patterns 1997–2009. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 211–212 , 61–75.

Endo, E., Malone, S., Noson, L., & Weaver, C. (1981). locations, Magnitudes, and statistics of the March 20-May18 earthquake secuence. In L. Peter, & D. Mullineaux, *The 1980 Eruption of Mount St. Helens Washington* (pp. 1-837). Washington: Geological Survey Professional Paper 1250.

Fink, J., & Anderson, S. (2000). Lava Domes and Coulees. In H. Sigurdsson, *Encyclopedia of Volcanoes* (pp. 307-344). varias: ACADEMIC PRESS.

Flynn, L., Wright, R., Garbeil, H., Harris, A., & Pilger, E. (2002). A Global Thermal Alert System Using MODIS: Initial Results from 2000-2001. *Advances in Environmental Monitoring and Modelling* , 37-69.

Francis, P. (1993). *Volcanoes a Planetary Perspective*. Oxford: Clarendon.

Francis, P., & Oppenheimer, C. (2004). *VOLCANOES*. Cambridge: Oxford.

Gailler, A., Charvis, P., & Flueh, E. (2007). Segmentation of the Nazca and South American plates along the Ecuador subduction zone from wide angle seismic profiles. *Earth and Planetary Science Letters* 260 , 444–464.

Garcia, A., Kumagai, H., Samaniego, P., Mothes, P., Yepes, H., & Monzier, M. (2007). Seismic, petrologic, and geodetic analyses of the 1999 dome-forming eruption of Guagua Pichincha volcano, Ecuador. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* , in press.

Gil-Cruz, F. (1999). Observations of two special kinds of tremor at Galeras volcano, Colombia (1989-1991). *Annali di Geofisica Vol 42 N. 3* , 437-449.

Gill-Cruz, F. (1999). Observations of two special kinds of tremor at Galeras volcano, Colombia (1989-1991). *Annaldi di Geofisica, Vol. 42* , 437-449.

Gómez, D., Torres, R., Seidi, D., Hellweg, M., & Rademancher, H. (1999). Tornillo seismic events at Galeras volcano, Colombia: a summary and new information from broadband three-component measurments. *Annaldi di geofisica* , 365-378.

Gonnermann, H. M., & Manga, M. (2007). The Fluid Mechanics Inside a Volcano. *Annu. Rev. Fluid Mech*,39. Downloaded from arjournals.annualreviews.org , 321-356.

Gudmundson, A., Oskarsson, N., Gronvold, P., Seamudsson, K., Sigurdsson, O., Steffansson, R., et al. (1992). The 1991 eruption of Helka, Iceland. *Bull. Volcanol.* 54 , 238-246.

Guillier, B., & Chatelain, J.-L. (2006). Evidence for a seismic activity mainly constituted of hybrid events. *ELSEVIER Internal Geophysics* , 1-8.

Hall, M. (1977). El volcanismo en el Ecuador. *Biblioteca Ecuador* , 120.

Hall, M., & Beate, B. (1991). El volcanismo Plio - Cuaternario en los Andes del Ecuador. *Estudios de Geografía: Paisaje volcánico de la sierra ecuatoriana* , 5-17.

Hall, M., & Wood, C. (1985). Segmentación Volcano-Tectónica de los Andes Septentrionales. *Monografía ddde Geología 4. Vol. X* , 7-24.

Hall, M., Samaniego, P., Le Pennec, J. L., & Johnson, J. (2008). Ecuadorian Andes volcanism: A review of Late Pliocene to present activity. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 176 , 1-6.

Hall, M., Samaniego, P., Le Pennec, J. L., & Johnson, J. (2008). Ecuadorian Andes volcanism: A review of Late Pliocene to present activity. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 176 , 1-6.

Harris, A., & Rowland, S. K. (2009). Effusion rate controls on lava flow length and the role of heat loss: a review. In T. S. THORDARSON, *Studies in Volcanology: The Legacy of George Walker*. (pp. Special Publications of IAVCEI, 2, 33–51). London: Special Publications of IAVCEI, 2.

Harris, A., Dehn, J., & Calvari, S. (2007). Lava effusion rate definition and measurement: a review. *Springer - Verlag* , 1-22.

Hobden, B., Houghton, B., & Nairn, I. (2002). Growth of a young, frequently active composite cone: Ngauruhoe volcano, New Zealand. *Bull. Volcanol.* 64 , 392–409.

Houghton, B. F., Wilson, J. C., & Pyle, D. M. (2000). Pyroclastic Fall Deposits. In H. Sigurdsson, *Volcanoes* (pp. 555-569). varias: Academic Press.

Ibañez, J., & Carmona, E. (2009). Sismicidad Volcánica. In M. Astiz, & M. García, *Curso Internacional de Volcanología y Geofísica Volcánica* (pp. 269-282). Canarias: Excmo. Cabildo Insular de Lanzarote.

INHAMI. (2012). Quito, Napo.

INSTITUTO ECUATORIANO DE ELECTRIFICACIÓN . (1988). *ESTUDIO VULCANOLÓGICO DE "EL REVENTADOR"*. Quito: INECEL.

Jaillard, E., Guillier, B., Bonnardot, M.-A., & Hassani, R. (2005). Orogenic buildup of the Ecuadorian Andes. In Varios, *6th International Symposium on Andean Geodynamics (ISAG), Extended Abstracts*, (pp. 404-407.). Barcelona: España.

Kellogg, J., & Vega, V. (1995). Tectonic development of Panama, Costa Rica, and the Colombian Andes: Constraints from global positioning system geodetic studies and gravity. *Geological Society of America, special paper 295*, 75-90. , 75-90. .

Kumagai, H., Maiyakawa, K., Negishi, H., Inoue, H., Obara, K., & Suetsugu, D. (2003). Magmatic dike resonances inferred from very-long period seismic signals. *ScienceReprint* , 2058-2061.

Kumagai, K., & Chouet, B. (2000). Acoustic properties of crack containing magmatic or hydrothermal fluids. *Journal of Geophysical*, 25 , 493-512.

Lahr, J., Chouet, B., Stephens, J., Power, J., & Page, R. (1994). Earthquake classification, location, and error analysis in a volcanic environment: implications for the magmatic system of 1989-1990 eruptions at Redoubt Volcano, Alaska. *Journal of volcanology and Geothermal Reserch* 62 , 137-151.

- Lillesand, T., Kiefer, R., & Chipman, J. (2007). *Remote Sensing and Image Interpretation*. Madison: Wiley.
- Litherland, M., Aspend, J., & Jemielita, R. (1994). *The metamorphic belt of Ecuador*. England: Overseas Memoir of British Geological Survey No. 11.
- Llambías, E. (2001). *Geología de los cuerpos ígneos*. La Plata: Instituto Superior de Correlación Geológica.
- Loughlin, S., Luckett, R., Ryan, G., Christopher, T., Hards, V., & De Anegelis, S. (2010). AN overview of lava dome evolution, dome collapse and cyclicity at Soufriere Hills Volcano, Montserrat, 2005-2007. *Geophysical Research Letters*. Vol. 37 , 25-30.
- Lyons, J., Waite, G., Rose, W., & Chigna, G. (2009). Patterns in open vent, strombolian behavior at Fuego volcano, Guatemala, 2005–2007. *Bulletin of Volcanology* , 1-15.
- Malavassi, M. J. (2002). The role of basalt replenishment in the generation of basaltic andesites of the ongoing activity at Arenal volcano, Costa Rica: evidence from clinopyroxene and spinel. *Bulletin Volcanology* 64: , 316–327.
- Marti, J., Legros, F., & Colombo, F. (2009). Volcanismo Explosivo. In M. Astiz, & A. García, *Curso Internacional de Volcanología y Geofísica Volcánica* (pp. 73-89). Las Canarias: Excmo Cabildo Insular de Lanzarote.
- Mathews, S. J., Ganderweg, M. C., & Sparks, R. S. (1997). *Bulletin Volcanology* 59 , 72-82.
- McNutt, R. (2005). VOLCANIC SEISMOLOGY. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* , 1-34.
- McNutt, S. (1986). Observations and analysis of B-type earthquakes, explosions, and volcanic tremor at Pavlof volcano, Alaska. *Bulletin of Seismological Society of America* Vol 76 , 153-175.
- McNutt, S. (2002). Volcano Seismology and Monitoring for Eruptions. 383-406.
- McPhie, J., Doyle, M., & Allen, R. (1993). *Volcanic Textures A guide to the interpretation of textures in volcanic rocks*. Tasmania: CODES University of Tasmania.
- Morales, A. M. (2011). *COMPARISONS BETWEEN OMI SO2 DATA AND GROUND-BASED SO2*. Michigan: Michigan Technological University.
- Moran, S., Malone, S., Qamar, A., Thelen, W., & Wright, A. (2008). Seismicity Associated with Renewed Dome Building at Mount St. Helens, 2004–2005. In D. Sherrod, & W. Scott, *A Volcano Rekindled: The Renewed Eruption of* (pp. 27-60). Virginia: U.S. Geological Survey Professional Paper 1750.
- Moran, S., Malone, S., Qamar, A., Thelen, W., Wright, A., & Caplan-Auerbach, J. (2008). Seismicity Associated with Renewed Dome Building at Mount St. Helens, 2004–2005. In D. Sherrod, S. William, & P. Stauffer, *A Volcano Rekindled: The Renewed Eruption of Mount St. Helens, 2004–2006* (pp. 27-60). U.S.A.: U.S. Geological Survey Professional Paper 1750,.

Moran, S., McChesney, P., & Lockhart, A. (2008). Seismicity and Infrasound associated with explosions at Mount St. Helens, 2004-2005. *A Volcano Rekindled: The Renewed Eruption of Mount St. Helens, 2004–2006*, 111-127.

Moreno, H., & Gardeweg, M. G. (1989). Retrieved from Mayo 14, 2013, from <http://www.rgeologica.equipu.cl/index.php/revista1/article/viewFile/2358/pdf>

Moreno, H., & Gardeweg, M. (n.d.). LA ERUPCION RECIENTE EN EL COMPLEJO VOLCANICO LONQUIMAY (DICIEMBRE 1988-), ANDES DEL SUR. 93-117.

Nocquet, J.-M., Mothes, P., Chlieh, M., Jarrin, P., ValleE, M., Ruiz, G., et al. (2010). New GPS velocity field in the northern Andes (Ecuador - Colombia) : partial locking along the subduction and northeastward escape of the Northern Andean Block. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 12, 9531.

NotiSar. (2013, 06 25). <http://www.rescate.com>. Retrieved from NotiSar: <http://ar.groups.yahoo.com/group/NotiSar/message/1016>

ONU MUJERES. (n.d.). Retrieved 05 23, 2013, from <http://www.endvawnow.org/es/articles/330-cual-es-el-monitoreo-y-la-evaluacion.html>

Ortiz, R. (2009). Introducción de la física de la lavas. In M. Astiz, & A. García, *Curso Internacional de Volcanología y Geofísica Volcánica* (pp. 61-72). Canarias: Excmo. Cabildo Insular de Lanzarote.

Paz y Miño, L. T. (1931). La exploración al Reventador,. *Boletín*.

Philppotts, A., & Ague, J. (2009). *Principles of Igneous and Metamorphic Petrology*. Cambridge: Cambridge University Press.

Power, J. A., Nye, M. L., Coombs, R. L., Wessels, R. L., Cervelli, P. F., Dhen, J., et al. (2006). The reawakening of Alakas's Augustine Volcano. *EOS - Vol. 87*, 1-3.

Power, J., & Lalla, D. (2006). Seismic Observations of Augustine Volcano, 1970–2007. In J. Power, M. Coombs, & J. Freymueller, *The 2006 Eruption of Augustine Volcano, Alaska* (pp. 3-40). Alaska: U.S. Geological Survey Professional Paper 1769.

Power, J., Lahr, J., Page, R., Chouet, B., Stephens, C., Harlow, D., et al. (1993). Sismic evolution of 1989-1990 eruption sequence of Redoubt Volcano, Alaska. *ELSEVIER*, 69-94.

Price, R., Gamble, J. A., Smith, I. E., Maas, R., Waight, T., Stewart, R., et al. (2012). The Anatomy of an AndesiteVolcano: a Time^Stratigraphic Study of Andesite Petrogenesis and Crustal Evolution at RuapehuVolcano, New Zealand. *JOURNAL OF PETROLOGY Vol. 53 N°.10*, 2139-2189.

Punin, Y., Shtukenberg, A., Smetannikova, O., & Amelin, S. (2009). Plagioclase twin associations from the basic volcanic rocks of the Kamchatka, Russia: growth conditions and formation mechanisms. *Eur. J. Mineral*, 139–145.

Ramón, P. (2009c). *ACTIVIDAD DEL VOLCÁN REVENTADOR . 14 OCTUBRE 2009*. Quito: IG.

Ramón, P. (2009d). *Actividad del volcán Reventador. Observaciones aéreas efectuadas el 31 de Octubre de 2009*. Quito.

Ramón, P. (2008). *Actividad eruptiva del volcán Reventador de julio y agosto de 2008*. Quito: IG EPN.

Ramón, P. (2008b). *INFORME ESPECIAL VOLCÁN REVENTADOR- 11 agosto de 2008*. Quito: IG EPN.

Ramón, P., & Bustillos, J. (2008). *RESUMEN DE LAS OBSERVACIONES EFECTUADAS DURANTE EL SOBREVUELO DEL DÍA 28 DE AGOSTO 2008*. Quito: IG EPN.

Ramón, P., & Vallejo, S. (2011). La actividad del volcán Reventador posterior a la gran erupción de noviembre de 2002. *Séptimas Jornadas de Ciencias de la Tierra*. Quito: EPN.

Ramón, P., & Vallejo, S. (2009). *MONITOREO TERMICO DE LOS VOLCANES DEL ECUADOR CONTINENTAL Y DE LAS ISLAS GALAPAGOS: AÑO 2008*. Quito: IG EPN.

Ramón, P., Samaniego, P., García, A., LePennec, J., Mothes, P., Hall, M., et al. (2002). *NUEVA ACTIVIDAD EN EL VOLCAN REVENTADOR. 3 DE NOVIEMBRE DE 2002. INFORME TECNICO PRELIMINAR DEL INICIO DE LA ERUPCION*. INSTITUTO GEOFISICO. Quito: IG-EPN.

Ramón, P., Troncoso, L., & Ruíz, M. (2009b). *INFORME ESPECIAL No.4 VOLCAN REVENTADOR 15 de Octubre 2009*. Quito: IG EPN.

Ramón, P., Vallejo, S., Arellano, S., & Bustillos, J. (2008a). *MONITOREO TERMICO DE LOS VOLCANES DEL ECUADOR CONTINENTAL Y DE LAS ISLAS GALAPAGOS: AÑO 2007*. Quito: IG EPN.

Ramón, P., Yepes, H., & Christensen, B. (2007). *INFORME ESPECIAL VOLCAN REVENTADOR 24 de Abril de 2007*. Quito: IG EPN.

Ramón, P., Yepes, H., Bustillos, J., & S., V. (2009a). *INFORME ESPECIAL No. 3 VOLCÁN REVENTADOR 11 agosto de 2009*. Quito: IG.

Rivero, D. (2006). *Estudio de anomalías térmicas en el volcán Cotopaxi en el período 2002-2005*. Quito: EPN Tesis para obtención del título de ingeniero geólogo.

Rivero, D., & Ramón, P. (2005). *MONITOREO TERMICO DE LOS VOLCANES DEL ECUADOR AÑO 2005*. Quito: IG EPN.

Rollinson, H. (1993). *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*. England: Pearson Prentice Hall.

Rosi, M., Papale, P., Lupi, L., & Stoppato, M. (2004). *Volcanoes*. Spain: Firefly Book.

Rymer, H. (2000). Eruption. In H. Sigurdsson, *Volcanoes* (pp. 246-247). Varis: Academic Press.

Samaniego, P., Eissen, J.-P., Jean-Luc, L. P., Robin, C., Hall, M., Mothes, P., et al. (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* , 82–93.

Saunders, K., Blundy, J., Dohmen, R., & Cashman, K. (2012). Linking Petrology and Seismology at an Active Volcano. *SCIENCE VOL. 336* , 1023-1027.

Schiano, P., Monzier, M., Eissen, J.-P., Martin, H., & Koga, K. T. (2010). Simple mixing as the major control of the evolution of volcanic suites in the Ecuadorian Andes. *Contrib Mineral Petrol vol. 160* , 297–312.

Scott, W., Sherrod, D., & Gardner, C. (2008). Overview of the 2004 to 2006, and Continuing, Eruption of Mount St. Helens, Washington. In D. Sherrod, W. Scott, & P. Stauffer, *A Volcano Rekindled: The Renewed Eruption of Mount St. Helens, 2004–2006* (pp. 3-23). California: U.S. Geological Survey Professional Paper 1750.

Sean. (2005). *Reventador's Ongoing Activity (Septembe 21, 2005) (A Transition from Predominantly Effusive to Predominantly Explosive Activity)*. Quito: IG.

Shaw, D. (2007). *Trace Elements in Magmas A theoretical Treatment*. Cambridge: Cambridge University Press.

Sigurdsson, H., Houghton, B., McNutt, S., Rymer, H., & Stix, J. (2000). *Enciclopedy of Volcanoes*. San Diego: ACADEMIC PRESS.

Simkin, T., & Siebert, L. (1994). *Volcanoes of the Word. Second Edition*. Washington D.C.: Geoscience Press & Smithsonian Institution.

Smith, R., Kilburn, C., & Sammonds, P. (2007). *Bulletin of Volcanology* 69 , 681-694.

Soulas, J.-P., Egüez, A., Yepes, H., & Pérez, H. (1991). Tectónica activa y riesgo sísmico en los Andes Ecuatorianos y el extremo sur de Colombia. *Bol. Geol. Ecuat., vol. 2, 1, , 3-11*.

Spampinato, L., Calvari, S., Oppenheimer, C., & Boschi, E. (2011). Volcano surveillance using iffrared cameras. *Earth - Science Reviews* 106 , 63–91.

Spikings, R., Crowhurst, P., Winkler, W., & Villagomez, D. (2010). Syn and post-accrecionary cooling history of the Ecuadorian Andes constrained by their in-situ and detrital thermochronometric record. *Journal of South American Earth Sciences* 30 , 121-133.

Stern, C. (2004, 12 31). Active Andean volcanism: its geologic and tectonic setting. *Andean Geology, vol. 31, núm. 2* , 161-206.

Tibaldi, A., & Ferrari, L. (1992). From latest miocene thrusting to quaternary transpression and transtension in the interandean valley, Ecuador. *J. Geodynamics* Vol. 15 , 59-83.

Tibaldi, A., Rovida, A., & Corazzato, C. (2007). Late Quaternary kinematics, slip-rate and segmentation of a major Cordillera-parallel transcurrent fault: The Cayambe-Afiladores-Sibundoy system, NW South America. *Journal of Structural Geology* xx , 1-17.

- Trenkamp, R., Kellogg, J., Freymueller, J., & Mora, H. (2002). Wide plate margin deformation, southern Central America and northwestern South America, CASA GPS observations. *Journal of South American Earth Sciences* 15 , 157-171.
- Troncoso, L. (2004). *Análisis de la actividad sísmica anómala del volcán Cotopaxi y su vínculo con la sismicidad de la zona de Pastocalle. Período 2001-2002*. Quito.
- Troncoso, L., Barba, D., & Rivero, D. (2005). *INFORME ESPECIAL No. 5 - VOLCÁN REVENTADOR jueves 25 de mayo de 2005*. Quito.
- Troncoso, L., Jhonson, J., Ruiz, G., Andrade, D., Barba, D., Ramón, P., et al. (2006). Evolution of the seismic activity of El Reventador volcano during its current eruptive phase (2004-2005). *Fourth Conferences Cities on Volcanoes IAVCEI* , 112-113.
- Troncoso, L., Lema, V., & Arellano, S. (2006). *INFORME DE LA ACTIVIDAD DEL VOLCAN EL REVENTADOR DURANTE EL AÑO 2006*. Quito.
- Troncoso, L., Lema, V., & Arellano, S. (2006). *INFORME DE LA ACTIVIDAD DEL VOLCAN EL REVENTADOR DURANTE EL AÑO 2006*. Quito: IG EPN.
- Troncoso, L., Ramón, P., & Vaca, S. (2009a). *INFORME ESPECIAL No.2 VOLCAN EL REVENTADOR 23 de abril de 2009*. Quito: IG.
- Troncoso, L., Ruiz, M., & Ramón, p. (2009). *INFORME ESPECIAL No.5 VOLCAN REVENTADOR 16 de Octubre de 2009*. Quito: IG.
- Troncoso, L., Ruíz, M., & Ramón, P. (2009b). *INFORME ESPECIAL No.5 VOLCAN REVENTADOR 16 de Octubre de 2009*. Quito.
- Troncoso, L., Vallejo, S., & Yepes, H. (2009c). *INFORME ESPECIAL No.7 VOLCAN REVENTADOR 23 de Octubre de 2009*. Quito.
- Valentine, G., & Ficher, R. (2000). Pyroclastic Surges and Blasts. In H. Sigurdsson, B. Houghton, S. McNutt, H. Rymer, & J. Stix, *Volcanoes* (pp. 571-580). Varías: Academic Press.
- Vallejo, S. (2009). *IDENTIFICACIÓN DE LÍMITES DE FLUJOS DE LAVA EN EL VOLCÁN REVENTADOR EN BASE A IMÁGENES TÉRMICAS DESDE EL 2002*. Quito: IG EPN.
- Vallejo, S., & Ramón, P. (2011). Evolución del cono de escoria y domo al interior del cráter del volcán Reventador 2010-2011. *7mas Jornadas de Ciencias de la Tierra y I Encuentro sobre Riesgos y Desastres* , 179-182.
- Vallejo, S., Bourquin, J., & Ramón, P. (2009). Quito: IG.
- Vera, R. (2013). *Geology of Ecuador*. Quito: Iberia.
- Vernon, R. (2004). Microstructures of igneous rocks. In R. Vernon, *A practical guide to Rock Microstructure* (pp. 43-165). Cambridge: Cambridge University Press.
- Walker, G. (1973). Lengths of lava flows. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*. 274 , 107-118.
- Wallace, P., & Anderson, A. (2000). Volatiles in Magmas. In H. Sigurdsson, *Encyclopedia of Volcanoes* (pp. 149-170). VArías: Academic Press.

Wassermann, J. (2011, Agosto). Volcano Seismology. Fürstentfeldbruck, Germany.

Watts, R., Herd, R., Sparks, S., & Young, S. (2012). Growth patterns and emplacement of the andesitic lava dome at Soufrière Hills Volcano, Montserrat. *Geological Society, London, Memoirs* , p115-152.

White, R., Miller, A., Lynch, L., & Power, J. (1998). Observations of hybrid seismic events at Soufrière Hills volcano, Montserrat: July 1995 to September 1996. *Geophysical Research Letters*, Vol. 25 , 3657-3660.

Wright, R., Flynn, L., Garbeil, H., Harris, A., & Pilger, E. (2004). MODVOLC: near-real-time thermal monitoring of global volcanism. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* , 1-21.

Wright, R., Flynn, L., Garbeil, H., Harris, A., & Pilger, E. (2004). MODVOLC: near-real-time thermal monitoring of global volcanism. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 135 , 29– 49.

Zobin, V., Varley, N., González, M., Orozco, J., Reyes, G., Navarro, C., et al. (2008). Monitoring the 2004 andesitic block-lava extrusion at Volcán de Colima, México from seismic activity and SO₂ emission. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 177 , 367–377.

Portales web de las herramientas de monitoreo satelital:

Aster Volcano Archive (AVA):

<http://ava.jpl.nasa.gov/ava.asp>

HOT SPOTS-HAWAII:

<http://modis.higp.hawaii.edu/cgi-bin/modis/modisnew.cgi>.

MODVOLC:

<http://modis.higp.hawaii.edu/>

NASA:

www.nasa.gov

Volcano Ash Advisory Center (VAAC):

<http://www.ssd.noaa.gov/VAAC/ARCH02/archive.html>.

Sulfur Dioxide Monitoring Home Page (OMI):

<http://so2.gsfc.nasa.gov/>

**MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE LOS FLUJOS DE LAVA DEL
VOLCÁN EL REVENTADOR EMITIDOS ENTRE 2002 A
2009**

ANEXOS

Anexo 1. Puntos de control en el campo

Anexo 2. Herramientas de MONITOREO VISUAL

Anexo 3. Reportes de actividad stromboliana – BITÁCORA IG EPN

Anexo 4. Emisión de columnas de ceniza – VAAC WASHINGTON

Anexo 5. Alertas de anomalías térmicas – MODVOLC Y HOT SPOT HAWAI

Anexo 6. Emisiones representativas de SO₂ detectadas por OMI

Anexo 7. Descripción de láminas delgadas

Anexo 8. Datos de análisis geoquímicos

Anexo 2. Herramientas de MONITOREO VISUAL

OBSERVACIONES VISUALES																															
Fecha	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Nov-02		ERUP						1										1							1			2			
Dic-02	1							1																							
Ene-03						2								2	2		1														
Feb-03																															
Mar-03																	1		1												
Sep-03				1																											
Nov-03																												1			
Dic-03								1																							
Mar-04																															
Oct-04																			1												1
Nov-04																											2				
Dic-04											2	2	2																		
Ene-05														1	1																
Mar-05										1																					
Abr-05								1			1							1		1	1										
Mav-05					1																				1						
Jun-05																1		1													
Ago-05																											2	2			
Nov-05																	1								1						
Sep-06				1																											
Oct-06																															1
Jul-07																	1								1						
Sep-07																									1	1					
Dic-07		1																													
Jul-08																													2	2	
Ago-08																											2				
Ago-09											2	2																			
Sep-09																1															
Oct-09																1	1							1							1

SIMBOLOGÍA	1	Monitoreo con sobrevuelo
	2	Monitoreo con visita al campo

Anexo 3. Reportes de actividad stromboliana – BITÁCORA IG EPN

REPORTES DE ACTIVIDAD STROMBOLIANA -BITACORA DEL VOLCÁN EL REVENTADOR 2007-2009																																
Fecha	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
Ene-07																																
Feb-07																																
Mar-07																				v	c					IC			f	F		
Abr-07	ic		ic																													
Jul-07																									G							
Sep-07				e																												
May-08																					G										c	
Jul-08																											ic					
Ago-08							F																									
Nov-08								ic																			G					
Feb-09									G																							
Abr-09																																
May-09	ic																															
Oct-09															sv	ic		ic		v												
Nov-09						v	v																									

SIMBOLOGÍA
 ic=incandescencia en crater
 v=Emisión de vapor
 G=olor a azufre

Anexo 4. Emisión de columnas de ceniza – VAAC WASHINGTON

COLUMNAS DE EMISIÓN DE CENIZA - ALERTAS EMITIDAS POR WASHINGTON VAAC																															
Fecha	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	#	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Nov-02			x	x	x	0	0	x	x	0	x	x	0	0	x			0	0					0	X	0	0				
Nov-04																								0							
Dic-04		X		0				X	0																						
Ene-05									x					0	0												0				
Abr-05							0	0				0															0				
Mav-05																				0											
Jun-05			x	0		x	0	x	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Jul-05	0	0	x	0	x	0				0								0	0	0			x	0	0		0	x			
Ago-05	0	x		0	0					0		0					0	0			x									0	
Sep-05	0	0	0									0	0	0	x	0			x	0	0	0	0	0	0	0	x	0		0	
Oct-05					0	x				0				0	0		0	0		0	0	0	0	0	0	0	0				
Nov-05	0	0		0						0	0						x							x	x		x	0		0	
Dic-05	0	x	0								0																			X	0
Ene-06	0										0																				
Feb-06																											0				
Mar-06			0										0	0																	
Mar-07																					0		0	x	0	0	x	0		x	0
Abr-07	0	X	X	X	X	0	X											X	0											X	
Mav-07	0				0																							0			
Jun-07															0		0														
Jul-07																	0		0												
Oct-07										0																					
Jul-08																												x	x	0	
Ago-08	0	0																													
Nov-08							0	x	x	0	x								0												
Abr-09																								x							
Mav-09	0														0												x				
Ago-09															0																
Sep-09																						0									
Oct-09				0	0													x								0	0				
Nov-09		0		0										x	0							0									

SIMBOLOGÍA:

0 Registro sin imagen de confirmación

X Registro con imagen de confirmación

Portal web: <http://www.ssd.noaa.gov/VAAC/ARCH02/archive.html>

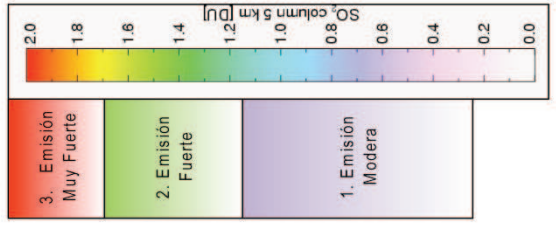
Anexo 5. Alertas de anomalías térmicas – MODVOLC Y HOT SPOT HAWAI

ALERTAS TERMALES IDENTIFICADAS POR MODVOLC - HOTSPOTS-HIGP																																						
Fecha	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	#	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31							
Nov-02								2										2		2				3	2													
Nov-04											1				2								2															
Dic-04		1					2	1	1				3					1		2					2							2						
Ene-05	1		1							1												1									1							
Feb-05							1																		2	1												
Mar-05												1			1	1																						
Abr-05		1																											1				1					
May-05				1																																		
Jun-05								1	2			1				1				2																		
Jul-05			1				1															1																
Ago-05						2									1							1	2															
Sep-05																2																						
Oct-05																																						
Nov-05																1																		1				
Dic-05																																			2			
Mar-07																												1	1							1		
Abr-07	3					1	1	3			2				1								1															
May-07																																		1				
Ago-07							1																															
Jul-08																																	2				3	
Nov-08												2		2																								
Abr-09																										2	2											
May-09								1	1			1		2	1																							
Ago-09		1																																				
Sep-09																																						
Oct-09						1					1		2								1														1			
Nov-09							1							1									1															
NIVEL DE INTENSIDAD:																		Muy Fuerte			Moderada			Leve														
Clasificación currencia de alertas termales .																																						
Portal web: http://goes.hiqp.hawaii.edu/goes/about.html																																						

Anexo 6. Emisiones representativas de SO₂ detectadas por OMI

EMISIONES IDENTIFICADAS POR OMI																																		
Emisiones detectadas por TOMS																																		
Fecha	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31			
Nov-02																																		
Jul-07																																		
Ago-07				1/0.9																														
Sep-07				1/0.7																														
Oct-07						1/0.7																												
Nov-07																																		
Dic-07	1/0.5																																	
Ene-08										2/1.2																								
Feb-08																																		
Mar-08							1/0.6																											
Abr-08							1/0.8				1/0.7																							
May-08								1/0.5																										
Jun-08				1/0.7																														
Ago-08						1/0.7					1/0.5	2/1.0			1/0.7																			
Sep-08					1/0.7							1/0.7																						
Oct-08																																		
Nov-08																																		
Dic-08	1/0.9	1/0.5	1/0.5	1/0.5	1/0.7					1/0.8	3/2.0	3/2.0	1/0.8	1/0.7																				
Ene-09																																		
Feb-09																																		
Mar-09																																		
Abr-09																																		
May-09	3/2.0																																	
Jun-09																																		
Jul-09																																		
Ago-09																																		
Sep-09																																		
Oct-09																																		
Dic-09																																		

ESCALA GRÁFICA



0.7 Valor máximo de masa de SO₂ en DU

Portal web: <http://iso2.gsfc.nasa.gov>

Nota. Únicamente se indican las emisiones mayores a 1 DU, según la escala gráfica.

Anexo 7. Descripción de láminas delgadas

Índice de Muestras con láminas delgadas y Localización

PUNTOS DE MUESTREO - LÁMINAS DELGADAS		
Cód.Muestra	UTM ESTE_W GS84	UTM NORTE_W GS84
REV 20	207200	9989400
REV 43	207100	9989500
REV 44	206900	9989600
REV 45	206800	9989700
REV 46	206800	9989500
REV 47	206700	9989400
REV 48	206600	9989300
REV 55	206800	9989200
REV 31A	206500	9989900
REV 31B	206500	9989900
REV 51A	205400	9990300
REV 53A	205500	9990100
REV 54	206200	9989600
REV 42A	205400	9989400
REV 42B	205400	9989400
REV 50	206200	9989400
REV 52	205400	9990000
REV 49	206400	9989100
REV 56	207200	9988900
REV 58	206500	9989600
REV 59	206300	9989400
REV 60	206900	9989000
REV 62	desconocida	
REV64	205800	9989200
REV65	205800	9989200
REV66	207934	9991812
REV67	204269	9991479
REV68	207000	9989600
REV69.a	207000	9989600
REV69.b	207000	9989600
REV-70	205052	9992114
REV-71	205841	9989407
REV-72	205896	9989564
REV-73	205825	9989379
REV-74	205203	9990013
REV-75	205822	9989557
REV 51B	205400	9990300
REV 53B	205500	9990100

Formato de descripción de las láminas delgadas

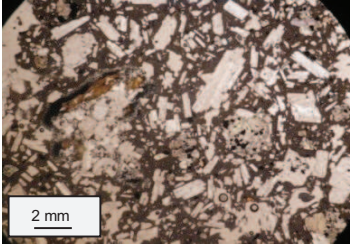
Muestra	Código: REV #	
Localidad	Lava #. UTM WGS84 Zona 18S Incluidos en el Índice de muestras	
Análisis Macroscópico		
Textura		
Fenocristales	% total	Características macroscópicas
Minerales	%	
Matriz	% total	Características
vidrio	%	De color negro y masiva
vesículas	% total	Tamaños < 0,5 mm
Análisis Microscópico		
Textura		
Estructura		
Fenocristales	% total	Características
Minerales	%	
Matriz	% total	Características
vidrio	%	
vesículas	% total	
Min. Accesorios	% total	
Observaciones generales:		
<p>Tipo de roca: Andesita/Andesitas basáltica</p> <p>Representación Ilustrativa</p>		

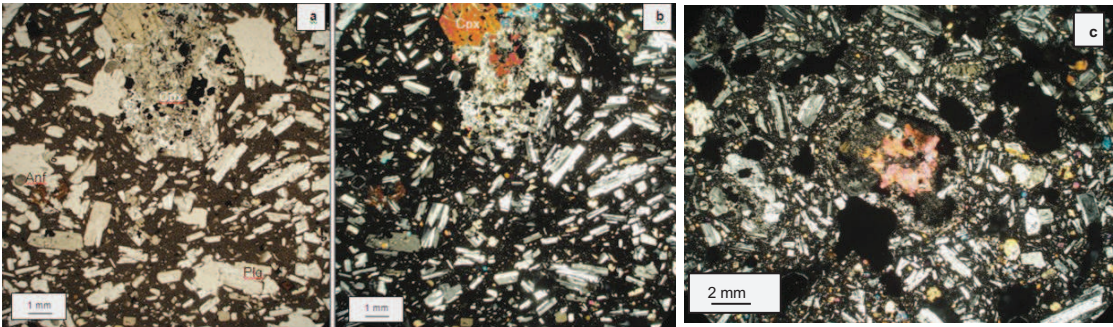
Siglas usadas en la descripción de las láminas delgadas

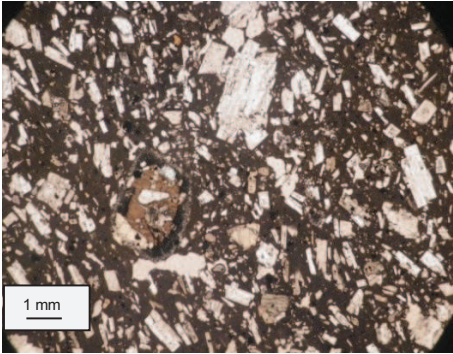
El contenido de los principales fenocristales, matriz y vesículas son presentados en %, de acuerdo al contenido porcentual respecto al volumen total en la roca.

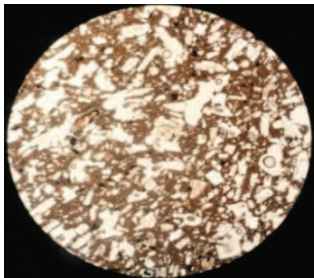
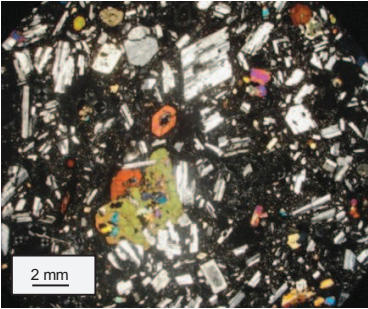
La escritura de los minerales se resumirá al utilizar sus siglas: Ol=olivino, Cpx=clinopiroxeno, Opx=ortopiroxeno, Plg=plagioclasa, Anf=anfíbol; óx= óxidos metálicos.

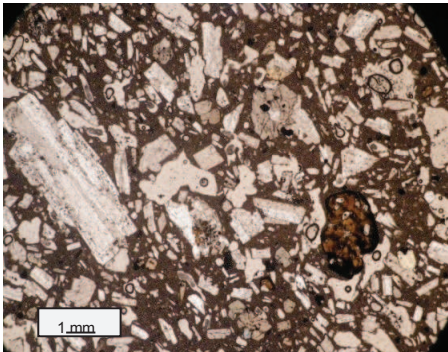
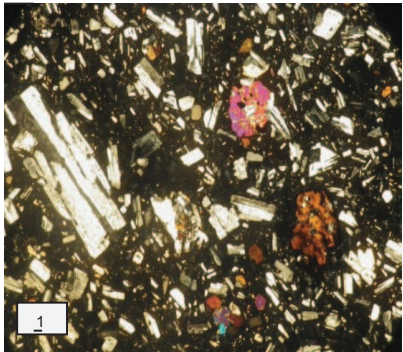
1G= Primera generación, 2G= Segunda generación, 3G= Tercera generación.

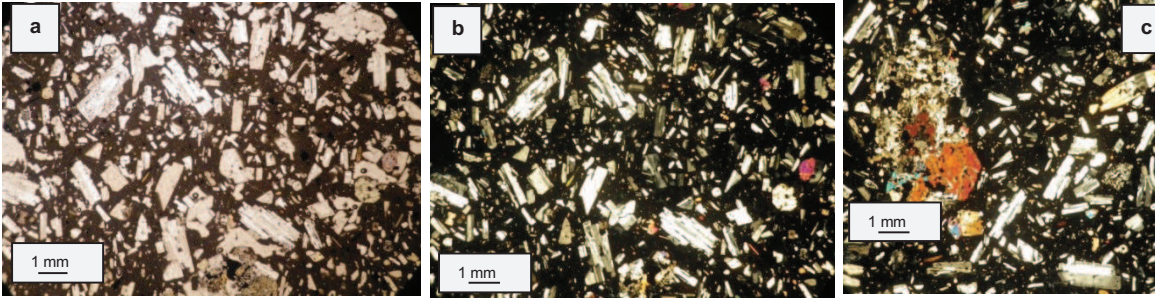
Muestra	REV 43	
Localidad	Lava 1	
Análisis Macroscópico		
Textura	Porfírica de grano medio y glomerofídica.	
Fenocristales	12	Características macroscópicas
Plagioclasa	10	Cristales euhedrales, tabulares y prismáticos de color blanco de hasta 2 mm.
Piroxeno	2	Cristales aglomerados de color verde - amarillento, translúcido y de brillo vítreo. Tamaño
Matriz	73	Características
vidrio	58	De color negro y masiva
vesículas	15	Tamaños < 0,5 mm
Análisis Microscópico		
Textura	Porfírica de grano medio, glomerofídica y seriada.	
Estructura	Masiva	
Fenocristales	23	Características
Plagioclasa	12	Cristales incoloros, euhedrales, tabulares y subhedrales prismáticos. Los primeros de hasta 1,5 mm y los segundos hasta 2 mm. Los primeros son entrecrecidos entre si y tienen maclas simples. Los segundos son alterados con intercrecimiento de óxidos y piroxenos al interior y con extinción ondulatoria. Los primeros presenta zonación y bordes reabsorbidos, los segundos muestran nucleación o textura de tamiz, maclas simples, compuestas y corazones alterados.
Clinopiroxeno	2	Cristales prismáticos y tabulares, subhedrales, pleocroicos amarillo pálido, de tamaño entre 0,5 hasta 1 mm. Presentan bordes reabsorbidos, corona de reacción dentro de opx. Algunos cristales muestran maclas de espada.
Ortopiroxeno	6	Cristales subhedrales que alcanzan hasta 2 mm, y están entrecrecidos con cristales euhedrales de plg. Además muestran maclas tipo reloj de arena,. Los cristales tienen alteraciones, bordes reabsorbidos y corazones de òx. Los cristales más pequeños presentan textura glomerofídica.
Anfibol	3	Cristales anhedrales, menores a 0,6 mm. Muestran alteraciones de oxidación, bordes reabsorbidos y oxidados, corona de reacción, textura poikilitica con óxidos, golfos de reacción y entrecrecimientos de piroxeno.
Olivino	>1?	Cristales anhedrales y como aglomerados, rodeados de cristales de piroxeno (cpx y opx). Al parecer dentro de un cumulado de composición gabroica o granodioritica (Cpx?)
Matriz	2	Características
plg.	1	Cristales anhedrales, incoloros y tamaños menores a 0,3mm.
Ortopiroxeno	1	Cristales incoloros, anhedrales e irregulares menores a 0,3 mm.
vidrio	44	Color negro e isotrópico.
vesículas	30	Tamaños desde 2 mm y mayores.
Min. Acc.	1	Características
óxidos	1	Cristales tanto dentro de cristales más grandes y en la matriz.
Observaciones generales:		
La roca tiene textura porfírica de grano fino y medio, glomerofídica. Presenta varios cúmulos de fenocristales de plg y cpx con tamaños entre 0,5 a 15mm. Además se tiene el intercrecimiento de fenocristales de plg al interior de los fenocristales alterados de anfíbol. Estos presenta coronas de reacción muy evidentes, aunque también se observan coronas de reacción para cristales de opx rodeando a cpx.		
Tipo de roca: Andesita		
a		b

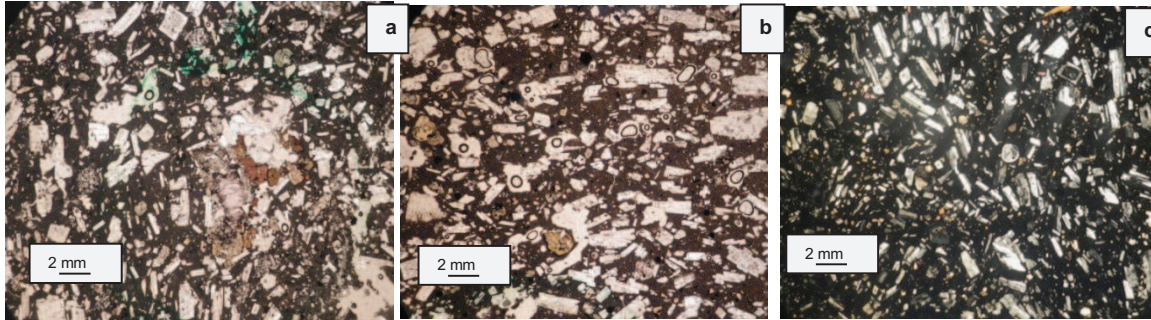
Muestra	REV 44	
Localidad	Lava 1	
Análisis Microscópico		
Textura	Porfírica de grano medio y seriada	
Estructura	Masiva	
Fenocristales	25	Características
Plagioclasa	15	Cristales incoloros, euhedrales, tabulares y subhedrales prismáticos. Los primeros de hasta 1,5mm y los segundos hasta 2 mm. Los primeros son entrecrecidos y maclas simples y los segundos son alterados con intercrecimiento de óxidos y piroxenos al interior y con extinción ondulatoria. Los primeros presenta zonación y bordes reabsorbidos, los segundos muestran nucleación o textura de tamiz, maclas simples u compuestas y corazones alterados.
Clinopiroxeno	2	Cristales verdosos, anhedrales, con tamaño de hasta 1mm. Presenta los bordes reabsorbidos, golfos de reacción y aglomerados de microcristales de anfíbol con bordes oxidados.
Ortopiroxeno	5	Cristales incoloros, subhedrales con colores de interferencia amarillos de 1er orden. Muestran maclas de reloj de arena y de espada. Se presentan individualmente y también en aglomerados. Los primeros de tamaño <0,5 mm y los aglomerados con cristales prismáticos de hasta 1mm., con macla de espada y también aglomerado con cristales tabulares de plg.
Anfíbol	3	Cristales anhedrales de tamaño 1-3 mm, con coronas de oxidación, bordes reabsorbidos e intercrecimiento de minerales como plg. (cristales tabulares entrecrecidos y aglomerados) y en otros casos, ya están reemplazados por microcristales anhedrales de plg. y óxidos.
Matriz	5	Características
Ortopiroxeno	2	Cristales incoloros, anhedrales e irregulares menores a 0,3 mm.
Plagioclasa	3	Cristales anhedrales, incoloros y tamaños menores a 0,3mm.
vidrio	48	Isotrópico de color negro.
vesículas	20	De tamaños variables pero en general mayores a 0,5 mm.
Min. Acc.	2	Características
óxidos	2	Cristales subhedrales, isotópicos, con tamaños de hasta 0,5 mm.
Observaciones generales:		
La roca presenta textura porfírica con varios cúmulos de minerales de hasta 4 mm, principalmente plg.s y piroxeno. Otros presentan entrecrecimiento de plg en cristales alterados de anfíbol, pues estos presentan fuertes evidencias de desequilibrio al presentar bordes de reacción. Los cristales de opx tienen corazones de cpx. Importante presencia de cristales de óxidos, con tamaños de hasta 0,5 mm principalmente en cristales de anfíbol, opx y matriz.		
Tipo de roca: Andesita		
		
Aumento óptico: x12,5		

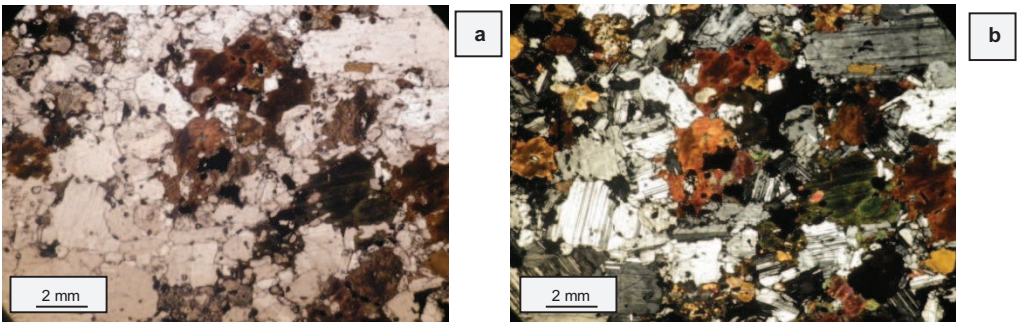
Muestra	REV 45	
Localidad	Lava 1	
Análisis Microscópico		
Textura	Porfírica de grano medio, glomerofídica y seriada.	
Estructura	Traquítica	
Fenocristales	31	Características
Plagioclasa	22	Cristales incoloros, euhedrales, tabulares y subhedrales prismáticos. Los primeros de hasta 1,5mm y los segundos hasta 2 mm. Los primeros son entrecrecidos y maclas simples y los segundos son alterados con intercrecimiento de óxidos y piroxenos al interior y con extinción ondulatoria. Los primeros presenta zonación y bordes reabsorbidos, los segundos muestran nucleación o textura de tamiz, corazones alterados. maclas simples y compuestas.
Clinopiroxeno	1	Cristales verdosos, anhedrales, con tamaño de hasta 1mm. Presenta los bordes reabsorbidos, golfos de reacción, y como aglomerados con otros microcristales de plg. tabular y anfíboles con bordes oxidados.
Ortopiroxeno	5	Cristales incoloros, subhedrales con colores de interferencia amarillos de 1er orden. son prismáticos y se muestran aglomerados de varios cristales y alcanzan un tamaño de 2 mm. Presentan maclas de reloj de arena y de espada. Se presentan individualmente y también en aglomerados. Los primeros de tamaño <0,5 mm y los aglomerados con cristales prismáticos de hasta 1mm, con macla de espada y aglomerado con cristales tabulares de plg.
Anfibol	3	Cristales anhedrales, con tamaños hasta 3mm, y de diferentes tamaños. Presentan coronas de oxidación, de color negro, otros con aspecto pulverulento, bordes reabsorbidos, golfos de reacción e intercrecimiento de minerales como plg (cristales tabulares, entrecrecidos y aglomerados) y opx (cristales subhedrales prismáticos y de aspecto aglomerados compacto) hacia los bordes de los cristales de anf. En otros casos ya el anf. ha sido reemplazado por microcristales anhedrales de opx masivo.
Matriz	6	Características
Ortopiroxeno	2	Cristales incoloros, anhedrales e irregulares menores a 0,3 mm.
Plagioclasa	3	Cristales anhedrales, incoloros y tamaños menores a 0,3mm.
Clinopiroxeno	1	Cristales incoloros, individuales, extinción a 45°, anhedrales < 0,3mm.
vidrio	55	De color negro e Isotrópico.
vesículas	20	De foram irregular y tamaño mayores a 0,5 mm
Min. Acc.	1	Características
óxidos	1	Cristales subhedrales, isotrópicos, con tamaños de hasta 0,2 mm.
Observaciones generales:		
La roca presenta varios cúmulos asociados al intercrecimiento entre cristales subhedrales y anhedrales de hasta 2mm, donde se agrupan plg y piroxeno dentro de cristales de anfíbol. El tamaño máx. es 2 mm de los cristales tabulares entrecrecidos de plg. Los cristales de opx tienen corazones de cpx. Importante presencia de cristales de óxidos que alcanzan hasta 0,5 mm principalmente al interior de los anf., opx y matriz.		
Tipo de roca: Andesita		
a		b
Aumento óptico: x 12,5		
	1 mm	1mm

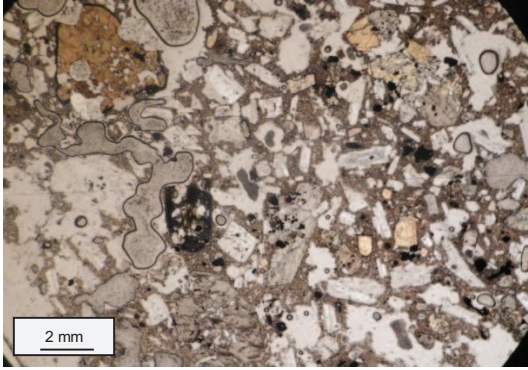
Muestra	REV 46	
Localidad	Lava 1	
Análisis Microscópico		
Textura	Porfírica de grano medio, glomerofídica y seriada.	
Estructura	Semi traquítica	
Fenocristales	29	Características
Plagioclasa	20	Cristales incoloros, euhedrales, tabulares y subhedrales prismáticos. Los primeros de hasta 1,5mm y los segundos hasta 2 mm. Los primeros son entrecrecidos y maclas simples y los segundos son alterados con intercrecimiento de óxidos y piroxenos al interior y con extinción ondulatoria. Los primeros presenta zonación y bordes reabsorbidos, los segundos muestran nucleación o textura de tamiz, corazones alterados, maclas simples y compuestas.
Clinopiroxeno	2	Cristales verdosos, anhedrales, con tamaño de hasta 1mm. Presenta los bordes reabsorbidos, golfos de reacción, y como aglomerados con otros microcristales de plg. tabular y anf. con bordes oxidados.
Ortopiroxeno	5	Cristales incoloros, subhedrales con colores de interferencia amarillos de 1er orden. son prismáticos y se muestran aglomerados de varios cristales y alcanzan un tamaño de 2 mm. Presentan maclas de reloj de arena y de espada. Se presentan individualmente y también en aglomerados. Los primeros de tamaño <0,5 mm y los aglomerados con cristales prismáticos de hasta 1mm., con macla de espada y también aglomerado con cristales tabulares de plg.
Anfibol	2	Cristales anhedrales, con tamaños hasta 3mm, y de diferentes tamaños. Presentan coronas de oxidación, de color negro, otros con aspecto pulverulento, bordes reabsorbidos, golfos de reacción e intercrecimiento de minerales como plg. (cristales tabulares entrecrecidos y aglomerados) y opx (cristales subhedrales prismáticos y de aspecto aglomerados compacto) hacia los bordes de los cristales de anf. En otros casos ya el Anf. ha sido reemplazado por microcristales anhedrales de Opx masivo.
Matriz	5	Características
Ortopiroxeno	2	Cristales incoloros, anhedrales e irregulares menores a 0,3 mm.
Plagioclasa	3	Cristales anhedrales, incoloros y tamaños menores a 0,3mm.
vidrio	35	Isotrópico, de color café oscuro.
vesículas	30	Tamaños desde 0,5 mm
Min. Acc.	1	Características
óxidos	1	Cristales subhedrales, isotópicos, con tamaños de hasta 0,2 mm.
Observaciones generales:		
La roca presenta cristales de varios tamaños, siendo los más grandes los de anf y plg. Estos cristales se presentan individuales y aglomerados. El anfíbol tiene entrecrecimiento de cristales subhedrales y anhedrales donde se agrupan plg y pxo dentro del anf. Los cristales de plg. son tabulares, entrecrecidos entre si, tiene zonación y textura de tamiz. Los cristales de opx tienen reemplazamiento con corazones de cpx. Cristales de óxidos con tamaños de hasta 0,4 mm.		
Tipo de roca: Andesita		
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content;"> Aumento óptico: x12,5 </div>	 <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: 20px; margin: 0 auto;">a</div>	 <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: 20px; margin: 0 auto;">b</div>

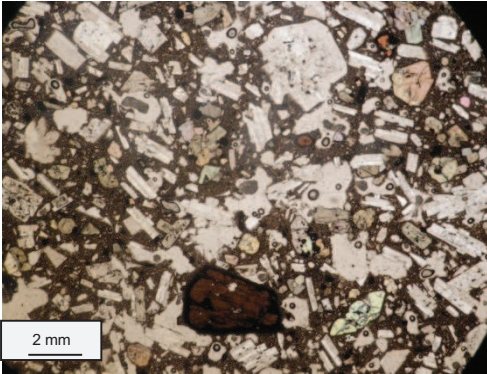
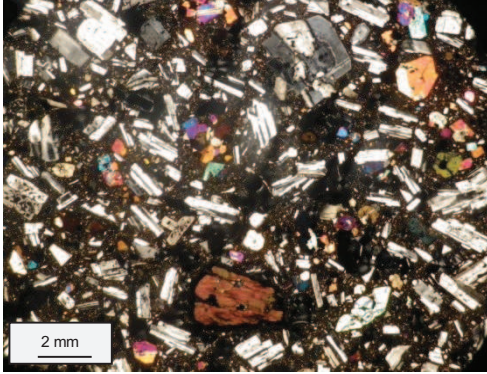
Muestra	REV 47	
Localidad	Lava 1	
Análisis Microscópico		
Textura	Porfírica de grano medio, glomerofídica y seriada.	
Estructura	Semi-traquítica	
Fenocristales	23	Características
Plagioclasa	15	Cristales incoloros, euhedrales, tabulares y subhedrales prismáticos. Los primeros de hasta 1,5mm y los segundos hasta 2 mm. Los primeros son entrecrecidos y maclas simples y los segundos son alterados con intercrecimiento de óxidos y piroxenos al interior y con extinción ondulatoria. Los primeros presenta zonación y bordes reabsorbidos, los segundos muestran nucleación o textura de tamiz, maclas simples y compuestas.
Clinopiroxeno	1	Cristales verdosos, anhedrales, con tamaño de hasta 2mm. Presenta los bordes reabsorbidos, golfos de reacción, y como aglomerados con otros microcristales de plg. tabular y anfíboles con bordes oxidados. Varios cristales presentan maclas de espada.
Ortopiroxeno	5	Cristales incoloros, subhedrales con colores de interferencia amarillos de 1º orden, prismáticos, textura glomerofídica y alcanzan un tamaño de hasta 2 mm. Presentan maclas de espada. Se presentan individualmente y como aglomerados. Los individuales con tamaños hasta 1 mm y presenta entrecrecimiento de cristales de plg. Los cristales prismáticos son glomerofídicos, tienen macla de espada y tamaño alcanza hasta 1mm. Además presentan textura poikilitica con óxidos.
Anfibol	2	Cristales anhedrales, con tamaños hasta 1,5 mm, y de diferentes tamaños y de forams (MA) irregular. Presentan coronas de oxidación, de color negro, bordes reabsorbidos, golfos de reacción e intercrecimiento de minerales como plg. (cristales tabulares entrecrecidos y aglomerados) y poco opx (cristales subhedrales prismáticos y de aspecto aglomerados compacto) y óxidos.
Matriz	5	Características
Ortopiroxeno	2	Cristales incoloros, anhedrales e irregulares menores a 0,3 mm.
Plagioclasa	3	Cristales anhedrales, incoloros y tamaños menores a 0,3 mm.
vidrio	56	Color café oscuro e isotrópico.
vesículas	15	Tamaño mayores a 2mm.
Min. Acc.	1	Características
óxidos	1	Cristales subhedrales y con tamaños de hasta 0,2 mm.
Observaciones generales:		
La roca presenta textura porfírica de grano medio, con fenocristales de varios tamaños, siendo los más grandes los de anf y plg. Estos cristales están individuales y como aglomeraciones. El anf. presenta entrecrecimiento de cristales subhedrales y anhedrales de hasta 2mm, Contiene cristales de plg. y piroxeno al interior del anf. Los cristales tabulares de plg. están entrecrecidos y alcanzan el mayor tamaño, incluyen zonación y tiene textura de tamiz. Los cristales de opx tienen reemplamiento con corazones de cpx. Los cristales de óxidos alcanzan tamaños de hasta 0,4 mm.		
Tipo de roca: Andesita		
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content;"> Aumento óptico: x 12,5 </div>		

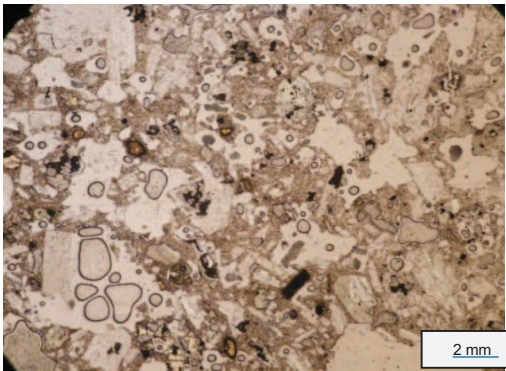
Muestra	REV 48	
Localidad	Lava 1	
Análisis Microscópico		
Textura	Porfírica de grano medio, glomerofídica y seriada.	
Estructura	Semi traquítica	
Fenocristales	29	Características
Plagioclasa	20	Cristales incoloros, euhedrales, tabulares y subhedrales prismáticos. Los primeros de hasta 1,5mm y los segundos hasta 2 mm. Los primeros, son entrecrecidos y con maclas simples; los segundos son alterados, con intercrecimiento de óx+pxo y con extinción ondulatoria. Los primeros con zonación y bordes reabsorbidos, los segundos con nucleación o textura de tamiz, corazones alterados, maclas simples y compuestas.
Clinopiroxeno	1	Cristales verdosos, anhedrales, con tamaño de hasta 1mm, habiendo también unos pequeños que se han aglomerado (<0,3 mm) Presenta los bordes reabsorbidos, golfos de reacción, y como aglomerados con otros microcristales tabulares de plg. y anfíboles con bordes oxidados. Varios cristales presentan maclas de espada.
Ortopiroxeno	5	Cristales incoloros, subhedrales con colores de interferencia amarillos de 1er orden. son prismáticos y se muestran aglomerados de varios cristales y alcanzan un tamaño de 1,5 mm. Presentan maclas de espada. Están individuales y aglomerados. Los individuales, alcanzan hasta 1 mm y entrecrecimiento de cristales de plg. Los aglomerados, se combinan entre sí con cristales prismáticos con macla de espada y tamaño hasta 1mm. También se encuentran microcristales como recristalización sobre un mineral anterior. Además presentan textura poikilítica con óxidos.
Anfibol	3	Cristales anhedrales, con tamaños hasta 1 mm y de diferentes tamaños y de forma irregular debido al desequilibrio en el que encuentra. Presentan coronas de oxidación, de color negro, bordes reabsorbidos, golfos de reacción e intercrecimiento de minerales como plg. (cristales tabulares entrecrecidos y aglomerados) y poco opx (cristales subhedrales prismáticos y de aspecto aglomerados compacto) y óxidos.
Matriz	5	Características
Ortopiroxeno	2	Cristales incoloros, anhedrales e irregulares menores a 0,3 mm.
Plagioclasa	3	Cristales anhedrales, incoloros y tamaños menores a 0,3 mm.
vidrio	50	Color café oscuro e isotrópico.
vesículas	15	Tamaños desde 2 mm.
Min. Acc.	1	Características
óxidos	1	Cristales subhedrales, isotópicos, con tamaños de hasta 0,2 mm.
Observaciones generales:		
La roca de textura porfírica, grano medio, glomerofídica y seriada. Contiene fenocristales de varios tamaños, los más grandes los de anf y plg. Estos cristales están individuales y como aglomeraciones. El anf. presenta entrecrecimiento de cristales subhedrales y anhedrales de hasta 2mm (con plg+pxo dentro del anf). Se observan cristales tabulares entrecrecidos de plg y otros de mayor tamaño, zonados y con textura de tamiz. Los cristales de opx tienen reemplazamiento con corazones de cpx. Cristales de óxidos con tamaños de hasta 0,4 mm.		
Tipo de roca: Andesita		
		
Aumento óptico:		

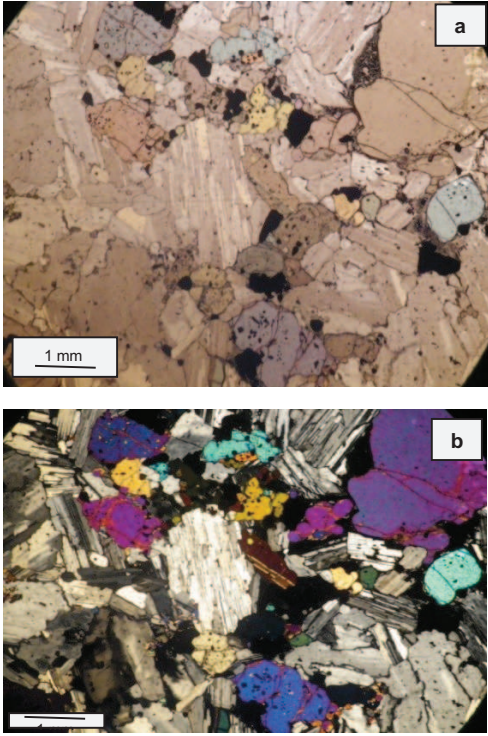
Muestra	Rev 20	
Localidad	Lava 1	
Análisis Microscópico		
Textura	Porfírica de gano medio, glomerofídica y seriada.	
Estructura	Masiva	
Fenocristales	23	Características
Plagioclasa	12	Cristales incoloros, euhedrales, tabulares y subhedrales prismáticos. Los primeros de hasta 1,5mm y los segundos hasta 2 mm. Los primeros tienen entrecrecimientos y maclas simples; los segundos intercrecimiento de óx+pxo al interior, y con extinción ondulatoria. Los primeros presentan zonación y bordes reabsorbidos, y los segundos, nucleación o textura de tamiz, maclas simples y compuestas.
Clinopiroxeno	2	Cristales prismáticos y tabulares, subhedrales, pleocróicos color amarillo pálido, de tamaño entre 0,5 hasta 1 mm. Presentan bordes reabsorbidos, corona de reacción dentro de opx. Algunos cristales muestran maclas de espada.
Ortopiroxeno	6	Cristales subhedrales que alcanzan hasta 2 mm, y están entrecrecidos con cristales euhedrales de plg. Muestran maclas tipo reloj de arena, alteraciones, bordes reabsorbidos, corazones. Los cristales más pequeños están aglomerados e intercrecidos.
Anfibol	3	Cristales anhedrales, menores a 0,6 mm. Muestran alteraciones de oxidación, bordes reabsorbidos y oxidados, corona de reacción, textura poikilitica con óx., golfos de reacción y entrecrecimientos de piroxeno.
Olivino	>1?	Cristales anhedrales y como aglomerados, rodeados de cristales de piroxeno (cpx y opx). Al parecer dentro de un cumulato de composición gabaróica/granodiorítica (Cpx?)
Matriz	2	Características
Plagioclasa	1	Cristales incoloros, anhedrales e irregulares menores a 0,3 mm.
Ortopiroxeno	1	Cristales amarillo pálido, anhedrales e irregulares menores a 0,3 mm.
vidrio	44	Color negro e isotrópico.
vesículas	30	Tamaños desde 2 mm y mayores.
Min. Acc.	1	Características
óxidos	1	Cristales tanto dentro de cristales más grandes y en la matriz, tamaños <0,3mm.
Observaciones generales:		
La roca presenta varios cúmulos de minerales de tamaños entre 0,5 a 15mm. Se forman principalmente de plg. y piroxeno, otros con entre-crecimiento de plg en cristales alterados de anf.. Los cristales de opx presentan cpx hacia el centro del cristal.		
Tipo de roca: Andesita		
		
Aumento óptico: (12,5x)		

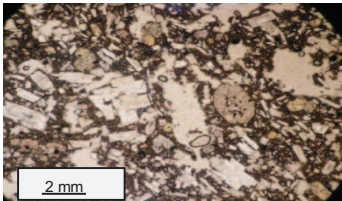

Muestra	REV 51 B	
Localidad	xenolito en Lava 2	
Análisis Microscópico		
Textura	Fanerítica de grano medio, inequigranular	
Estructura	Masiva y vesiculada	
Fenocristales	98	Características
Plagioclasa	60	Cristales incoloros, euhedrales a subhedrales, prismáticos, tamaños entre 2 a 4 mm. Se presenta con maclas simples y polisintéticas; intercrecimiento de óxidos al interior (textura poikilitica) y con extinción ondulatoria. Todos con textura intersertal.
Clinopiroxeno	20	Cristales subhedrales a anhedrales, pleocroicos de color anaranjado, de formas octogonales y prismáticos, con maclas de espada, de tamaño de entre 2 a 6 mm. Presentan cristales individuales y entrecrecidos con otros cristales de Opx y Cpx, además presenta textura intersertal.
Ortopiroxeno	10	Cristales subhedrales, incoloros y con colores de interferencia de 1° orden, de tamaños aprox. 2 mm, con entrecrecimientos cristales de hasta 2 mm. Entrecrecimiento con otros cristales tabulares de plg. Se observan bordes reabsorbidos y golfos de reacción. También recristalización en un cristal anterior y con aspecto pulvulento.
Anfibol	8	Cristales subhedrales a anhedrales, inequigranulares, pleocroismo de color verdoso a café y buen clivaje (ángulo de intersección a 120°) con tamaños 1,5 -3 mm. Presenta bordes reabsorbidos, óxidados, golfos de reacción y con las coronas de reacción con cpx.
Min. Acc.	2	Características
óxidos	2	Cristales anhedrales y subhedrales, menores a 0,2 mm dentro de cristales y en la matriz.
Observaciones generales:		
La roca presenta textura fanerítica, inequigranular, con fenocristales de plg. fuertemente maclados, de tamaños superiores a los 3mm, con extinción ondulatoria y con textura intersertal. El cpx es de color anaranjado pálido y que rodea a otros fenocristales de opx. Los fenocristales de anfíbol son subhedrales verdosos.		
Tipo de roca: Granodiorita		
		
Aumento óptico: (12,5x)		

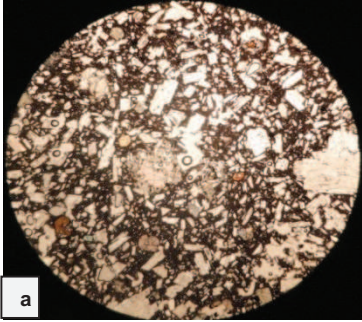
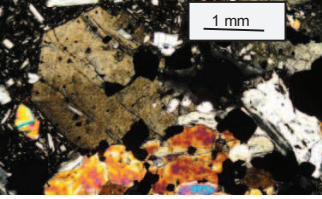
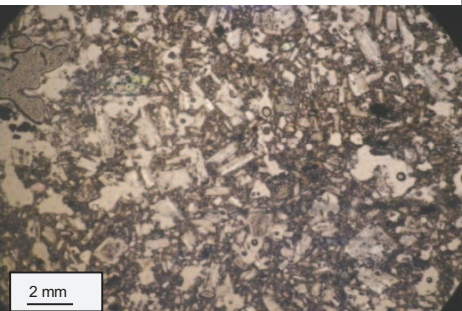
Muestra	53A	
Localidad	Lava 2	
Análisis Microscópico		
Textura	Porfírica de grano medio, glomerofídica y seriada.	
Estructura	Masiva y vesiculada	
Fenocristales	36	Características
Plagioclasa	20	Cristales incoloros, euhedrales, tabulares y subhedrales prismáticos. Los primeros de 2 mm y los segundos hasta 2 mm, aunque tiene también una mayor tendencia de un tamaño un poco menor. Los primeros son entrecrecidos, maclas simples y los segundos son alterados con intercrecimiento de óxidos y piroxenos al interior y con extinción ondulatoria. Los primeros presentan zonación y bordes reabsorbidos, los segundos muestran nucleación o textura de tamiz, maclas simples u compuestas y corazones alterados.
Clinopiroxeno	8	Cristales subhedrales, de relieve alto, clivaje característico, prismáticos, con maclas de espada, de tamaño hasta 2 mm. Presentan cristales individuales y entrecrecidos de hasta 2mm. Algunos de ellos presentan zonación y macla tipo espada. Otros son anhedrales y de mayor tamaño (1,2 mm).
Ortopiroxeno	6	Cristales subhedrales prismáticos, de tamaños de 2 mm, con intercrecimientos de óxidos al interior. Entrecrecimiento con otros cristales tabulares de plg. Se observan bordes reabsorbidos y golfos de reacción. También recristalización en un cristal anterior y con aspecto pulvurulento.
Anfibol	2	Cristales pleocróica de color café claro, anhedrales y de tamaños hasta 2 mm. Presenta los bordes reabsorbidos y de color negro por los óxidos. Además presenta intercrecimientos de cristales anhedrales de 0,6 mm de plg de la (1°G).
Matriz	10	Características
Ortopiroxeno	2	Cristales incoloros, anhedrales e irregulares menores a 0,3 mm.
Plagioclasa	5	Cristales anhedrales, incoloros y tamaños menores a 0,3 mm.
Clinopiroxeno	3	Cristales anhedrales, incoloros y tamaños menores a 0,3 mm.
vidrio	23	Características
vesículas	30	De tamaño mayor a 3 mm.
Min. Acc.	1	Características
óxidos	1	Cristales anhedrales y subhedrales, con tamaños de hasta 0,2 mm dentro de cristales y en la matriz.
Observaciones generales:		
Roca escoriaécea y porfírica, enriquecida con microcristales en la matriz. Se reconocen cristales anteriores de opx con recristalización de cpx; de plg y anf. La plg anterior es prismáticas y la reciente con maclas tipo Carlsbad.		
Tipo de roca: Andesita basáltica		
a		b
Aumento óptico: (12,5x)		

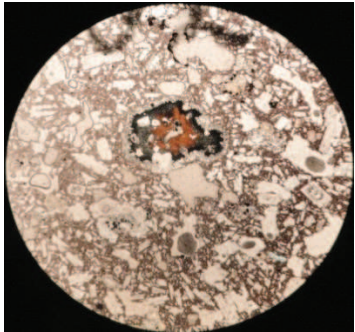
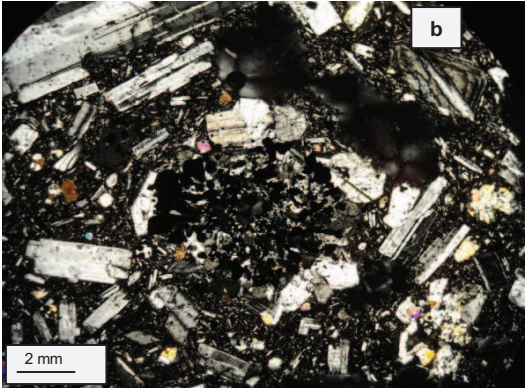
Muestra	REV 54	
Localidad	Lava 2	
Análisis Microscópico		
Textura	Porfírica de grano medio, glomerofídica y seriada.	
Estructura	Masiva y vesiculada	
Fenocristales	54	Características
Plagioclasa	35	Cristales incoloros, euhedrales, tabulares y subhedrales prismáticos. Los primeros de 2,5 mm y los segundos hasta 2 mm. Los primeros son entrecrecidos, tiene maclas simples y los segundos, alterados, con intercrecimiento de óx+pxo al interior (textura intersertal) y con extinción ondulatoria. Los primeros presenta zonación y bordes reabsorbidos, los segundos muestran nucleación o textura de tamiz, maclas simples y compuestas, con corazones alterados.
Clinopiroxeno	10	Cristales subhedrales, pleocroismo débil de tonalidad rosacea, de forma prismática, con maclas de espada, de tamaño hasta 1mm. Presentan cristales individuales y entrecrecidos con Opx y Cpx, alcanzando tamaños de hasta 2mm.
Ortopiroxeno	5	Cristales subhedrales, amarillo pálido, de tamaños de 1 mm, entrecrecimientos cristales de hasta 2 mm. Entrecrecimiento con otros cristales tabulares de plg. Se observan bordes reabsorbidos y golfos de reacción. También recristalización en un cristal anterior y con aspecto pulvurulento.
Anfibol	3	Cristales anhedrales, pleocroicos de color café oscuro con tonalidad verdosa y tamaños desde 0,5 a 3 mm. Presenta bordes reabsorbidos y óxidados, golfos de reacción. Las coronas de reacción están compuestas de microcristales de cpx y hacia el interior se observan fenocristales de cpx. Otros tienen intercrecimiento de plg y opx con cristales de hasta 0,5 mm.
Olivino	1	Cristales anhedrales rómbicos y de alta birrefringencia, con textura esquelética.
Matriz	11	Características
Ortopiroxeno	2	Cristales incoloros, anhedrales e irregulares menores a 0,3 mm.
Plagioclasa	6	Cristales anhedrales, incoloros y tamaños menores a 0,3 mm.
Clinopiroxeno	3	Cristales anhedrales, incoloros y tamaños menores a 0,3 mm.
vidrio	43	Color café oscuro e isotrópico.
vesículas	10	Son irregulares y mayores a 1 mm.
Min. Acc.	1	Características
óxidos	1	Cristales anhedrales y subhedrales, tamaños menores a 0,2 mm dentro de la matriz.
Observaciones generales:		
La roca es fresca, tiene textura porfírica, con fenocristales de plg., clinopiroxeno de pleocroismo verdosos de hasta 2mm, ortopiroxenos incoloros con fuertes colores de birrefringencia que no superan los 2 mm y anfíbol de pleocroismo de color café de hasta 3mm. Además, como aglomerados de micro cristales de plg que alcanzan los 2 mm. La matriz es vítrea y de color café está enriquecida de microcristales de pxo.		
Tipo de roca: Andesita basáltica		
a		b
		
		Aumento óptico: x12,5

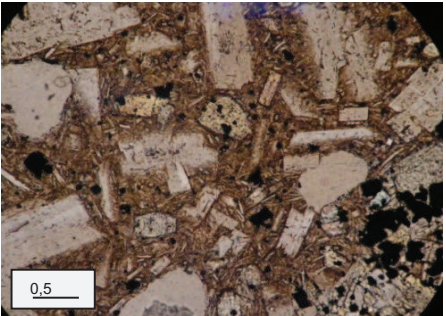

Muestra	REV 51A	
Localidad	Lava 2	
Análisis Microscópico		
Textura	Porfírica de grano medio, glomerofídica y seriada.	
Estructura	Masiva y vesiculada	
Fenocristales	52	Características
Plagioclasa	35	Cristales incoloros, euhedrales, tabulares y subhedrales prismáticos. Los primeros de 2 mm y los segundos hasta 2 mm. Los primeros son entrecrecidos, maclas simples y los segundos, alterados con intercrecimiento de óx+pxo al interior y con extinción ondulatoria. Los primeros presenta zonación y bordes reabsorbidos, los segundos muestran nucleación o textura de tamiz, maclas simples y compuestas, con núcleos alterados.
Clinopiroxeno	8	Cristales subhedrales a anhedrales, incoloros, fuertes colores de birrefringencia, prismáticos, con maclas de espada, de tamaño hasta 1mm. Presentan cristales
Ortopiroxeno	5	Cristales subhedrales de tamaños de 1,5 mm, subredondeado, con intercrecimientos de óxidos al interior. Entrecrecimiento con otros cristales tabulares de plg. Se observan bordes reabsorbidos y golfos de reacción. También recristalización en un cristal anterior y con aspecto pulvurulento.
Anfibol	3	Cristales anhedrales, pleocroismo de color café desde claro a oscuro con tonalidad verdosa, tamaños < 0,5 mm. Presenta bordes de reacción, bordes reabsorbidos y óxidados.
Olivino	1	Cristales anhedrales, de relieve alto, alta birrefringencia, incoloro y con tonalidad verdosa, tamaño < 0,6 mm. Presenta bordes reabsorbidos, golfos de reacción y textura esquelética y en algunos casos rodeado de anf. e inclusiones de óx.
Matriz	10	Características
Ortopiroxeno	2	Cristales incoloros, anhedrales e irregulares menores a 0,3 mm.
Plagioclasa	5	Cristales anhedrales, incoloros y tamaños menores a 0,3 mm.
Clinopiroxeno	3	Cristales anhedrales, incoloros y tamaños menores a 0,3 mm.
vidrio	6	Color café claro e isotrópico.
vesículas	30	Son de tamaños mayores a 1,5mm y de forma irregular y subredondeada.
Min. Acc.	2	Características
óxidos	2	Cristales anhedrales y subhedrales, con tamaños de hasta 0,2 mm dentro de cristales y de la matriz.
Observaciones generales:		
Roca escoriaea, relativamente enriquecida de cristales. Contiene fenocristales de opx con recristalización de cpx; fenocristales de plg. que alcanzan hasta 2 mm, de formas prismáticas y tabulares. En la matriz se pueden observar microlitos junto con microcristales de orto y clino piroxeno.		
Tipo de roca: Andesita		
a		b
Aumento óptico: (12,5x)		

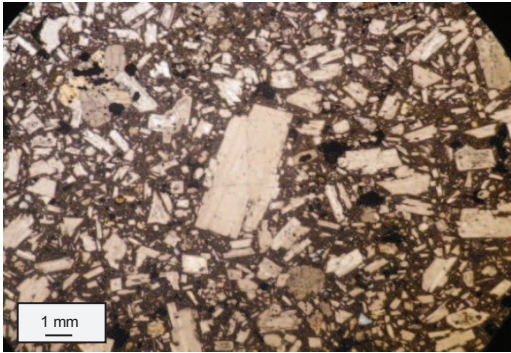
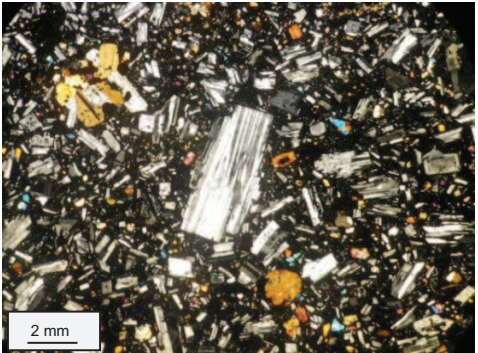
Muestra	53B	
Localidad	Gabro en Lava 2	
Análisis Macroscópico		
Textura	Fanerítica	
Fenocristales	105	Características macroscópicas
Plagioclasa	62	Cristales euhedrales, tabulares y prismáticos de color blanco de hasta 2 mm.
Piroxeno	38	Cristales aglomerados de color verde - amarillento, translúcido y vítreo de tamaños hasta 5 mm.
Anfíbol	5	Cristales subhedrales, alargados de color negro y brillo vítreo.
Análisis Microscópico		
Textura	Holocristalina, fanerítica de grano grueso e inequigranular.	
Estructura	Masiva	
Fenocristales	98	Características
Plagioclasa	65	Cristales euhedrales y subhedrales, entre 2 y 3 mm, Cristales prismáticos, con maclas, zonados y con extinción ondulatoria.
Clinopiroxeno	25	Cristales euhedrales y subhedrales, de tamaño 2-3mm, pleocroicos desde amarillos pálidos hasta rosaceos verdosos.
Anfíbol	8	Cristales euhedrales a subhedrales, pleocroicos de color verde, de 1mm, textura poikilitica con óxidos.
Min. Acc.	2	Características
óxidos	2	Cristales euhedrales isotrópicos.
Observaciones generales:		
Roca fresca de textura fanerítica de grano medio a grano grueso, con fenocristales de plagioclasas con macla tipo Carlsbad y con extinción ondulatoria. Los fenocristales pleocroicos de piroxeno son de tamaño hasta 3 mm y con intercrecimientos de óxido.		
Tipo de roca: Gabro		
		
Aumento óptico: (12,5x)		

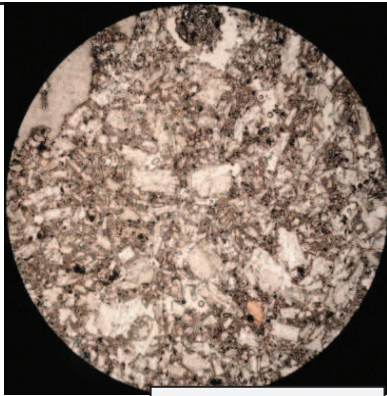
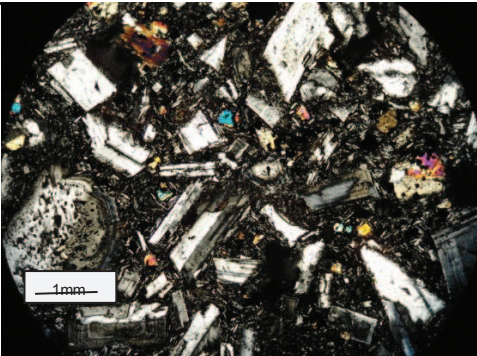
Muestra	REV 42B	
Localidad	Lava 3	
Análisis Macroscópico		
Textura	Porfírica	
Fenocristales	7	Características macroscópicas
Plagioclasa	5	Cristales euhedrales, tabulares y prismáticos de color blanco de hasta 2 mm.
Piroxeno	1	Cristales aglomerados de color verde - amarillento, translúcido y vítreo de tamaños hasta 2 mm.
Anfibol	1	Hornblenda negra y con bordes de oxidación color rojo.
Matriz	73	Características
vidrio	53	Color negro e isotrópico.
vesículas	20	Tiene un diámetro de hasta 1 mm.
Análisis Microscópico		
Textura	Porfírica de grano medio y seriada	
Estructura	Masiva y poca vesicularidad.	
Fenocristales	47	Características
Plagioclasa	30	Cristales incoloros, euhedrales, tabulares y subhedrales prismáticos. Los primeros de 2 mm y los segundos hasta 2 mm. Los primeros son entrecrecidos y maclas simples y los segundos son alterados con intercrecimiento óxidos, coronas de reacción y con extinción ondulatoria. Los primeros presenta zonación y bordes reabsorbidos, los segundos muestran nucleación o textura de tamiz, nucleos alterados, maclas simples y compuestas.
Clinopiroxeno	10	Cristales subhedrales, prismáticos, con maclas de espada, de tamaño hasta 1mm. Presentan cristales individuales y entrecrecidos con Opx y Cpx, alcanzando tamaños de hasta 2mm.
Ortopiroxeno	5	Cristales subhedrales hexagonales, maclados y unos pocos están zonados. Su tamaño es casi 1 mm. También se encuentra aglomerados de hasta 3mm. Presenta bordes reabsorbidos y golfos de reacción.
Anfibol	1	Cristales subhedrales, pleocroicos café, con tamaños de 2 mm, como cristales individuales con intercrecimientos tabulares de plg. Presentan bordes reabsorbidos, coronas de oxidación, corazones alterados, y recristalización de cpx al interior.
Olivino	1	Cristales anhedrales, romboidal, de textura esquelética, alta birrefringencia, de tamaño 1,5 mm. Con golfos de reacción.
Matriz	11	Características
Ortopiroxeno	2	Cristales incoloros, anhedrales e irregulares menores a 0,3 mm.
Plagioclasa	6	Cristales anhedrales, incoloros y tamaños menores a 0,3 mm.
Clinopiroxeno	3	Cristales anhedrales, incoloros y tamaños menores a 0,3 mm.
vidrio	6	Color café claro e isotrópico.
vesículas	35	De diferentes tamaños (>0,5mm), pequeñas y grandes, de forma irregular.
Min. Acc.	1	Características
óxidos	1	Cristales isotrópicos de hasta 0,4 mm distribuidos en los minerales y en la matriz.
Observaciones generales:		
Se observan cristales de anf o px reemplazados por nuevos microcristales de pxo. Las plg.s presentan los bordes reabsorbidos, coronas de reacción, zonación y maclas. Se observa mayor presencia de minerales de tamaño entre 0,6 mm y más microlitos en la matriz.		
Tipo de roca: Andesita		
a		b
Aumento óptico: (12,5x)		
	2 mm	2 mm

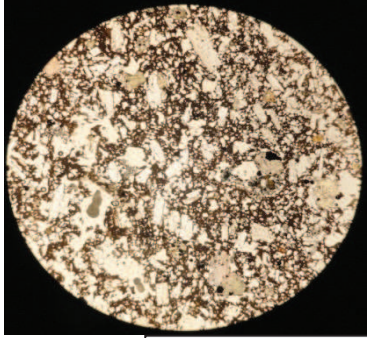
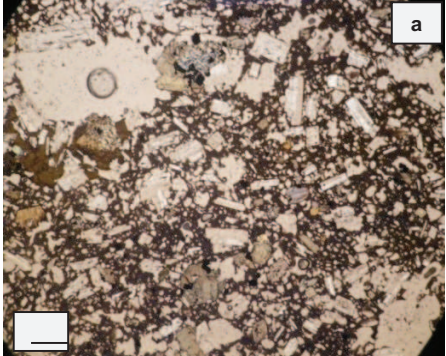
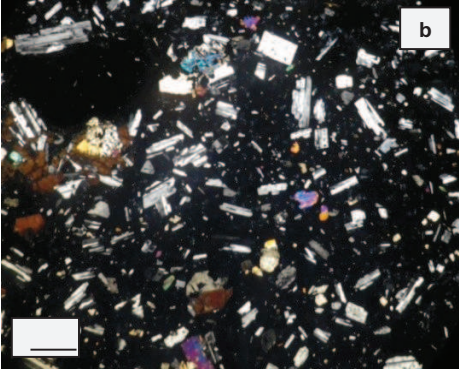
Muestra	REV 42A	
Localidad	Lava 3	
Análisis Microscópico		
Textura	Porfírica de gano medio, glomerofídica y seriada.	
Estructura	Masiva y poco vesiculada	
Fenocristales	50	Características
Plagioclasa	30	Cristales incoloros, euhedrales, tabulares y subhedrales prismáticos. Los primeros de 2 mm y los segundos hasta 2 mm. Los primeros son entrecrecidos y maclas simples y los segundos son alterados con intercrecimiento óxidos, coronas de reacción y con extinción ondulatoria. Los primeros presenta zonación y bordes reabsorbidos, los segundos muestran nucleación o textura de tamiz, corazones alterados, maclado simple compuesto. corazones alterados.
Clinopiroxeno	10	Cristales subhedrales, prismáticos, con maclas de espada, de tamaño hasta 1mm. Presentan cristales individuales y entrecrecidos con Opx y Cpx, alcanzando tamaños de hasta 2mm.
Ortopiroxeno	5	Cristales subhedrales, hexagonales, de tamaños de 1 mm, individuales y entrecrecidos para formar cristales de hasta 2 mm. Entrecrecimiento con otros cristales tabulares de plg. Se observan bordes reabsorbidos y golfos de reacción. También recristalización en un cristal anterior y con aspecto pulvurulento.
Anfibol	4	Cristales anhedrales de 3 mm. Presenta bordes reabsorbidos y óxidados, golfos de reacción. Las coronas de reacción estan compuestas de cpx.
Olivino	1	Cristales anhedrales, de alta birrefringencia y de tamaño 0,5 mm. Presenta textura esquelética con golfos de reacción y bordes reabsorbidos.
Matriz	10	Características
Ortopiroxeno	2	Cristales incoloros, anhedrales e irregulares menores a 0,3 mm.
Plagioclasa	5	Cristales anhedrales, incoloros y tamaños menores a 0,3 mm.
Clinopiroxeno	3	Cristales anhedrales, incoloros y tamaños menores a 0,3 mm.
vidrio	14	Color café claro e isotrópico.
vesículas	25	De tamaños pequeños y mayores a 0,5 mm.
Min. Acc.	1	Características
óxidos	1	Cristales anhedrales y subhedrales, con tamaños de hasta 0,2 mm dentro de cristales y de la matriz.
Observaciones generales:		
Se observan cristales de anf o px reemplazados por nuevos micro cristales de pxo. Las plg presenta los bordes reabsorbidos, coronas de reacción, zonación y maclas. Se observa mayor presencia de minerales de tamaño entre 0,6 mm y más microlitos en la matriz.		
Tipo de roca: Andesita basáltica		
 <p>a</p> <p>4,2 mm</p> <p>Aumento óptico: (12,5x)</p>	 <p>1 mm</p> <p>Aumento óptico: (30x)</p> <p>b</p>	 <p>2 mm</p> <p>Aumento óptico: (12,5x)</p> <p>c</p>

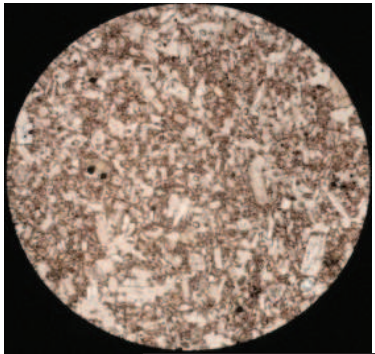
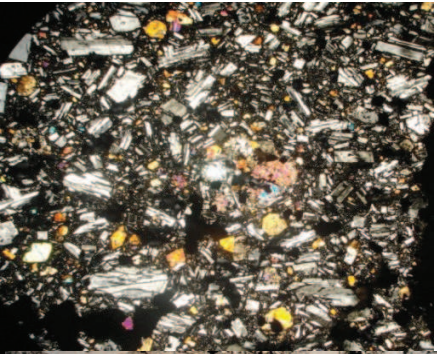
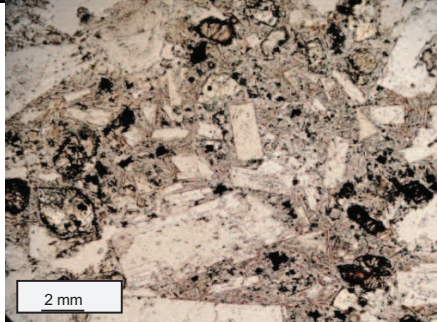
Muestra	REV 50	
Localidad	Lava 3	
Análisis Microscópico		
Textura	Porfírica de grano medio, glomerofídica y seriada.	
Estructura	Masiva y poco vesiculada	
Fenocristales	52	Características
Plagioclasa	33	Cristales incoloros, euhedrales, tabulares y subhedrales prismáticos. Los primeros de 2 mm y los segundos hasta 2 mm. Los primeros tiene entrecrecidos, maclas simples; y los segundos muestran óx. intercrecidos, coronas de reacción y con extinción ondulatoria. Los primeros presenta zonación y bordes reabsorbidos, los segundos muestran nucleación o textura de tamiz, corazones alterados, maclado simpley compuesto. corazones alterados.
Clinopiroxeno	10	Cristales subhedrales, prismáticos, con maclas de espada, de tamaño hasta 1mm. Presentan cristales individuales y entrecrecidos con Opx y Cpx, alcanzando tamaños de hasta 2mm.
Ortopiroxeno	5	Cristales subhedrales, hexagonales, de tamaños de 1 mm, individuales y entrecrecidos para formar cristales de hasta 2 mm. Entrecrecimiento con otros cristales tabulares de plg. Se observan bordes reabsorbidos y golfos de reacción. También recristalización en un cristal anterior y con aspecto pulvurulento.
Anfibol	4	Cristales anhedrales de 3 mm. Presenta bordes reabsorbidos y óxidados, golfos de reacción. Las coronas de reacción estan compuestas de cpx.
Matriz	10	Características
Ortopiroxeno	2	Cristales incoloros, anhedrales e irregulares menores a 0,3 mm.
Plagioclasa	5	Cristales anhedrales, incoloros y tamaños menores a 0,3 mm.
Clinopiroxeno	3	Cristales anhedrales, incoloros y tamaños menores a 0,3 mm.
vidrio	27	Color café claro e isotrópico.
vesículas	10	De tamaños pequeños y mayores a 0,5 mm.
Min. Acc.	1	Características
óxidos	1	Cristales anhedrales y subhedrales, con tamaños de hasta 0,2 mm al interior de cristales y matriz.
Observaciones generales:		
Se observan cristales de anf o px reemplazados por nuevos micro cristales de pxo. Las plg.s presentan los bordes reabsorbidos, coronas de reacción, zonación y maclas. Se observa mayor presencia de minerales de tamaño entre 0,6 mm y más microlitos en la matriz.		
Tipo de roca: Andesita		
 <p style="text-align: center;">a</p> <p style="text-align: center;">4,2 mm</p> <p style="text-align: center;">Aumento óptico: (12,5x)</p>	 <p style="text-align: center;">b</p> <p style="text-align: center;">2 mm</p> <p style="text-align: center;">Aumento óptico: (22,5x)</p>	

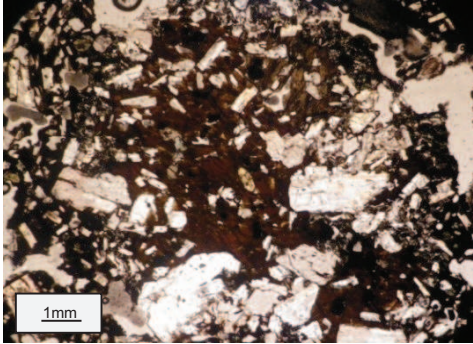
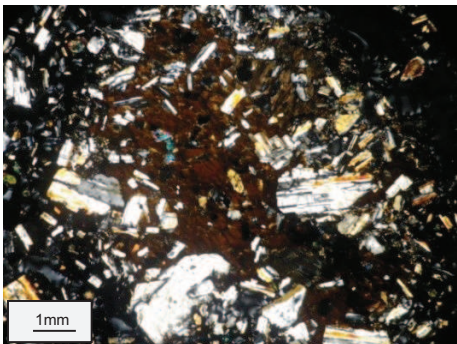
Muestra	REV 52	
Localidad	Lava 3	
Análisis Microscópico		
Textura	Porfírica de grano medio, glomerofídica y seriada.	
Estructura	Masiva y poco vesiculada e inequigranular	
Fenocristales	51	Características
Plagioclasa	30	Cristales incoloros, euhedrales, tabulares y subhedrales prismáticos. Los primeros de 2 mm y los segundos hasta 2 mm. Los primeros son entrecrecidos, tienen maclas simples; y los segundos, son alterados, con óx. intercrecido, coronas de reacción y con extinción ondulatoria. Los primeros presenta zonación y bordes reabsorbidos, los segundos muestran nucleación o textura de tamiz, pocas maclas simples y abundantes compuestas.
Clinopiroxeno	12	Cristales subhedrales, prismáticos, con maclas de espada, de tamaño hasta 1mm. Presentan cristales individuales y entrecrecidos con Opx y Cpx, alcanzando tamaños de hasta 2mm.
Ortopiroxeno	5	Cristales subhedrales, hexagonales, de tamaños de 1 mm, individuales y entrecrecidos para formar cristales de hasta 3 mm y seriados. Entrecrecimiento con otros cristales subhedrales prismáticos de plg. Se observan bordes reabsorbidos y golfos de reacción. También recristalización en un cristal anterior y con aspecto pulvulento.
Anfibol	3	Cristales anhedrales de 3 mm. Presenta bordes reabsorbidos y óxidados, golfos de reacción. Las coronas de reacción están compuestas de cpx. Se observa también aglomerados cristales de plg tabular a su alrededor de casi 3 mm.
Olivino	1	Cristales <0,5 mm, subhedrales, fuertes colores de birrefringencia y con textura esquética.
Matriz	10	Características
Ortopiroxeno	2	Cristales incoloros, anhedrales e irregulares menores a 0,3 mm.
Plagioclasa	5	Cristales anhedrales, incoloros y tamaños menores a 0,3 mm.
Clinopiroxeno	3	Cristales anhedrales, incoloros y tamaños menores a 0,3 mm.
vidrio	3	Color café claro e isotrópico.
vesículas	35	De tamaños mayores a 2 mm
Min. Acc.	1	Características
óxidos	1	Cristales isotrópicos de hasta 0,4 mm distribuidos en los minerales y en la matriz.
Observaciones generales:		
Roca con importante cantidad de vesículas. Se ven cristales porfíricos, de tamaños que alcanzan hasta 2 mm. Los cristales principales son plg y Cpx.		
Tipo de roca: Andesita		
a		b
	Aumento óptico: (20x)	
		Aumento óptico: (12,5x)

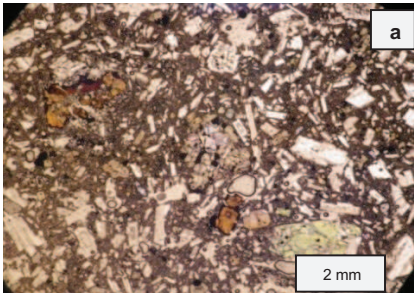
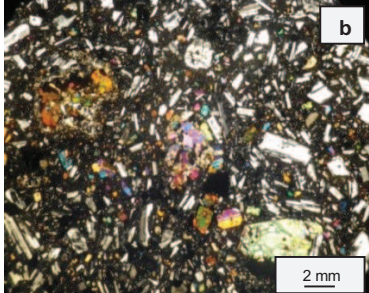
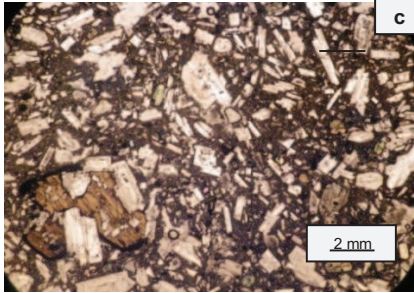
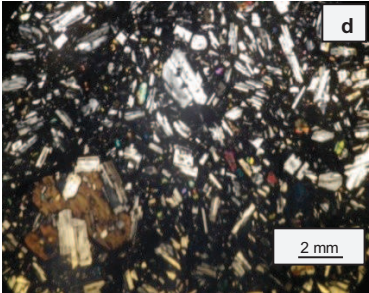
Muestra	REV 51A	
Localidad	Lava 3	
Análisis Microscópico		
Textura	Porfírica de gano medio, glomerofídica y seriada.	
Estructura	Masiva y poco vesiculada.	
Fenocristales	47	Características
Plagioclasa	30	Cristales incoloros, euhedrales, tabulares y subhedrales prismáticos. Los primeros de 2 mm y los segundos hasta 2 mm. Los primeros son entrecrecidos, con maclas simples; los segundos son alterados con intercrecimiento óxidos, coronas de reacción y con extinción ondulatoria. Los primeros presenta zonación y bordes reabsorbidos, los segundos muestran nucleación o textura de tamiz, corazones alterados, maclado simple y compuesto.
Clinopiroxeno	10	Cristales subhedrales, prismáticos, con maclas de espada, de tamaño hasta 1mm. Presentan cristales individuales y entrecrecidos con Opx y Cpx, alcanzando tamaños de hasta 2mm.
Ortopiroxeno	5	Cristales subhedrales hexagonales, maclados y unos pocos están zonados. Su tamaño es casi 1 mm. También se encuentra aglomerados de hasta 3mm. Presenta bordes reabsorbidos y golfos de reacción.
Anfibol	1	Cristales subhedraes, pleocroicos cafés, con tamaños de 2 mm. Como cristales individuales con intercrecimiento de cristales tabulares de plg. Presentan bordes reabsorbidos, coronas de oxidación, corazones alterados, y recristalización de cpx al interior.
Olivino	1	Cristales anhedrales, romboidal, de textura esquelética, alta birrefringencia, de tamaño 1,5 mm. Con golfos de reacción.
Matriz	11	Características
Ortopiroxeno	2	Cristales incoloros, anhedrales e irregulares menores a 0,3 mm.
Plagioclasa	6	Cristales anhedrales, incoloros y tamaños menores a 0,3 mm.
Clinopiroxeno	3	Cristales anhedrales, incoloros y tamaños menores a 0,3 mm.
vidrio	32	Color café claro e isotrópico.
vesículas	35	De forma irregular y tamaños mayores a 0,5 mm y menores a 2mm.
Min. Acc.	1	Características
óxidos	1	Cristales isotrópicos de hasta 0,4 mm ditribuidos en los minerales y en la matriz.
Observaciones generales:		
La roca es fresca con textura porfírica donde se observan fenocristales de anf y px reemplazados por nuevos microcristales de cpx. Las plg.s presentan los bordes reabsorbidos, coronas de reacción, zonación y maclas; además de estar entrecrecidos con cristales de piroxeno. Se ve un relativo erinquecimiento de minerales de tamaño entre 0,6 mm y más microlitos en la matriz.		
Tipo de roca: Andesita basáltica		
a		b
		
Aumento óptico: (12,5x)		

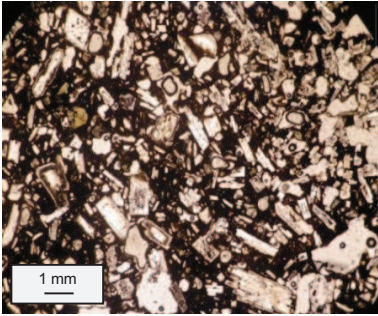
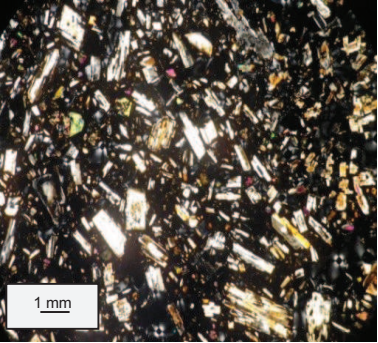
Muestra	REV 56		
Localidad	Lava 4		
Análisis Macroscópico			
Textura	Afanítica masiva		
Fenocristales	8	Características macroscópicas	
Plagioclasa	5	Cristales euhedrales, tabulares y prismáticos de color blanco de hasta 2 mm.	
Piroxenos	3	Cristales aglomerados, de color verde - amarillento, translúcido y vítreo de tamaños hasta 2 mm.	
Matriz	80	Características	
	68	Es de color gris clara con tonalidad rosácea. Rica en óxidos.	
vesículas	12	Pequeñas de entre 0,2 mm.	
Análisis Microscópico			
Textura	Porfírica y seriada		
Estructura	Tranquítica		
Fenocristales	46	Características	
Plagioclasa	30	Cristales subhedrales de 1 mm, zonados, maclados, con bordes re-absorbidos, con corona de reacción y extinción ondulatoria. Los otros cristales tabulares, maclados y entrecrecidos entre ellos.	
Clinopiroxeno	10	Cristales subhedrales, prismáticos, con maclas de espada, de tamaño hasta 1mm. Presentan cristales individuales y entrecrecidos con Opx y Cpx, alcanzando tamaños de hasta 2mm.	
Ortopiroxeno	5	Se observan 2 generaciones de cristales. Uno de tamaño hasta 1m con cristales subhedrales maclados y con bordes reabsorbidos. La otra son cristales <0,5 mm subhedrales. Ortopiroxeno con zonación, cristal de 2 mm.	
Anfibol	1	Cristales anhedrales, oxidados y reemplazados por microcristales de Px y con tamaño hasta 2,5 mm. Presentan coronas de reacción compuestas de px y plg.	
Olivino	< 1	Cristales subhedrales, de hasta 1 mm, alta birrefringencia	
Matriz	16	Características	
Plagioclasa	8	Microlitos. Cristales tabulares de hasta 0,3 mm.	
Ortopiroxeno	3	Cristales anhedrales de hasta 0,3 mm.	
Clinopiroxeno	5	Cristales anhedrales de hasta 0,3 mm.	
vidrio	12	Color café clara e isotrópica.	
vésculas	25	De diferentes tamaños, pequeños y grandes	
Min. Acc.	1	Características	
óxidos	1	Cristales isotrópicos de hasta 0,4 mm ditribuidos en los minerales y en la matriz.	
Observaciones generales:			
Cristales de 3 mm de plg. Zonada y con bordes reabsorbidos. Anfíboles reemplazados por px. Roca fresca y poco vesiculada.			
Tipo de roca: Andesita			
	a		b
(20x)			

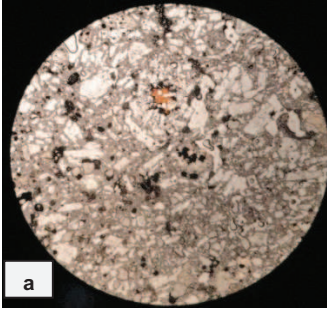
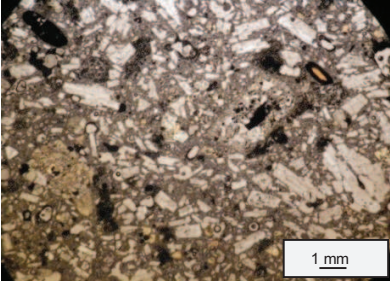
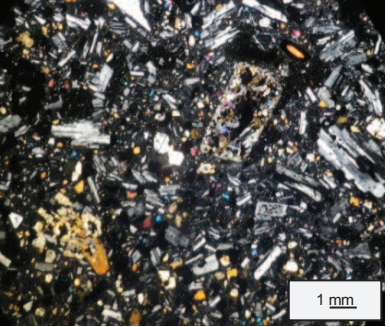
Muestra	REV 55	
Localidad	Lava 4	
Análisis Microscópico		
Textura	Porfírica y seriada	
Estructura	Tranquítica	
Fenocristales	34	Características
Plagioclasa	20	Cristales prismáticos, subhedrales de 2 mm, zonados y maclados, con bordes reabsorbidos y con coronas de reacción. Adicionalmente, otro grupo de cristales euhedrales a subhedrales, tabulares maclados y entrecrecidos, con textura intersertal.
Clinopiroxeno	3	Cristales anhedrales a subhedrales, menores a 1 mm, donde se encuentran rodeados de cristales de opx y plg y anf.
Ortopiroxeno	8	Cristales individuales hexagonales, subhedrales de 2 mm, zonados y macla de espada u otros como aglomerados. Muestran los bordes reabsorbidos e intercrecimiento de ol, cpx y plg (cristales tabulares <0,6 mm).
Anfibol	3	Cristales anhedrales de hasta 1 mm. Muestra bordes de oxidación y entrecrecimiento con cristales de plg. También hay cristales rodeados de plg, cpx y opx de 3 mm.
Matriz	13	Características
Plagioclasa	10	Microlitos. Cristales tabulares de hasta 0,3 mm.
Ortopiroxeno	3	Cristales anhedrales de hasta 0,3 mm.
vidrio	7	Color café oscuro e isotropico.
vesículas	45	Desde 0,5 mm.
Min. Acc.	1	Características
óxidos	1	Cristales isotrópicos de hasta 0,4 mm.
Observaciones generales:		
Aglomerados de opx con hasta 8 mm, y más pequeños. Los 2 tamaños principales de plg y se observan alteración y recristalización alrededor de (L)os cristales de anf. Matriz más vitrea y muy vesiculada.		
Tipo de roca: Andesita		
 <p style="text-align: center;">4,2 mm</p> <p style="text-align: center;">Aumento óptico: (12,5x)</p>  		

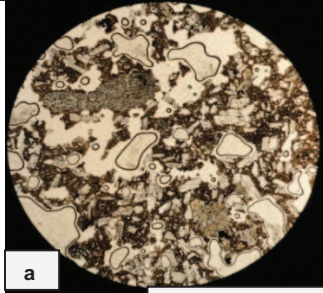
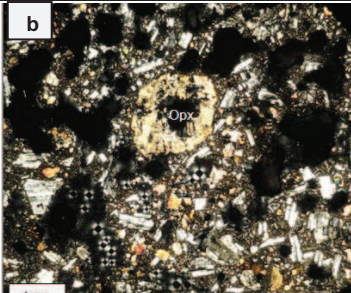
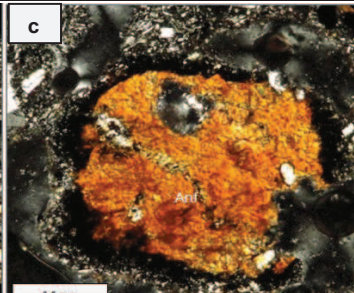
Muestra	REV 49	
Localidad	Lava 4	
Análisis Microscópico		
Textura	Porfírica de grano medio y seriada	
Estructura	Traquítica	
Fenocristales	41	Características
Plagioclasa	26	Cristales subhedrales prismáticos de 1, 5 mm. Presenta zonación, bordes reabsorbidos, coronas de reacción, extinción ondulatoria y maclas simples y compuestas. También se presentan cristales tabulares maclados de 1 mm. Están entrecrecidos con textura glomerofídica.
Clinopiroxeno	8	Cristales subhedrales prismáticos, bordes reabsorbidos, zonación, macla de espada, en cristales individuales y como aglomerados de 1 mm y de hasta 2 mm respectivamente.
Ortopiroxeno	5	Cristales hexagonales, euhedrales y subhedrales con clivaje típico, de 1 mm. Presenta aglomeración alrededor de cpx. Otros cristales son de hasta 0,5 mm.
Anfibol	1	Cristales pleocróicos de color café oscuro, anhedrales, alargados y con bordes de oxidación y de tamaño menor a 1 mm.
Olivino	1	Cristales anhedrales, con alta birrefringencia y fractura típica. Tamaño 0,6 mm.
Matriz	16	Características
Plagioclasa	10	Microlitos. Cristales tabulares de hasta 0,3 mm.
Clinopiroxeno	4	Cristales anhedrales de hasta 0,3 mm.
Ortopiroxeno	2	Cristales anhedrales de hasta 0,3 mm.
vidrio	4	Color café claro e isotrópico.
vesículas	38	Irregulares y desde 0,5 mm
Min. Acc.	1	Características
óxidos	1	Cristales isotrópicos de hasta 0,4 mm.
Observaciones generales:		
La roca es de textura seriada, principalmente plg, de 2 tamaños, al igual que opx. Los clinopiroxenos cristalizan alrededor de opx. La matriz es más cristalina, enriquecida en microcristales.		
Tipo de roca: Andesita basáltica		
 <p style="text-align: center;">4,2 mm</p> <p style="text-align: center;">Aumento óptico: (12,5x)</p> <p style="text-align: center;">Aumento óptico: (20x)</p>	 <p style="text-align: center;">2 mm</p>	

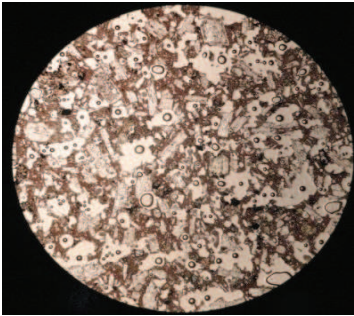
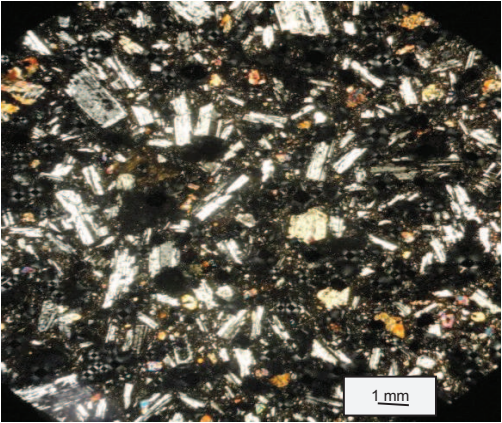
Muestra	REV 605-1 6	
Localidad	Lava 5	
Análisis Microscópico		
Textura	Porfírica y seriada	
Estructura	Masiva y poco vesiculada	
Fenocristales	37	Características
Plagioclasa	20	Cristales subhedrales prismáticos de 1, 5 mm. Presenta zonación, bordes reabsorbidos, coronas de reacción, extinción ondulatoria y maclas simples y compuestas. También cristales tabulares maclados, de 1 mm. Se encuentran entrecrecidos formando aglomerados cristalinos.
Clinopiroxeno	10	Cristales subhedrales prismáticos, bordes reabsorbidos, zonación, macla de espada, en cristales individuales y como aglomerados de 1 mm y de hasta 2 mm respectivamente. Algunos cristales están como corazones en opx.
Ortopiroxeno	5	Cristales subhedrales hexagonales, con clivaje típico, de 1 mm. Presenta aglomeración alrededor de cpx. Otros cristales son de hasta 0,5 mm y recristalización alrededor con px.
Anfibol	2	Cristales anhedrales de 4 mm. Tienen bordes reabsorbidos, coronas de oxidación y golfos de reacción. Además de que los bordes de reacción presenta cristalización de plag, opx, cpx y óxidos.
Matriz	7	Características
Plagioclasa	3	Microlitos. Cristales tabulares de hasta 0,3 mm.
Clinopiroxeno	2	Cristales anhedrales de hasta 0,3 mm.
Ortopiroxeno	2	Cristales anhedrales de hasta 0,3 mm.
vidrio	20	Color café oscuro.
vesículals	35	De diferentes tamaños, pequeños y grandes
Min. Acc.	1	Características
óxidos	1	Cristales isotrópicos de hasta 0,4 mm.
Observaciones generales:		
La lámina está muy gruesa. Se distinguen unicamente roca fresca con textura porfírica, fenocristales de plg. prismática y tabular. Aglomerados de plg y pxo. No se puede identificar bien los pxos.		
Tipo de roca: Andesita		
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  <p>a</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>b</p> </div> </div> <div style="text-align: center; margin-top: 20px;"> <p>Aumento óptico: (12,5x)</p> </div>		

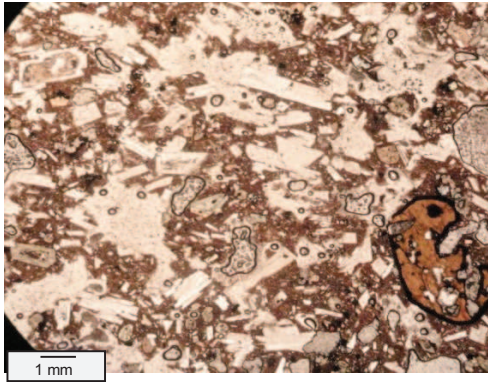
Muestra	REV 605-2 7	
Localidad	Lava 5	
Análisis Microscópico		
Textura	Porfírica y seriada	
Estructura	Masiva y poco vesiculada	
Fenocristales	38	Características
Plagioclasa	20	Se observan cristales de la 1G y 2G. La 1G presenta cristales anhedral, zonados, con bordes reabsorbidos y con extinción ondulatoria. La 2G tiene cristales euhedrales, tabulares de hasta 1 mm, con maclas y con entrecrecimiento con otros cristales. Extin(d)ión desde el interior al exterior en lo cristales subhedrales prismáticos con corona de reacción.
Clinopiroxeno	10	Cristales subhedrales individuales que alcanzan los 2 mm. Se presenta como cristales individuales verdosos y como aglomerados. Presentan maclas de espada.
Ortopiroxeno	5	Cristales subhedrales, hexagonales, de color amarillo a café pálidos, extinción paralela, de tamaño hasta 1 mm. También se encuentran como aglomerados. Presenta bordes de oxidación y maclas tipo espada.
Anfibol	3	Cristales anhedral de hasta 2 mm y con entrecrecimiento de plg y textura intersertal. Presentan bordes reabsorbidos, golfos de reacción, corona de reacción donde cristaliza Cpx y plg. Otros cristales se observan ya reemplazados aunque mantienen la forma del cristal.
Matriz	12	Características
Plagioclasa	6	Microlitos. Cristales aciculares de hasta 0,3 mm.
Clinopiroxeno	4	Cristales anhedral de hasta 0,3 mm.
Ortopiroxeno	2	Cristales anhedral de hasta 0,3 mm.
vidrio	34	Color café oscuro e isotrópico.
vesículas	15	De tamaños variados, desde 1 mm hasta 4 mm.
Min. Acc.	1	Características
óxidos	1	Cristales isotrópicos de hasta 0,4 mm.
Observaciones generales:		
La lámina está gruesa y se confunden los colores de birrefringencia. Únicamente se distinguen los cristales de plg. y piroxeno.		
Tipo de roca: Andesita		
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content;"> Aumento óptico: (12,5x) </div>		
		

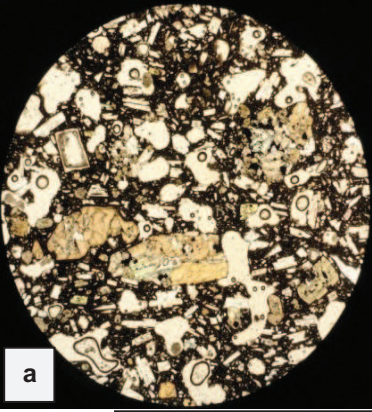

Muestra	REV 605-3 8	
Localidad	Lava 5	
Análisis Microscópico		
Textura	Porfírica y seriada	
Estructura	Masiva y poco vesiculada	
Fenocristales	36	Características
Plagioclasa	20	Se observan cristales euhedrales y subhedrales de dos tamaños preferenciales, de entre 2 y 1 mm.
Clinopiroxeno	10	Cristales subhedrales aglomerados e individuales desde 1 mm. Presentan maclas de espada
Ortopiroxeno	3	Se ven cristales amarillentos, subhedrales casi hexagonales.
Anfibol	3	Cristales anhedrales de hasta 2 mm y con entrecrecimiento de plg.
Matriz	18	Características
Plagioclasa	10	Microlitos. Cristales tabulares de hasta 0,3 mm.
Clinopiroxeno	5	Cristales anhedrales de hasta 0,3 mm.
Ortopiroxeno	3	Cristales anhedrales de hasta 0,3 mm.
vidrio	25	Color café oscuro e isotrópico.
vesículas	20	De tamaños variados, desde 1 mm hasta 4 mm.
Min. Acc.	1	Características
óxidos	1	Cristales isotrópicos de hasta 0,3 mm.
Observaciones generales:		
Lamina gruesa. Se distinguen la textura porfírica de la roca y los fenocristales de plg y Cpx de hasta 2 mm en la matriz. Matriz vítrea.		
Tipo de roca: Andesita		
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;"> Aumento óptico: (12,5x) </div>	<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;">  <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-top: 5px;">a</div> </div>	
	<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;">  <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-top: 5px;">b</div> </div>	

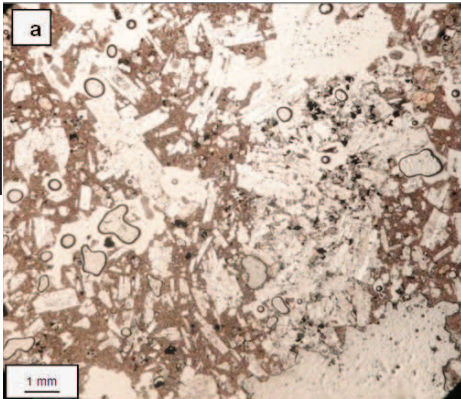
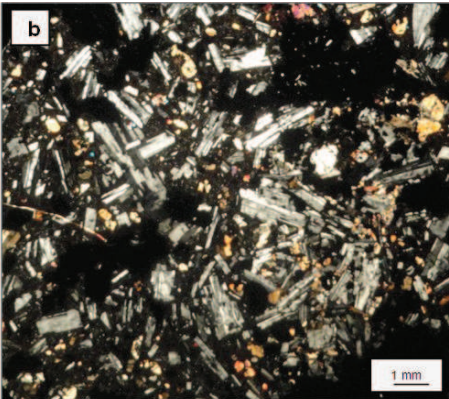
Muestra	REV 62	
Localidad	Lava 6	
Análisis Microscópico		
Textura	Profirítica seriada	
Estructura	Escoréacea	
Fenocristales	23	Características
Plagioclasa	15	Cristales de 1G son subhedrales a anhedrales, incoloros, de tamaño hasta 2 mm. Son irregulares, con zonación, golfos de reacción, bordes reabsorbidos. Los cristales son tabulares, euhedrales, de tamaños hasta 1 mm. Presentan entrecrecimiento, maclas de Carlsbad y con textura pulvurulenta y de panal.
Clinopiroxeno	5	Cristales subhedrales, prismáticos, verdosos, de tamaño hasta 2,5 mm y se presenta como cristales individuales
Ortopiroxeno	2	Cristales subhedrales, amarillo pálidos, hexagonales, macla de espada y tamaños de 0,8 mm.
Anfibol	1	Cristales anhedrales de hasta 3 mm. En algunos casos se encuentran cristales individuales y con coronas de oxidación, otros presentan una tipo aureola a su alrededor donde se observan cristales de plg y Cpx. Se observan golfos de reacción, bordes reabsorbidos y coronas de reacción con microcristales de plg y cpx.
Matriz	9	Características
Plagioclasa	6	Microlitos aciculares < 0,2 mm.
Clinopiroxeno	2	Cristales anhedrales de hasta 0,3 mm.
Ortopiroxeno	1	Cristales anhedrales de hasta 0,3 mm.
vidrio	46	Color café oscuro e Isótropico.
vesículas	20	De diferentes tamaños, pequeños y grandes
Min. Acc.	2	Características
óxidos	2	Cristales isotrópicos de hasta 0,4 mm.
Observaciones generales:		
Se observan cristales de anf que son reemplazados por cristales tabulares de plg, textura intersertal y tamaños de hasta 4 mm. Los fenocristales promedio alcanzan alrededor de 1,5 mm. Principalmente se distinguen plg y Cpx, respectivamente como cristales euhedrales y subhedrales, individuales, como aglomerados y presentan maclas simples (Tipo Carlsbad y de espada).		
Tipo de roca: Andesita		
 <p>a</p> <p>4,2 mm</p>	 <p>b</p> <p>1 mm</p>	 <p>c</p> <p>1 mm</p>
<p>Aumento óptico: (12,5x)</p>		 <p>d</p> <p>1 mm</p>

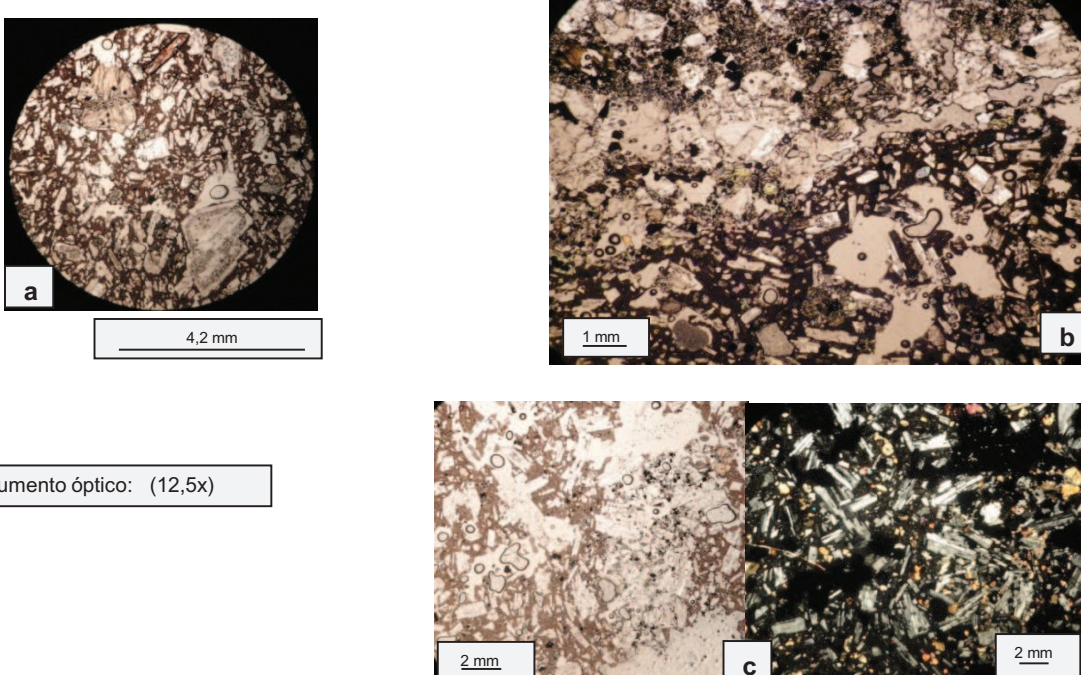
Muestra	REV 64	
Localidad	Lava 8	
Análisis Macroscópico		
Textura	Afanítica	
Fenocristales	11	Características macroscópicas
Plagioclasa	7	Cristales euhedrales, tabulares y prismáticos de color blanco de hasta 1 mm.
Piroxeno	3	Cristales aglomerados, de color verde - amarillento, oxidados, translúcidos y vitreos de tamaños hasta 3 mm.
Anfíbol	1	Cristales subhedrales, negros, de brillo vítreo, tamaño 1mm, hábito prismático con golfos reabsorbidos y con recristalizaciones de plg. y piroxeno hacia el centro.
Matriz	59	Características
	20	Matriz vítrea de color gris oscuro
vesículas	30	Con tamaños desde 0,5 mm y hasta 2 cm.
Observaciones Generales		
La roca presenta un estructura tipo lente que al parecer es un xenolito granodiorítico.		
Análisis Microscópico		
Textura	Porfirítica de grano medio y seriada	
Estructura	Escoriaécea	
Fenocristales	26	Características
Plagioclasa	15	Cristales anhedrales mayores a 1,5 mm que muestran bordes reabsorbidos, corona de reacción, zonación, macla de Carlsbad y con extinción ondulatoria (de adentro hacia afuera), además con golfos de reacción y maclas tipo microclina. Los otros cristales son subhedrales, tabulares, maclados y zonados y de tamaños de hasta 1,5 mm.
Clinopiroxeno	6	Cristales subhedrales, y anhedrales, irregulares, individuales y como aglomerados que alcanzan hasta 1 mm y hasta 2 mm, respectivamente. Además existe reemplamiento del opx e intercrecimiento con el mismo.
Ortopiroxeno	3	Cristales anhedrales, hexagonales, amarillo pálido, con cristales de hasta 1 mm, con macla de espada, bordes de oxidación y golfos reabsorbidos e intercrec..
Anfíbol	1	Cristales anhedrales, de diferentes tamaños hasta 1 mm. Muestra bordes reabsorbidos, coronas de reacción, golfos de reacción,
Olivino	1	? Como cristales anhedral , <0,5 mm que rodean a los cristales de anf.
Matriz	8	Características
Plagioclasa	3	Microlitos. Cristales tabulares de hasta 0,3 mm.
Clinopiroxeno	4	Cristales anhedrales de hasta 0,3 mm.
Ortopiroxeno	1	Cristales anhedrales de hasta 0,3 mm.
vidrio	10	Color café oscuro e lstrópico.
vesículas	55	Irregulares de tamaños > 3mm.
Min. Acc.	1	Características
óxidos	1	Cristales isotrópicos de hasta 0,4 mm.
Observaciones generales:		
Roca muy escoriaécea y porfirítica, con pocos fenocristales y microcristales en la matriz. Presenta los cristales más grandes de plg y cpx que se encuentran distribuidas en la matriz.		
Tipo de roca: Andesita basáltica		
 <p>a</p> <p>4,2 mm</p>	 <p>b</p> <p>Opx</p> <p>1 mm</p>	 <p>c</p> <p>Anf</p> <p>0.5 mm</p>

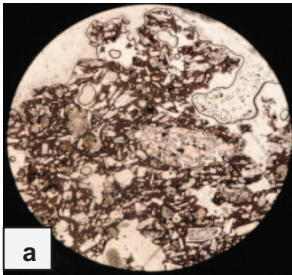
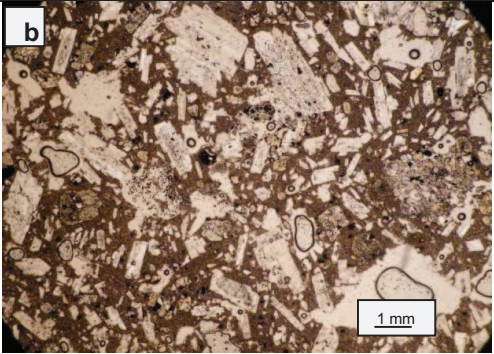
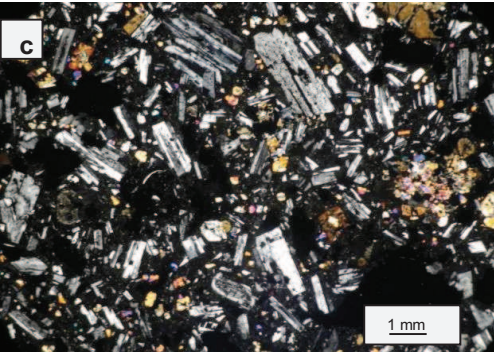
Muestra	REV 65		
Localidad	Lava 8		
Análisis Microscópico			
Textura	Profirítica de grano medio y seriada		
Estructura	Escoréacea		
Fenocristales	27	Características	
Plagioclasa	12	Se observan cristales de la 1G y 2G. La 1G presenta cristales anhedrales, zonados, con bordes reabsorbidos y con extinción ondulatoria. La 2G tiene cristales euhedrales, tabulares de hasta 1 mm, con maclas y con entrecrecimiento con otros cristales. extinción desde el interior al exterior en lo cristales subhedrales prismáticos con corona de reacción.	
Clinopiroxeno	8	Cristales incoloros, subhedrales, anhedrales y esqueléticos que están recristalizando a partir de opx. Tienen tamaños de entre 1 y 2 mm. Presenta entrecrecimiento y aglomerados <1 mm.	
Ortopiroxeno	5	Cristales incoloros, anhedrales de hasta 1 mm, con corona de reacción, macla de espada y bordes reabsorbidos. Se presentan individuales y como aglomerados o entrecrecidos	
Anfibol	1	Cristales anhedrales, irregulares, <1mm, con corona de oxidación y bordes reabsorbidos y coronas de reacción con microcristales de cpx, plg en algunos casos y óx	
Olivino	1	Cristales incoloros, de relieve alto, fuertes colores de birrefringencia, anhedrales de hasta 1 mm, con textura esquelética con bodes reabsorbidos y golfos de reacción.	
Matriz	16	Características	
Plagioclasa	8	Microlitos. Cristales tabulares de hasta 0,2 mm.	
Clinopiroxeno	5	Cristales anhedrales de hasta 0,2 mm.	
Ortopiroxeno	3	Cristales anhedrales de hasta 0,2 mm.	
vidrio	16	Color café oscuro e ls(ó)tropico.	
vesículas	40	De tamaños mayores a 0,5 mm	
Min. Acc.	1	Características	
óxidos	1	Cristales euhedrales e isotrópicos de hasta 0,4 mm.	
Observaciones generales:			
Roca vesiculada, porfirítica y seriada. Los cristales están como alterados, son pocos fenocristales, principalmente de plg y cpx. La matriz es enriquecida con microcristales principalmente de px y plg.			
Tipo de roca: Andesita basáltica			
 <p style="text-align: center;">4,2 mm</p>	a	b	 <p style="text-align: center;">1 mm</p>
Aumento óptico: (12,5x)			

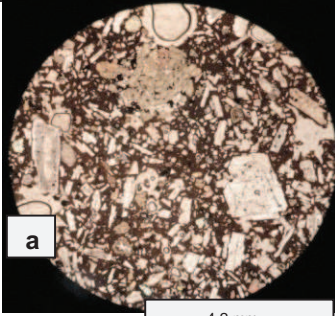
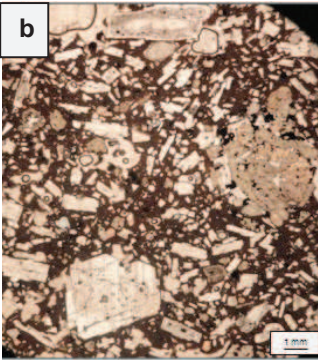
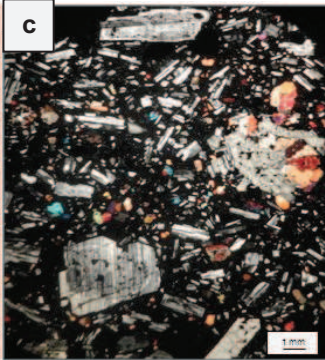
Muestra	REV 66	
Localidad	Lava 9	
Análisis Macroscópico		
Textura	Porfírica de grano medio	
Fenocristales	10	Características macroscópicas
Plagioclasa	7	Cristales euhedrales, tabulares y prismáticos de color blanco de hasta 1 mm.
Piroxeno	3	Cristales aglomerados, de color verde, translúcido y vitreo de tamaños hasta 1,5 mm.
Matriz	75	Características
vidrio	67	Color gris oscura y vitrea.
vesículas	15	De tamaño promedio 10 mm.
Análisis Microscópico		
Textura	Porfírica de grano medio y seriada	
Estructura	Vesiculada a escoréacea	
Fenocristales	35	Características
Plagioclasa	20	Cristales anhedrales mayores a 1,5 mm que muestran bordes reabsorbidos, corona de reacción, zonación, con golfos de reacción y maclas tipo microclina, macla de Carlsbad y extinción ondulatoria (de adentro hacia afuera). Los otros cristales son subhedrales, tabulares, maclados, zonados y de tamaños máximos de 1,5 mm.
Clinopiroxeno	10	Cristales subhedrales, y anhedrales, irregulares, individuales y glomerofídicos que alcanzan hasta 1 mm y 2 mm, respectivamente. Además, reemplazamiento por fenocristales de opx.
Ortopiroxeno	3	Cristales subhedrales, hexagonales, amarillo pálido, con cristales de hasta 1 mm, con macla de espada y bordes de oxidación.
Anfibol	1	Cristales subhedrales de color café, de tamaño < 1mm, extinción a 45°, clivaje característico. Presenta evidentes bordes de oxidación color negro.
Olivino	1	Cristales anhedrales < 1mm y con textura esquelética.
Matriz	7	Características
Plagioclasa	4	Cristales subhedrales, tabulares y <0,3 mm.
Clinopiroxeno	2	Cristales anhedrales <0,3 mm.
Ortopiroxeno	1	Cristales anhedrales <0,3 mm.
vidrio	12	Café oscuro e isotrópico
vesículas	45	Irregulares de tamaños > 1mm.
Min. Acc.	1	Características
óxidos	1	Cristales euhedrales al interior de los otros cristales y en la matriz. Tamaños de hasta 0,1 mm.
Observaciones generales:		
Roca con muy intensa vesicularidad. Los cristales que predomina son los de 2G de plg. La matriz presenta importante número de microcristales.		
Tipo de roca: Andesita		
Aumento óptico: (12,5x)		

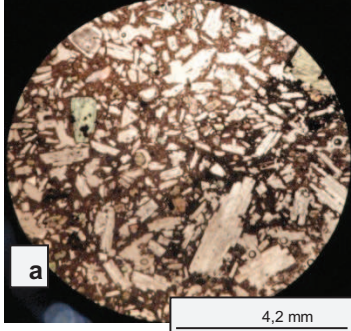
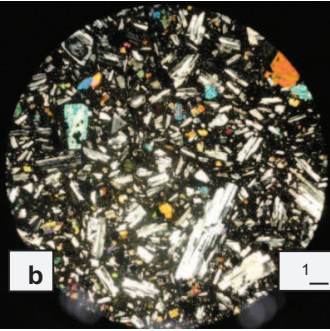
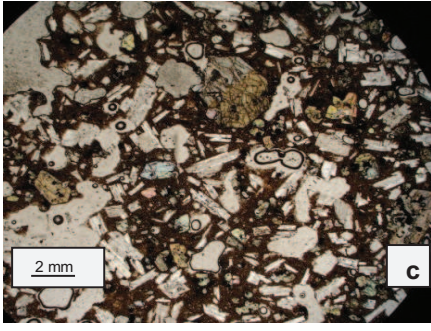
Muestra	REV 67	
Localidad	Lava 10	
Análisis Macroscópico		
Textura	Porfírica inequigranular	
Fenocristales	13	Características macroscópicas
Plagioclasa	10	Cristales euhedrales, tabulares y prismáticos de color blanco de hasta 0,5 mm.
Piroxeno	3	Cristales aglomerados, de color verde, translúcido y vítreo de tamaños hasta 1,5 mm.
Matriz	27	Características
vidrio	67	Color gris oscura y vítrea.
vesículas	60	De tamaños entre 1 a 5mm de diámetro.
Análisis Microscópico		
Textura	Porfírica de grano grueso y seriada	
Estructura	Inequigranular vesiculada	
Fenocristales	41	Características
Plagioclasa	25	Cristales anhedrales Presentan golfos de reacción y maclas tipo microclina. Los otros cristales son tabulares, maclados, zonados y con corona pulverulenta.
Clinopiroxeno	10	Cristales subhedrales, y anhedrales, irregulares, individuales y en aglomerados. Muestran reemplamiento a opx y varían desde cristales de 0,5 mm hasta 2 mm.
Ortopiroxeno	4	Cristales, con pleocroismo con tonalidad verdosa, rosacea amarillo pálido, subhedrales, hexagonales, con cristales de hasta 1 mm, con macla de espada y bordes de oxidación.
Anfibol	1	Cristales subhedral, de color café, tamaño < 1mm, extinción a 45°, clivaje característico. Posee evidentes bordes de oxidación color negro.
Olivino	1	Cristales anhedrales < 1mm y con textura esquelética.
Matriz	9	Características
Plagioclasa	5	Cristales subhedrales, tabulares y <0,3 mm.
Clinopiroxeno	3	Cristales anhedrales <0,3 mm.
Ortopiroxeno	1	Cristales anhedrales <0,3 mm.
vidrio	4	Café oscuro e isotrópico
vesículas	45	Irregulares de tamaños > 1mm.
Min. Acc.	1	Características
óxidos	1	Cristales euhedrales al interior de los otros cristales y en la matriz. Tamaños de hasta 0,1 mm.
Observaciones generales:		
Roca con impotante vesicularidad. Los cristales que predomina son los de 2G de plg. La matriz presenta importante número de microcristales.		
Tipo de roca: Andesita		
 <p style="text-align: center;">4,2 mm</p>	 <p style="text-align: center;">1 mm</p>	
Aumento óptico: (12,5x)		

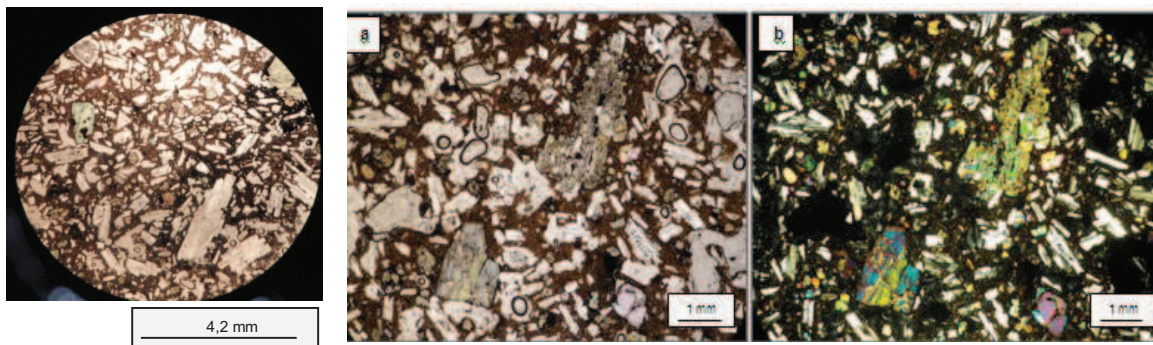
Muestra	REV 68	
Localidad	Lava 11	
Análisis Macroscópico		
Textura	Porfírica de grano medio y seriada.	
Fenocristales	13	Características macroscópicas
Plagioclasa	10	Cristales euhedrales, tabulares y prismáticos de color blanco de hasta 1mm.
Piroxeno	3	Cristales aglomerados, de color verde, translúcido y vítreo.
Matriz	72	Características
	60	De color negro
vesículas	15	Pequeñas desde 0,5 mm hasta 2 mm.
Análisis Microscópico		
Textura	Porfírica de grano medio y seriada	
Estructura	Poco escoriaécea	
Fenocristales	41	Características
Plagioclasa	25	Cristales incoloros, anhedrales a subhedrales de forma prismática donde los cristales alcanzan hasta 4 mm, y otros cristales euhedrales a subhedrales, tabulares y con tamaños hasta 2mm. Algunos presentan coronas de reacción, zonación, maclas y extinción ondulatoria. y aglomerados alrededor de anf.
Clinopiroxeno	12	Cristales más desarrollados, alcanzan tamaños de hasta 3mm formado aglomeraciones, e individualmente alcanzan 1 mm.
Ortopiroxeno	3	Cristales subhedrales hexagonales que alcanzan tamaños de hasta 1mm. Y una 2G tiene cristales de 0,5 mm, anhedrales y como aglomerados.
Anfibol	1	Cristales anhedrales, con pleocroismo de color café y tamaños de hasta 1 mm. Presentan bordes de oxidación de color negro.
Matriz	10	Características
Plagioclasa	3	Cristales prismáticos, que alcanzan hasta 0,5 mm, subhedrales
Clinopiroxeno	5	Microcristales anhedrales de hasta 0,4 mm.
Ortopiroxeno	2	Cristales subhedrales, hexagonales, de tamaño <0,5 mm, con macla de espada.
vidrio	18	Café oscuro e isotrópico
vesículas	30	Irregulares de tamaños > 1mm.
Min. Acc.	1	
óxidos	1	Cristales euhedrales al interior de los otros cristales y en la matriz. Tamaños de hasta 0,
Observaciones generales:		
La roca es fresca, un poco escoriaécea y porfírica de grano medio a fino. Los fenocristales de plg. de la 1G son más grandes y están en menor número. Los de la 2G son tabulares y maclados. Hay aglomerados de fenocristales de cpx de hasta 2,5 mm. También se observan agregados de microcristales, posiblemente resultado del reemplazo de fenocristales de anf.		
Tipo de roca: Andesita basáltica		
<p>Aumento óptico: (12,5x)</p>		

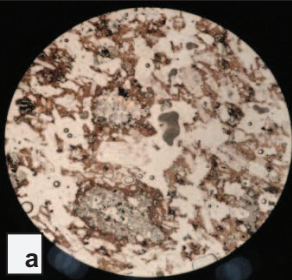
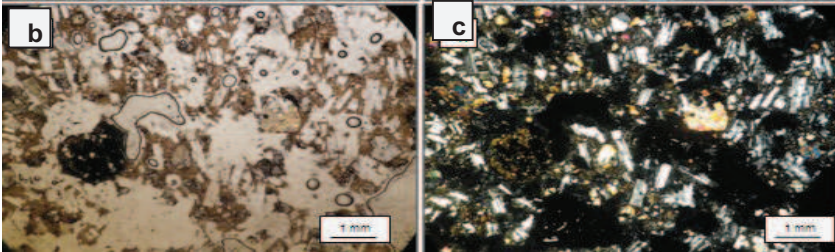
Muestra	REV 69a	
Localidad	Lava 11	
Análisis Microscópico		
Textura	Porfírica de grano medio y seriada	
Estructura	Traquitica	
Fenocristales	46	Características
Plagioclasa	25	Cristales subhedrales, prismáticos, de 1G hasta 2, 5 mm. Los cristales de 2G son tabulares y prismáticos de hasta 1 mm. Con coronas de reacción a modo pulverulento, maclas de Carlsbad y en casos de entrecrecimiento se observa cpx rellenando los espacios entre los cristales.
Clinopiroxeno	15	Cristales color pardo pálido, subhedrales, irregulares y tamaños hasta 3 mm. Presentan bordes reabsorbidos, y están distribuidos de manera individual y <u>aglomerática</u> .
Ortopiroxeno	3	Fenocristales pleocroicos de coloración verdosa, subhedrales, y con tamaños variados.*Cristales menores a 0,5 mm subhedrales y octogonales.
Anfibol	2	En los enclaves gabroicos y como cristales anhedrales alargados, con bordes de oxidación.
Olivino	1	Cristales anhedrales, alto relieve, fractura típica, tamaño hasta 1 mm. Presentan bordes reabsorbidos y golfos de reacción y textura esquelética.
Matriz	10	Características
Plagioclasa	6	Cristales prismáticos, que alcanzan hasta 0,5 mm, subhedrales
Clinopiroxeno	4	Microcristales pseudo prismáticos, de hasta 0,4 mm.
vidrio	18	Color café oscuro e isotrópico.
vesículas	25	De tamaño < 3mm.
Min. Acc.	1	Características
óxidos	1	Cristales euhedrales al interior de los otros cristales y en la matriz. Tamaños de hasta 0,1 mm.
Observaciones generales:		
Se encuentra el contacto entre material diorítico (2/3plg+Px+anf(Hb))+óxidos alterados y la matriz. Se observa principalmente fenocristales de plg, cpx y anf. La textura porfírica es de grano fino y textura intersertal.		
Tipo de roca: Andesita basáltica		
		
Aumento óptico: (12,5x)		

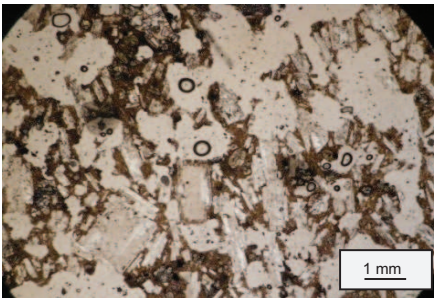
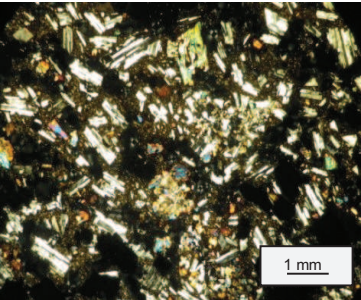
Muestra	REV 69b	
Localidad	Lava 11	
Análisis Microscópico		
Textura	Porfírica y seriada	
Estructura	Inequigranular	
Fenocristales	45	Características
Plagioclasa	25	Cristales de 1G hast 2, 5 mm, con coronas de reacción, zonación, maclas simples y polisintéticas. Los cristales de la 2G tabulares y prismáticos de hasta 1 mm. Con coronas de reacción entre el borde y el núcleo del cristal. Algunos se aglomeran.
Clinopiroxeno	15	Cristales subherales, prismáticos de hasta 3 mm. Presentan aglomeraciones de cristales verdosos que presentan entrecrecimiento.
Ortopiroxeno	3	Cristales menores a 0,5 mm subhedrales y hexagonales. Se encuentran individuales y como aglomerados de tamaños variados. Presentan maclas tipo espada, simples y múltiples.
Anfibol	2	En los enclaves gabroicos de casi 4 mm que aparecen en la matriz, y como cristales reemplazados por cpx y presenta bordes de oxidación.
Matriz	12	Características
Plagioclasa	6	Cristales prismáticos, que alcanzan hasta 0,5 mm, subhedrales
Clinopiroxeno	4	Microcristales anhedrales, irregulares de hasta 0,4 mm.
Ortopiroxeno	2	Microcristales pseudo prismáticos, con maclas de espada, tamaño hasta 0,4 mm y se encuentra distribuida en la matriz.
vidrio	17	Color café oscuro e isotrópico.
vesículas	25	De tamaño < 3mm.
Min. Acc.	1	Características
óxidos	1	Cristales euhedrales al interior de los otros cristales y en la matriz. Tamaños de hasta 0,1 mm.
Observaciones generales:		
Se encuentra enclaves de cristales de cpx y anf, reecristalizado y reemplazado, respectivamente. Y se observa un buen desarrollo de los fenocristales de plg , Cpx y Anf.		
Tipo de roca: Andesita basáltica		
 <p>a</p> <p>4,2 mm</p>	 <p>b</p> <p>1 mm</p>	
<p>Aumento óptico: (12,5x)</p>	 <p>c</p> <p>1 mm</p>	

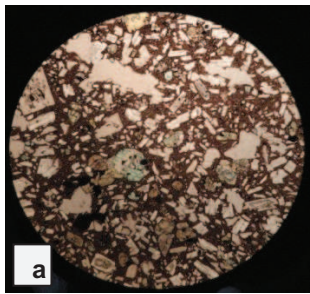
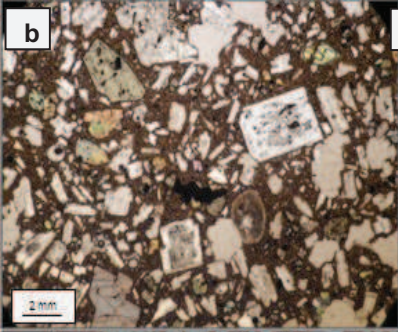
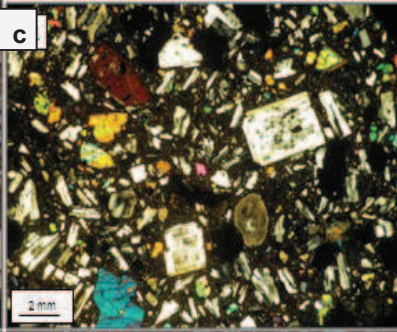
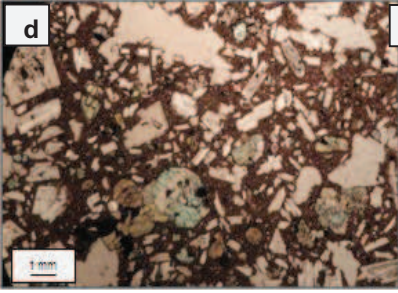
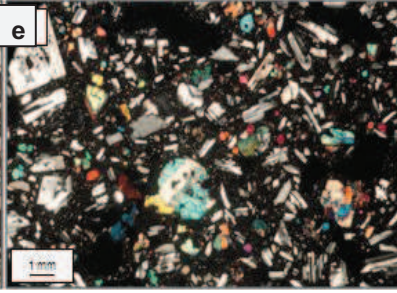
Muestra	REV 70	
Localidad	Lava 13	
Análisis Macroscópico		
Textura	Porfírica e inequigranular	
Fenocristales	25	Características macroscópicas
Plagioclasa	20	Cristales euhedrales, de hábito tabular y prismático. Son de color blanco y con tamaños que van entre 1 a 5 mm.
Piroxeno	5	Cristales aglomerados, de color verde, translúcido y vítreo, y menores a 1mm.
Matriz	45	Características
vidrio	15	Masiva, de color negra
vesículas	30	de tamaño <1mm
Análisis Microscópico		
Textura	Porfírica y seriada	
Estructura	Vesicular e inequigranular	
Fenocristales	35	Características
Plagioclasa	20	Los cristales de la 1G son subhedrales, prismáticos, con tamaños de 2 mm y presentan extinción ondulatoria, bordes de oxidación, golfos de reacción, zonación y maclas tipo Carlsbad y polisintéticas. Los cristales de la 2G son tabulares, euhedrales y tamaños de hasta 4mm. Presentan entrecrecimiento, maclas de Carlsbad y algunos cristales muestran coronas de reacción en la parte central.
Clinopiroxeno	10	Cristales incoloros, subhedrales, prismáticos, de hasta 2mm. Están como cristales individuales y como aglomerados.
Ortopiroxeno	3	Cristales pleocroicos de color amarillo pálido, euhedrales, hexagonales, clivaje y extinción típica (a casi 45°) y tamaños de hasta 0,8 mm. Presenta maclas tipo espada, y se muestran individuales y otros con entrecrecimiento y reemplazamiento de sus bordes por cpx.
Anfibol	2	Cristal de hasta 6 mm y que está rodeado por plg Cpx y Opx y óxido a modo de una corona con cristales tabulares y prismáticos alrededor.
Matriz	9	Características
Plagioclasa	5	Cristales anhedrales, incoloros y de tamaño < 0,2 mm.
Clinopiroxeno	3	Cristales anhedrales, incoloros y de tamaño < 0,2 mm, con bordes de oxidación.
Ortopiroxeno	1	Cristales euhedrales, color amarillo pálido de tamaño < 0,2 mm.
vidrio	20	Café oscuro e isotrópico
vesículas	35	De tamaños mayores a 1 mm
Min. Acc.	1	Características
óxidos	1	Cristales euhedrales al interior de los otros cristales y en la matriz. Tamaños de hasta 0,1 mm.
Observaciones generales:		
La roca está fresca, presenta fenocristales de plg y Cpx, el cual es más abundante. Se encuentra como aglomerados o enclaves. Los microcristales en la matriz son principalmente de plg, Opx y Cpx.		
Tipo de roca: Andesita basáltica		
 <p>a</p> <p>4,2 mm</p>	 <p>b</p> <p>1 mm</p>	 <p>c</p> <p>1 mm</p>
Aumento óptico: (12,5x)		

Muestra	REV 71	
Localidad	Lava 14	
Análisis Macroscópico		
Textura	Porfírica e inequigranular	
Fenocristales	20	Características macroscópicas
Plagioclasa	15	Cristales euhedrales, tabulares y prismáticos de color blanco.
Piroxeno	5	Cristales aglomerados, de color verde, translúcido y vítreo
Matriz	73	Características
vidrio	66	Masiva, de color negra
vesículas	7	Presentan tamaños <1mm hasta 1 cm
Análisis Microscópico		
Textura	Porfírica y seriada	
Estructura	Vesicular y pseudo traquítica	
Fenocristales	40	Características
Plagioclasa	22	Cristales subhedrales de la 1G con tamaños de 1,5 mm. Presentan coronas de reacción de aspecto pulverulento entre el núcleo y el borde de los cristales, zonación, maclas de Carlsbad, bordes reabsorbidos. Los cristales de la 2G son euhedrales, maclados (macla de Carlsbad y polisintéticas) y entrecrecimiento de hasta 4 mm.
Clinopiroxeno	12	Cristales euhedrales y subhedrales, pleocroicos de color verde, prismático, subangulares e irregulares. Tamaño alcanza los 3,5 mm. Se encuentra maclas y cristalizando en los bordes de otros cristales como plg.
Ortopiroxeno	5	Cristales euhedrales, de color amarillo pálido, hexagonales, clivaje y extinción típicas, cristales de hasta 1 mm. Presenta macla de espada y se encuentra como cristales individuales y com aglomerados.
Anfibol	1	Presentan cristales anhedrales de color café oscuro. Se muestran reemplazados por microcristales de cpx y óxidos.
Matriz	9	Características
Plagioclasa	5	Cristales anhedrales, icoloros y de tamaño < 0,2 mm.
Clinopiroxeno	3	Cristales anhedrales, icoloros y de tamaño < 0,2 mm. Presenta bordes de oxidación.
Ortopiroxeno	1	Cristales euhedrales, color amarillo pálido de tamaño < 0,2 mm.
vidrio	15	Café oscuro e isotrópico.
vesículas	35	De forma irregular y con tamaños mayores a 1 mm
Min. Acc.	1	Características
óxidos	1	Cristales euhedrales al interior de los otros minerales y en la matriz. S tamaño no supera los 0,1 mm.
Observaciones generales:		
Lámina gruesa. Roca de textura porfírica que solo permite reconocer los fenocristales de plg y Cpx. Los cristales son de tamaños superior a los 2 mm. La matriz es de color café oscuro.		
Tipo de roca: Andesita basáltica		
		
Aumento óptico: (12,5x)		

Muestra	REV 72	
Localidad	Lava 14	
Análisis Microscópico		
Textura	Porfírica y seriada	
Estructura	Semi traquítica	
Fenocristales	46	Características
Plagioclasa	20	Cristales subhedrales de la 1G con tamaños de 1,5 mm. Presentan coronas de reacción, zonación, maclas de Carlsbad, bordes reabsorbidos. Los cristales de la 2G son euhedrales, maclados (macla de Carlsbad y polisintéticas) y entrecrecimiento de hasta 4 mm. Una posible 3G en la matriz.
Clinopiroxeno	20	Cristales euhedrales y subhedrales, pleocroicos de color verde, prismático, subangulares e irregulares. Tamaño alcanza los 2,5 mm. Se encuentra maclas y cristalizando en los bordes de otros cristales como plg.
Ortopiroxeno	5	Cristales euhedrales, de color amarillo pálido, hexagonales, clivaje y extinción típicas, cristales de hasta 1 mm. Presenta maclas de espada y como aglomerados.
Anfibol	1	Se observa la sombra de lo que pudo ser cristales de anfíbol. Se observan ya reemplazados por microcristales de cpx y óxidos.
Matriz	21	Características
Plagioclasa	10	Cristales anhedrales, incoloros y de tamaño < 0,2 mm.
Clinopiroxeno	8	Cristales anhedrales, incoloros, de tamaño < 0,2 mm y presenta bordes de oxidación.
Ortopiroxeno	3	Cristales euhedrales, color amarillo pálido de tamaño < 0,2 mm.
vidrio	17	Color café oscuro e isotrópico.
vesículas	15	De tamaño < 1mm.
Min. Acc.	1	Características
óxidos	1	Cristales euhedrales al interior de los otros cristales y en la matriz. Tamaños de hasta 0,1 mm.
Observaciones generales:		
Andesita con matriz vítrea de color café con fenocristals de plg y Cpx con tamaños que superan los 3 mm. Se observan reemplazamiento de cpx en cristales como opx y anf.		
Tipo de roca: Andesita basáltica		
		
Aumento óptico: (12,5x)		

Muestra	REV 73	
Localidad	Lava 16	
Análisis Macroscópico		
Textura	Porfírica de gano medio	
Fenocristales	13	Características macroscópicas
Plagioclasa	8	Cristales euhedrales, tabulares, blancos y tamaños entre 1 a 3 mm. También se encuentra aglomerados < 0,8 mm.
Piroxeno	5	Cristales transúcidos de color verde oscuro a negros, que se encuentran individualmente y también aglome(t)aos que recubre a otros cristales, y que son hasta de 1 cm.
Matriz	72	Características
vidrio	28	Color negra y vítrea.
Vesículas	15	con diámetro mayor a 0,5 mm
Análisis Microscópico		
Textura	Porfírica y seriada	
Estructura	Vesicular y pseudo traquíta	
Fenocristales	28	Características
Plagioclasa	10	Cristales de la 1G son subhedrales y anhedrales, tamaño de hasta 2,5 mm, zonados, maclas polisintéticas, bordes reabsorbidos. Los cristales de 2G son euhedrales, tabulares, tamaño de hasta 1,5, presentan maclas de carlsbad, y se observan aglomerados de varios cristales. Posible 3G.
Clinopiroxeno	12	Cristales anhedrales, con bordes reabsorbidos y nucleos reemplazando a olivino(?).
Ortopiroxeno	5	Cristales anhedrales y subhedrales de hasta 1 mm, también están aglomerados que alcanzan los 2,5 mm. Presentan entrecrecimiento, maclas de espada, bordes de reacción, y con bordes de cpx. coronas y bordes de cpx.
Anfibol	1	Cristales anhedrales, irregulares con tamaños hasta 2mm. Presenta bordes reabsorbidos, corazones alterados a cpx, golfos de reacción y bordes de oxidación negros y coronas de reacción.
Olivino?	<1	Cristales anhedrales, relieve alto, fractura típica, tamaño < 0,7mm, con golfos de reacción y textura esquelética y reemplazado por cpx.
Matriz	9	Características
Plagioclasa	3	Cristales anhedrales con tamaños <0,1 mm
Clinopiroxeno	6	Cristales anhedrales con tamaños <0,2 mm dispersos individualmente en la matriz.
vidrio	7	Color café oscuro e isotrópico.
vesículas	55	Con tamaño mayor a 2mm.
Min. Acc.	1	Características
óxidos	1	Cristales euhedrales al interior de los otros cristales y en la matriz y < 0,1 mm.
Observaciones generales:		
Matriz rica en microcristales de cpx los cristales que están corroídos, rotos y disueltos. El Opx está rodeado de cpx como corona. Los vestigios de ol. y anf. que mantiene la forma pero es reemplazado por óx.		
Tipo de roca: Andesita		
		
4,2 mm	Aumento óptico: (12,5x)	

Muestra	REV 74	
Localidad	Lava 17	
Análisis Macroscópico		
Textura	Porfírica de grano fino	
Fenocristales	25	Características macroscópicas
Plagioclasa	20	Cristales euhedrales, translúcidos y tabulares con tamaños que no superan los 2 mm.
Piroxenos	5	Cristales verdes vidriosos, transúcidos cuyos tamaños alcanzan hasta 4 mm.
Matriz	%	Características
Vítrea	75	Color negra y con vesículas pequeñas <1mm.
Análisis Microscópico		
Textura	Porfírica y seriada	
Estructura	Vesicular e inequigranular	
Fenocristales	43	Características
Plagioclasa	25	Los cristales de la 1G son anhedrales, con tamaño hasta 2 mm y presentan bordes de oxidación, zonación, coronas de reacción y entrecrecimiento. Los cristales de la 2G son euhedrales tabulares, alcanzan hasta 1,5 mm. Los primeros con maclas de Carlsbad y polisintéticas, coronas de reacción y de aspecto pulverulento entre el borde y el núcleo y algunos con presencia de bordes reabsorbidos.
Clinopiroxeno	15	Cristales anhedrales y subhedrales que alcanzan hasta 2,5 mm. Presentan macla de espada, también tienen textura glomerofídica distribuidas en la matriz.
Ortopiroxeno	3	Cristales anhedrales y subhedrales, hexagonales, clivaje y birrefringencia típicas. Tamaño de 0,3 mm y con bordes de oxidación e intercrecimiento con cpx.
Matriz	18	Características
Clinopiroxeno	10	Cristales anhedrales con tamaños <0,2 mm
Plagioclasa	8	Cristales anhedrales con tamaños <0,2 mm
vidrio	18	Color café oscuro e isotrópico.
vesículas	20	Con tamaño mayor a 2mm.
Min. Acc.	1	Características
óxidos	1	Cristales euhedrales al interior de los otros cristales y en la matriz. Tamaños de hasta 0,1 mm.
Observaciones generales:		
Lámina gruesa. Presencia de fenocristales de tamaños más destacables (3,5 mm), y con desarrollo preponderante de los cristales maclados de Cpx y plg, individuales con aglomerados y se observa recristalización de cpx alrededor de plg.		
Tipo de roca: Andesita		
a		b
		
Aumento óptico: (12,5x)		

Muestra	REV 75	
Localidad	Lava 17	
Análisis Microscópico		
Textura	Porfírica, y seriada	
Estructura	Vesicular	
Fenocristales	54	Características
Plagioclasa	30	Los cristales de la 1G son anhedrales, con tamaño hasta 1 mm y presentan bordes de oxidación, coronas de reacción (panal) y entrecrecimiento. Los cristales de la 2G son euhedrales tabulares, alcanzan hasta 1,5 mm. Los primeros con maclas de Carlsbad y polisintéticas, coronas de reacción y bordes reabsorbidos.
Clinopiroxeno	20	Cristales subhedrales que alcanzan hasta 2 mm. Presentan maclas simples y múltiples de espada, también tienen textura glomerofídica distribuidas en la matriz.
Ortopiroxeno	3	Cristales euhedrales y subhedrales, hexagonales, clivaje y birrefringencia típicas. Tamaño de 0,3 mm y con bordes de oxidación e intercrecimiento con cpx.
Olivino	1	Cristales esqueléticos, de alta birrefringencia de color rosa verdoso, de alto relieve. Tiene golfos de reacción y tiene tamaños < 0,4mm e intercrecido con cpx.
Matriz	18	Características
Clinopiroxeno	10	Cristales anhedrales con tamaños <0,2 mm
Plagioclasa	8	Cristales anhedrales con tamaños <0,2 mm. Posiblemente constituye una 3G de cristales
vidrio	12	Color café oscuro e isotrópico.
vesículas	15	De tamaño < 1mm
Min. Acc.	1	Características
óxidos	1	Cristales euhedrales al interior de los otros cristales y en la matriz. Su tamaño no supera el 0,1 mm.
Observaciones generales:		
Presencia de fenocristales de tamaños más destacables (3,5 mm), y con desarrollo preponderante de los cristales maclados de Cpx yplg y se observa recristalización de cpx alrededor de plg. Los cristales de plg de la 1G están más descompuestos respecto a lavas anteriores.		
Tipo de roca: Andesita basáltica		
 <p>a</p> <p>4,2 mm</p>	 <p>b</p> <p>2 mm</p>	 <p>c</p> <p>2 mm</p>
<p>Aumento óptico: (12,5x)</p>	 <p>d</p> <p>1 mm</p>	 <p>e</p> <p>1 mm</p>

