

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA EN GEOLOGÍA Y PETRÓLEOS**

**CARACTERIZACIÓN DE LOS DINAMISMOS ERUPTIVOS DE LOS  
PERÍODOS DE ACTIVIDAD DE MARZO Y JULIO 2013 DEL VOLCÁN  
TUNGURAHUA, CON BASE EN EL ESTUDIO MORFO-  
GRANULOMÉTRICO, GEOQUÍMICO Y MODAL DE LOS  
PRODUCTOS DE CAÍDA**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO  
GEÓLOGO.**

**NARVAEZ RIVADENEIRA DIEGO FERNANDO**

diego.fe.rn@hotmail.com

**DIRECTORA: DRA. HIDALGO TRUJILLO SILVANA IVONNE**

shidalgo@igepn.edu.ec

**Quito, Septiembre 2014.**

## **DECLARACIÓN**

Yo, Diego Fernando Narvárez Rivadeneira, 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.

---

Diego Narvárez

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Diego Fernando Narváez Rivadeneira, bajo mi supervisión.

---

Dra. Hidalgo Trujillo Silvana Ivonne

**DIRECTORA DEL PROYECTO**

## **AGRADECIMIENTO**

A mis padres, Janet y Patricio, por sus consejos y por siempre confiar en mí y en mis decisiones. Su amor y sacrificio permitieron que yo cumpla una importante meta en mi vida.

A mis hermanos, Gaby, Sebas e Iván, ya que su cariño me ha motivado a seguir adelante.

A la Dra. Silvana Hidalgo por su amistad, confianza y por la oportunidad que me otorgó para demostrar mis conocimientos fuera de las aulas. Al Dr. Benjamin Bernard por guiarme a lo largo de la realización de este proyecto, sus ideas y correcciones mejoraron en gran medida este manuscrito.

A Sébastien Leibrandt, Jean-Luc Le Penneec, Julia Eychenne por su ayuda y aporte a esta investigación.

Al Instituto Geofísico y todo el personal que a diario realiza una gran labor en el monitoreo y que desinteresadamente me han apoyado.

A mis profesores de carrera, sus conocimientos me permitieron y permitirán alcanzar grandes logros. Especialmente al Ing. Bernardo Beate por las correcciones realizadas a este trabajo.

A mí querida novia Alina, que ocupó un espacio en mi corazón durante mi paso por la Poli.

A mis amigos Michelle, Camilo, Dario, Stefanie y Marco por todo su humor y compañía, en especial a Francisco Vásconez por toda su ayuda y amistad en el trabajo.

## **DEDICATORIA**

A mis padres y hermanos.

A mi sobrino Rafael quién empieza su vida.

A mi preciosa novia Alina.

# ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE GENERAL</b> .....	<b>i</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>v</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>xi</b>
<b>ÍNDICE DE ANEXOS</b> .....	<b>xii</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>xiv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xv</b>
<b>1 CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1 ANTECEDENTES.....	1
1.2 JUSTIFICATIVOS .....	2
1.3 OBJETIVOS.....	2
1.3.1 OBJETIVO GENERAL.....	2
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	2
1.4 ALCANCE .....	3
1.5 METODOLOGÍA .....	3
1.6 UBICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	4
1.7 ESTUDIOS RELACIONADOS .....	6
1.8 DESARROLLO DE ESTE TRABAJO.....	6
<b>2 CAPÍTULO II VOLCANISMO CUATERNARIO Y GEOLOGÍA DEL VOLCÁN TUNGURAHUA</b> .....	<b>8</b>
2.1 VOLCANISMO CUATERNARIO DE LOS ANDES ECUATORIANOS .....	8
2.1.1 Cordillera Occidental. ....	9
2.1.1 Callejón Interandino.....	9

2.1.2	Cordillera Real .....	10
2.1.3	Volcanismo de tras arco. ....	10
2.2	VOLCANISMO ACTUAL DE LOS ANDES ECUATORIANOS .....	11
2.3	GEOLOGÍA DEL VOLCÁN TUNGURAHUA .....	13
<b>3</b>	<b>CAPÍTULO III CONTEXTO TEÓRICO .....</b>	<b>15</b>
3.1	FRAGMENTACIÓN MAGMÁTICA.....	15
3.1.1	Fragmentación por desgasificación de volátiles. ....	15
3.2	TIPOS DE ERUPCIONES EN VOLCANES ANDESÍTICOS. ....	17
3.2.1	ERUPCIONES VULCANIANAS.....	17
3.2.2	ERUPCIONES ESTROMBOLIANAS.....	20
3.3	COLUMNA ERUPTIVA .....	20
3.3.1	FORMACIÓN DE COLUMNAS ERUPTIVAS .....	20
3.3.2	INTERACCIÓN MAGMA- AGUA .....	22
3.3.3	EFFECTOS DEL VIENTO SOBRE LA COLUMNA ERUPTIVA.....	23
3.4	DEPÓSITOS PIROCLÁSTICOS .....	24
3.4.1	DEPÓSITOS PIROCLÁSTICOS DE CAÍDA.....	24
3.4.2	DEPÓSITOS DE CORRIENTES DE DENSIDAD PIROCLÁSTICAS. .....	26
3.4.2.1	Surges piroclásticos .....	26
3.4.2.2	Flujos piroclásticos.....	27
<b>4</b>	<b>CAPITULO IV METODOLOGÍA.....</b>	<b>29</b>
4.1	RECOLECCIÓN DE CENIZAS .....	29
4.2	GEOQUÍMICA.....	30
4.3	ESTIMACIÓN DE COMPONENTES.....	31
4.3.1	MATERIAL JUVENIL MICRO-VESICULADO .....	32
4.3.2	ESCORIA (MATERIAL JUVENIL MACRO-VESICULADO).....	33

4.3.3	LÍTICOS DENSOS NEGROS .....	34
4.3.4	PARTÍCULAS OXIDADAS (Rocas del conducto) .....	34
4.3.5	CRISTALES.....	35
4.3.6	PROCEDIMIENTO DE LA ESTIMACIÓN.....	36
4.4	MORFOLOGÍA.....	36
4.4.1	INSTRUMENTOS DE MEDIDA.....	36
4.4.1.1	Morphology G3.....	36
4.5	GRANULOMETRÍA.....	39
4.5.1.1	Tipos de ensayo.....	41
4.5.1.1.1	Ensayo de tamizado .....	41
4.5.1.1.2	Granulometría láser .....	41
4.5.1.1.3	Morphology G3 .....	42
<b>5</b>	<b>CAPÍTULO V ACTIVIDAD ERUPTIVA DEL VOLCÁN</b>	
	<b>TUNGURAHUA DESDE 1999 HASTA AGOSTO 2013 .....</b>	<b>43</b>
5.1	ACTIVIDAD ERUPTIVA DEL VOLCÁN TUNGURAHUA .....	43
5.1.1	ACTIVIDAD ERUPTIVA 1999-2010.....	43
5.1.2	ACTIVIDAD ERUPTIVA, ENERO 2010-JULIO 2013.....	43
<b>6</b>	<b>CAPITULO VI ANÁLISIS Y RESULTADOS .....</b>	<b>49</b>
6.1	CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA DE LA ACTIVIDAD ERUPTIVA ENERO 2010 – JULIO 2013.....	49
6.2	FENOMENOLOGÍA DE LA FASE ERUPTIVA MARZO 2013.....	53
6.2.1	INFORMACIÓN VISUAL, INSTRUMENTAL, MORFOLÓGICA, GRANULOMÉTRICA Y DE COMPONENTES DE LAS CENIZAS.....	55
6.2.1.1	Observaciones instrumentales y visuales .....	56
6.2.1.2	Morfología de los componentes .....	64
6.2.1.3	Componentes.....	68

6.2.1.4	Granulometría .....	70
6.3	FENOMENOLOGÍA DE LA FASE ERUPTIVA JULIO-AGOSTO 2013 ..	73
6.3.1	INFORMACIÓN VISUAL, INSTRUMENTAL, MORFOLÓGICA, GRANULOMÉTRICA Y DE COMPONENTES DE LAS CENIZAS.....	75
6.3.1.1	Observaciones instrumentales y visuales .....	77
6.3.1.2	Morfología de los componentes .....	84
6.3.1.3	Componentes.....	88
6.3.1.4	Granulometría .....	90
<b>7</b>	<b>CAPÍTULO VII DISCUSIÓN.....</b>	<b>92</b>
7.1	DISCUSIÓN.....	92
7.1.1	DESCRIPCIÓN DE LOS DINAMISMOS ERUPTIVOS .....	92
	Modelo de la migración/residencia del magma para la actividad eruptiva Enero 2010-Julio 2013.....	92
7.1.1.1	Dinamismos eruptivos para marzo 2013.....	95
7.1.1.2	Dinamismos eruptivos para julio 2013 .....	99
<b>8</b>	<b>CAPITULO VIII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>103</b>
8.1	CONCLUSIONES .....	103
8.2	RECOMENDACIONES .....	104
	<b>REFERENCIAS CITADAS .....</b>	<b>106</b>
	<b>ABREVIATURAS Y SIGLAS UTILIZADAS .....</b>	<b>116</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>117</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<p>Figura 1-1 Mapa topográfico del volcán Tungurahua. Modificado de Hall et al. (1999), Le Pennec et al. (2005). Curvas de nivel cada 200 m. QA=quebrada Achupashal; QCh=quebrada Chontapamba; QCo= quebrada confesionario; QCs=quebrada Choglontus; QIn=quebrada Ingapirca; QLP=quebrada La Piramide; QM=quebrada Mandur; QMt=quebrada Motilones; QPi=quebrada Pingullo; QPU=quebrada Palmaurcu; QR=quebrada Rea; QRo=quebrada de Romero; QT=quebrada Terremoto. Lineas negras gruesas =carreteras. ....</p>	5
<p>Figura 2-1 Esquema geomorfológico y de las principales fallas del Ecuador continental. BAT Bloque Amotape-Tahuín o cinturón metamórfico del Oro, CAL Cuenca Alamor Lancones, ZNF zona de falla Zanjón-Naranjo, LAF falla Las Aradas, PF falla Peltetec, CMF falla Cosanga-Mendez, BF frente Baños, CPF falla Calacalí-Pallatanga. (Modificado de Spikings et al., 2000; Litherland et al., 1994). ....</p>	8
<p>Figura 2-2 Mapa de ubicación de los volcanes cuaternarios del Ecuador Continental. (Bernard y Andrade, 2011). El volcán Tungurahua cuyo número de leyenda es 79, se ubica en este gráfico al Oeste de la ciudad de Puyo.....</p>	12
<p>Figura 2-3 Vista del cono actual (Tungurahua III) desde la localidad de Choglontus (UTM: 777814, 9835074). En la parte central derecha se observa un desnivel topográfico correspondiente a lavas remanentes (Unidad Tiacos) del cono intermedio (Tungurahua II). (Fotografía: Narváez D.) .....</p>	14
<p>Figura 3-1 a. Ilustración esquemática de la localización de las superficies de saturación y exsolución cuando la nucleación de burbujas es homogénea (nucleación tardía) b. Esquema de la equivalencia de la localización de las superficies de saturación y exsolución cuando la nucleación de burbujas es heterogénea (cuando no hay barreras para la nucleación). Esquema tomado de Cashman et al. (2001).....</p>	16
<p>Figura 3-2 Columna eruptiva que alcanza 8 km snc, vista desde el Observatorio del Volcán Tungurahua (UTM: 778651; 9849744), resultado de una explosión vulcaniana con generación de flujos piroclásticos ocurrida en el volcán Tungurahua el 1 febrero de 2014. (Fotografía: Narváez D.).....</p>	19

Figura 3-3 Esquema de la formación de columnas eruptivas a partir de la desgasificación de los componentes volátiles. Figura tomada de Carey y Bursik (2001).....	22
Figura 3-4 Esquema de la clasificación de columnas eruptivas generadas a partir de un viento volcánico. a. Columna eruptiva fuerte característica de erupciones Vulcanianas. b. Columna eruptiva inclinada característico de erupciones discretas y en condiciones ventosas. Figura tomada de Carey y Bursik (2001).....	23
Figura 3-5 Columna eruptiva débil generada durante la actividad de marzo 2013 (6/03/2013) en el volcán Tungurahua vista desde Pillate (UTM: 776144; 9839102). (Fotografía: Narváez D.).....	24
Figura 3-6 Dispersión de la ceniza durante el periodo eruptivo de julio-agosto 2013. Tomado de Parra et al. (en preparación). ....	25
Figura 3-7 Depósito de flujo piroclástico generado durante la erupción del 14 de julio 2013 en el volcán Tungurahua, quebrada Achupashal. La ausencia del material finogranular en el depósito se debe a su elutriación durante el descenso del flujo piroclástico por los flancos del volcán. ....	28
Figura 4-1 Cenizómetro casero instalado cerca de la estación de monitoreo Retu, ubicado a 3900 msnm en el flanco Norte del volcán Tungurahua.....	30
Figura 4-2 Ejemplo de 4 clases de piroclastos identificados: material juvenil microvesiculado (P), líticos negros densos (D), escoria (S), cristales libres (C). Las partículas oxidadas no son posibles distinguir de las escorias en las imágenes SEM, debido a que la mayoría corresponde a escorias oxidadas.....	32
Figura 4-3 Material juvenil micro-vesiculado presente en las muestras de marzo 2013 observados bajo binocular. Material similar al presente en las muestras de julio 2013.....	33
Figura 4-4 Escorias presentes en las muestras de marzo 2013 observadas bajo binocular. Material similar al presente en las muestras de julio 2013.....	33
Figura 4-5 Líticos densos negros presentes en las muestras de marzo 2013 observadas bajo binocular. Material similar al presente en las muestras de julio 2013. ....	34

Figura 4-6 Partículas oxidadas presentes en las muestras de marzo 2013 observadas bajo binocular. Material similar al presente en las muestras de julio 2013. ....	35
Figura 4-7 Cristales presentes en las muestras de marzo 2013 observadas bajo binocular. Material similar al presente en las muestras de julio 2013. Plg:plagioclasas; px=piroxenos. ....	35
Figura 4-8 Equipo “Morphology G3” utilizado en el análisis morfológico de las cenizas de marzo y julio 2013. ....	37
Figura 6-1 Clasificación geoquímica de los productos eruptivos del volcán Tungurahua desde 1999. a. Diagrama Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O vs SiO <sub>2</sub> es modificado de Le Bas et al. (1986). b. Diagrama K <sub>2</sub> O modificado de Peccerillo y Taylor (1976). Los datos geoquímicos de 1999 a 2006 fueron tomados de Samaniego et al. (2011).	51
Figura 6-2 Representación de la concentración de ciertos elementos mayores y en trazas respecto al contenido de sílice. En elipses con bordes entrecortados se encierran los análisis realizados para este trabajo y comprende a las fases eruptivas ocurridas desde Enero 2010. ....	52
Figura 6-3 Inicio de la actividad de Marzo de 2013. Emisiones casi continuas de gases y ceniza volcánica en dirección al occidente. Foto: (J. Ordóñez – OVT- IG; Informe semanal OVT # 680) .....	53
Figura 6-4 Columna de ceniza. 17h57 TL. 16/03/2013. Volcán Tungurahua (Foto: P. Mothes, Informe semanal #682). ....	54
Figura 6-5 Mapa de isomasas de la fase eruptiva de marzo 2013. (Bernard et al., 2013) La dirección del eje de dispersión es SSW sobre la localidad de Choglontus. ....	55
Figura 6-6 En líneas sólidas se representa la tasa de caída de ceniza respecto a la fecha de recolección de las muestras diarias medida en tres localidades (Bernard, 2014). En líneas entrecortadas se representa el flujo diario de SO <sub>2</sub> para la fase eruptiva de marzo 2013 (Hidalgo et al., 2014).....	57
Figura 6-7 Dispersión en el tiempo de las explosiones con IRP (Infrasound Reduced Pressure; Hall et al., 2013) >100 Pa calculadas a un Km del cráter (Steele, 2014)	

ocurridas durante la fase eruptiva de marzo 2013. Estas explosiones pueden considerarse como vulcanianas (Johnson, 2003). .....	57
Figura 6-8 Columnas de emisión poco energética de baja altura con moderado a bajo contenido de ceniza, observadas en la tarde del 1 de marzo de 2013. Informe Especial del volcán Tungurahua No.5. 2/03/2013. ....	58
Figura 6-9 Registro del sensor de infrasonido de la estación BMAS para el día 01/03/2013 UTC. ....	59
Figura 6-10 Registro del sensor de infrasonido de la estación BMAS para el día 08/03/2013 UTC. ....	60
Figura 6-11 Registro del sensor de infrasonido de la estación BMAS para los días 13 y 14 de Marzo de 2013 (UTC). ....	61
Figura 6-12 Dirección de la columna eruptiva, para el día 13/03/2013 a las 10h45 (TL), hacia el SW a una altura de 1.8 km snc. (NOAA Satellite and Information Service, 2014). La muestra 14M13 es recolectada durante la mayor parte del día 13/03/2013. ....	62
Figura 6-13 Registro del sensor de infrasonido de la estación BMAS para los días 16 y 17 de marzo de 2013 (UTC). ....	63
Figura 6-14. Esquema, HS circularidad vs Rectangularidad obtenidos para las muestras de marzo 2013, analizados en rangos de 1 $\phi$ . La rectangularidad está representado por la fórmula $\text{perímetro}/(2\text{largo}+2\text{ancho})$ (Anexo 8) .....	65
Figura 6-15 Diagrama de la Elongación vs Tamaño de grano, para las muestras tomadas durante julio 2013 analizados en intervalos de 1 $\phi$ . ....	65
Figura 6-16 Esquema del parámetro Solidity vs Tamaño de grano, para las muestras tomadas durante julio 2013 analizados en intervalos de 1 $\phi$ . ....	66
Figura 6-17 Morfologías presentes en las muestras A) 1M13, B) 8M13, C) 14M13, D) 17M13. Fotografías tomadas en el MG3. ....	68
Figura 6-18 Porcentaje en peso de los componentes, en las muestras de marzo 2013, analizados en la fracción 315 $\mu\text{m}$ -500 $\mu\text{m}$ . El rango de tamaño fue escogido considerando la disponibilidad de partículas y facilidad de manejo al momento de la separación de componentes. ....	69

Figura 6-19. Distribución del tamaño de grano, representado en % de peso, analizado para las tres muestras de cenizas correspondientes a la fase de marzo 2013. Para la muestra 14M13 se incluye datos de ensayo de tamizado y granulometría láser, con superposición en 90 $\mu\text{m}$ ( $3.5\phi$ ). .....	70
Figura 6-20. Muestras de ceniza observadas bajo binocular. A) 1M13, B) 14M13, C) 17M13.....	72
Figura 6-21 Columna eruptiva observada por satélite a las 8h15 TL (NOAA Satellite and Information Service, 2014). Se observan dos direcciones preferenciales del movimiento de la columna eruptiva. Una hacia el norte, a una altura de 8.5 km snc; y otra hacia el oeste, a 4.5 km snc. ....	74
Figura 6-22 Dispersión de la ceniza durante el periodo eruptivo de julio-agosto 2013. (Parra et al., “en preparación”). En las cercanías del volcán el viento dirigió la ceniza hacia el SW, mientras que en las partes más lejanas, la ceniza tiene una dispersión hacia el NW-W. Se observa que la localidad de Choglontus se encuentra en el eje principal de la dispersión de ceniza. ....	75
Figura 6-23. Caída de ceniza registrada en 4 localidades alrededor del volcán (Parra et al. en preparación). Se puede observar que la mayor sedimentación de ceniza durante el periodo eruptivo de julio-agosto 2013 ocurrió en la localidad de Choglontus ubicada al WSW del cráter mientras que es mínima en Runtún y Palictahua. La localidad de Pillate se encuentra al oeste del volcán.....	76
Figura 6-24 Esquema del flujo diario de $\text{SO}_2$ para la fase eruptiva de Julio 2013. (Hidalgo et al., 2014) Se indican las muestras recolectadas asociadas a su determinado valor de desgasificación. ....	77
Figura 6-25 Dispersión en el tiempo de las explosiones con IRP (Infrasound Reduced Pressure; Hall et al., 2013) $>100$ Pa calculadas a un Km del cráter (Steele, 2014) ocurridas durante la fase eruptiva de julio 2013. Estas explosiones pueden considerarse como vulcanianas de acuerdo al criterio de clasificación de Johnson, (2003).....	78
Figura 6-26 Nube de ceniza, desprendida del flujo piroclástico, dirigiéndose hacia el Oeste. Este flujo descendió a lo largo de la quebrada Juive Grande-La Pampa (Fuente: Informe semanal OVT # 699).....	79

Figura 6-27 Registro del sensor de infrasonido de la estación BMAS para el día 14/07/2013 UTC. ....	80
Figura 6-28. Registro del sensor de infrasonido de la estación BMAS para el día 20/07/2013 UTC. El reporte de explosiones, se registra con un valor elevado de componente acústica. ....	81
Figura 6-29. Se observa la columna de ceniza dirigiéndose al W, a 2.5 km snc el día 23/07/2013 a las 19h44 (TL). Mientras que el día 24/07/2013, a las 10h45 TL, se observa que la columna se dirige hacia el NW a 4.7 km snc y hacia el W a 1.4 km snc. (NOAA Satellite and Information Service, 2014). ....	82
Figura 6-30 Registro del sensor de infrasonido de la estación BMAS para el día 23 y 24 de julio 2013 (UTC). Se observa la interrupción del registro debido a un corte programado de energía. ....	83
Figura 6-31 Diagrama HS circularidad vs Rectangularidad obtenidos para las muestras de julio 2013, analizados en intervalos de 1 $\phi$ . La rectangularidad está representado por la fórmula "perímetro/(2largo+2ancho)" (Anexo 8). ....	84
Figura 6-32 Diagrama de la Elongación vs Tamaño de grano, para las muestras tomadas durante julio 2013 analizados en intervalos de 1 $\phi$ . ....	85
Figura 6-33 Esquema del parámetro Solidity vs Tamaño de grano, para las muestras tomadas durante julio 2013 analizados en intervalos de 1 $\phi$ . ....	86
Figura 6-34 Morfologías presentes en las muestras A) 14J13, B) 20J13, C) 24J13. Fotografías tomadas en el MG3. ....	87
Figura 6-35. Porcentaje en peso de los componentes que conforman las muestras de julio 2013, analizados en la fracción 315-500 $\mu\text{m}$ . El rango de tamaño fue escogido considerando la disponibilidad de partículas y facilidad de manejo al momento de la separación de sus componentes. ....	89
Figura 6-36 Distribución del tamaño de grano, representado en % de peso, analizado para las tres muestras de cenizas correspondientes al periodo julio-agosto 2013. El análisis incluye ensayo de tamizaje y granulometría láser, con superposición en 90 $\mu\text{m}$ (3.5 $\phi$ ). ....	90

Figura 7-1. Modelo de la migración/estancia del magma basado en el resultado de análisis geoquímicos de depósitos piroclásticos. Esquema modificado de Samaniego et al. (2011). La fase eruptiva “marzo 2013” es ejemplo de la actividad eruptiva representada en el esquema 7-1a, mientras que “julio 2013” del esquema 7-1d. .... 94

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Número de explosiones vulcanianas ocurridas durante el periodo de recolección de las muestras de marzo 2013. Estas explosiones se clasifican como vulcanianas por presentar IRP >100 Pa calculadas a 1 km del cráter (Johnson, 2003) ..... 58

Tabla 2 Tabla granulométrica comparativa para las muestras pertenecientes a la actividad eruptiva de marzo 2013. Moda, valor obtenido utilizando el programa SFT. Media gráfica ( $Md_{\phi}$ ), desviación estándar ( $\sigma_{\phi}$ ), valor de curtosis ( $K_G$ ) y valor de asimetría ( $Sk_l$ ) en base a la estadística grafica de Folk & Ward (1957). Las tres muestras presentan una cola de partículas finas por su valor de asimetría positiva. .... 71

Tabla 3 Número de explosiones vulcanianas ocurridas durante el periodo de recolección de las muestras de julio 2013. Estas explosiones se clasifican como vulcanianas por presentar IRP >100 Pa calculadas a 1km del cráter (Johnson, 2003). .... 78

Tabla 4 Tabla granulométrica comparativa para las muestras pertenecientes a la actividad eruptiva de julio-agosto 2013. Moda, valor obtenido utilizando el programa SFT. Media grafica ( $Md_{\phi}$ ), desviación estándar ( $\sigma_{\phi}$ ), valor de curtosis ( $K_G$ ) y valor de asimetría ( $Sk_l$ ) en base a la estadística grafica de Folk & Ward (1957). Las tres muestras presentan una cola de partículas finas por su valor de asimetría positiva. .... 91

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Muestra 14J13. Partícula de ceniza vesiculada poco angular. Vesículas ovoides y paredes delgadas de vesículas. Múltiple vesiculación evidenciado por paredes de vesículas deformadas (deformación plástica y crecimiento de vesículas en diferente momento). Esta partícula presenta bordes con fractura concoidea resultado de abrasión.....	117
Anexo 2 Muestra 14J13. Partícula de ceniza vesiculado subangular con paredes entre vesículas muy finas a muy gruesas. Multi- vesiculación evidenciado por vesículas deformadas (deformación plástica y crecimiento de vesículas en diferente momento). Esta partícula presenta bordes con fractura concoidea resultado de abrasión.....	117
Anexo 3 Muestra 14J13. Ceniza subangular muy vesiculada. Paredes entre vesículas delgadas. Múltiple vesiculación evidenciado por paredes de vesículas deformadas (deformación plástica y crecimiento de vesículas en diferente momento). Esta partícula presenta bordes con fractura concoidea resultado de abrasión.....	117
Anexo 4 Muestra 14J13. Ceniza altamente vesiculada. Vesículas alargadas bien desarrolladas. Paredes delgadas entre vesículas.....	118
Anexo 5 Muestra 14J13. Partícula de ceniza subangular. Vesículas exteriores muy alargadas con paredes delgadas de vesículas.....	118
Anexo 6 Muestra 14J13. Fragmento juvenil muy vesiculado. Las vesículas son alargadas y las superficies fluidas. Las paredes entre vesículas son delgadas.	118
Anexo 7 Tabla de datos de elementos mayores y en trazas de muestras de productos de caída emitidos por el volcán Tungurahua desde Enero 2010-Julio 2013 .....	119
Anexo 8 Descripción de los parámetros descriptivos de la morfología y geometría de partículas, calculados por el instrumento Morphology G3-Malvern. Documento de Malvern.....	121
Anexo 9 Promedio, desviación estándar y moda de la elongación, HS circularidad, rectangularidad y solidity para diferentes fracciones de tamaños de partículas de	

ceniza. Se presenta número de partículas analizadas para cada fracción. Datos obtenidos a partir del instrumento Morphology G3.....	123
Anexo 10 Resumen de este trabajo presentado para el encuentro Cities on Volcanoes 8, llevado a cabo del 9-13 de septiembre 2014 en Yogyakarta, Indonesia. Este trabajo fue aceptado para una presentación oral en dicho encuentro.....	130

## RESUMEN

En este trabajo se presenta el estudio de la distribución granulométrica, morfología y tipos de componentes de dos secuencias de cenizas pertenecientes a las fases eruptivas de marzo y julio-agosto 2013 del volcán Tungurahua.

En ambas fases se reconoce comportamientos eruptivos similares, los cuales están gobernados por las características reológicas del magma. Se considera a la desgasificación como el factor principal que controla estos cambios.

La actividad eruptiva en “sistema abierto” se caracteriza por altas tasas de desgasificación, generación de poca cantidad de ceniza y mayor presencia de material micro-vesiculado.

Las erupciones “vulcanianas intermitentes” son caracterizadas por explosiones fuertes (IRP “Infrasound Reduced Pressure”,  $>100$  Pa), asociadas a bajas tasas de desgasificación. Esta actividad genera gran cantidad de ceniza cuya angularidad es mayor a la producida durante erupciones en “sistema abierto”. Su característica de mayor angularidad es atribuida a una mayor viscosidad del magma al momento de la fragmentación.

La actividad eruptiva considerada como “fuente de lava” genera las partículas más angulares y elongadas. Estas características están relacionadas a una fragmentación más superficial del magma lo cual evita altas tasas de abrasión en el conducto y permite la conservación de sus morfologías.

Para explicar el aumento del porcentaje de ceniza extremadamente fina ( $<45$   $\mu\text{m}$ ) cuando aumenta el porcentaje de material micro-vesiculado, en las muestras de julio-agosto 2013, se considera un proceso de abrasión dentro del conducto y dentro de los flujos piroclásticos, este último considerado para la erupción del 14 de julio.

## ABSTRACT

Grain-size distribution, morphology and componentry analysis has been carried out for two ash sequences belonging to the March and July 2013 eruptive activity at Tungurahua volcano.

Both phases had similar eruptive activities which were dominated by rheological magma properties. Degasification is considered the principal cause that controls the variations of the physical properties.

The “open system” eruptive activity is related to high degasification rates, low generation of ash and a greater amount of particles with micro-vesicle.

The high explosive eruptive activity is characterized by strong explosions (IRP “Infrasound Reduced Pressure”  $>100$  Pa) and has been defined in this report as “intermittent vulcanian eruptions”. This activity is related to low degasification rates and generation of more angular ash compared to the “open system” eruption. This characteristic is attributed to a higher magma viscosity during fragmentation.

The eruptive activity considered as “lava fountaining” produce the most angular and elongated particles due to a superficial fragmentation avoiding abrasion inside the conduit.

A process of abrasion inside the conduit and pyroclastic flows is evoked to relate the increase of extremely fine ash ( $<45$   $\mu\text{m}$ ) and a consequent increase of micro-vesicles particles.

# 1 CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 ANTECEDENTES

El Instituto Geofísico, desde su creación en 1983, realiza el estudio e investigación de la actividad volcánica reciente e histórica en el Ecuador. Esta misma institución es a partir del año 2003 el ente oficial de vigilancia, de información, y de detección de actividad volcánica y sísmica para todo el territorio ecuatoriano. Por tal razón y con el fin de cumplir este rol, se ha visto en la necesidad de estudiar a detalle la actividad y comportamiento del volcán Tungurahua que desde el año 1999 ha estado activo y ha mantenido en alerta y zozobra a los pobladores que habitan a su alrededor, como es de conocimiento público.

El estudio de los productos de caída piroclástica (ceniza) como parte del monitoreo e investigación ha sido dirigida, en la mayoría de ocasiones, a la cuantificación del volumen de magma y componentes emitidos por el volcán (Bernard et al., 2013; Bustillos et al., 2013; Eychehenne et al., 2013).

El presente trabajo se realiza como parte del proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Geólogo, el cual cuenta con el soporte y financiamiento del Instituto Geofísico (IG) de la Escuela Politécnica Nacional, gracias al Proyecto SENPLADES componente 4: “Generación de capacidades para la difusión de alertas tempranas y para el desarrollo de instrumentos de decisión ante las amenazas sísmicas y volcánicas dirigido al sistema nacional de gestión de riesgo”; del Laboratorio Mixto Internacional (LMI), convenio que mantiene el IG en conjunto con el Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD), el Laboratorio Magmas et Volcans (LMV) de la Universidad Blaise Pascal, Clermont-Ferrand (Francia) y de la Universidad San Francisco de Quito (USFQ).

## **1.2 JUSTIFICATIVOS**

Desde la reactivación eruptiva del volcán Tungurahua en 1999, el fenómeno más común ha sido la caída de ceniza, la cual ha generado afectaciones en la salud de los pobladores que habitan en sus cercanías, así como a las actividades productivas de ganadería y agricultura (Le Pennec et al., 2012). Conociendo que el estudio de depósitos de ceniza es esencial para determinar el tamaño y tipo de erupciones explosivas modernas o históricas (Eychenne et al., 2012) y gracias a la disponibilidad de las secuencias de muestras de ceniza recolectadas en la red de cenizómetros, instalados por la Universidad San Francisco en colaboración con el Instituto Geofísico, se consideró realizar un estudio a detalle de dos secuencias de muestras correspondientes a dos fases eruptivas que presentaron características diferentes y que ocurrieron en los meses de Marzo y Julio 2013.

El análisis granulométrico, morfológico, modal de componentes y geoquímico de estas cenizas permite esclarecer los mecanismos que dominan el comportamiento de las erupciones en este volcán y conocer con mayor detalle los productos generados y procesos involucrados en cada fase eruptiva, con el fin de distinguir cambios en sus patrones de actividad y contribuir al conocimiento vulcanológico y consiguiente incidencia en la gestión del riesgo.

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 OBJETIVO GENERAL**

- Relacionar las características de las cenizas producidas durante las fases de actividad eruptiva de Marzo y Julio 2013 del Volcán Tungurahua con los dinamismos eruptivos.

### **1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- I. Determinar las diferencias granulométricas, morfológicas y de componentes entre las cenizas producidas durante las fases eruptivas de marzo y julio 2013.
- II. Calcular el porcentaje de erosión del conducto, mediante el estudio de componentes de las cenizas.

- III. Determinar los mecanismos de fragmentación del magma.
- IV. Comparar la composición geoquímica de los productos eruptivos de marzo y julio 2013 con las ocurridas en el volcán Tungurahua desde el 2010.

#### **1.4 ALCANCE**

- I. Descripción de la actividad eruptiva superficial basado en los informes semanales del Observatorio del Volcán Tungurahua
- II. Obtención de los datos morfológicos de las cenizas por medio del equipo Morphology G3 perteneciente al LMV.
- III. Caracterización geoquímica de las fases eruptivas reconocidas desde enero 2010 (Hidalgo et al., 2014) en base al análisis de elementos mayores, menores y en trazas en muestras de productos piroclásticos.
- IV. Obtención de los datos de granulometría por medio de ensayos de tamizaje y granulometría láser.
- V. Obtención de los datos de porcentaje de componentes de las cenizas bajo análisis binocular.
- VI. Descripción de los datos morfológicos, geoquímicos, de componentes y granulométricos obtenidos.

#### **1.5 METODOLOGÍA**

El presente trabajo se realizó en las siguientes etapas:

- Trabajo de campo: recuperación de las muestras de ceniza de la red de cenizómetros instalada alrededor del volcán Tungurahua.
- Trabajo de recopilación de información relacionada con el tema y con la zona de estudio. La información se obtuvo de publicaciones científicas e informes especiales y semanales del OVT.
- Trabajo de laboratorio: preparación de las muestras de ceniza para análisis geoquímico; preparación y análisis morfológico de las muestras en el LMV; análisis de componentes bajo binocular; preparación y realización de ensayos de tamizaje para obtención de datos granulométricos y preparación de muestras para análisis granulométrico láser.

- Interpretación de los datos obtenidos en la etapa anterior y preparación del informe de titulación.

## **1.6 UBICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO**

El volcán Tungurahua (UTM: 17M 784231; 9837603) se ubica entre las provincias de Tungurahua y Chimborazo. Su cumbre (5 023 msnm) se encuentra a 30 km al sureste de la ciudad de Ambato y a 8 km de Baños.

La topografía circundante varía entre 2 000 y 3 800 metros de elevación, características de la cordillera Real sobre la cual se construyó este volcán. Posee una forma cónica caracterizada por su gran relieve (aprox. 3 200 m) y cuyo diámetro basal es de 14 km. Su cráter es de aproximadamente 300 m de diámetro y cerca de 100 m de profundidad (Le Pennec et al., 2005).

Este volcán es drenado por numerosas quebradas que desembocan en los ríos Puela al Sur y Sudeste, Chambo al occidente y Pastaza al Norte y Noreste (Fig. 1-1). Una densa vegetación cubre todos los flancos, especialmente entre 2 000 y 3 800 metros de elevación (Hall et al., 1999; Le Pennec et al., 2005).

Más de una decena de pequeñas comunidades se localizan en las faldas del volcán Tungurahua, principalmente en el flanco occidental, entre las cuales se encuentran: Choglontus, Bilbao, Yuibug, Puela y Palitahua. Una carretera de segundo orden que conecta la ciudad de Penipe con la zona de “Los Pájaros” es la principal vía de conexión entre estos poblados.

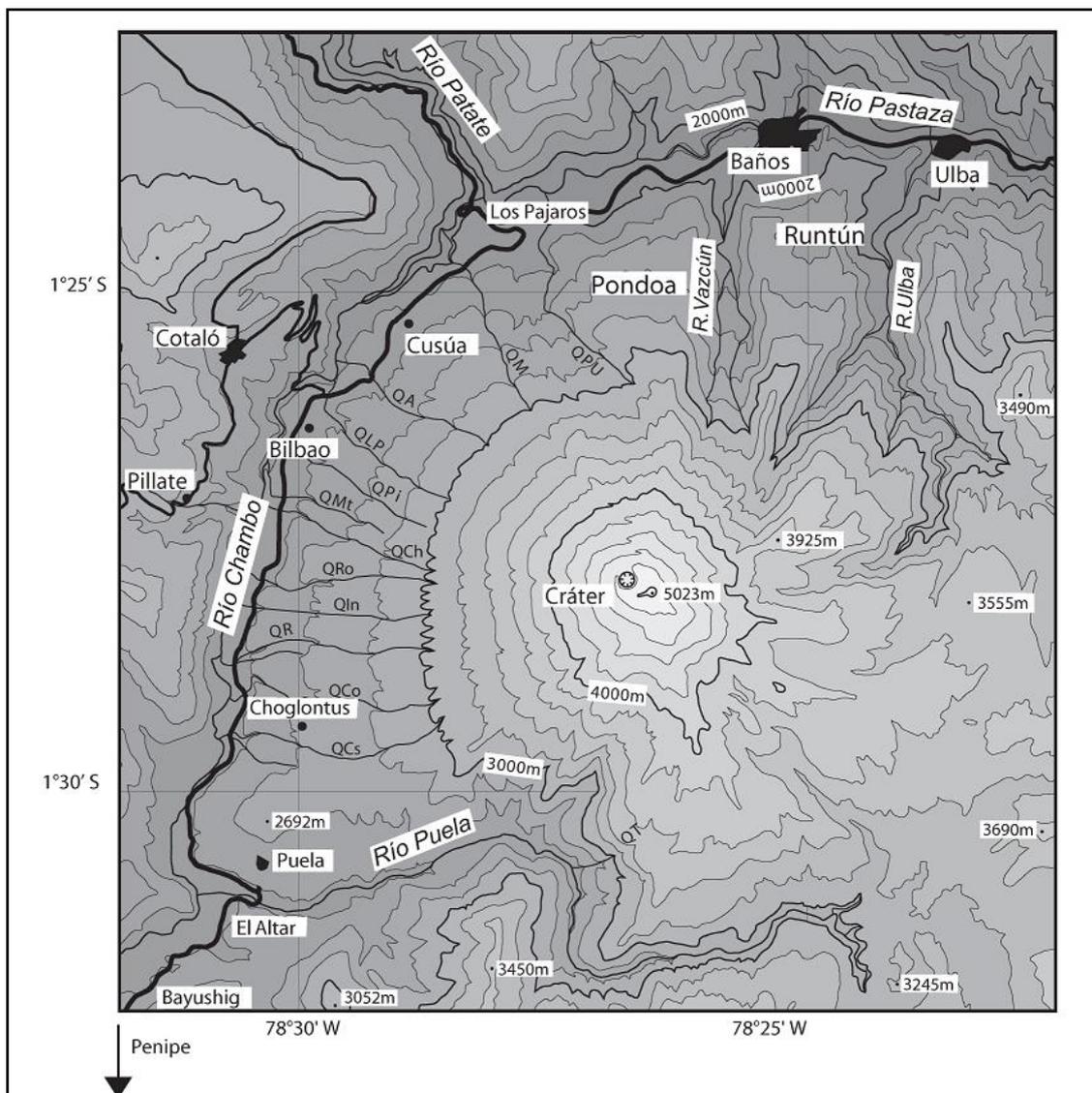


Figura 1-1 Mapa topográfico del volcán Tungurahua. Modificado de Hall et al. (1999), Le Pennec et al. (2005). Curvas de nivel cada 200 m. QA=quebrada Achupashal; QCh=quebrada Chontapamba; QCo= quebrada confesionario; QCs=quebrada Choglontus; QIn=quebrada Ingapirca; QLP=quebrada La Piramide; QM=quebrada Mandur; QMt=quebrada Motilonas; QPi=quebrada Pingullo; QPU=quebrada Palmaurcu; QR=quebrada Rea; QRo=quebrada de Romero; QT=quebrada Terremoto. Líneas negras gruesas =carreteras.

## **1.7 ESTUDIOS RELACIONADOS**

Los dinanismos que rigen las erupciones explosivas son muy complejos y dependen de un gran número de parámetros, tales como: mecanismos de ascenso y fragmentación, características químicas y reológicas del magma involucrado en la erupción, contenido de volátiles y las características del sistema volcánico (ej. geometría del conducto) (Alfano et al., 2012).

La descripción de morfologías en los productos piroclásticos ha sido realizada por Heiken y Wohletz (1985) quienes utilizaron imágenes de microscopio electrónico de barrido (SEM) para este propósito. El estudio de la morfología en caídas de ceniza es utilizado por Coltelli et al. (2008) para la determinación de las velocidades terminales en caídas de piroclastos.

El análisis de componentes en depósitos de caídas piroclásticas se ha realizado en muchos trabajos investigativos con fines descriptivos. Un estudio realizado a detalle con el fin de determinar la variabilidad de la densidad de sus componentes, con respecto al tamaño de sus partículas fue realizado por Eychenne y Le Penneec (2012).

Estudios guiados hacia la comprensión de dinanismos eruptivos se han realizado mediante el análisis de morfologías de las vesículas en piroclastos, este el caso de los trabajos de Alfano et al. (2012) y Moitra et al. (2013).

## **1.8 DESARROLLO DE ESTE TRABAJO**

El presente trabajo expone en el capítulo II el marco volcánico de los andes ecuatorianos sobre el cual se ubica el volcán Tungurahua. Además se presenta un resumen del conocimiento geológico y la actividad eruptiva del volcán Tungurahua anterior a 1999. La actividad eruptiva registrada entre 1999 y agosto 2013, es resumida en el capítulo V.

En el capítulo III se presentan los fenómenos y depósitos generados durante actividades eruptivas explosivas, en volcanes de características similares al volcán

Tungurahua, y los términos volcanológicos utilizados en las descripciones posteriores.

El capítulo IV contiene una descripción de cada uno de los análisis llevados a cabo para alcanzar los objetivos de este trabajo y la base científica que los respalda. El análisis y los resultados son presentados en el capítulo VI, en donde además se presenta una descripción detallada de las dos fases eruptivas (marzo 2013, julio-agosto 2013) concernientes a este trabajo.

Una descripción detallada de los dinamismos eruptivos distinguidos en la fase eruptiva de marzo 2013 y julio-agosto 2013 y basado en los resultados morfológicos, granulométricos, geoquímico y de componentes se presenta en el capítulo VII.

Las conclusiones y recomendaciones alcanzadas luego de la realización de este trabajo están expuestas en el capítulo VIII.

## 2 CAPÍTULO II

### VOLCANISMO CUATERNARIO Y GEOLOGÍA DEL VOLCÁN TUNGURAHUA

#### 2.1 VOLCANISMO CUATERNARIO DE LOS ANDES ECUATORIANOS

La descripción expuesta a continuación es tomada y actualizada de Hall et al. (2008). Según los autores, el volcanismo del Plioceno tardío al presente se manifiesta en cuatro grupos lineales, cada uno con características morfológicas, estilos eruptivos, diversidad química y petrográfica propias.

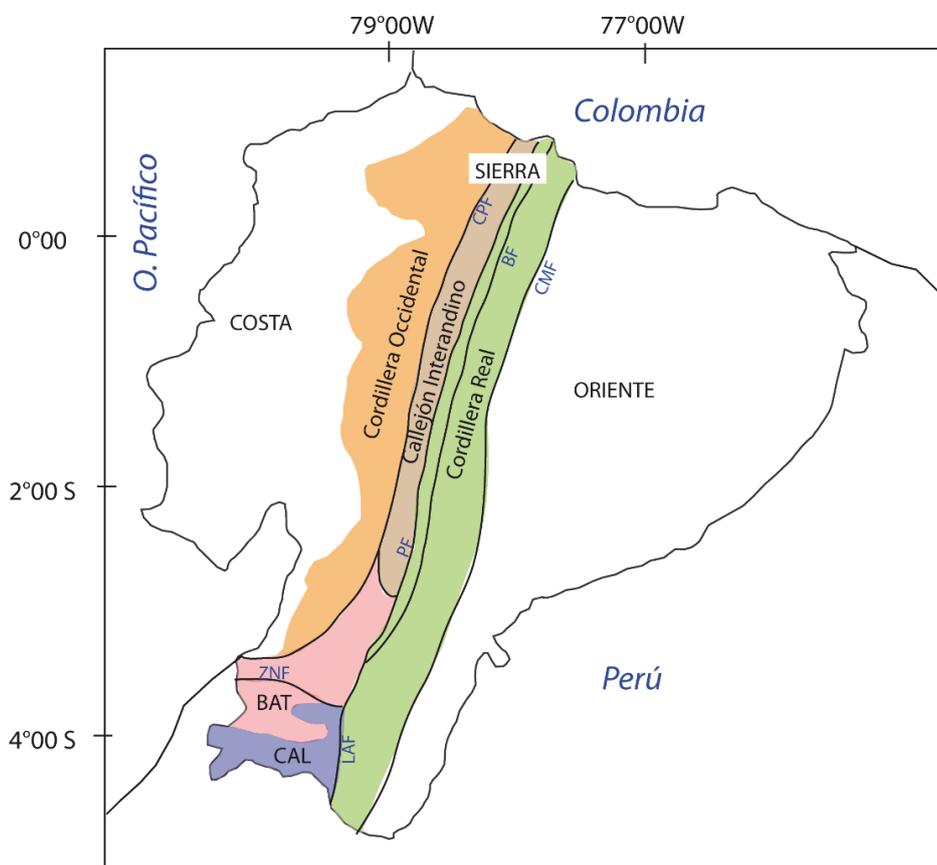


Figura 2-1 Esquema geomorfológico y de las principales fallas del Ecuador continental. BAT Bloque Amotape-Tahuín o cinturón metamórfico del Oro, CAL Cuenca Alamor Lancones, ZNF zona de falla Zanjon-Naranjo, LAF falla Las Aradas, PF falla Peltetec, CMF falla Cosanga-Mendez, BF frente Baños, CPF falla Calacalí-Pallatanga. (Modificado de Spikings et al., 2000; Litherland et al., 1994).

### **2.1.1 Cordillera Occidental.**

Los volcanes se encuentran sobre basamento del Cretácico tardío compuesto de basaltos y rocas volcano-sedimentarias (Jaillard et al., 2004; Hughes y Pilatasig, 2002). La actividad holocénica y pleistocénica de estos centros eruptivos fue principalmente de composición andesítica y dacítica. Morfológicamente la mayoría de estos centros son conos compuestos. Estos centros generalmente tienen cicatrices de deslizamientos gigantes de entre 2-3 km abiertos principalmente hacia el Oeste.

La actividad histórica y precolombina es ejemplificada por las erupciones del Quilotoa (800 <sup>14</sup>C años AP), Pululahua, Ninahuilca (2300-2400 <sup>14</sup> C años AP), Cuicocha (2900-3000 <sup>14</sup> C años AP; Von Hillebrandt, 1989), complejo volcánico Pichincha (1450-1660 años AP, Robin et al., 2008) y Chachimbiro (3640-3510 años AP; Bernard et al., 2014)

Las rocas jóvenes pertenecientes a este grupo tienden a caer dentro de rangos entre 60-66 % SiO<sub>2</sub> y 0.9-1.5 % K<sub>2</sub>O; y se caracterizan por llevar medianos a grandes fenocristales de plagioclasas, anfíbol, ortopiroxeno y escaso cuarzo.

### **2.1.1 Callejón Interandino**

Estos volcanes se ubican irregularmente a lo largo del Callejón Interandino y algunos tienden a poseer calderas remanentes que poseen en ocasiones domos en su interior. Son estratovolcanes de 10-20 km de ancho y elevaciones de 3800-4700 msnm. La mayoría de estos volcanes son considerados extintos, solamente el volcán Imbabura presentó actividad eruptiva durante el Holoceno (Le Pennec et al., 2011). Una característica de la ubicación espacial de estos centros eruptivos es su concentración en zonas donde existe una curva axial ligera de los Andes (Hall y Wood, 1985) como por ejemplo en las cercanías de la ciudad de Otavalo en donde se ubican los volcanes: complejo volcánico Mojanda-Fuya-Fuya, Cusín e Imbabura, así como también entre las ciudades de Ambato y Riobamba en donde se encuentran los volcanes Igualata, Huisla y Puñalica. Las rocas características de este grupo son andesitas-basálticas con plagioclasas y ocasionalmente anfíbol y su química varía entre 57-60 % SiO<sub>2</sub> y 0.5-1.0 % K<sub>2</sub>O. Depósitos de composición

riolítica (70-71 % SiO<sub>2</sub>) han sido atribuidos a actividades explosivas del volcán Fuya-fuya (Robin et al., 2009).

### **2.1.2 Cordillera Real**

Los edificios volcánicos de la Cordillera Real están subyacidos por rocas metamórficas Paleozoicas y Mesozoicas que forman el basamento de esta cordillera (Aspden & Litherland, 1992), lavas y volcano-sedimentos del Terciario tardío. Estos edificios volcánicos comprenden estratovolcanes andesíticos de un ancho de 15-20 km que están distribuidos a lo largo de esta cordillera y que en algunos casos alcanzan alturas de entre 5700-5900 msnm, con un relieve mayor a 3000 m. Estos volcanes han sido más activos durante el Holoceno que aquellos formados sobre la cordillera occidental. Por ejemplo, los volcanes Cotopaxi y Tungurahua han tenido erupciones periódicas en intervalos de  $100 \pm 50$  años. Los productos de las erupciones más jóvenes son principalmente andesitas con contenido de sílice bajo a alto y de afinidad calco-alkalina (56-61 % SiO<sub>2</sub> y 1-2 % K<sub>2</sub>O). Estas rocas poseen plagioclasas, clinopiroxenos, ortopiroxenos y ocasionalmente olivino. También se han reportado dacitas y riolitas en el volcán Cayambe y Cotopaxi, respectivamente, así como también en la caldera de Chacana.

### **2.1.3 Volcanismo de tras arco.**

Son estratovolcanes con afinidad alcalina que se ubican al Este de la Cordillera Real en medio de la jungla amazónica. Comprende el volcán Sumaco, Yanurcu, Pan de azúcar y los conos de escoria conocidos como “conos de Puyo” (Hoffer, 2008). Las rocas son principalmente basanitas y tefritas (42-53 % SiO<sub>2</sub>; 1-5 % K<sub>2</sub>O). El aumento de K<sub>2</sub>O y elementos incompatibles hacia el Este de los Andes ecuatorianos se debería a la disminución en el contenido de fluidos provenientes de la placa que subduce, y a su vez del grado de fusión parcial de la fuente mantélica (Barragán et al., 1998).

## 2.2 VOLCANISMO ACTUAL DE LOS ANDES ECUATORIANOS

Según el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (Bernard y Andrade, 2011) a lo largo de todo el territorio continental Ecuatoriano existen 84 volcanes de edad cuaternaria (Fig. 2-2). Tres de ellos tuvieron actividad durante el último año (a Agosto, 2014) y se los considera como volcanes “en erupción”. Estos volcanes son: Reventador, Tungurahua y Sangay de los cuales se presenta un resumen de sus principales erupciones y afectaciones.

El volcán Reventador se ha mantenido en actividad semi-continua desde el 3 de noviembre de 2002 (esta actividad ocurrió luego de 26 años de inactividad) día en el que se registró una erupción catalogada como sub-pliniana y cuya columna eruptiva alcanzó 16-17 km de altura snm generando flujos piroclásticos que llegaron al río Quijos ubicado a 9 km al Este del volcán (Samaniego et al., 2008). El volumen total de tefra emitido durante esta erupción se estimó entre  $\sim 3 \times 10^8 \text{ m}^3$  (Le Pennec et al., 2003) clasificándola con un VEI (índice de explosividad volcánica) de 4. Es la erupción más grande registrada en el Ecuador durante todo el siglo XX (Samaniego et al., 2008). Debido a esta erupción se registró caída de ceniza en la ciudad de Quito, ubicada a 100 km al Oeste del volcán, y se declaró el estado de emergencia en las provincias de Pichincha, Sucumbíos, Napo y Orellana; además se declaró el día 4 de noviembre como día de descanso en las zonas afectadas (El Universo, 2002). La actividad volcánica observada a partir de esta fecha se ha caracterizado por erupciones explosivas y efusivas (ej. emisiones de flujos de lava),

El volcán Sangay es reconocido por ser el volcán más activo del Ecuador. Su presente actividad eruptiva comenzó en 1995 y está caracterizada por crecimiento de domos, fuentes de lava, generación de columnas eruptivas y flujos piroclásticos. Este volcán se ubica dentro del parque Nacional Sangay a 40 km del Noreste de Macas (Monzier et al., 1999). Debido a su ubicación remota de las áreas pobladas las afectaciones asociadas a sus erupciones han sido mínimas.

La actividad eruptiva del volcán Tungurahua desde 1999 es resumida en este trabajo en los capítulos siguientes.

Además de los volcanes en erupción, cinco volcanes se consideran “activos” debido a que sus últimas erupciones ocurrieron hace menos de 500 años y son Cayambe, Guagua Pichincha, Chacana, Sumaco y Cotopaxi. Por último, 17 volcanes se consideran potencialmente activos y los restantes “dormidos o extintos”.

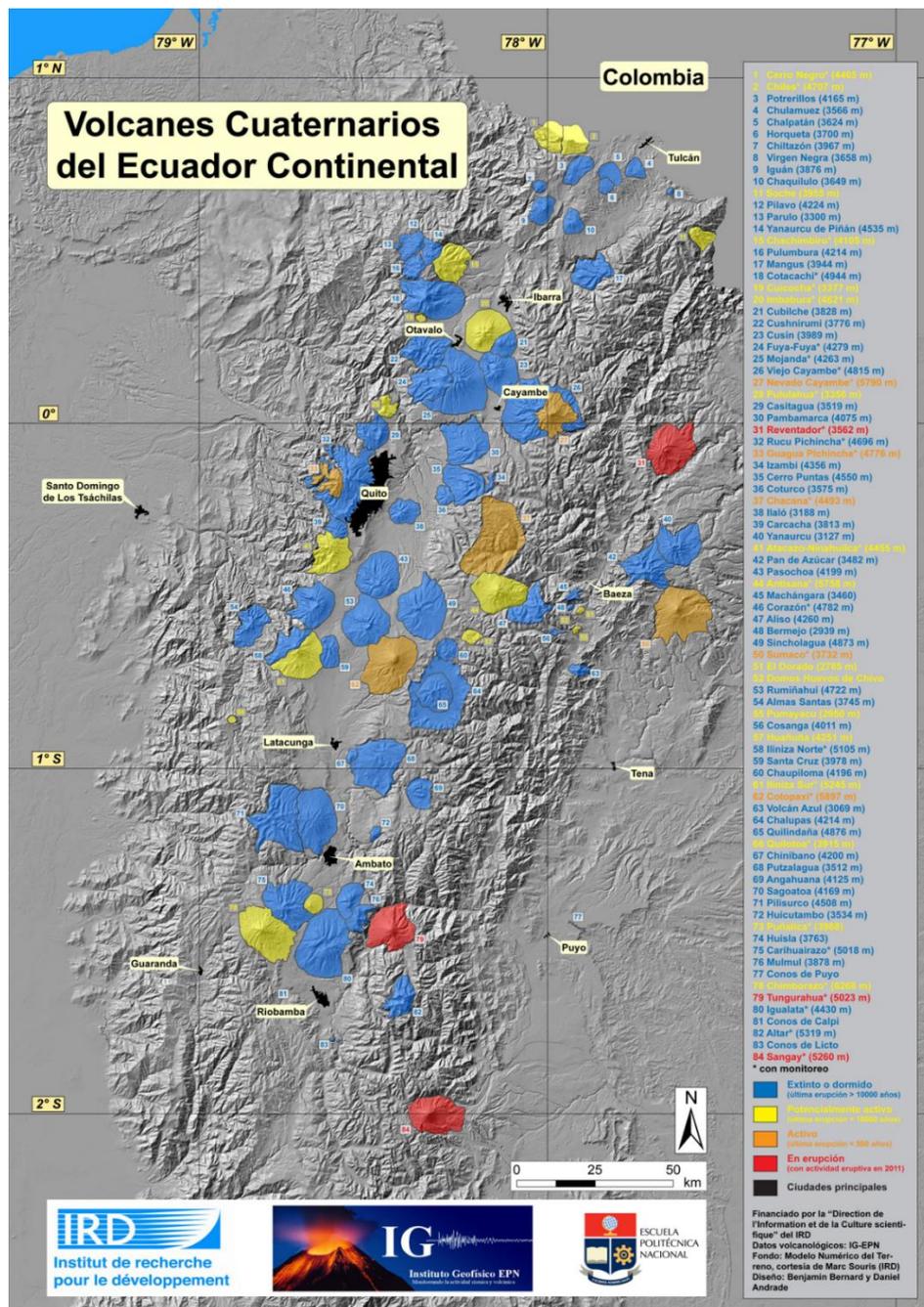


Figura 2-2 Mapa de ubicación de los volcanes cuaternarios del Ecuador Continental. (Bernard y Andrade, 2011). El volcán Tungurahua cuyo número de leyenda es 79, se ubica en este gráfico al Oeste de la ciudad de Puyo.

## 2.3 GEOLOGÍA DEL VOLCÁN TUNGURAHUA

El volcán Tungurahua es un volcán que se encuentra sobre la Cordillera Real, a 120 km al Sur de Quito. Presenta un relieve de 3200 m y su cráter se ubica a 5023 msnm. La síntesis geológica que se describe a continuación es en su mayor parte tomada del trabajo de Hall et al. (1999).

El actual volcán Tungurahua es el tercer edificio construido sobre otros dos deslizados hace 30 000 y 3 000 años AP. A estos edificios volcánicos se los conoce como Tungurahua I, II y III, desde el más viejo al actual.

- Tungurahua I (Tungurahua viejo).

Este volcán se formó sobre el basamento metamórfico de la Cordillera Real. Actualmente se lo observa directamente al sur de Baños y consiste de una secuencia de ~400 m de lavas basálticas y andesíticas intercaladas con tefras. Actualmente forman las elevaciones conocidas como Pondoá y Runtún. La serie magmática completa del Tungurahua I varía de andesita basáltica a dacita. Las lavas dacíticas pertenecientes a este edificio son aquellas conocidas como Minsas que se ubican al SE del volcán y forman parte de la última fase de este edificio (Hall et al., 1999). Dos dataciones radiométricas (Barberi et al., 1988) dan edades para estas rocas entre 770 000 y 350 000 años AP. Finalmente, este edificio sufrió un gran deslizamiento acompañado de una explosión que destruyó parcialmente el edificio. Este depósito rellenó el valle del río Chambo formando terrazas en lugares donde ahora se ubican los poblados de Penipe, La Providencia, Guanando, Pillate y Cotaló. Esta avalancha de escombros represó el río Chambo formando un lago temporal que habría durado siglos o milenios. Se sugiere una edad de 30 000 años para este evento. (Le Pennec et al., 2005).

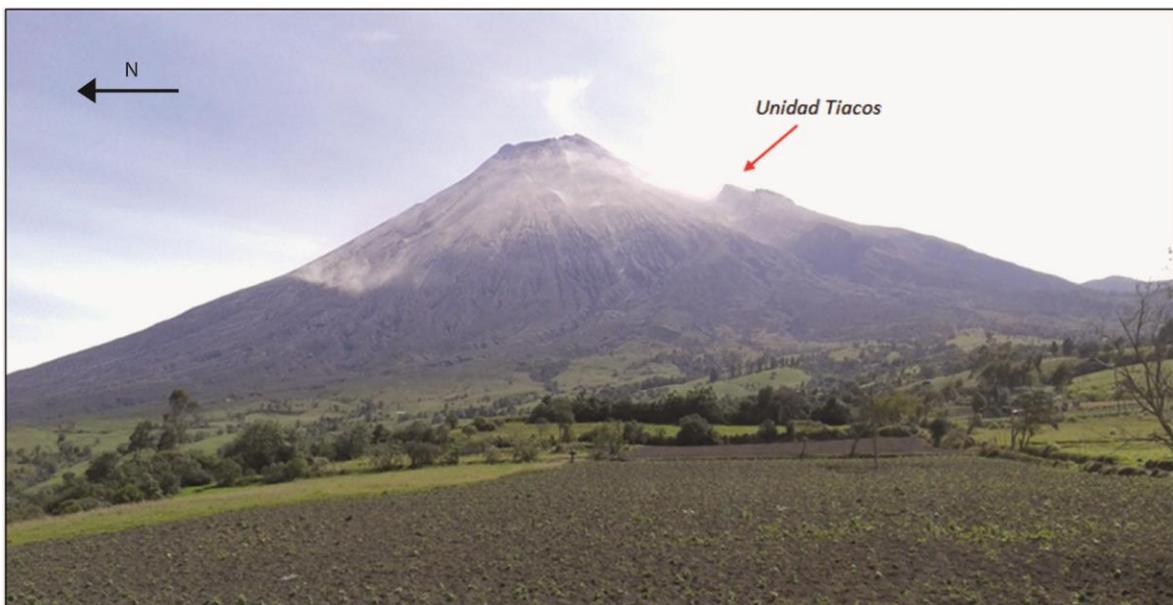
- Tungurahua II (Cono intermedio)

Este edificio está formado por lavas andesíticas ácidas (57,3-62,3% SiO<sub>2</sub>) conocidas como unidad Tiacos cuyo espesor alcanza de entre 80-100m (Fig. 2-3). Esta unidad se encuentra en la parte alta del flanco sur del volcán sobreyaciendo a las rocas erosionadas del cono más viejo y se encuentran truncadas por el escarpe de una avalancha de escombros ocurrida hace aproximadamente 3000 años. El

depósito de esta segunda avalancha está compuesto por rocas pertenecientes a la unidad Tiacos y cubre alrededor de 80 km<sup>2</sup>, con un promedio de espesor de 30-50 m. Este depósito es observable a lo largo de la vía Baños-Penipe (Le Pennec et al., 2013).

- Tungurahua III (Cono actual)

El actual edificio volcánico creció después del colapso del Tungurahua II. Este nuevo cono se desarrolló desde hace 3000 años (Le Pennec et al., 2008). Le Pennec et al. (2005) indican que el desarrollo de este cono implica al menos 16 erupciones con flujos piroclásticos y alrededor de 17 flujos de lava que alcanzaron el pie del volcán. Cuatro erupciones históricas son reconocidas y ocurrieron en: 1641-1646, 1773-1781, 1886-1888 y 1916-1918 (Le Pennec et al., 2008).



*Figura 2-3 Vista del cono actual (Tungurahua III) desde la localidad de Choglontus (UTM: 777814, 9835074). En la parte central derecha se observa un desnivel topográfico correspondiente a lavas remanentes (Unidad Tiacos) del cono intermedio (Tungurahua II). (Fotografía: Narváez D.)*

## 3 CAPÍTULO III

### CONTEXTO TEÓRICO

#### 3.1 FRAGMENTACIÓN MAGMÁTICA

La fragmentación magmática ocurre principalmente en erupciones explosivas. Se puede distinguir dos tipos de erupciones magmáticas: “secas”, aquellas erupciones generadas solamente por gases disueltos del magma y “húmedas”, aquellas en las que el magma entra en contacto con agua externa (Cashman et al., 2001).

##### 3.1.1 Fragmentación por desgasificación de volátiles.

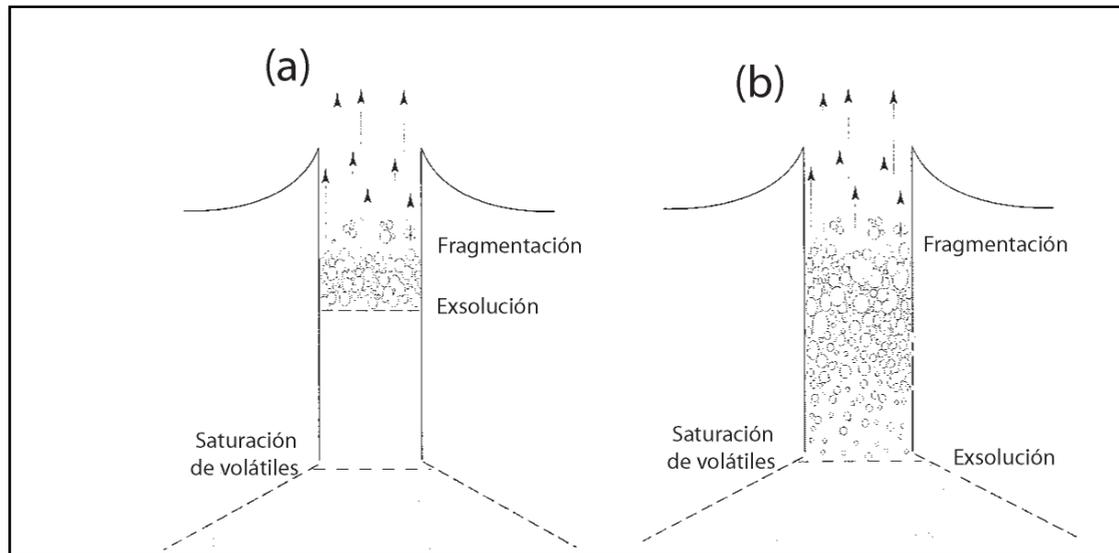
Según Cashman et al. (2001) la fragmentación transforma un magma líquido con gas disperso a un gas con gotas de magma líquido disperso o partículas sólidas dispersas. La fuerza explosiva de las erupciones se genera durante la fragmentación, cuando la energía potencial del magma (gases + líquido) se transforma en energía cinética de la mezcla de gases y partículas individuales y luego se expande térmicamente en las columnas eruptivas volcánicas.

La fragmentación ocurre cuando el magma asciende rápidamente por el conducto acelerándose por expansión de la fase gaseosa. Diferentes modelos la explican, sin embargo, el que explica de mejor manera este fenómeno es aquel que considera un exceso de presión dentro de las burbujas de gas al interior del magma.

Para que se dé inicio a la formación de la primera burbuja de gas dentro del magma, éste debe alcanzar el punto de saturación en volátiles el cual depende de varios parámetros como son: viscosidad del magma, presión litostática, etc. Este nivel de saturación en ocasiones coincide con el nivel o la superficie de exsolución de los gases, pero es más común que la exsolución de gases ocurra posteriormente a la saturación en volátiles del magma (Fig. 3-1) debido principalmente a propiedades intrínsecas del magma que impiden la formación de las vesículas.

Las burbujas de gases crecen mientras ascienden por el conducto. Si la velocidad de crecimiento de estas burbujas es mayor a la de difusión a través de las paredes o a la velocidad de ascenso de las burbujas, el magma alcanzará la fragmentación.

Se considera que la fragmentación ocurre cuando la fase gaseosa alcanza el 70-80% de volumen del magma ascendente (Cashman et al., 2001).



*Figura 3-1 a. Ilustración esquemática de la localización de las superficies de saturación y exsolución cuando la nucleación de burbujas es homogénea (nucleación tardía) b. Esquema de la equivalencia de la localización de las superficies de saturación y exsolución cuando la nucleación de burbujas es heterogénea (cuando no hay barreras para la nucleación). Esquema tomado de Cashman et al. (2001).*

Según Mader (1998) los detalles de los mecanismos de fragmentación en erupciones explosivas son actualmente desconocidos. Sin embargo se explican dos maneras como el magma puede fragmentar: frágil o dúctil.

- Fragmentación dúctil.

La fragmentación dúctil consiste en un adelgazamiento progresivo de capas líquidas por medio de alguno de dos mecanismos: 1. drenaje de los líquidos fuera de las capas bajo efecto de la gravedad, 2. por expansión de la fase gaseosa. El adelgazamiento continúa hasta que la capa llega a ser tan delgada que necesariamente se rompe. Todo el proceso ocurre en un estado líquido.

Una forma de piroclastos que se forma debido a este tipo de fragmentación son los cabellos de Pelé.

- Fragmentación frágil.

La fragmentación frágil en un flujo de dos fases (líquido + gas) que se acelera, ocurre cuando se somete una tasa de cizalla-deformación tan grande que el tiempo de relajación natural es excedido. Por lo tanto el material fractura de manera similar a un vidrio. Un tipo de piroclasto que se forma debido a este tipo de fragmentación es la pómez.

Según el mismo autor los efectos del tipo de fragmentación en una erupción tendrían más efecto en características texturales a escala pequeña que en características a grande escala (ej. tasa de descarga).

### **3.2 TIPOS DE ERUPCIONES EN VOLCANES ANDESÍTICOS.**

Existen diferentes tipos de erupciones descritos para volcanes andesíticos, como por ejemplo las erupciones sub-Plinianas (16-17 de agosto 2006, volcán Tungurahua; Eychenne y Le Penneç, 2012). Sin embargo, dos tipos de erupciones son muy bien conocidos y se asemejan a las ocurridas en el volcán Tungurahua durante las fases eruptivas de marzo y julio 2013 concernientes a este trabajo y son: erupciones vulcanianas y erupciones estrombolianas.

#### **3.2.1 ERUPCIONES VULCANIANAS**

Erupción tipo: Vulcano (Italia) 1888-1890

Una erupción Vulcaniana consiste de erupciones discretas (desconectadas y aleatorias) las cuales son seguidas por fases de tranquilidad que pueden durar desde minutos hasta días. En ocasiones comprenden la primera fase de erupciones más duraderas permitiendo la limpieza del conducto del volcán y dando paso a estilos eruptivos menos explosivos (ej. erupciones estrombolianas) (Francis y Oppenheimer, 1993).

Es así que generalmente, durante este tipo de estilo eruptivo el volcán emite clastos de lava “vieja” (roca densa que forma el tapón) que se formó previamente en el conducto (Francis y Oppenheimer, 1993). Esta lava se forma por la desgasificación de la columna magmática (Diller et al., 2006) generando una zonificación de

vesículas (Wright et al., 2007). La vesicularidad debido a esta zonificación aumenta con la profundidad (Miwa y Toramaru, 2013). El aumento de la presión de los gases bajo una capa de roca densa aumenta hasta que la roca se rompe de manera frágil generando la erupción vulcaniana. Un mecanismo que considera la interacción del magma ascendente con el agua meteórica ha sido propuesto debido a las similitudes de los depósitos de erupciones vulcanianas con los de los maars (cráter volcánico ancho y bajo) freatomagmáticos (Morrissey y Mastin, 2001).

Durante erupciones Vulcanianas, el material piroclástico es emitido a velocidades en el rango de cientos de metros por segundo formando una columna eruptiva que asciende convectivamente sobre el cráter (Francis y Oppenheimer, 1993) alcanzando alturas de entre 5-10 km (Fig. 3-2). Durante estas erupciones puede ocurrir caída de bloques balísticos y/o generación de flujos piroclásticos formados a partir de la columna eruptiva (Heiken y Wohletz, 1985) (McPhie et al., 1993).

Las características distintivas de las cenizas, emitidas durante una actividad eruptiva tipo vulcaniano, no son bien definidas y reflejan una mezcla de erupciones magmáticas y freatomagmáticas. Estas cenizas están compuestas de cantidades variables de fragmentos juveniles y no juveniles. Los fragmentos juveniles puede ser vesiculados o en forma de blocky (forma de la partícula caracterizada por superficies planares o curviplanares que se intersecan en ángulos cercanos a 90°) dependiendo de la cantidad de magma o agua meteórica envuelta en la erupción (Heiken y Wohletz, 1985). Usualmente comprenden magmas andesíticos y andesíticos-basálticos (Francis y Oppenheimer, 1993).



*Figura 3-2 Columna eruptiva que alcanza 8 km snc, vista desde el Observatorio del Volcán Tungurahua (UTM: 778651; 9849744), resultado de una explosión vulcaniana con generación de flujos piroclásticos ocurrida en el volcán Tungurahua el 1 febrero de 2014. (Fotografía: Narvéez D.)*

### **3.2.2 ERUPCIONES ESTROMBOLIANAS**

Una erupción Estromboliana resulta en la mayoría de ocasiones de explosiones discretas e intermitentes de grandes burbujas (slug de gas) o grupos de burbujas que migran hacia la superficie en un conducto abierto, (McPhie et al., 1993), eyectando piroclastos a pocas decenas o cientos de metros del cráter. Cada explosión dura solamente unos pocos minutos y se generan largas pausas entre explosiones. Lo más importante es que no se forman columnas eruptivas sostenidas. Teóricamente esta actividad involucra magmas de baja viscosidad y bajo contenido de gases los cuales ascienden por el conducto despacio y suavemente, posiblemente a unos pocos metros por segundo. Por tanto existe la oportunidad para que burbujas en crecimiento coalescan, crezcan en diámetro (alcanzando en ocasiones algunos metros dependiendo del diámetro del conducto) y se muevan hacia arriba a través del cuerpo magmático. Las explosiones estrombolianas son efectivamente el resultado de las burbujas explotando en la parte alta de la columna de magma, cuya presión interna puede ser unos pocos bares (Francis y Oppenheimer, 1993).

La fragmentación en ocasiones no es muy eficiente y solo se produce poca cantidad de ceniza aunque esto depende de la tasa de descarga magmática, viscosidad, etc. La mayoría de los piroclastos son depositados cerca del viento y generalmente se forma un cono de escoria, lapilli, bloques y bombas (McPhie et al., 1993)

## **3.3 COLUMNA ERUPTIVA**

### **3.3.1 FORMACIÓN DE COLUMNAS ERUPTIVAS**

La descripción expuesta a continuación es dada por Carey y Bursik (2001).

Las columnas eruptivas/volcánicas o nubes de erupción son consecuencia de la actividad explosiva de un volcán. Estas se forman cuando el magma es fragmentado (ver sección 3.1) y expulsado a través de un conducto a velocidades elevadas. El material emitido consiste de una mezcla de magma parcialmente fundido o solidificado, gases provenientes del magma o de los alrededores, y fragmentos del conducto del edificio volcánico.

Al momento de que este material sale por el viento su densidad es mayor a la de la atmósfera pero sube a través de ella gracias a la cantidad de momento (momentum) ganado gracias a la exsolución de gases. La zona de la columna eruptiva dominada por este efecto de salida se conoce como zona de "Jet" la misma que se extiende unos kilómetros sobre el cráter y se caracteriza por un flujo altamente turbulento (Fig. 3-3). Una rápida desaceleración ocurre por efecto de la gravedad y arrastre de la atmósfera. El aire de la atmósfera es halado hacia dentro de la columna volcánica por el desarrollo de bordes turbulentos a lo largo de su margen. Este aire es calentado y se genera un descenso en la densidad de la columna eruptiva mientras gana altura.

Una transición crítica ocurre cuando la densidad total del material llega a ser menor que la densidad de la atmósfera circundante. Las fuerzas que mueven a la columna de gases están en este momento dominadas por la flotabilidad y continúa subiendo como ocurre en un globo de aire caliente. Esta zona convectiva representa la parte más grande de la columna eruptiva y puede extenderse por decenas de kilómetros sobre el cráter. El ancho de la columna eruptiva aumenta progresivamente con la altura mientras el aire ingresa continuamente al flujo de masa ascendente (Fig. 3-3). En la zona convectiva la velocidad es mayor hacia el eje central y disminuye exponencialmente hacia los márgenes de la columna eruptiva, estas velocidades están en el orden de 10-100 m/s y están relacionadas a las condiciones de la fuente.

La atmósfera terrestre disminuye en densidad con la altura al mismo tiempo que la columna eruptiva aumenta su densidad por la disminución de temperatura y eventualmente la parte convectiva de la columna alcanzará un nivel donde las densidades de la columna eruptiva y la atmósfera son las mismas. En este punto la flotabilidad deja de ser la fuerza principal de la columna eruptiva y la misma empieza a moverse lateralmente en un nivel de flotabilidad neutra ( $H_b$ ). Pero la altura final que alcanza la columna será mayor que este nivel debido al exceso de empuje que tienen las partículas al alcanzar este nivel ( $H_t$ ). Entre  $H_b$  y  $H_t$  el material se esparcirá lateralmente en la atmósfera. Esta "zona de paraguas" corresponde a la forma de hongo que es usual observar en erupciones Vulcanianas y Plinianas.

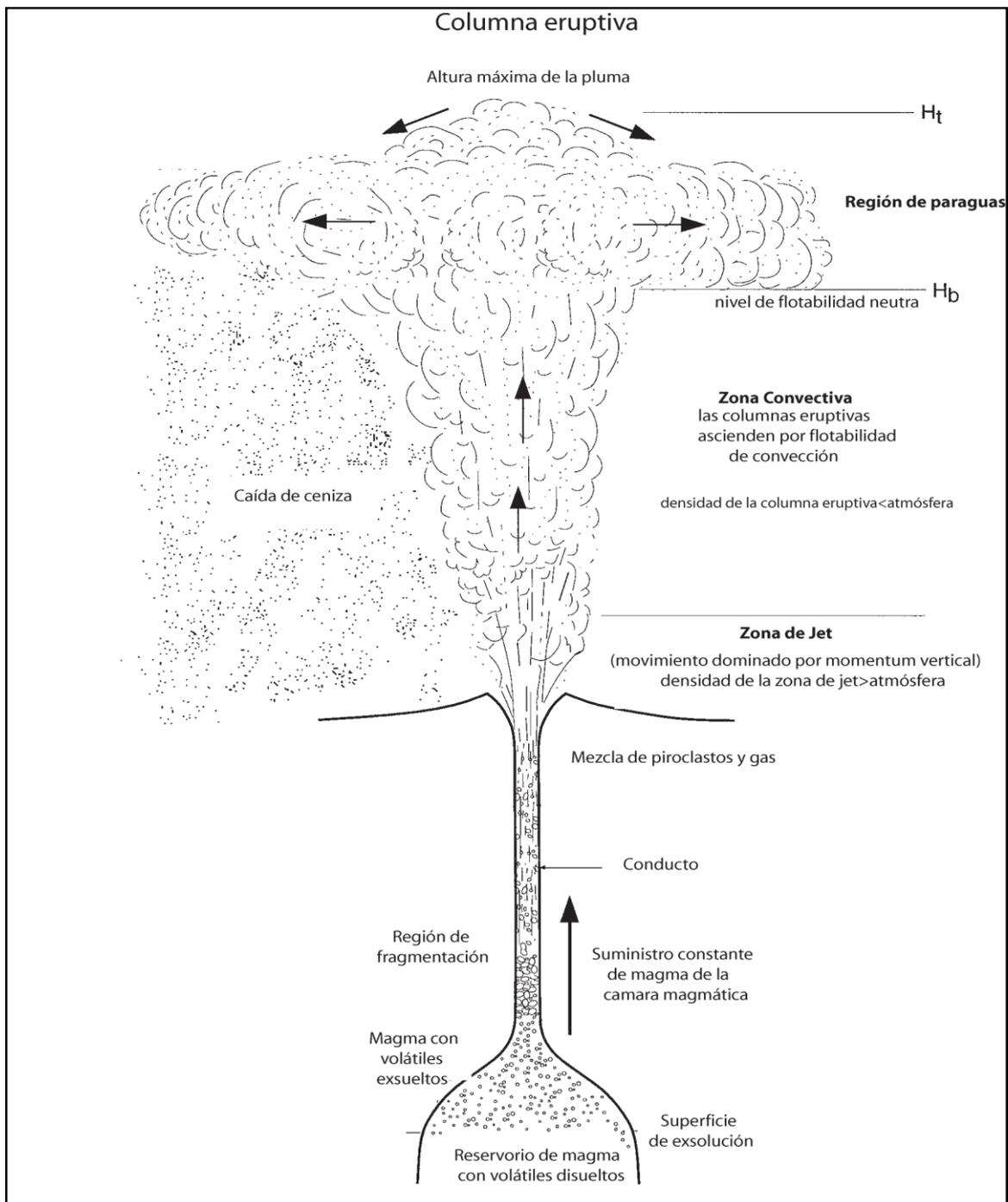


Figura 3-3 Esquema de la formación de columnas eruptivas a partir de la desgasificación de los componentes volátiles. Figura tomada de Carey y Bursik (2001).

### 3.3.2 INTERACCIÓN MAGMA- AGUA

Como consecuencia de la interacción del magma con agua se tienen un aumento en el grado de fragmentación y en consecuencia en la producción de grandes volúmenes de ceniza volcánica fina. Un efecto de esta interacción es que al

momento en que el agua se convierte en vapor la densidad de la mezcla de material eruptivo disminuye y favorece la flotabilidad de la pluma. Por otro lado también puede provocar una disminución en la temperatura global de la columna eruptiva y por tanto una reducción del flujo termal (Carey y Bursik, 2001).

### 3.3.3 EFECTOS DEL VIENTO SOBRE LA COLUMNA ERUPTIVA

Las velocidades del viento presentes al momento de una erupción son determinantes para la formación o no de una zona de paraguas. Columnas eruptivas poco vigorosas ascienden en la atmósfera al mismo tiempo que son transportadas por el viento.

Se puede clasificar así a las columnas eruptivas en fuertes o débiles, en función de la presencia o no de una zona de paraguas (Carey y Bursik, 2001). Se puede por tanto expresar la diferencia entre estas como la razón entre la velocidad del viento y la velocidad de ascenso de la columna eruptiva. Una columna eruptiva débil, para la cual la razón es mayor ( $>1$ ), se ve más afectada por el viento tomando la característica de una columna eruptiva inclinada (bent-over) (Fig. 3-5). En cambio para columnas eruptivas fuertes esta relación pequeña y son poco afectadas por el viento. (Fig. 3-2, Fig. 3-4)

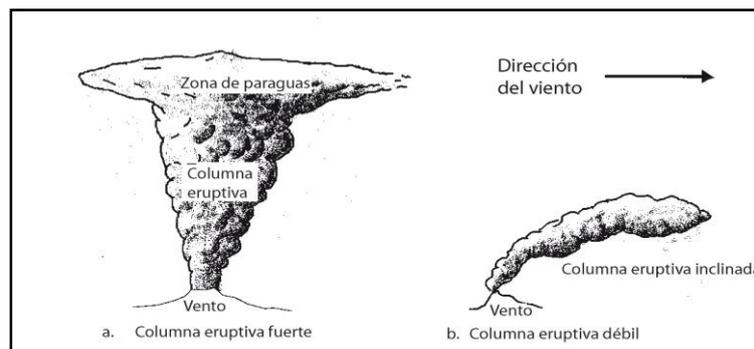


Figura 3-4 Esquema de la clasificación de columnas eruptivas generadas a partir de un viento volcánico. a. Columna eruptiva fuerte característica de erupciones Vulcanianas. b. Columna eruptiva inclinada característico de erupciones discretas y en condiciones ventosas. Figura tomada de Carey y Bursik (2001).



*Figura 3-5 Columna eruptiva débil generada durante la actividad de marzo 2013 (6/03/2013) en el volcán Tungurahua vista desde Pillate (UTM: 776144; 9839102). (Fotografía: Narváez D.)*

### **3.4 DEPÓSITOS PIROCLÁSTICOS**

Según Cas y Wright (1987) los depósitos piroclásticos están conformados por material fragmentado que se forma debido a la actividad volcánica explosiva. Estos depósitos se clasifican según su modo de transporte y depositación en: corrientes de densidad (Druitt, 1998) y caídas.

#### **3.4.1 DEPÓSITOS PIROCLÁSTICOS DE CAÍDA**

Son depósitos producidos por la caída de material desde la zona de jet o de la zona de pluma durante una erupción explosiva. Las partículas más grandes y densas caen más rápido con trayectorias balísticas mientras las más finas se mantienen más tiempo en la atmósfera. Debido a este fenómeno los depósitos de

caída se caracterizan por tener un buen sorteo y una disminución del tamaño de grano en dos direcciones hacia el techo del depósito y lateralmente alejándose del viento. El tamaño, el espesor y la forma del depósito, así como la distribución del tamaño de la partícula dependen de la tasa de expulsión, el volumen emitido, la energía de la explosión y la dirección y velocidad del viento que prevalecen durante la erupción (Winter, 2010) (Fig. 3-6).

Depósitos de caída ocurren también luego de que material de grano fino se desprende de los flujos piroclásticos en movimiento (Cas y Wright, 1987).

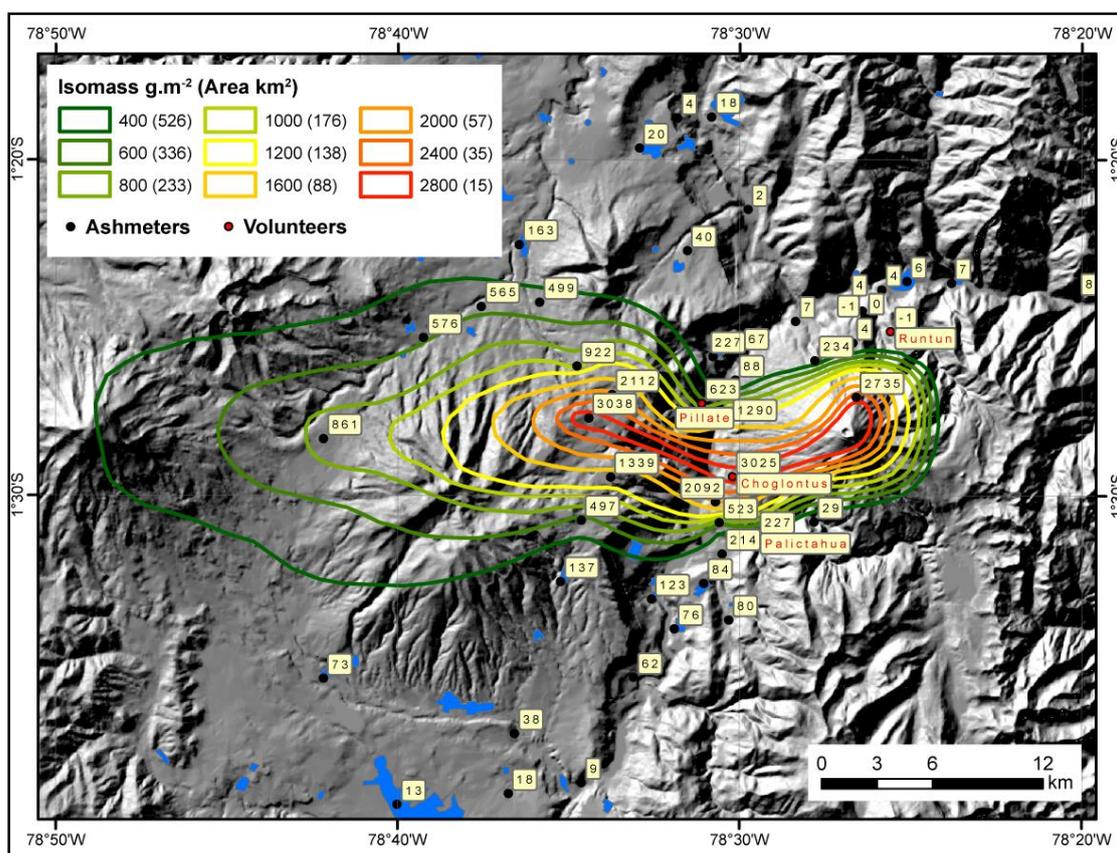


Figura 3-6 Dispersión de la ceniza durante el periodo eruptivo de julio-agosto 2013. Tomado de Parra et al. (en preparación).

### **3.4.2 DEPÓSITOS DE CORRIENTES DE DENSIDAD PIROCLÁSTICAS.**

Las corrientes de densidad piroclástica son una mezcla de partículas y de gases volcánicos calientes que se mueven rápidamente (con o sin agua libre) a lo largo de la superficie y bajo la influencia de la gravedad. Estos se forman por el desplome gravitacional de domos de lavas, colapso o emisión continua de una columna eruptiva o por erupciones laterales (Druitt, 1998)

Se reconocen dos tipos de corrientes de densidad piroclástica, basados en las características texturales y sus depósitos. Estos son: surges y flujos piroclásticos.

#### **3.4.2.1 Surges piroclásticos**

Según Druitt (1998) existen cuatro tipos de surges piroclásticos:

- Surge de base (base surges): formados durante erupciones freato-magmáticas. Este surge se esparce como una nube radial a lo largo del suelo o del mar.
- Surge de explosión lateral (lateral blast): formado de una rápida descompresión de un magma altamente presurizado. Estos pueden formarse durante un deslizamiento gigante.
- Surge de fondo (ground surges): finos depósitos dejados en los bordes frontales de flujos piroclásticos.
- Surge de nube de ceniza (ash-cloud surge): finos depósitos dejados por la nube de ceniza que se forma sobre los flujos piroclásticos.

Se definen a los surges como corrientes turbulentas que se movilizan en suspensión llevando una baja concentración de partículas en una fina capa de carga de fondo (bed-load layer) (Druitt, 1998; Cas y Wright, 1987). Sus depósitos son controlados por la topografía y tienden a acumularse o a ser más espesos en depresiones topográficas (Cas y Wright, 1987).

Los depósitos de surges están comúnmente enriquecidos en líticos más densos y cristales (Druitt, 1998). Se caracterizan por bajos ángulos de estratificación cruzada, formas de dunas, estructuras oleadas, entre otras (Cas y Wright, 1987). Sus capas son muy bien estratificadas en una escala de decímetros a centímetros

y muestran estratificación planar, cruzada o en olas. Otras capas también presentan gradación inversa, normal o son masivos.

Algunos depósitos pueden contener estructuras tipo “pipe” por la segregación de gas desde depósitos de flujo anteriores (Cas y Wright, 1987).

Si la temperatura del surge es menor a 100°C el vapor condensa y el surge llega a ser una suspensión de tres fases: sólido, gotas de agua y gas (Wohletz y Sheridan, 1979) y se los conoce como surge “húmedo”. Mientras que si la temperatura es mayor a 100°C la fase de agua está ausente y se conoce como surge “seco”. Depósitos de surges secos contienen en ocasiones madera carbonizada y son mejor sorteados que los surges húmedos.

#### 3.4.2.2 Flujos piroclásticos

Según Druitt (1998) se reconocen dos formas de generación de flujos piroclásticos los cuales son:

- Por colapso de un domo de lava:

Este flujo piroclástico se conoce como *flujos de bloque y ceniza* (block & ash flow). Esta corriente piroclástica se movilizan gracias a la gravedad como flujos altamente concentrados a los cuales comúnmente se les sobrepone una nube de ceniza. Sus depósitos se caracterizan por contener abundantes componentes densos pobremente vesiculados.

- Por colapso de una columna eruptiva

Se reconocen dos tipos: flujo de escoria, formados por el colapso de una columna eruptiva y cuyos depósitos son ricos en componentes moderadamente vesiculados; flujo de pómez, formados por el colapso de una columna eruptiva y cuyos depósitos son ricos en componentes altamente vesiculados.

La columna colapsada genera una corriente estratificada por densidad en las cuales las partículas son suspendidas por turbulencia (Druitt, 1998). Internamente los depósitos de flujos piroclásticos son generalmente masivos o pobremente

sorteados. Al igual que los depósitos de surges, estos depósitos pueden presentar “pipes” debido a la segregación de gas (Cas y Wright, 1987). Sus velocidades varían de 50 a más de 200 km/h (Winter, 2010).

Si el depósito de flujo piroclástico contiene como mayor constituyente a la pómez se la conoce como *ignimbrita* (Druitt, 1998)



*Figura 3-7 Depósito de flujo piroclástico generado durante la erupción del 14 de julio 2013 en el volcán Tungurahua, quebrada Achupashal. La ausencia del material finogranular en el depósito se debe a su elutriación durante el descenso del flujo piroclástico por los flancos del volcán.*

## 4 CAPITULO IV

### METODOLOGÍA

#### 4.1 RECOLECCIÓN DE CENIZAS

El Instituto Geofísico, como parte de sus labores de monitoreo y estudio de los volcanes, mantuvo instalada desde Marzo 2007 hasta Diciembre 2012 una red de contenedores de cenizas alrededor del volcán Tungurahua. Estos contenedores correspondían a envases sólidos en los cuales se medía el espesor sedimentado de ceniza (Bustillos et al., 2013). A partir de 2012, estos contenedores fueron reemplazados por cenizómetros caseros los cuales pueden obtener además del espesor medido en mm (hasta un mínimo de 0,3 mm), el peso de ceniza sedimentado (Bernard et al., 2013). Adicionalmente estos instrumentos evitan las interacciones de la ceniza recolectada con el viento y permiten el paso de la lluvia evitando la acumulación de agua (Bernard, 2013). Las muestras de recolección diaria pertenecientes a Marzo y Julio de 2013 fueron recolectadas con este último sistema mencionado (Fig. 4-1).

Cada uno de los cenizómetros se encuentran ubicados junto a estaciones de monitoreo pertenecientes al IG o en las partes altas de edificaciones privadas, cuyo acceso es limitado. Está priorizado la ubicación de los cenizómetros en las propiedades de los voluntarios que forman parte de la red de vigías del volcán Tungurahua, los cuales brindan información de la actividad eruptiva al personal que labora en el OVT-IG.

La recolección diaria de ceniza es realizada por parte de los voluntarios locales de cuatro localidades que son: Pillate, Choglontus, Runtún y Palictahua. Estas personas fueron capacitadas y dotadas con balanzas electrónicas con una precisión de 0.1 g con lo cual se puede obtener la masa de tefra sedimentada *in situ* (g). Dividiendo este valor por el área de acumulación se obtiene la “densidad de área *in situ*” (g/m<sup>2</sup>). De igual manera se puede calcular ambos valores luego de secar las muestras en laboratorio conociendo así la densidad de área seca (g/m<sup>2</sup>) (Bernard, 2013). Este último valor está representado en las figuras Fig. 6-26 y Fig. 6-6.



*Figura 4-1 Cenizómetro casero instalado cerca de la estación de monitoreo Retu, ubicado a 3900 msnm en el flanco Norte del volcán Tungurahua.*

La ceniza utilizada para realizar el análisis geoquímico fue en algunos casos recolectada de los paneles solares que sirven de abastecimiento a los equipos de monitoreo instalados por parte del Instituto Geofísico, debido a la mayor cantidad de material disponible y a su fácil acceso.

## **4.2 GEOQUÍMICA**

Con el fin de determinar si existen cambios composicionales en los magmas involucrados en cada uno de las fases eruptivas ocurridas en el volcán Tungurahua desde enero 2010, fue necesario realizar un análisis geoquímico del material emitido.

El material emitido comprende cenizas de las caídas piroclásticas, bombas y material denso de los flujos piroclásticos asociados. Las muestras de ceniza escogidas cumplían con las siguientes condiciones: suficiente cantidad de ceniza recolectada ( $> 8$  g), haber sido recolectadas durante las tres primeras semanas iniciada la fase eruptiva. Con esta última condición se espera una homogenización de la muestra con el fin de que represente a toda una fase eruptiva.

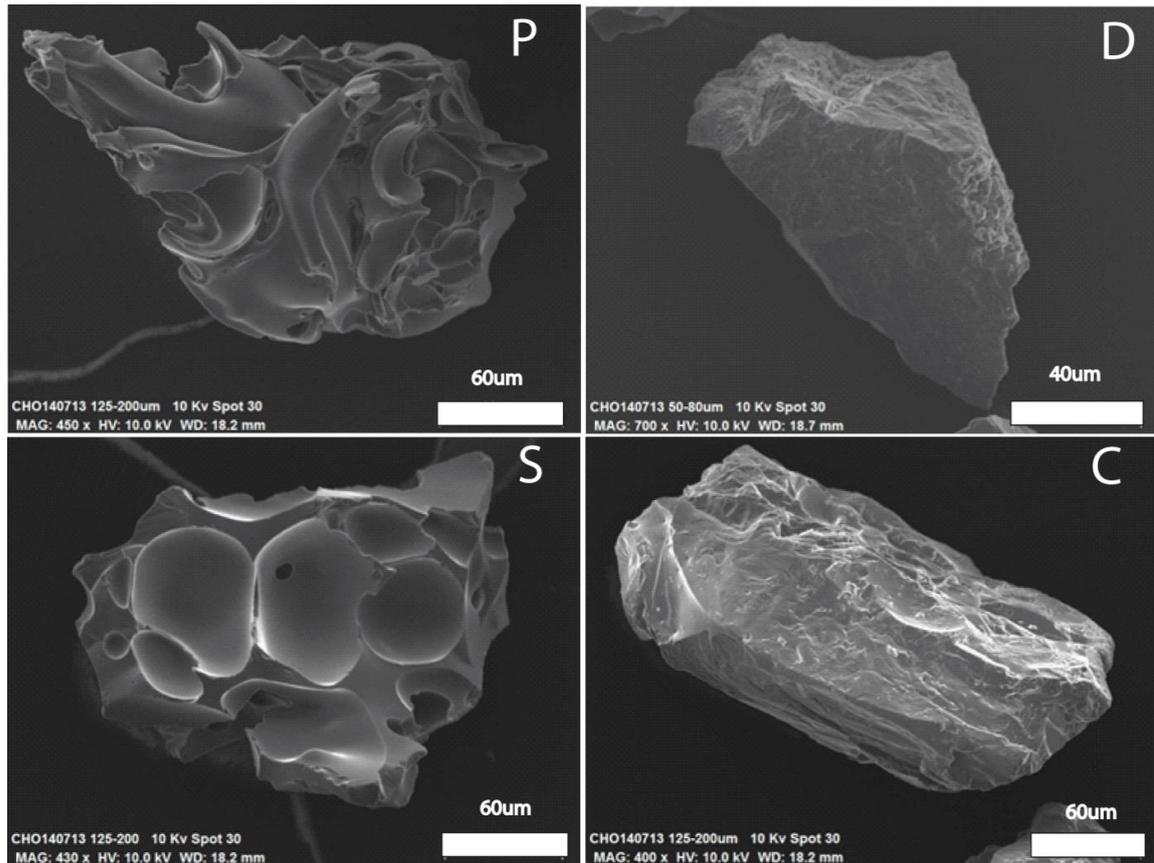
Considerando que la composición geoquímica de una misma caída de ceniza puede ser distinta si cambian los componentes que la conforman, por ejemplo: el contenido y tipo de cristales generalmente es diferente en función de la distancia a la que el depósito se encuentra del viento (Samaniego et al., 2011) (sedimentación por diferente peso, tamaño y forma de los cristales). Se ha considerado a las escorias como el material que representa de mejor manera la parte juvenil del magma emitido. Por tal razón se separaron las escorias de cada una de las muestras de cenizas.

Para alcanzar un porcentaje de pureza de escorias de entre 80-90% en cada muestra, fue necesario realizar un ensayo de tamizaje. Con este ensayo de tamizaje se logró separar un material finogranular ( $<100 \mu\text{m}$ ) de color blanco a incoloro presente en la mayoría de las muestras. Posteriormente se utilizó el separador magnético FRANTZ, con el fin de separar los cristales libres y el material juvenil micro-vesiculado de las escorias.

Una vez separadas las escorias, estas fueron molidas a mano en un mortero de ágata y enviadas para el análisis XRF e ICP-MS de elementos mayores, menores y en trazas al Laboratorio de Geoquímica de la Universidad de Bretaña Occidental (Brest-Francia).

### **4.3 ESTIMACIÓN DE COMPONENTES**

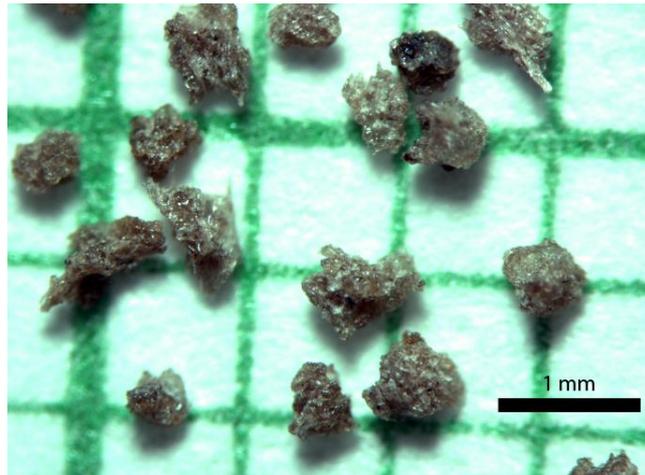
Previo al análisis de componentes, todas las muestras fueron secadas, cuarteadas y tamizadas en el rango de  $315 \mu\text{m}$ - $500 \mu\text{m}$ . Basados en criterios texturales (forma, color, vesicularidad) (Eychehenne y Le Penneec, 2012), cinco clases de piroclastos han sido reconocidos en las muestras de ceniza analizadas. Estas cinco clases se describen a continuación:



*Figura 4-2 Ejemplo de 4 clases de piroclastos identificados: material juvenil microvesiculado (P), líticos negros densos (D), escoria (S), cristales libres (C). Las partículas oxidadas no son posibles distinguir de las escorias en las imágenes SEM, debido a que la mayoría corresponde a escorias oxidadas.*

#### 4.3.1 MATERIAL JUVENIL MICRO-VEVICULADO

Es un vidrio volcánico de color amarillento. Clastos sub-translúcidos o translúcidos, los cuales presentan vesiculación moderada a alta, con vesículas microscópicas, y en ocasiones se distinguen por un aspecto fibroso. Estos componentes pueden o no poseer cristales.

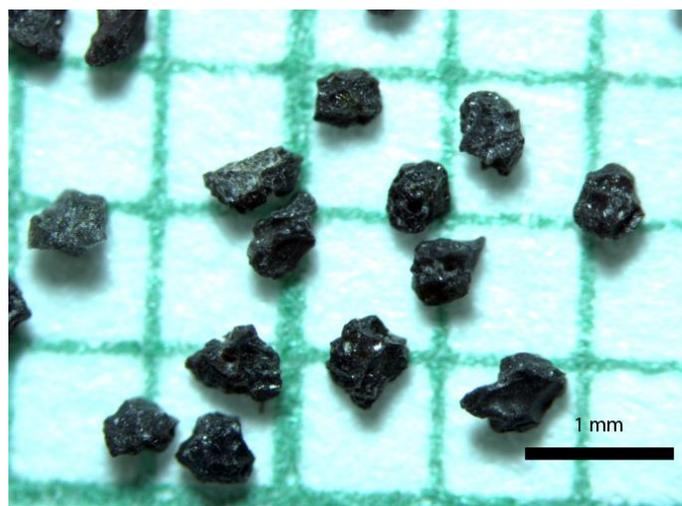


*Figura 4-3 Material juvenil micro-vesiculado presente en las muestras de marzo 2013 observados bajo binocular. Material similar al presente en las muestras de julio 2013.*

#### **4.3.2 ESCORIA (MATERIAL JUVENIL MACRO-VESICULADO)**

Es un vidrio volcánico negruzco. Son clastos que poseen vesículas (observables a simple vista) o bahías en los bordes de los granos. En algunos casos las escorias son muy brillantes.

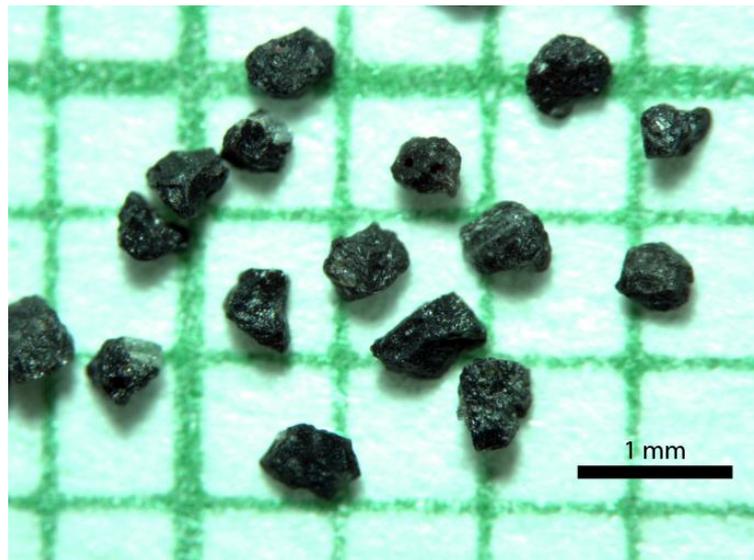
Las vesículas en la pómez y en las escorias varían ampliamente en tamaño y forma. Ambos se forman por perturbación explosiva del magma vesiculado. (McPhie et al., 1993)



*Figura 4-4 Escorias presentes en las muestras de marzo 2013 observadas bajo binocular. Material similar al presente en las muestras de julio 2013.*

### 4.3.3 LÍTICOS DENSOS NEGROS

Descritos por McPhie et al. (1993) como: fragmentos piroclásticos “líticos conatos”, son fragmentos juveniles derivados de las partes solidificadas del magma expulsado, tal como corteza desgasificada de lava estancada en el viento, magma enfriado contra las rocas del conducto, o porciones de magma ya cristalizado en la cámara magmática.

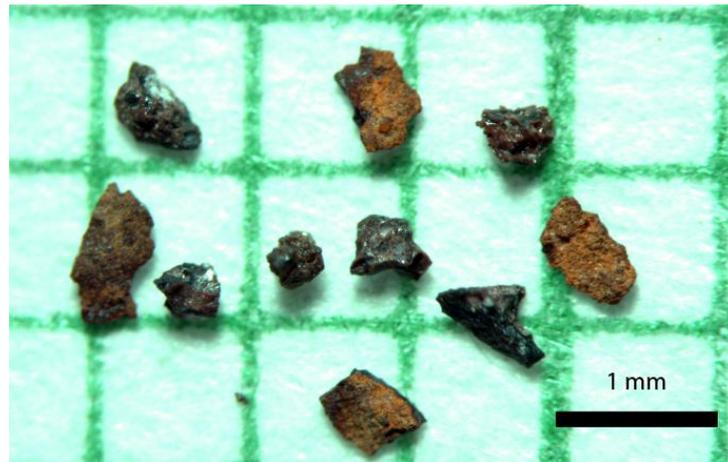


*Figura 4-5 Líticos densos negros presentes en las muestras de marzo 2013 observadas bajo binocular. Material similar al presente en las muestras de julio 2013.*

### 4.3.4 PARTÍCULAS OXIDADAS (Rocas del conducto)

Eychenne et al. (2013) indica que la ocurrencia de escorias rojizas en los depósitos de ceniza, está relacionado a un sistema hidrotermal que bordea el conducto del volcán Tungurahua. Este grupo es conocido por McPhie et al. (1993) como: “piroclastos líticos accesorios” y corresponden a fragmentos de la roca caja que son desprendidos de las paredes del conducto y del viento durante una explosión.

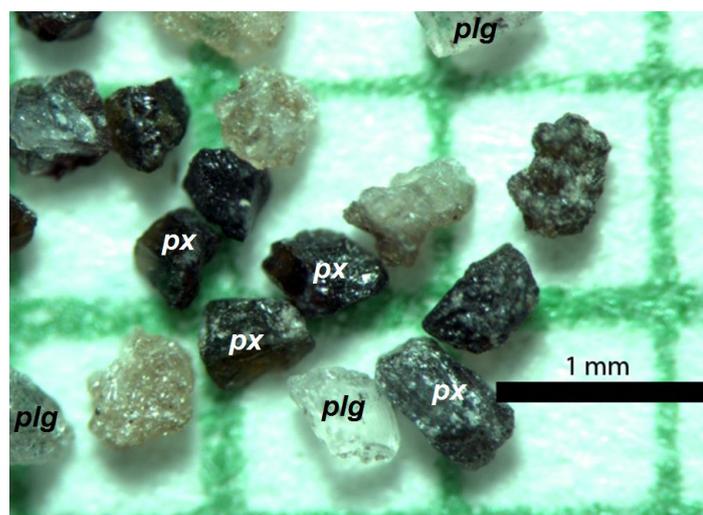
Se ha considerado dentro de este grupo a los fragmentos que poseen una superficie mayoritariamente rojiza, evidencia de oxidación.



*Figura 4-6 Partículas oxidadas presentes en las muestras de marzo 2013 observadas bajo binocular. Material similar al presente en las muestras de julio 2013.*

#### 4.3.5 CRISTALES

Grupo conformado por cristales euhedrales o fragmentos de cristales. Este material es liberado durante erupciones explosivas de magmas porfíricos y pueden ser separados de la matriz encajante por procesos volcánicos de fragmentación primarios. Una proporción pequeña puede derivarse de la desintegración de las paredes de la roca caja. Algunos de estos cristales poseen una delgada capa de vidrio, material micro-vesiculado o matriz de roca densa adherido a sus caras. (McPhie et al., 1993) Los cristales presentes son: plagioclasas, ortopiroxenos y clinopiroxenos.



*Figura 4-7 Cristales presentes en las muestras de marzo 2013 observadas bajo binocular. Material similar al presente en las muestras de julio 2013. Plg:plagioclasas; px=piroxenos.*

### **4.3.6 PROCEDIMIENTO DE LA ESTIMACIÓN**

Cada muestra fue cuarteada hasta obtener alrededor de 500 partículas. Estas partículas fueron separadas en recipientes previamente pesados, considerando las cinco clases anteriormente descritas. Los recipientes y el material contenido luego de la separación fueron pesados nuevamente para obtener el peso de cada clase. Para esto se utilizó una balanza de alta precisión ( $10^{-4}$  g). La medición se realizó en tres ocasiones para la misma muestra en diferentes grupos de partículas previamente cuarteadas, obteniendo valores similares en cada una de ellas.

## **4.4 MORFOLOGÍA**

Los piroclastos juveniles tienen formas que pueden estar relacionados a su origen y a la historia de su transporte. Las partículas grandes pueden ser analizadas directamente; la morfología de las partículas finas puede ser mejor estudiada utilizando un microscopio electrónico de escaneo (Houghton et al., 2001) o como en este caso utilizando el instrumento Morphology G3.

### **4.4.1 INSTRUMENTOS DE MEDIDA.**

#### **4.4.1.1 Morphology G3**

El sistema de caracterización de partículas Morphology G3 de Instrumentos Malvern que fue utilizado para el análisis de las cenizas provenientes del volcán Tungurahua, permite determinar el tamaño y la forma de las partículas utilizando una técnica conocida como Análisis de Imagen Estática. El equipo utilizado para la realización de estos análisis pertenece al Laboratorio de Magmas y Volcanes, Clermont-Ferrand, Francia. (Fig. 4-8)



*Figura 4-8 Equipo “Morphology G3” utilizado en el análisis morfológico de las cenizas de marzo y julio 2013.*

Según Malvern Instruments Ltd, 2014, tres pasos son necesarios en el proceso de medición.

*1. Preparación y dispersión de las muestras.*

Con el fin de obtener una separación óptima de las cenizas y aglomerados, este instrumento utiliza un sistema de dispersión mediante aire seco. Este aire golpea el material a analizar sin afectarlo, permitiendo su separación. La intensidad de este dispersador puede ser controlada dependiendo del tipo de material (Malvern Instruments Ltd, 2014).

En el caso de las cenizas del volcán Tungurahua se realizaron dos análisis para cada muestra. Uno, para obtener los datos de granulometría y otro para el análisis de la morfología. En ambos casos se tomó un volumen de muestra de 11-13 mm<sup>3</sup>. La muestra para el primer análisis correspondía a una muestra homogenizada sin tamizar, mientras que para el segundo la muestra fue tamizada en la fracción 125-200 μm.

## *2. Captura de imagen.*

El equipo captura imágenes individuales de cada partícula de ceniza mientras mantiene enfocado el resto de partículas (Malvern Instruments Ltd, 2014). Para cada análisis fue necesaria la elección de: aumento del objetivo e intensidad de luz.

## *3. Análisis de datos*

Este equipo tiene la capacidad de medir propiedades morfológicas de las partículas a partir de las imágenes. Los datos obtenidos pueden ser graficados y clasificados dependiendo de los fines del estudio gracias al software propio del instrumento. Además se guardan al mismo tiempo imágenes en escala de grises de cada partícula para verificar la calidad y cuantificar los resultados (Malvern Instruments Ltd, 2014).

El tratamiento de los datos consistió en eliminar las fichas correspondientes a las fotografías de partículas que presentaban: menos de 500 píxeles, formas extremadamente convexas y granos muy alargados, los cuales no corresponderían a material volcánico.

El análisis morfológico está basado en un estudio de morfología realizado por Coltelli et al. (2008), quienes a partir de imágenes BSE (Backscattered Electron) obtienen las características morfológicas.

Para el presente trabajo se utilizaron los parámetros dados por el MG3 (Anexo 8), los cuales difieren de los utilizados por Coltelli et al. (2008), sin embargo describen de igual manera las formas de las partículas. Según el mismo autor los parámetros utilizados en la elaboración de las figuras: Fig. 6-14, Fig. 6-15, Fig. 6-16, Fig. 6-31, Fig. 6-32 y Fig. 6-33 representan: elongación, elongación total de la partícula pero sin hacer ninguna distinción entre formas rectangulares y circulares; circularidad de alta sensibilidad (HS circularity) y rectangularidad (rectangularity), son parámetros que representan las irregularidades o asperezas de la superficie; y solidity, parámetro descriptor de la robustez de la forma de las partículas. En el mismo trabajo se observa que la angularidad, definida como la característica o condición

de una partícula para ser angular, es mayor con el aumento de la rectangularidad y disminución de la circularidad de alta sensibilidad.

Para cada uno de estos parámetros se calculó: el promedio, desviación estándar, moda y número de partículas analizadas en un rango de tamaño determinado cuyos resultados están expuestos en el Anexo 9.

#### 4.5 GRANULOMETRÍA

La granulometría, definida como la medición de la distribución de tamaño en un conjunto de partículas (cenizas), puede ser analizada utilizando las fórmulas de Folk y Ward (1957). Se puede calcular para cada muestra de ceniza la media ( $Md_\phi$ ), desviación estándar ( $\sigma_\phi$ ), valor de curtosis ( $K_G$ ) y valor de asimetría ( $Sk_l$ ), cuyas formulas son:

$$\text{Media (Md)} = \frac{\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}}{3}$$

$$\text{Desviación estándar } (\sigma_\phi) = \frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{4} + \frac{\phi_{95} - \phi_5}{6.6}$$

$$\text{Curtosis } (K_G) = \frac{\phi_{95} - \phi_5}{2.44(\phi_{75} - \phi_{25})}$$

$$\text{Asimetría } (Sk_l) = \frac{\phi_{16} + \phi_{84} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{84} - \phi_{16})} + \frac{\phi_5 + \phi_{95} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{95} - \phi_5)}$$

De esta manera las muestras de cenizas puede ser clasificadas como:

Desviación estándar		Curtosis		Asimetría	
< 0.35	Muy buen sorteo	< 0.67	Muy platicúrtica	-1 a - 0.3	Muy negativa
0.35 a 0.50	Buen sorteo	0.67 a 0.9	Platicúrtica	- 0.3 a - 0.1	negativa

0.50 a 1	Moderadamente sorteado	0.9 a 1.11	Mesocúrtica	- 0.1 a 0.1	Casi simétrica
1 a 2	Pobrementemente sorteado	1.11 a 1.5	Leptocúrtica	0.1 a 0.3	Positiva
2 a 4	Muy pobrementemente sorteado	1.5 a 3	Muy leptocúrtica	0.3 a 1	Muy positiva
> 4	Sorteo extremadamente pobre	> 3	Extremadamente leptocúrtica		

Según White y Houghton (2006) los depósitos piroclásticos primarios no consolidados se clasifican según su tamaño de grano en:

Tamaño de grano		Depósitos primarios No consolidados
( <i>phi</i> )	( <i>mm</i> )	
>4	<1/16	Ceniza extremadamente fina
3-4	1/16-1/8	Ceniza muy fina
2-3	1/8-1/4	Ceniza fina
1-2	1/4-1/2	Ceniza media
0-1	1/2-1	Ceniza gruesa
-1 a 0	1-2	Ceniza muy gruesa
-2 a -1	2-4	Lapilli fina
-4 a -2	4-16	Lapilli media
-6 a -4	16-64	Lapilli gruesa
< -6	>64	Bloque/bomba

La distribución granulométrica de la ceniza provee importantes indicios de los procesos de fragmentación. Por ejemplo, la distribución de tamaño unimodal de una erupción Vulcaniana puede resultar de una fragmentación por rápida descompresión de un tapón de lava. (Morrisey y Mastin, 2001)

Las características de tamaño de grano de las partículas juveniles, a lo largo de todo el depósito de caída, refleja solamente procesos de fragmentación y erupción, no de transporte. (Houghton et al., 2001)

El tamaño de los clastos líticos no es siempre una medida de la eficiencia de la fragmentación, especialmente en depósitos con muchos líticos extraños (ej. Muestra 14J13).

#### **4.5.1.1 Tipos de ensayo**

##### *4.5.1.1.1 Ensayo de tamizado*

La distribución de tamaño (expresado en porcentaje en peso % wt) de las cenizas se realiza utilizando tamices. Estos tamices están formados por alambres que se entretejen formando aberturas cuadradas de tamaños normalizados, por lo tanto deben ser colocados en orden descendente, con el tamiz de mayor abertura en el tope y un recipiente de recolección en la base.

Los pesos del material acumulado en cada tamiz fueron ingresados en el programa SFT (Sequential Fragmentation/Transport) desarrollado por Ken Wohletz, diseñado para convertir los datos de tamaño y encontrar los parámetros de una distribución de tamaño log normal (Wohletz, 2013). El programa requiere datos en rangos de  $0,5 \phi$  y  $1 \phi$  ( $\Phi(\phi) = -(\log_2(\text{diámetro (mm)}))$ ) por lo que fue necesario utilizar tamaños de abertura de las mallas cada  $0,5 \phi$ .

##### *4.5.1.1.2 Granulometría láser*

Como se describe en Eshel et al. (2004) el método de granulometría láser se basa en el cálculo de la difracción hacia adelante, que un cuerpo esférico produce al ser incidido por un haz de láser. El ángulo de difracción es inversamente proporcional al tamaño de la partícula y la intensidad del haz difractado en cualquier ángulo es una medida del número de partículas con un área de sección transversal específica en el camino del haz. El modelo óptico más comúnmente utilizado en el cálculo del tamaño de las partículas es la "teoría de Mie".

La teoría de Mie es una aproximación de las ecuaciones de Maxwell y proporciona una solución para el caso de una onda plana sobre una esfera homogénea de cualquier tamaño. Adicionalmente, toma en cuenta otro fenómeno diferente a la difracción (ej. transmisión a través de la partícula), y por tanto requiere conocimiento del índice de refracción del material analizado. Es así que esta teoría ofrece una solución exacta para la dispersión de la luz desde una esfera homogénea. Así, la distribución de tamaño con este método está basada en el volumen de las partículas y no en su masa.

Las mayores ventajas de este método son: rapidez de los análisis (5-10 min) por muestra, alta repetitividad, pequeña cantidad de muestra (<1 g) y amplio rango de fracciones de tamaño en las que la muestra entera puede dividirse para el análisis posterior (para este trabajo cada 0,5  $\phi$ ). Mientras que las desventajas son el alto costo del equipo y la insuficiente confianza de los resultados debido al bajo número de análisis de difracción láser comparado con el amplio número de análisis llevados a cabo con los métodos tradicionales.

#### 4.5.1.1.3 *Morphology G3*

Los datos de distribución granulométrica reportados por este equipo están basados en el volumen y no en la masa, al contrario del tamizado clásico. El dato utilizado para describir la distribución granulométrica es SE Volumen. Este valor corresponde al volumen equivalente de una esfera con igual CE Diámetro de la partícula. CE Diámetro, corresponde al diámetro de un círculo con la misma área que el área proyectada de la partícula (Anexo 8). Los datos obtenidos mediante este equipo no fueron utilizados debido a la gran variación que existió con los datos obtenidos mediante el ensayo de tamizado.

## **5 CAPÍTULO V**

### **ACTIVIDAD ERUPTIVA DEL VOLCÁN TUNGURAHUA**

#### **DESDE 1999 HASTA AGOSTO 2013**

### **5.1 ACTIVIDAD ERUPTIVA DEL VOLCÁN TUNGURAHUA**

#### **5.1.1 ACTIVIDAD ERUPTIVA 1999-2010**

Según Samaniego et al. (2011), la actividad eruptiva ocurrida entre 1999-2005 consistió de fases explosivas moderadas a bajas. Las fases más importantes fueron las de noviembre-diciembre 1999, agosto 2001, septiembre 2002, septiembre-noviembre 2003 y mayo-julio 2004. Estas fases fueron caracterizadas por un estilo estromboliano, con explosiones de corta duración con cañonazos asociados, cuyas columnas eruptivas alcanzaban de 2 a 7 km snc.

A inicios de abril de 2006 el personal del IG-EPN detectó sismos de largo periodo profundos. Estos eventos fueron seguidos de un aumento de SO<sub>2</sub> emitido por el volcán y de una inflación registrada desde mayo de 2006 (Arellano et al., 2008). Para inicios de julio de 2006, se registró un aumento de la sismicidad superficial que culminó con las erupciones del 14 de julio y 16-17 de agosto. Esta fue la primera vez que el volcán experimentaba alta actividad explosiva, la misma que produjo flujos piroclásticos que descendieron por los flancos Noroeste, Oeste y Suroeste del volcán. Esta fase paroxísmica terminó con la emisión de un flujo de lava. La actividad eruptiva que continuó en octubre-noviembre fue similar a la ocurrida en el periodo 1999-2005.

Otra fase de actividad explosiva ocurrió en febrero 2008, produciendo también flujos piroclásticos pero de volúmenes menores a lo de 2006.

#### **5.1.2 ACTIVIDAD ERUPTIVA, ENERO 2010-JULIO 2013.**

La actividad eruptiva del volcán Tungurahua registrada entre enero 2010 y julio 2013 puede ser dividida en fases eruptivas.

Se considera una “fase eruptiva”, al lapso de tiempo durante el cual se observa en superficie una actividad explosiva o de emisión caracterizada por la salida de material sólido, independientemente de la presencia o no de explosiones. Esta fase de actividad es seguida por una fase de reposo sin emisión de ceniza. Considerando este criterio, entre enero 2010 y agosto 2013 se han contabilizado 10 fases eruptivas (Hidalgo et al., 2014). Cada una de ellas posee una peculiar actividad interna y de superficie. Para este trabajo se consideró a la actividad eruptiva de agosto 2012 como una fase independiente, diferenciándola de la fase Diciembre 2011-Julio 2012.

La información presentada a continuación, concerniente a las fases eruptivas ocurridas en el volcán Tungurahua, fue tomada de los informes semanales del Observatorio del Volcán Tungurahua (OVT) (del informe # 515 al informe # 705), informes especiales emitidos por el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional y datos proporcionados por NOAA Satellite and Information Service, (2014).

Fase	Enero-marzo 2010	Mayo-Agosto 2010	Noviembre-Diciembre 2010	Abril-Mayo 2011	Noviembre-Diciembre 2011
<i>Actividad superficial e instrumental previa</i>	IAS muy bajo (2), Máximo número de eventos: 2 LP/día, 3 VT/día. Emisiones débiles de vapor de agua que alcanzan 100-200m	IAS muy bajo-bajo (2-3). Máximo número de eventos: 56 LP/día, 3 VT/día.	IAS bajo (3). Máximo número de eventos: 38 LP/día, Ausencia de VT. Tendencia inflacionaria en Pondoá.	IAS muy bajo (1-2). Máximo número de eventos: 5 LP/día, 2 VT/día. Inflación registrada en la estación de inclinometría de Retu.	IAS moderado bajo (4). Máximo número de eventos: 27 LP/día, 4 VT/día. Inflación registrada en la estación de inclinometría de Retu
<i>Inicio</i>	31/12/2009	26/05/2010.	22/11/2010	20/04/2011	27/11/2011
<i>Duración (días)</i>	64	70	34	37	13
<i>Actividad superficial e instrumental durante la actividad</i>	Bramidos, emisiones de bloques y ceniza, y caída de ceniza en las localidades cercanas. Se registra un máximo de 64 LP el 31/12/2009.	28/05-19/06/2010 continuos episodios explosivos y bramidos asociados. Luego del 19/06 se registran explosiones discretas. Se registra un máximo de 93 LP el 26/06/2010.	Emisión de ceniza y explosiones Columna de 2-3 km snc con contenido moderado a alto de ceniza. Se registra un máximo de 70 LP el 21/12/2010.	Explosiones poco frecuentes y LP y VT casi nulos. Columnas eruptivas de entre 1-4 km snc con contenido bajo de ceniza. Se registra un máximo de 233 LP el 9/5/2011.	Bramidos constantes, explosiones esporádicas Generación de pequeños flujos piroclásticos. Se registra un máximo de 248 LP el 9/12/2011.

<i>Actividad eruptiva importante</i>		28/05/2010 Erupción volcánica con columna eruptiva que alcanza 7 km snc. Caída de cascajo en las cercanías. Caída de ceniza incluso en Guayaquil.	22/11/2010 Explosión con columna eruptiva de 6 km snc. 4/12/2010 emisión constante de ceniza cuya columna alcanza 4-5 km snc.	29/04/2011, aumento de la actividad estromboliana con columna eruptiva que alcanza 3 km snc.	
<i>Flujos piroclásticos (FP)</i>		Con la erupción volcánica ocurrida el 28/05/2010 FP por 5 quebradas. Descenso hasta ~2.5 km bnc.	22/11/2010 FP descendieron 4 km bnc principalmente por Q. Palmarco. 4/12/2010 descenso de FP por 8 quebradas. Descenso hasta ~2 km bnc.	29/04/2011, descenso de un FP por la quebrada Chontapamba que desciende ~1.5 km bnc.	27/11/2011 descenso de un FP por la quebrada Achupashal. Descenso hasta ~2 km bnc.
<i>#explosiones vulcanianas</i>	520 durante toda la fase. Máximo 29 el 3/02/2010.	1351 durante toda la fase. Máximo 246 el 31/05/2010.	111 durante toda la fase. Máximo 11 el 9/12/2010.	64 durante toda la fase. Máximo 11 el 21/05/2011.	52 durante toda la fase. Máximo 9 el 4/12/2011.
<i>Fin</i>	04/03/2010	03/08/2010	25/12/2010	26/05/2011	09/12/2011
<i>Actividad posterior relacionada</i>	Generación de lahares, 2 explosiones registradas el 19/03/2010.				Emisión de vapor que alcanza 1 km snc.

Fase	Diciembre 2011- Julio 2012	Agosto 2012	Diciembre 2012	Marzo 2013	Abril-Mayo 2013	Julio-Agosto 2013
<i>Actividad superficial e instrumental previa</i>	IAS moderada-alta a alta (6-7). Máximo número de eventos: 187 LP/día, 3 VT/día.	IAS moderada-baja (4). Máximo número de eventos: 26 LP/día, 4 VT/día.	IAS muy bajo (2). Máximo número de eventos: 7 LP/día, 4 VT/día. El día 13/12/2012 se registra 54 LP. Presencia de fumarolas alrededor del cráter.	IAS moderada-baja (4). Máximo número de eventos: 39 LP/día, 5 VT/día.	IAS moderada a moderada-baja (5-4). Máximo número de eventos: 82 LP/día, 2 VT/día	IAS baja a moderada-baja (3-4). Máximo número de eventos: 59 LP/día, 3 VT/día
<i>Inicio</i>	22/12/2011	05/08/2012	14/12/2012	01/03/2013	27/04/2013	14/07/2013
<i>Duración (días)</i>	223	31	29	19	20	23
<i>Actividad superficial e instrumental durante la actividad</i>	Explosiones seguidas por bramidos y columnas que alcanzan 3 km snc. Señales de tremor. Se registra un máximo de 226 LP el 20/04/2012.	Explosiones esporádicas y bramidos con columnas eruptivas de hasta 4 km snc. Se registra un máximo de 236 LP el 22/08/2012.	Explosiones y bramidos frecuentes. A partir del 1/01/2013 explosiones poco energéticas. Se registra un máximo de 228 LP el 24/12/2012.	Explosiones y bramidos con columnas eruptivas de 2 km snc. Se registra un máximo de 233 LP el 06/03/2013.	Emisiones constantes de columnas eruptivas con poca carga de ceniza, interrumpidas por episodios esporádicos de emisiones de mayor energía y/o explosiones. Se registra un máximo de 156 LP el 07/05/2013.	Explosiones intermitentes, y en ocasiones bramidos. Emisiones discretas de ceniza y tremor sísmico se observó a partir del 29/07/2013. Se registra un máximo de 384 LP el 14/07/2013.

<i>Actividad eruptiva importante</i>	22/12/2011 Explosión con columna eruptiva de 4 km snc.	10/08/2012. Explosión que estuvo acompañada de tremor sísmico que duró 5 horas. 19-20/08/2012. Señal de tremor durante todo el día. Caída de ceniza en las cercanías.	14/12/2012. Erupción con columna eruptiva de 7 km snc.	16/03/2013. Emisión continua de ceniza cuya columna alcanzó 4 km snc.	28/04/2013. Dos emisiones con columnas eruptivas de 2-5 km snc.	14/07/2013. Explosión seguida de señal de tremor de alta energía, que duró 2 h generando una columna eruptiva de 8.5 km snc.
<i>Flujos piroclásticos</i>	22/12/2011. Descenso de dos FP por la Q. Achupashal y Hacienda. Descenso hasta ~2 km bnc.	Reporte de pequeños flujos piroclásticos que no alcanzaban largas distancias.	14/12/2012. Descenso de un FP por Q. La Hacienda. Descenso hasta ~2 km bnc.	16/03/2013. Descenso de FP por las quebradas de Mandur y Achupashal. Descenso hasta ~1.5 km bnc.	28/04/2013. Descenso de un FP por el flanco occidental. Descenso hasta ~1.5 km snc.	14/07/2013. Descenso de FP por las quebradas Achupashal y Juive Grande-La Pampa. El FP que descendió por Q. Achupashal alcanzó río Chambo.
<i>Explosiones vulcanianas</i>	88 durante toda la fase. Máximo 10 el 1/05/2012.	51 durante toda la fase. Máximo 14 el 21/08/2012.	451 durante toda la fase. Máximo 132 el 20/12/2012.	118 durante toda la fase. Máximo 29 el 13/03/2013.	150 durante toda la fase. Máximo 25 el 7/05/2013.	64 durante toda la fase. Máximo 17 el 21/07/2013
<i>Fin</i>	31/07/2012	26/08/2012	11/01/2013	19/03/2013	16/05/2013	05/08/2013

## 6 CAPITULO VI

### ANÁLISIS Y RESULTADOS

#### 6.1 CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA DE LA ACTIVIDAD ERUPTIVA ENERO 2010 – JULIO 2013

Como se explica en la sección 4.2, el análisis geoquímico de roca total en las muestras pertenecientes a las fases eruptivas se realizó principalmente en “escorias” constituyentes de las caídas de ceniza, ya que representa de mejor manera el material juvenil de cada fase eruptiva.

Debido a la disponibilidad de muestras recolectadas de los flujos piroclásticos ocurridos el 22/11/2010 y el 14/07/2013 se realizaron análisis geoquímicos de roca total en muestras que corresponden a: bomba con estructura de coliflor (BB-36 B), que representa el material juvenil de esta erupción, y roca densa negra (BB-36 A) encontradas en los depósitos de flujo piroclástico del 22/11/2010; y roca densa negra (ACH-Jul-13) tomada de los depósitos de flujo piroclástico del 14/07/2013.

Todas las muestras de ceniza presentan composiciones homogéneas con  $58.3\text{-}59.4 \pm 1$  %wt  $\text{SiO}_2$  (normalizados en base anhidra, Anexo 7). Las rocas densas tomadas de los flujos piroclásticos generados durante las erupciones del 22 de Noviembre 2010 y 14 de Julio 2013 presentan una composición de  $57.77$  y  $58.44 \pm 1$  %wt  $\text{SiO}_2$ , respectivamente.

Las muestras pertenecientes a las fases eruptivas enero 2010 a julio-agosto 2013 caen dentro de la serie magmática calco-alcalino de K medio y de composición andesítica (Fig. 6-1). La concentración de ciertos elementos mayores es inversamente proporcional al contenido de sílice ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ; Fig. 6-2) al igual que ciertos elementos en traza (ej. Ni, Cr, V) mientras que en otros es directamente proporcional ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$ ). Los elementos litófilos de radio iónico grande (ej. Rb, Ba), elementos de alto potencial iónico (HSFE, ej. Th, Zr), y los elementos de tierras raras ligeras (LREE, ej. La, Nd, Ce) tienen una correlación

positiva con el contenido de sílice. Los siguientes elementos no muestran una tendencia clara: Yb, Er, Dy, Gd, Eu, Y, Sr.

Se reconoce en este análisis geoquímico que la muestra con mayor contenido de sílice es la que pertenece a la fase eruptiva Marzo 2013, correspondiente a escorias que conforman la caída de ceniza, mientras que la que contiene menor contenido es aquella emitida durante la actividad Noviembre-Diciembre 2010 (BB-36A).

Cuatro muestras exhiben claras características más básicas (menor contenido de sílice,  $K_2O$  y mayor contenido de  $CaO$ ) de entre todas las muestras analizadas, y son aquellas pertenecientes a las fases eruptivas Mayo-Agosto 2010 (muestra "Mayo 2010" recolectada a inicios de esta fase eruptiva), Noviembre-Diciembre 2010 (roca densa considerada como tapón, B36-A), Diciembre 2012 (cenizas, Mas-Di-12), y Julio-Agosto 2013 (roca densa considerada como tapón) (Fig. 6-2). Cuando se comparan estas cuatro con la muestra de la fase eruptiva precedente a cada una de ellas (Enero-Marzo 2010, Mayo-Agosto 2010, Agosto 2012, Abril-Mayo 2013, respectivamente) se observa que las primeras poseen generalmente menor contenido de  $SiO_2$ ,  $K_2O$  y de algunos elementos en traza (Y, Ba, Nb, Zr, Nd, Cs, La) y mayor contenido de Ni y Cr.

Solamente para el periodo eruptivo Noviembre-Diciembre 2010 se cuenta con análisis geoquímicos de la roca densa (BB-36A) y material juvenil (BB-36B) asociados al flujo piroclástico ocurrido el 22/11/2010, así como también de las escorias que componen la caída de ceniza (recolectadas el 12/12/2010). En esta secuencia se observa la composición más básica de la roca que compone el tapón ( $57.77 \pm 1$  %wt  $SiO_2$ ), y la composición más ácida del material juvenil (bomba,  $58.45 \pm 1$  %wt  $SiO_2$  y ceniza,  $59.01 \pm 1$  %wt  $SiO_2$ ).

Entre las dos fases eruptivas que compete este estudio, existe una fase intermedia (abril-mayo 2013). Para estos tres periodos eruptivos se obtuvo análisis geoquímicos. Para marzo y abril-mayo el análisis fue realizado en cenizas, mientras que la muestra para julio se analizó la muestra ACH-Jul-13. En esta secuencia se observa una tendencia decreciente de  $SiO_2$ ,  $K_2O$ ,  $TiO_2$ , Zr, REE (Rb, Ba, Th, Nb, La, Ce, Nd, Yb) y otra creciente de  $Al_2O_3$ ,  $CaO$ , Ni.

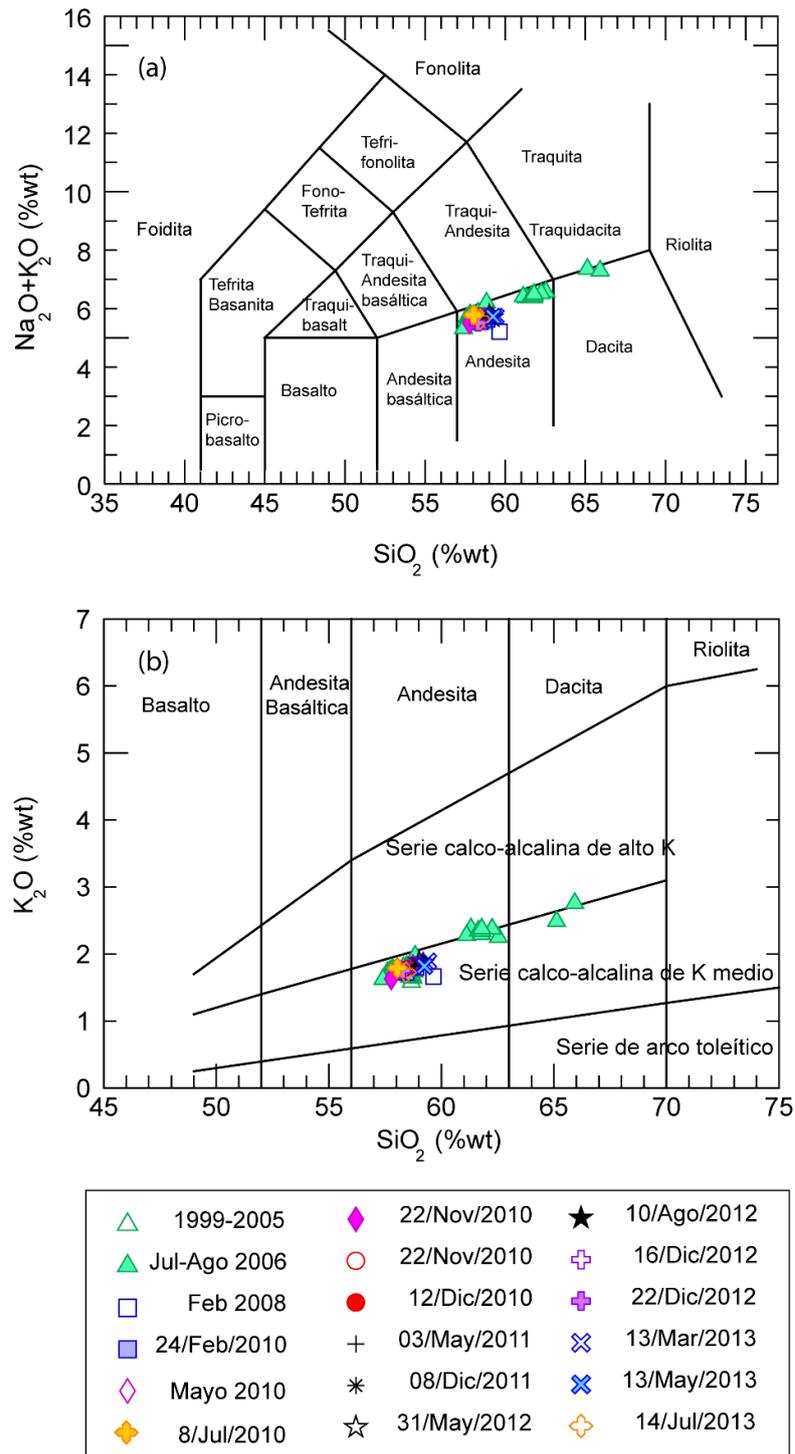


Figura 6-1 Clasificación geoquímica de los productos eruptivos del volcán Tungurahua desde 1999. a. Diagrama  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  vs  $\text{SiO}_2$  es modificado de Le Bas et al. (1986). b. Diagrama  $\text{K}_2\text{O}$  modificado de Peccerillo y Taylor (1976). Los datos geoquímicos de 1999 a 2006 fueron tomados de Samaniego et al. (2011).

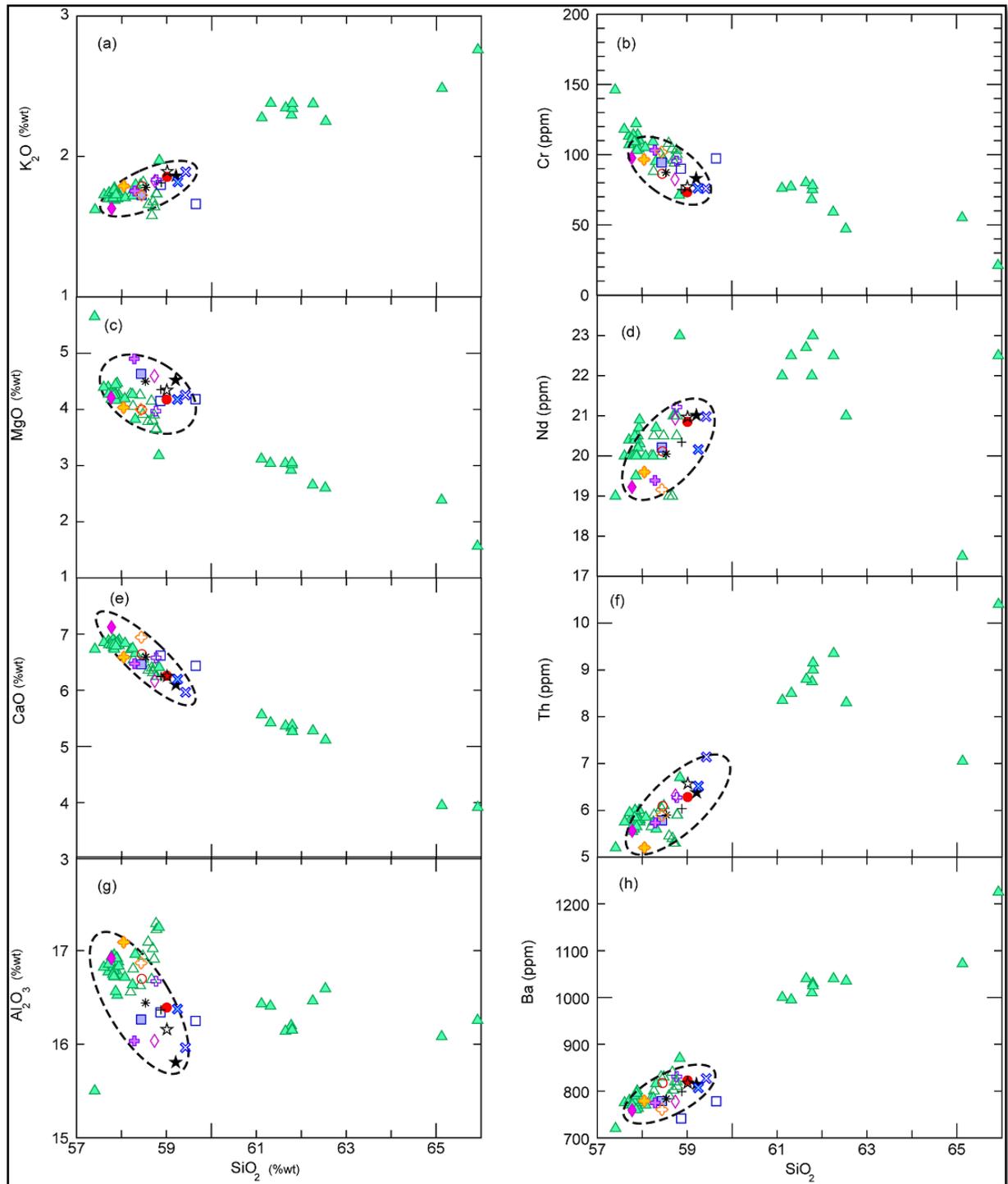


Figura 6-2 Representación de la concentración de ciertos elementos mayores y en trazas respecto al contenido de sílice. En elipses con bordes entrecortados se encierran los análisis realizados para este trabajo y comprende a las fases eruptivas ocurridas desde Enero 2010.

## 6.2 FENOMENOLOGÍA DE LA FASE ERUPTIVA MARZO 2013

Entre el fin de la fase eruptiva Diciembre 2012 y el inicio de la de marzo 2013 (1ro de marzo), transcurrieron 48 días. La única actividad superficial registrada durante este periodo de calma fueron emisiones de gases que alcanzaron 500 msnc. La actividad sísmica estuvo caracterizada por eventos LP que variaron entre 1-72 LP/día, registrándose el mayor número de este tipo de eventos el 27 de enero. El número de eventos VT fue menor, registrándose entre 0-5 VT/día, siendo el 8 de febrero el día con mayor número de eventos registrados.

Las dos semanas previas al inicio de esta fase eruptiva estuvieron caracterizadas por un IAS nivel 4, (Informe semanal OVT# 678-680) considerado como moderado a bajo, registrándose un máximo número de LP de 28 y VT de 1 registrados el día 28 de febrero. (Informe semanal OVT# 680)



*Figura 6-3 Inicio de la actividad de Marzo de 2013. Emisiones casi continuas de gases y ceniza volcánica en dirección al occidente. Foto: (J. Ordóñez – OVT- IG; Informe semanal OVT # 680)*

La actividad eruptiva inicia con una señal de tremor registrada a las 9h40 (TL) con leves bramidos escuchados solamente en las cercanías del volcán.

Entre los días 2-15 de marzo, la actividad se caracterizó por la formación de columnas eruptivas permanentes cuya altura alcanzaba entre 0,5 - 6 km snc y eran llevadas por el viento en dirección W. Las explosiones de esta fase estuvieron más comúnmente acompañadas por bramidos y en ocasiones por fuertes cañonazos (Informe semanal OVT# 680-682).

El día 16 se registraron tres explosiones, una muy energética ocurrida a las 17h57 (TL) la cual generó una columna eruptiva de 4 km de altura y que contenía alta carga de ceniza generando inmediatamente caída de ceniza en los flancos (Fig. 6-4) y pequeños flujos piroclásticos que descendieron por las quebradas de Mandur y Achupashal. (Informe semanal OVT# 682)



*Figura 6-4 Columna de ceniza. 17h57 TL. 16/03/2013. Volcán Tungurahua (Foto: P. Mothes, Informe semanal #682).*

Luego de este episodio el volcán va disminuyendo su actividad, escuchándose una última explosión el día 19 de marzo y registrándose tremor hasta el día 20 de marzo. El volumen del depósito sedimentado durante toda esta fase de actividad es calculado entre  $[1.70-2.33] \cdot 10^5 \text{ m}^3$  (Bernard et al., 2013)

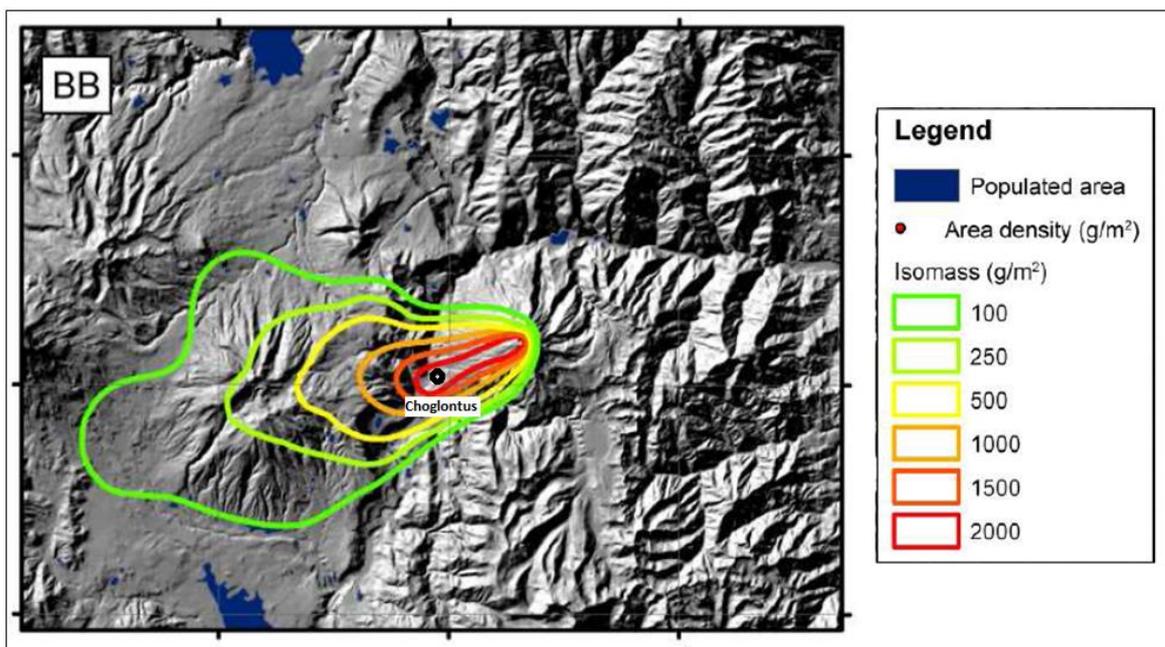


Figura 6-5 Mapa de isomasas de la fase eruptiva de marzo 2013. (Bernard et al., 2013) La dirección del eje de dispersión es SSW sobre la localidad de Choglontus.

### 6.2.1 INFORMACIÓN VISUAL, INSTRUMENTAL, MORFOLÓGICA, GRANULOMÉTRICA Y DE COMPONENTES DE LAS CENIZAS.

Se escogieron 4 muestras pertenecientes a esta fase eruptiva, las correspondientes al 1, 8, 14, 17 de marzo. La primera (1M13) contiene el material del inicio de este periodo, mientras que las muestras 8M13 y 14M13 representan a la parte intermedia de la fase eruptiva. Se escogieron las muestras de la localidad de Choglontus (Fig. 6-5), lugar donde se recolectó la mayor cantidad en peso del material (mayor sedimentación) durante toda la erupción (Fig. 6-6).

La última muestra (17M13) de esta secuencia, fue considerada para el análisis debido a que corresponde al material sedimentado posteriormente a una alta actividad ocurrida en el volcán el 16 de marzo.

Las muestras han sido designadas con un código que detalla el día de su recolección y contiene la ceniza acumulada durante el periodo de tiempo indicado a continuación.

- Muestra: 1M13, recolectada el 1/03/2013. Contiene la ceniza sedimentada entre las 11h30 y 19h25 del 1 de marzo 2013 (TL).
- Muestra: 8M13, recolectada el 8/03/2013. Contiene ceniza sedimentada entre el 7 de marzo 2013 a las 18h45 y el 8 de marzo 2013 a las 16h45 (TL).
- Muestra: 14M13, recolectada el 14/03/2013. Contiene ceniza sedimentada entre el 13/03/2013 a las 6h40 y el 14/03/2013 a las 7h25 (TL).
- Muestra: 17M13, recolectada el 17/03/2013. Contiene ceniza sedimentada entre el 16/03/2013 a las 16h30 y el 17/03/2013 a las 17h15 (TL).

#### **6.2.1.1 Observaciones instrumentales y visuales**

El peso del material sedimentado en los recipientes de recolección es medido diariamente, obteniendo un esquema de la sedimentación diaria como se observa en la Figura 6-6. Entre el 5-10 de marzo se observan los menores valores de sedimentación los cuales están asociados a mayores flujos de SO<sub>2</sub> y menor número de explosiones. La mayor sedimentación se registra entre los días 12-14 de marzo. Durante estos días se registra el mayor número de explosiones vulcanianas y bajos flujos de SO<sub>2</sub> (Fig. 6-6, Fig. 6-7).

El número de explosiones vulcanianas registradas durante el periodo de recolección de cada muestra se indican en la Tabla 1.

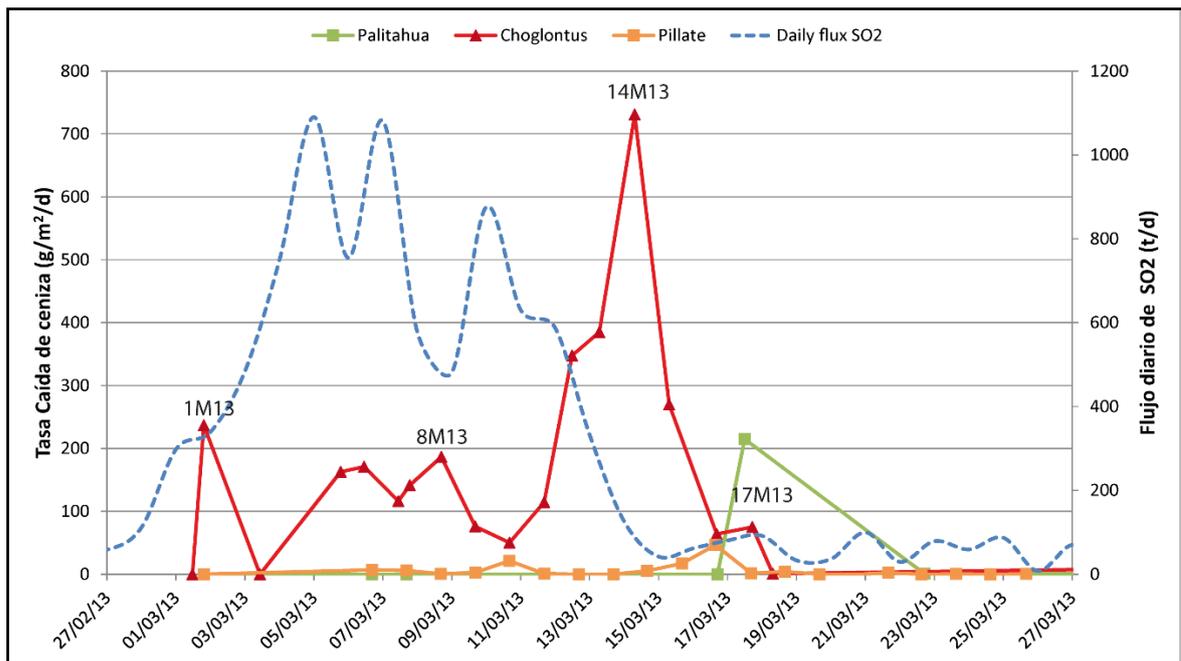


Figura 6-6 En líneas sólidas se representa la tasa de caída de ceniza respecto a la fecha de recolección de las muestras diarias medida en tres localidades (Bernard, 2014). En líneas entrecortadas se representa el flujo diario de  $SO_2$  para la fase eruptiva de marzo 2013 (Hidalgo et al., 2014).

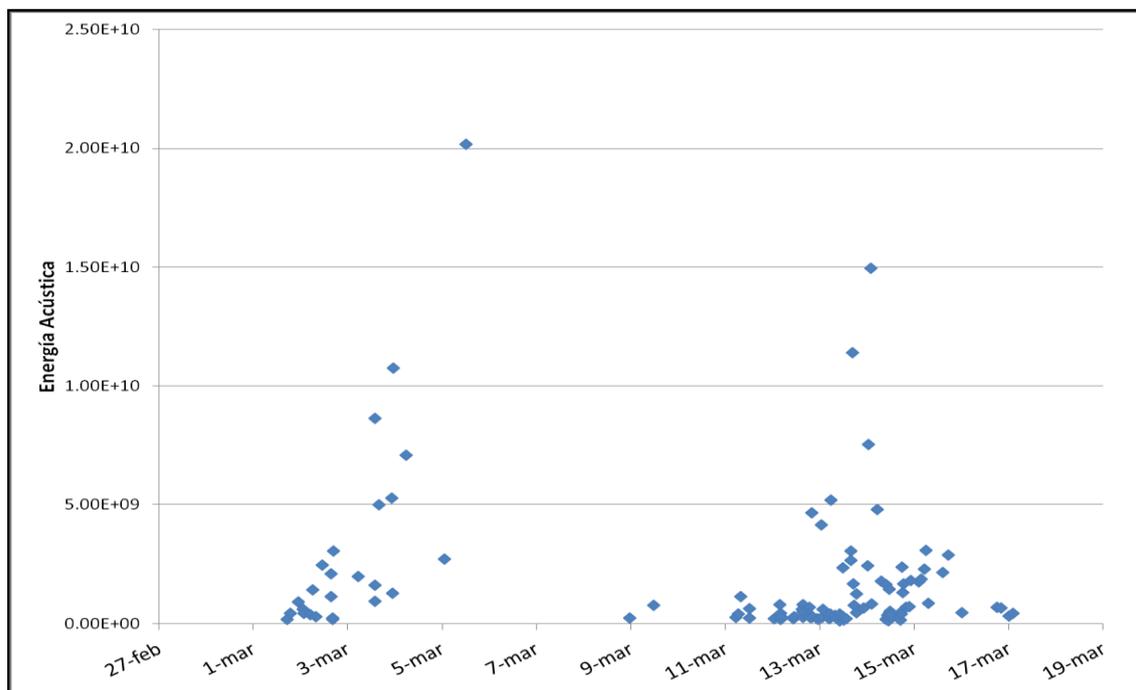


Figura 6-7 Dispersión en el tiempo de las explosiones con IRP (Infrasound Reduced Pressure; Hall et al., 2013)  $>100$  Pa calculadas a un Km del cráter (Steele, 2014) ocurridas durante la fase eruptiva de marzo 2013. Estas explosiones pueden considerarse como vulcanianas (Johnson, 2003).

Explosiones vulcanianas (Steele, 2014)	
Muestra	# de explosiones
1M13	2
8M13	2
14M13	24
17M13	4

*Tabla 1 Número de explosiones vulcanianas ocurridas durante el periodo de recolección de las muestras de marzo 2013. Estas explosiones se clasifican como vulcanianas por presentar IRP >100 Pa calculadas a 1 km del cráter (Johnson, 2003)*

- *Observaciones visuales e instrumentales durante el tiempo de recolección de la muestra 1M13.*

Un incremento de la actividad sísmica a partir del 28 de febrero genera un día después, a partir de las 11h40 (TL), la emisión de una columna eruptiva con contenido de ceniza bajo y bramidos asociados, estos últimos perceptibles solamente en las cercanías del volcán. La altura máxima alcanzada por una columna eruptiva durante este día es 400 msnc (Informe semanal OVT# 680). La columna de ceniza es dirigida hacia el Oeste con una velocidad de 7m/s (NOAA Satellite and Information Service, 2014).



*Figura 6-8 Columnas de emisión poco energética de baja altura con moderado a bajo contenido de ceniza, observadas en la tarde del 1 de marzo de 2013. Informe Especial del volcán Tungurahua No.5. 2/03/2013.*

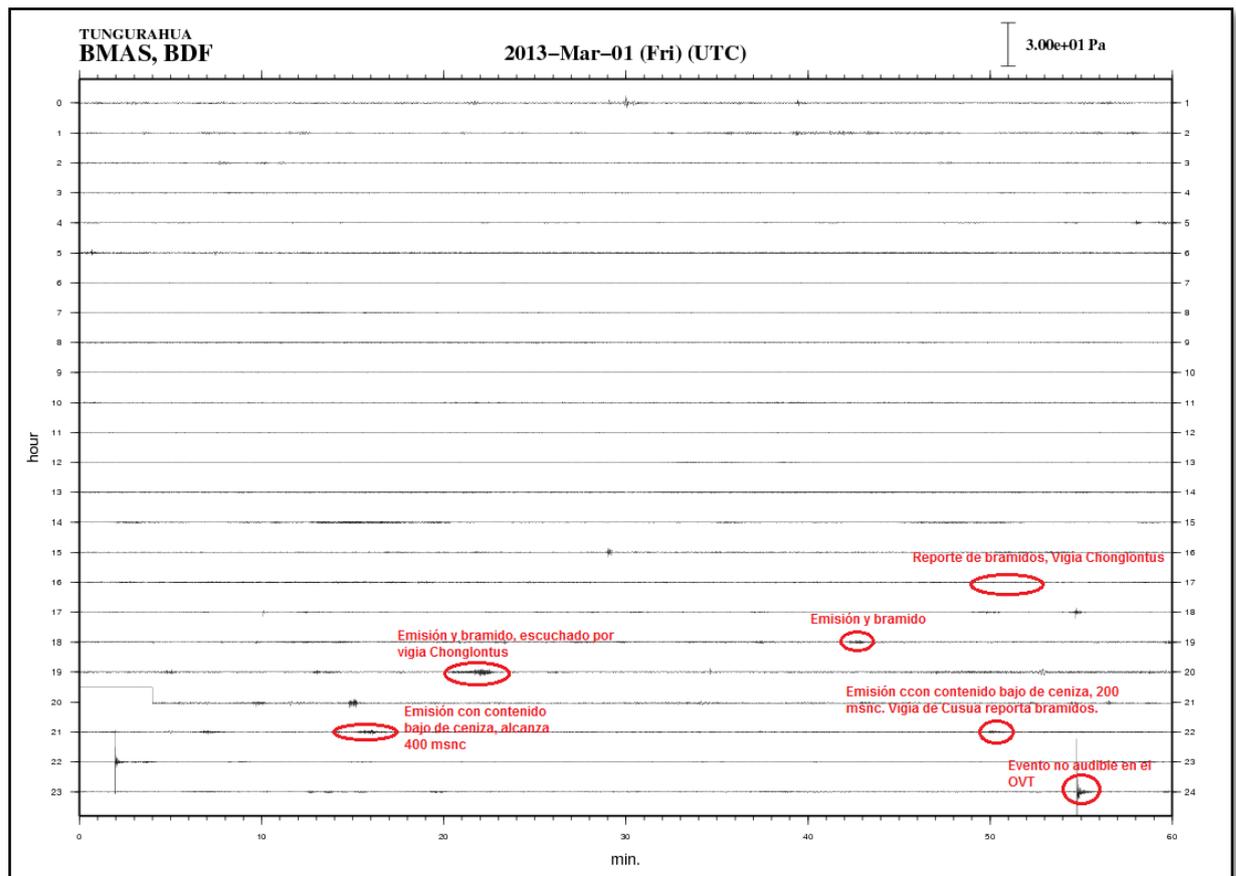


Figura 6-9 Registro del sensor de infrasonido de la estación BMAS para el día 01/03/2013 UTC.

- *Observaciones visuales e instrumentales durante el tiempo de recolección de la muestra 8M13.*

Para este día, el detalle de las observaciones visuales es vago. Solamente se describe incandescencia en el cráter durante la madrugada.

En los registros de infrasonido se observan señales que podrían asociarse a emisiones continuas de ceniza. En el mismo se observan solamente dos explosiones con cañonazos consideradas como vulcanianas, incluidas en la base de datos de Steele, (2014).

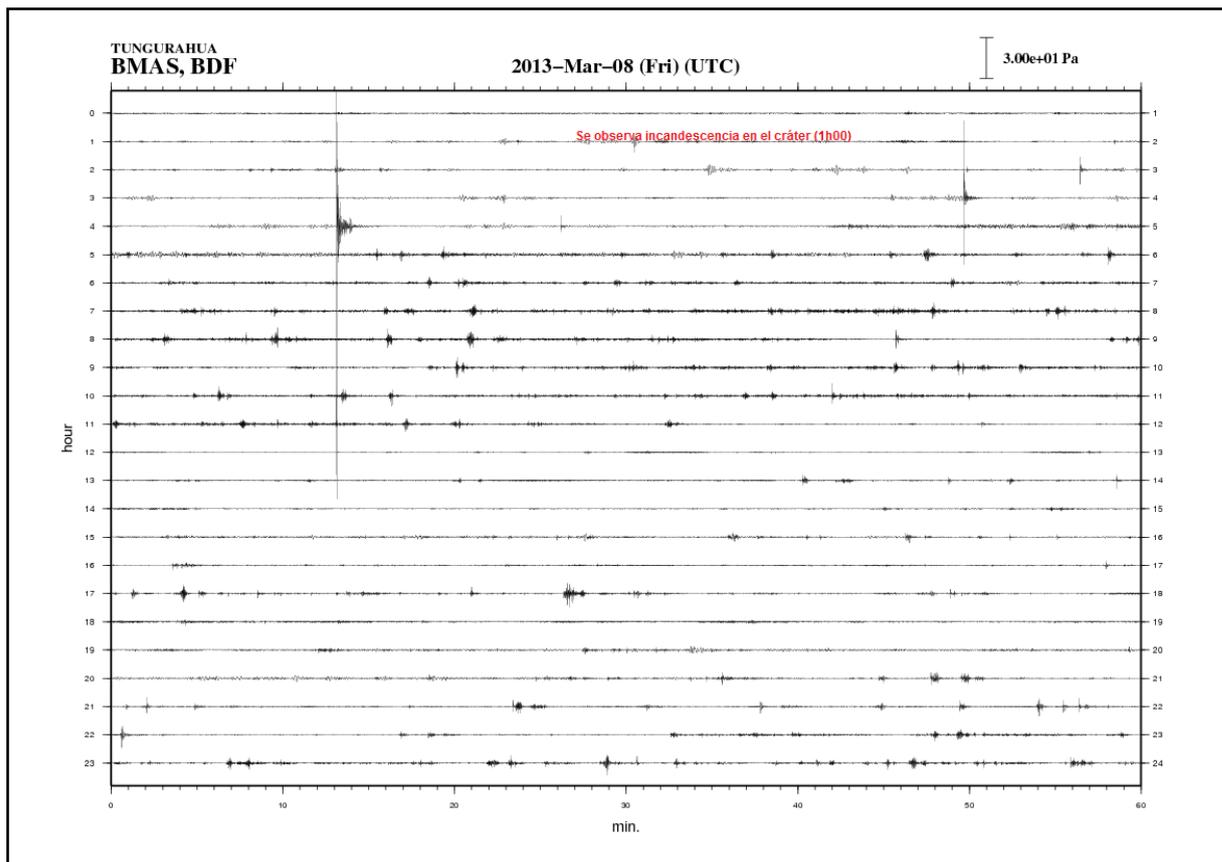


Figura 6-10 Registro del sensor de infrasonido de la estación BMAS para el día 08/03/2013 UTC.

- *Observaciones visuales e instrumentales durante el tiempo de recolección de la muestra 14M13.*

En la mañana del 13 de marzo se reporta explosiones continuas las cuales generan columnas eruptivas con alturas de hasta 2 km snc. Las emisiones se caracterizan por presentar alta carga de ceniza color negro (Informe semanal OVT#682).

A lo largo del día se reportan emisiones cuyo material se dirige al SW. Las columnas alcanzan una altura de 1.8 km snc (NOAA Satellite and Information Service, 2014; Fig. 6-12) y durante la noche se reportan cañonazos (Informe semanal OVT # 682). Durante el tiempo de recolección de esta muestra se registró el mayor número de explosiones vulcanianas (24) (Steel, 2014) en comparación a las otras tres muestras pertenecientes a la fase de marzo 2013.

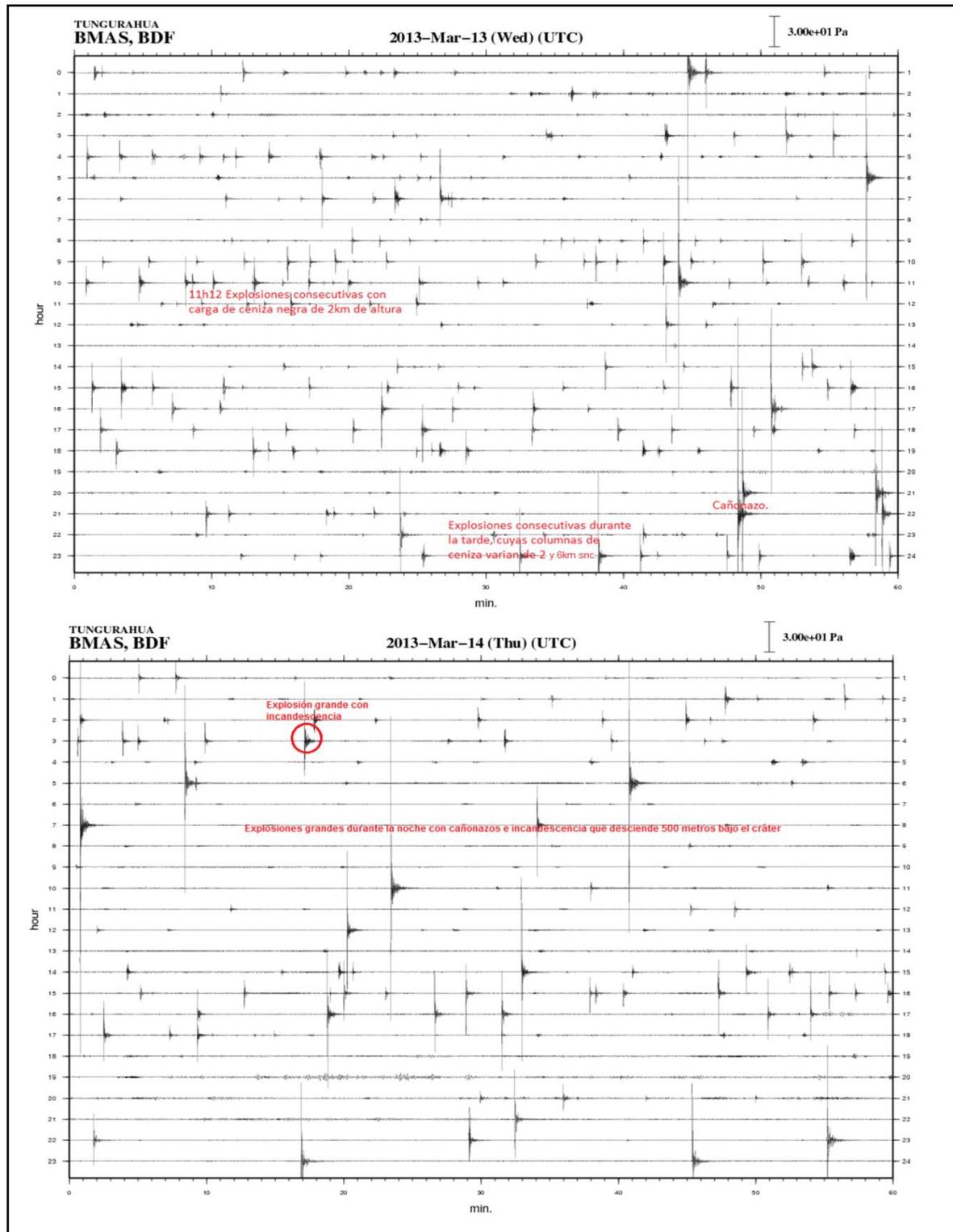


Figura 6-11 Registro del sensor de infrasonido de la estación BMAS para los días 13 y 14 de Marzo de 2013 (UTC).

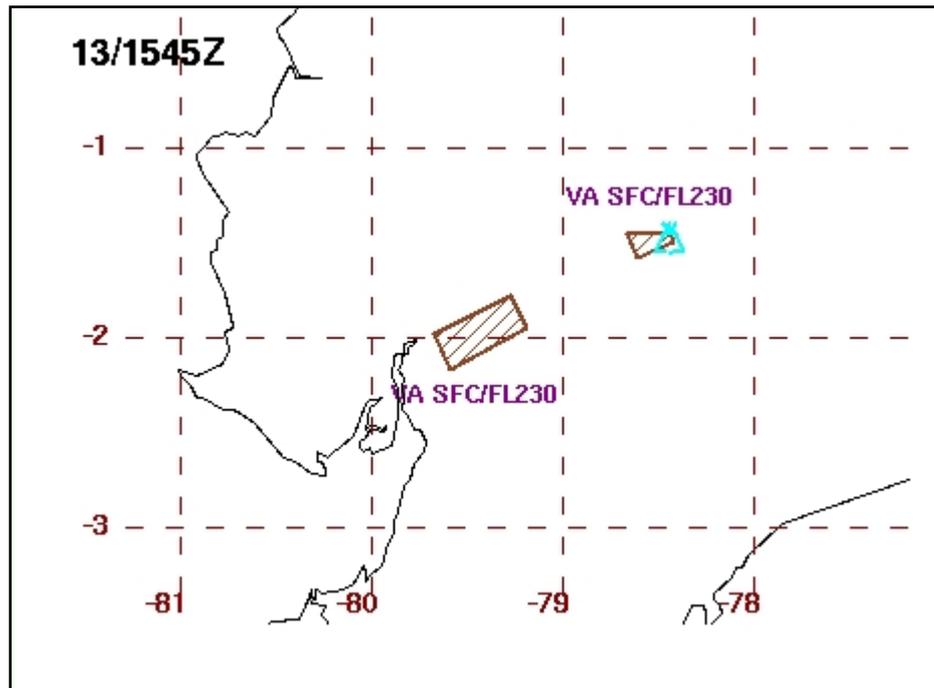


Figura 6-12 Dirección de la columna eruptiva, para el día 13/03/2013 a las 10h45 (TL), hacia el SW a una altura de 1.8 km snc. (NOAA Satellite and Information Service, 2014). La muestra 14M13 es recolectada durante la mayor parte del día 13/03/2013.

- Observaciones visuales e instrumentales durante el tiempo de recolección de la muestra 17M13.

La muestra 17/03/2013 corresponde al material recolectado entre el día 16/03/2013 a las 17h30 TL y 17/03/13 17h00 TL, por lo tanto incluye el material emitido por el volcán durante la alta actividad ocurrida el 16/03/2013 a las 17h56 TL la cual duró una hora y media aproximadamente (Informe del volcán Tungurahua N° 76-IGEPN). Esta actividad generó una columna eruptiva con alto contenido de ceniza que alcanzó 4 km snc y la cual se dirigió al SW (NOAA Satellite and Information Service, 2014). También se generó un pequeño flujo piroclástico que no descendió más allá de unos 500 mbnc (Informe semanal OVT#682).

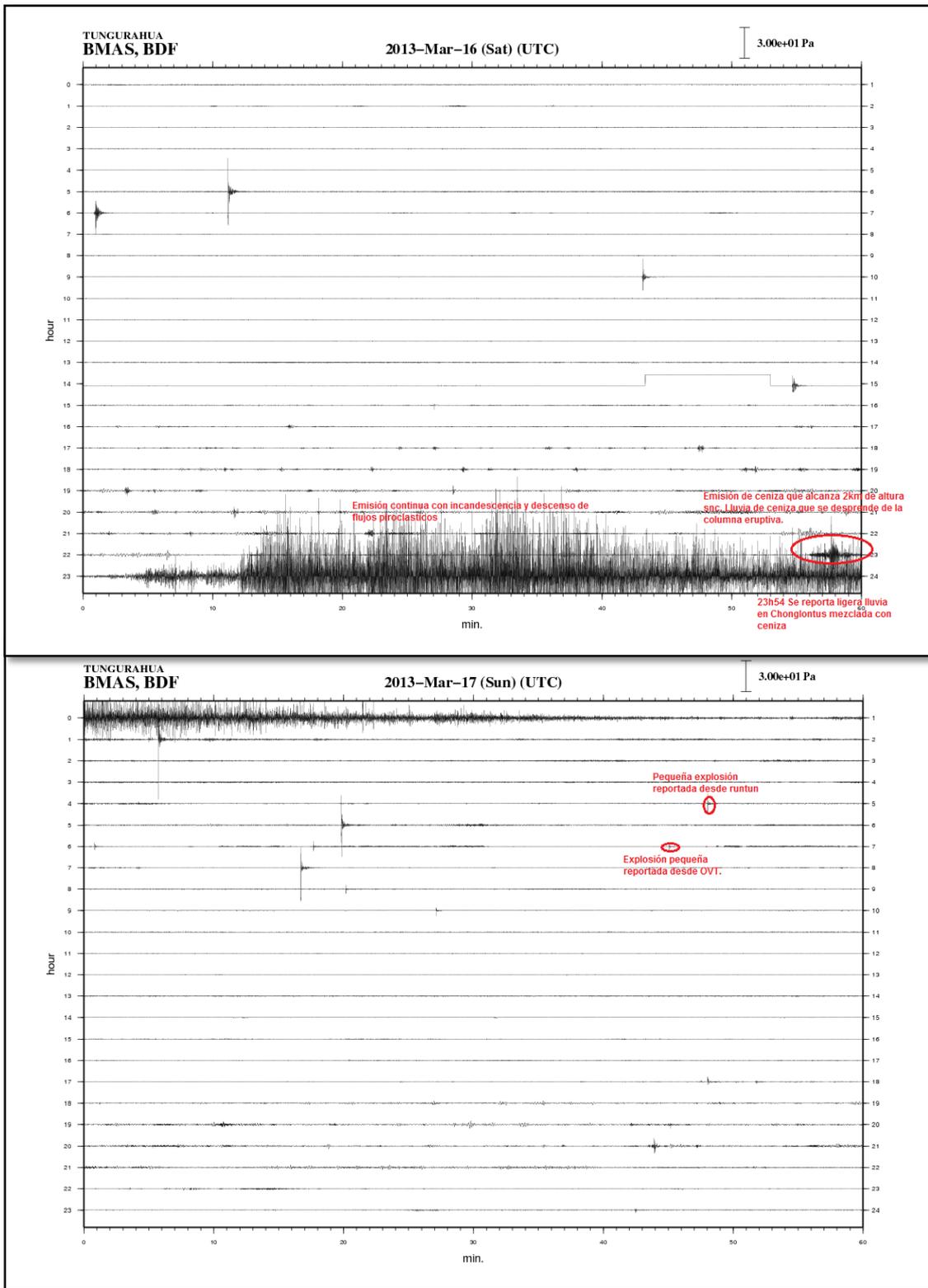


Figura 6-13 Registro del sensor de infrasonido de la estación BMAS para los días 16 y 17 de marzo de 2013 (UTC).

### 6.2.1.2 Morfología de los componentes

Para las cuatro muestras pertenecientes a la fase marzo 2013, el objetivo utilizado en la adquisición de imágenes para análisis morfológico fue de aumento 5x.

Las partículas mayores a  $1\Phi$  ( $<500\ \mu\text{m}$ ) pertenecientes a la muestra 1M13 son las más redondeadas de entre las 4 muestras analizadas. Solamente la fracción entre 0-1  $\phi$  posee mayor rectangularidad que su equivalente en las otras muestras.

Exceptuando la fracción  $>5\ \phi$  de la muestra 17M13, se cumple que las partículas de esta muestra son las más angulares de entre las cuatro muestras analizadas (Fig. 6-14). De igual manera, ésta muestra se caracteriza por un mayor valor de elongación y menor valor de *solidity* (Fig. 6-15, Fig. 6-16). El parámetro *solidity* disminuye con el aumento de la vesicularidad (Anexo 8).

Las diferencias morfológicas promedio de las partículas pertenecientes a las muestras 8M13 y 14M13 son mínimas, principalmente cuando se considera la elongación y el valor de *solidity*. Mientras que al considerar el esquema de angularidad, se observa que la muestra 14M13 es más angular que la 8M13.

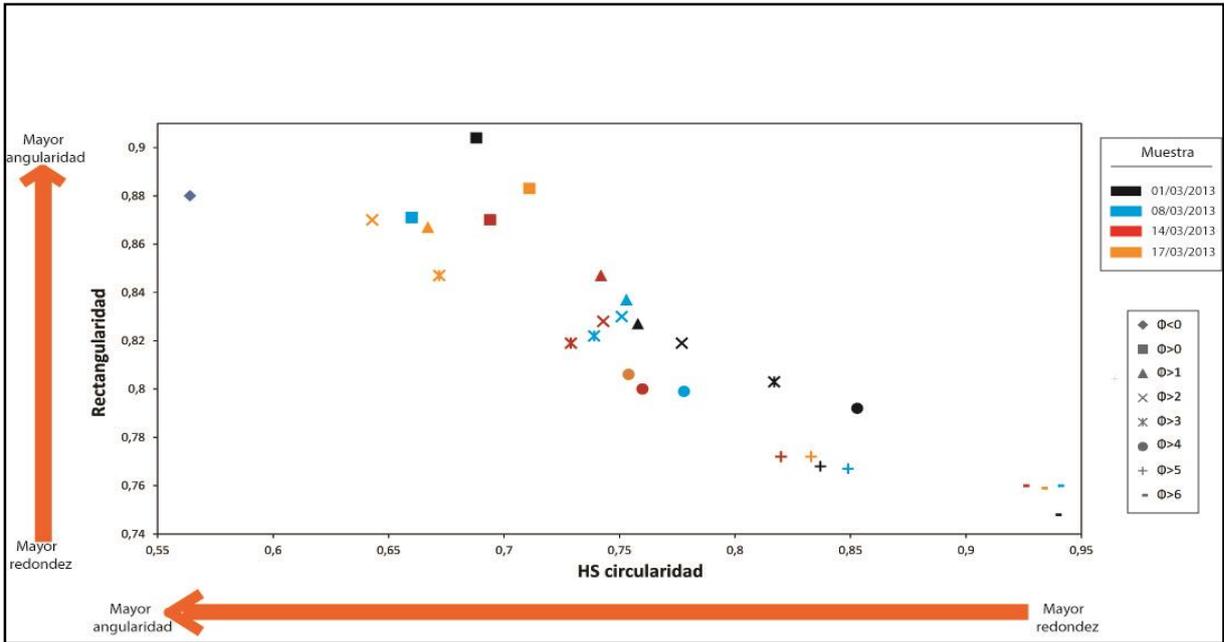


Figura 6-14. Esquema, HS circularidad vs Rectangularidad obtenidos para las muestras de marzo 2013, analizados en rangos de 1  $\phi$ . La rectangularidad está representado por la fórmula  $\text{perímetro}/(2\text{largo}+2\text{ancho})$  (Anexo 8)

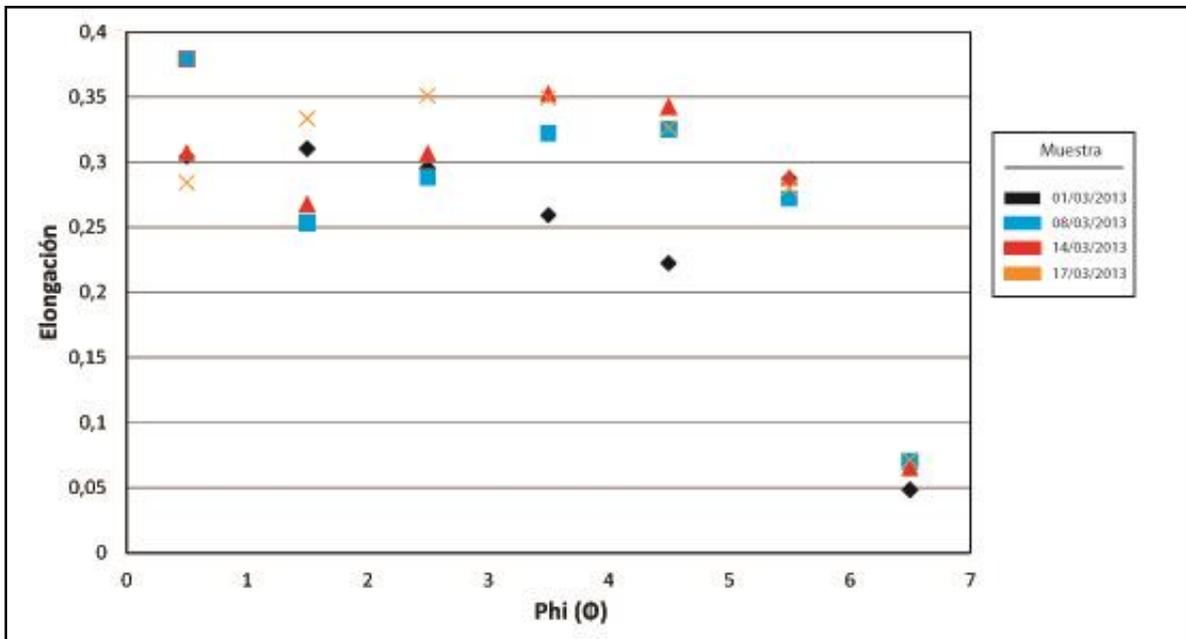


Figura 6-15 Diagrama de la Elongación vs Tamaño de grano, para las muestras tomadas durante julio 2013 analizados en intervalos de 1  $\phi$

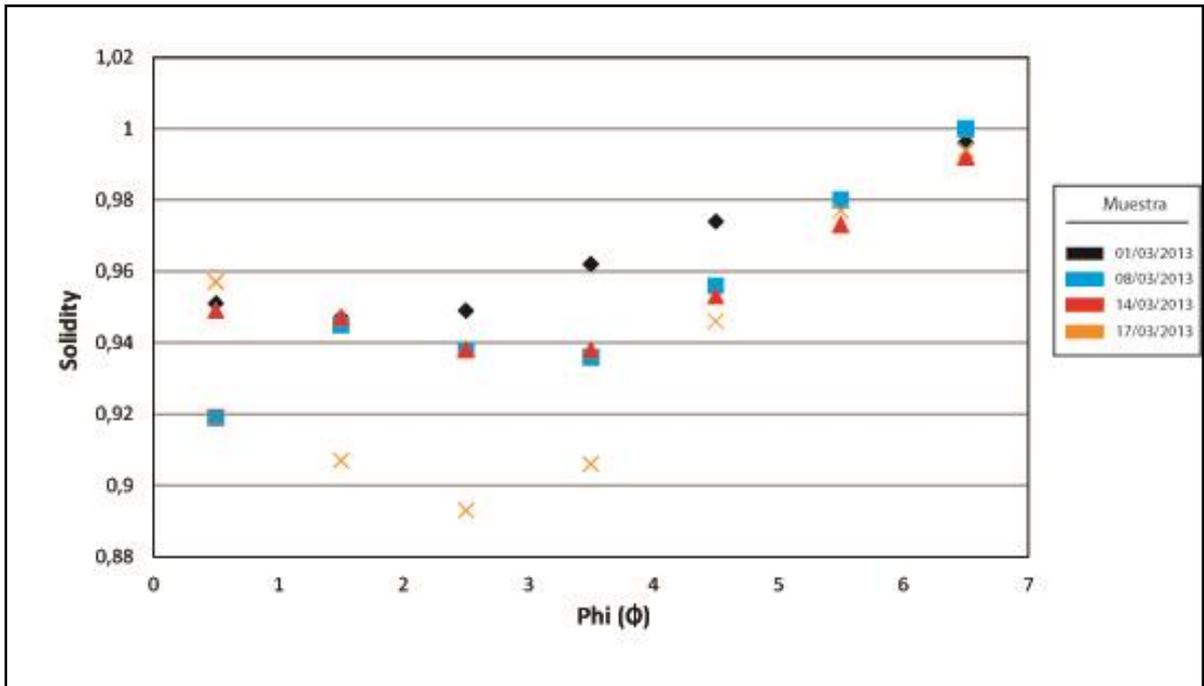


Figura 6-16 Esquema del parámetro Solidity vs Tamaño de grano, para las muestras tomadas durante julio 2013 analizados en intervalos de  $1 \phi$

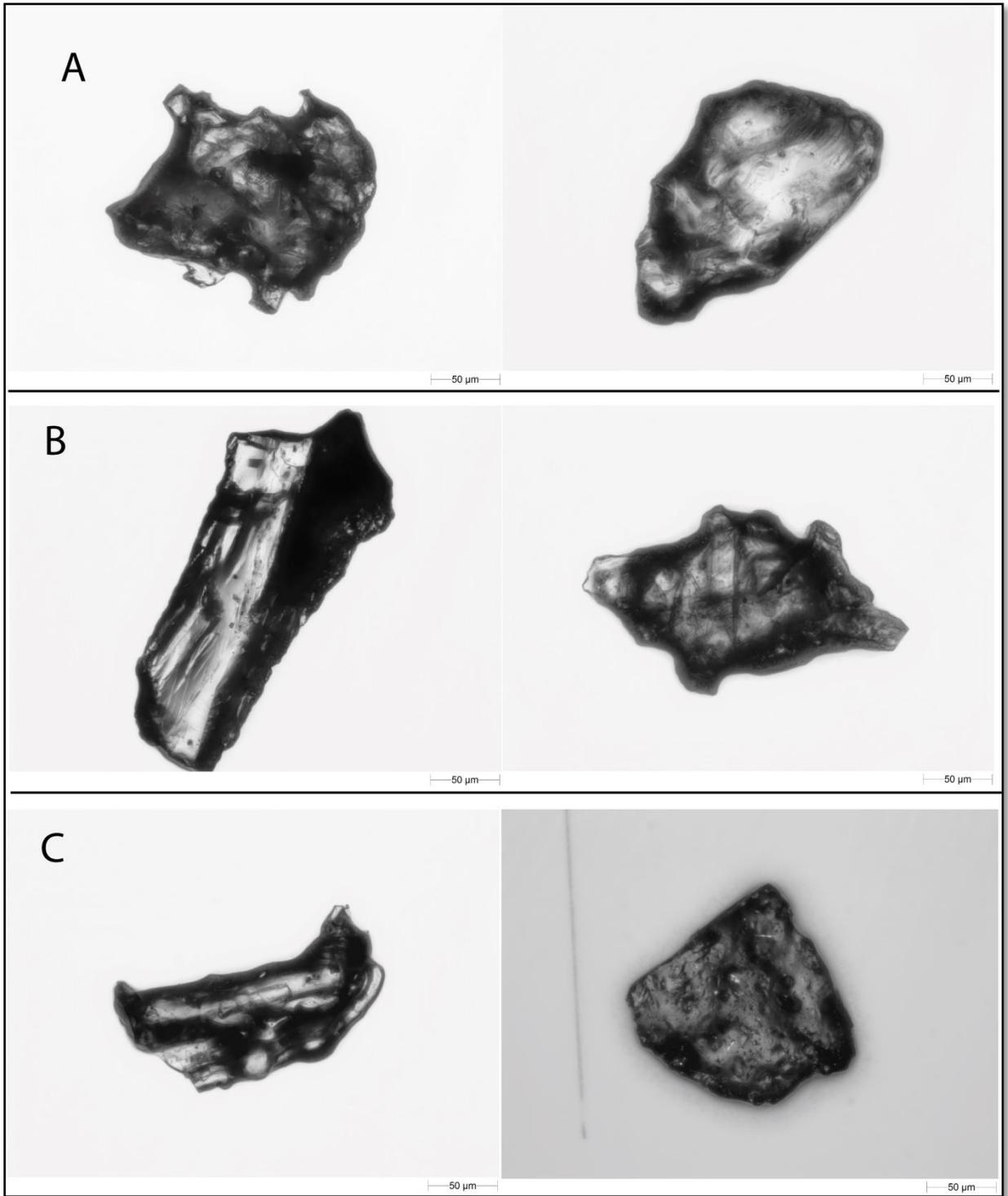




Figura 6-17 Morfologías presentes en las muestras A) 1M13, B) 8M13, C) 14M13, D) 17M13. Fotografías tomadas en el MG3.

### 6.2.1.3 Componentes

En la Figura 6-18 se observa el porcentaje de componentes presentes en cada muestra analizada. Se reconoce una tendencia descendente a través del tiempo del componente “partículas oxidadas” (grupo principalmente compuesto de escorias rojas).

La muestra 8M13, asociada a una actividad eruptiva caracterizada por altos valores de desgasificación (Fig. 6-6) y 2 explosiones vulcanianas (Fig. 6-7), posee un alto porcentaje de escorias y líticos negros (41% wt y 36% wt, respectivamente) y mucho menor porcentaje de cristales en comparación al resto de muestras.

Con la alta actividad eruptiva del 16 de marzo se obtiene mayor presencia de material juvenil micro-vesiculado y líticos negros en comparación a las otras muestras, y menor porcentaje de escorias. La moda de 426  $\mu\text{m}$  (la más gruesa de entre las muestras analizadas) explicaría la alta presencia de líticos densos en la fracción 315-500  $\mu\text{m}$ .

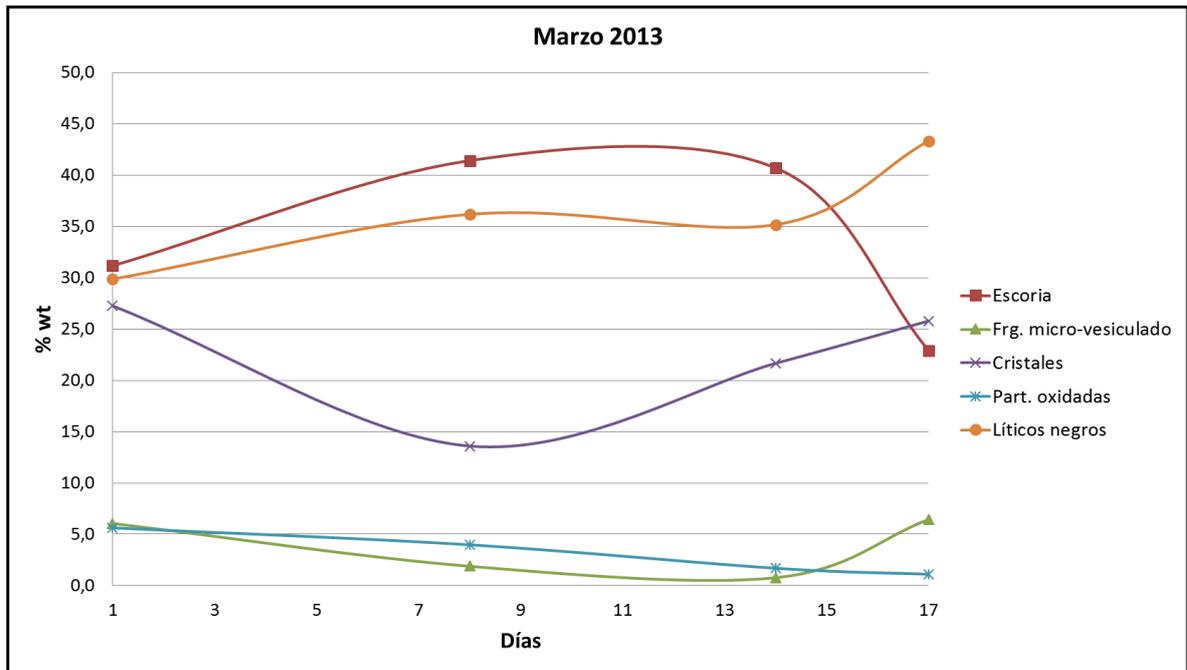
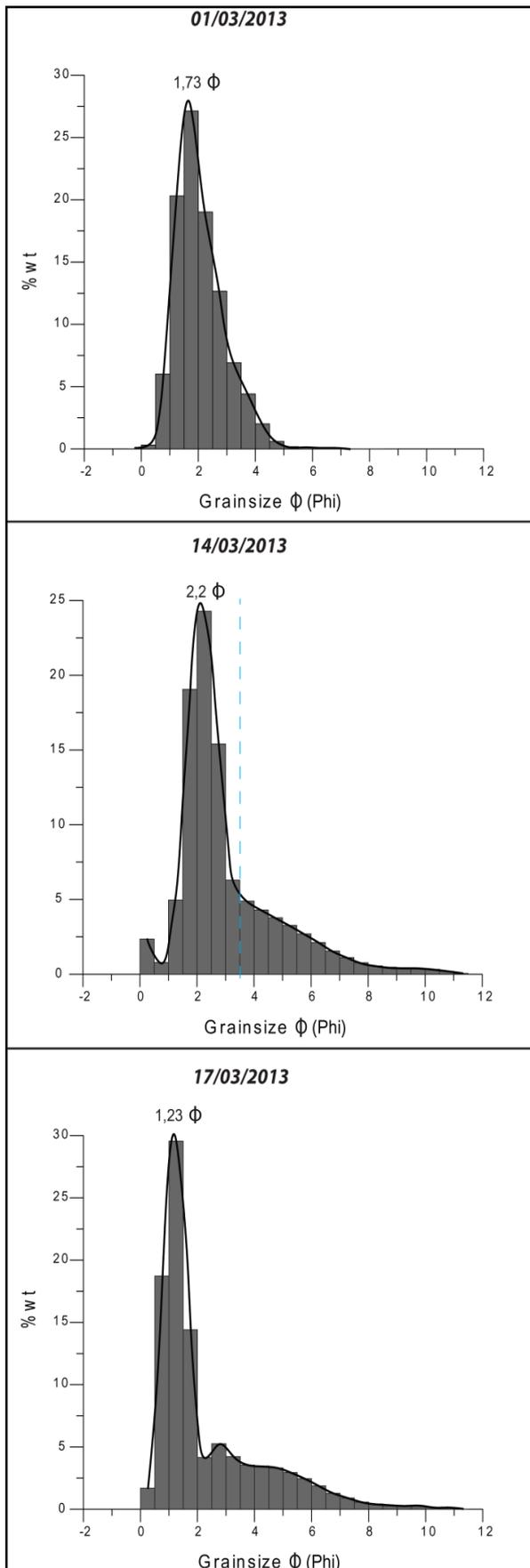


Figura 6-18 Porcentaje en peso de los componentes, en las muestras de marzo 2013, analizados en la fracción 315  $\mu\text{m}$ -500  $\mu\text{m}$ . El rango de tamaño fue escogido considerando la disponibilidad de partículas y facilidad de manejo al momento de la separación de componentes.



#### 6.2.1.4 Granulometría

Los resultados de la distribución granulométrica presentados para las muestras 1M13 y 17M13 están basados solamente en los datos de granulometría láser. En el caso de la muestra 14M13 se presentan los datos obtenidos por ensayo de tamizaje y granulometría láser, con superposición en  $90 \mu\text{m}$  ( $3.5\phi$ ). Para la muestra 8M13 no se tienen datos con ninguno de los dos tipos de ensayo, debido a la utilización de la totalidad de la muestra en el análisis morfológico con el equipo MG3.

*Figura 6-19. Distribución del tamaño de grano, representado en % de peso, analizado para las tres muestras de cenizas correspondientes a la fase de marzo 2013. Para la muestra 14M13 se incluye datos de ensayo de tamizaje y granulometría láser, con superposición en  $90 \mu\text{m}$  ( $3.5\phi$ ).*

Muestra	Moda ( $\phi$ )	Moda ( $\mu\text{m}$ )	Md $\phi$	$\sigma \phi$	$K_G$	Skl
1M13	1.73	301	2	0.86 (moderadamente sorteado)	1.02 (mesocúrtica)	0.22 (muy positiva)
14M13	2.2	217	2.95	1.59 (pobremente sorteado)	1.30 (leptocúrtica)	0.52 (muy positiva)
17M13	1.23	426	2.2	1.73 (pobremente sorteado)	1.11 (leptocúrtica)	0.67 (muy positiva)

*Tabla 2 Tabla granulométrica comparativa para las muestras pertenecientes a la actividad eruptiva de marzo 2013. Moda, valor obtenido utilizando el programa SFT. Media gráfica ( $Md_\phi$ ), desviación estándar ( $\sigma_\phi$ ), valor de curtosis ( $K_G$ ) y valor de asimetría (Skl) en base a la estadística gráfica de Folk & Ward (1957). Las tres muestras presentan una cola de partículas finas por su valor de asimetría positiva.*

A pesar de la falta de información granulométrica para la muestra 8M13, visualmente se distingue cantidad similar de material fino en ésta como en la 14M13.

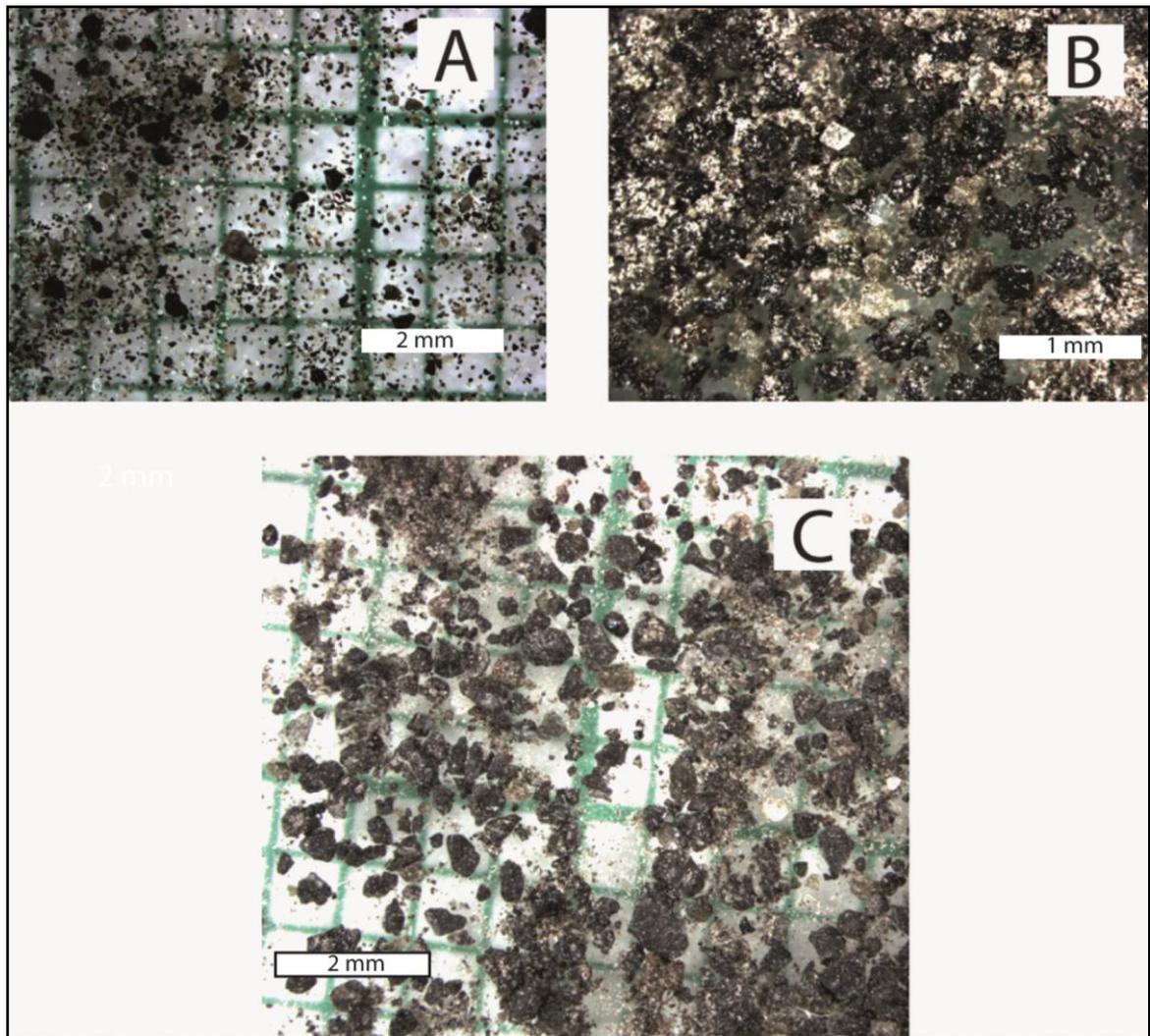


Figura 6-20. Muestras de ceniza observadas bajo binocular. A) 1M13, B) 14M13, C) 17M13.

### **6.3 FENOMENOLOGÍA DE LA FASE ERUPTIVA JULIO-AGOSTO 2013**

A partir del 25 de junio, el sistema de monitoreo del Tungurahua registró un incremento del número de eventos de largo periodo (LP), lo que ocasionó un cambio de tendencia de “descendente” a “ascendente” del IAS (índice de actividad sísmica, IGEPN). También a partir del 1 de julio se reportó una tendencia inflacionaria en la parte alta del volcán en base a los datos de la red de inclinómetros del IG (Informe semanal OVT #698).

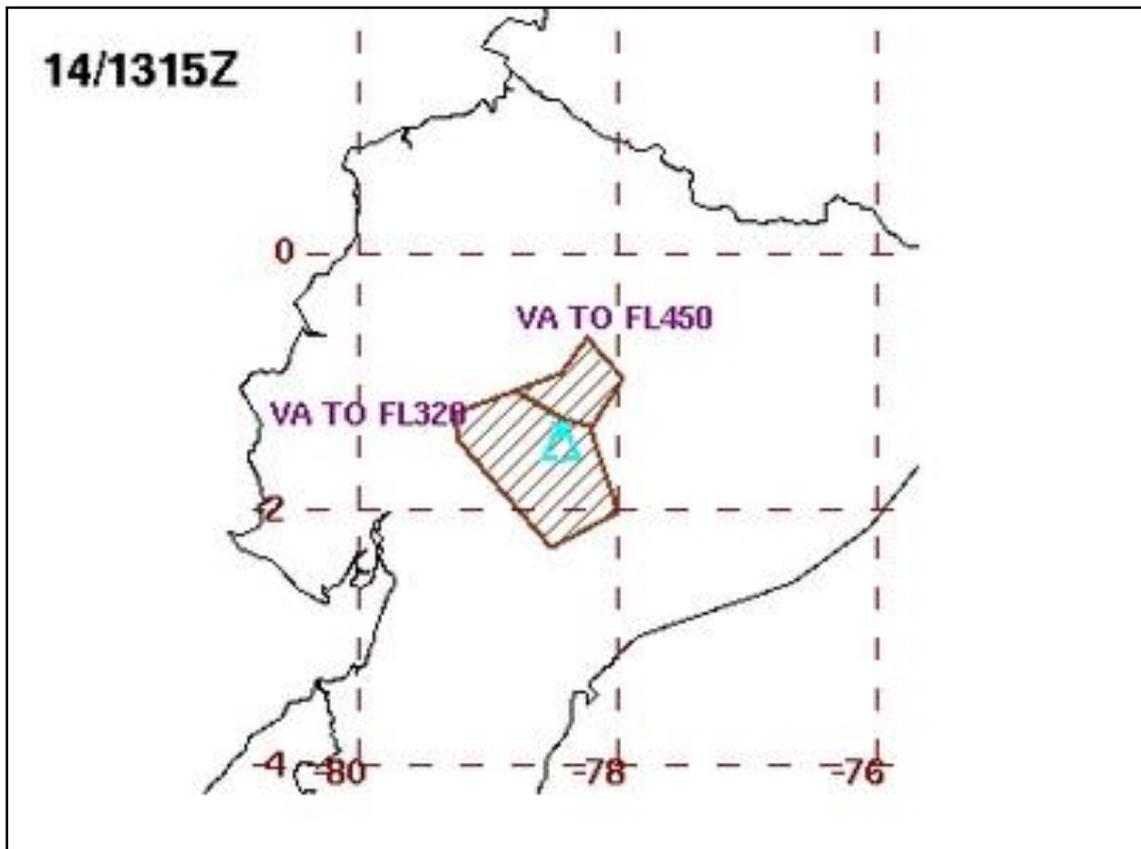
La actividad explosiva de este periodo inició con una gran erupción ocurrida el 14 de julio a las 6h45 TL, a la que le siguió una señal de tremor de alta energía, que duró aproximadamente 2 horas. Esta actividad generó una columna de gas y ceniza que alcanzó una altura de 8.5 km snc (NOAA Satellite and Information Service, 2014). La dirección del viento dirigió la ceniza hacia el Norte y hacia el Oeste del volcán (Fig. 6-21). La pluma de ceniza que fue hacia el Norte fue visible en el satélite hasta Colombia.

Con esta explosión se generaron flujos piroclásticos que descendieron por las quebradas Achupashal y Juive Grande-La Pampa, en la primera el flujo alcanzó el río Chambo que se encuentra a 7 km al Noroeste del cráter. Se reportó caída de lapilli negro y rojizo de hasta 5 cm de diámetro en las poblaciones de Chacauco, Cahuaji, Choglontus y Cusúa (Informe semanal OVT #699).

El resto del periodo eruptivo fue caracterizado por explosiones intermitentes, y en ocasiones bramidos escuchados con facilidad en las cercanías del volcán, asociados en algunos casos con vibración de ventanales y del suelo. El 20 de julio fue el día con mayor número de explosiones cuyo IRP fue mayor a 100 Pa normalizada a 1 km del cráter (Hall et al., 2013; Steele, 2014). Estos eventos explosivos fueron registrados hasta el 1 de agosto, aunque a partir del 28 de julio ocurrieron con menos frecuencia. Las emisiones discretas de ceniza y tremor sísmico persistieron hasta el 5 de agosto. (Informe semanal OVT #699-703).

Durante este periodo, la ceniza se depositó principalmente al Oeste y Sur-oeste del volcán (Fig. 6-22) (Fig. 6-23).

Figura 6-21 Columna eruptiva observada por satélite a las 8h15 TL (NOAA Satellite and



Information Service, 2014). Se observan dos direcciones preferenciales del movimiento de la columna eruptiva. Una hacia el norte, a una altura de 8.5 km snc; y otra hacia el oeste, a 4.5 km snc.

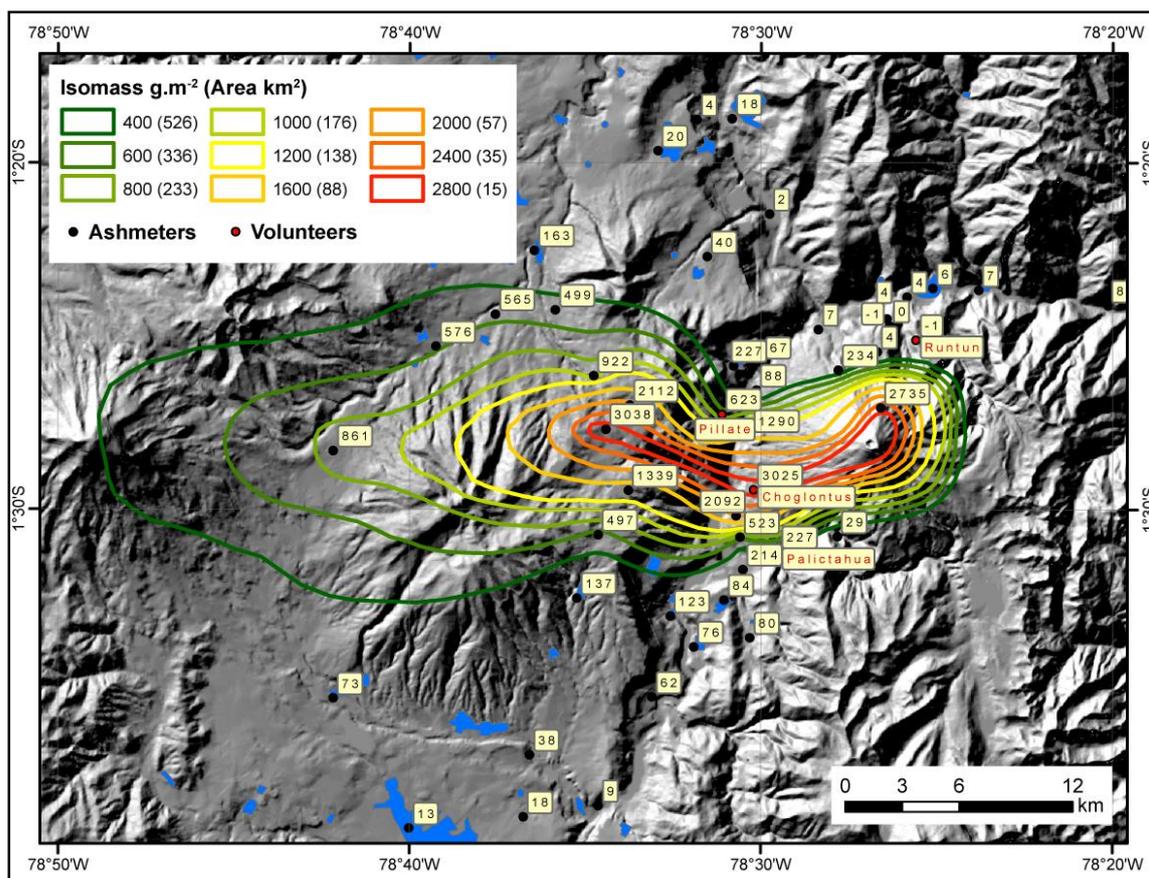


Figura 6-22 Dispersión de la ceniza durante el periodo eruptivo de julio-agosto 2013. (Parra et al., "en preparación"). En las cercanías del volcán el viento dirigió la ceniza hacia el SW, mientras que en las partes más lejanas, la ceniza tiene una dispersión hacia el NW-W. Se observa que la localidad de Choglontus se encuentra en el eje principal de la dispersión de ceniza.

### 6.3.1 INFORMACIÓN VISUAL, INSTRUMENTAL, MORFOLÓGICA, GRANULOMÉTRICA Y DE COMPONENTES DE LAS CENIZAS.

Se escogieron 3 muestras pertenecientes a esta fase eruptiva, las correspondientes al 14, 20 y 24 de Julio. La primera (14J13) contiene el material del inicio de este periodo, mientras que las otras dos (20J13 y 24J13) representan a la parte intermedia de la fase eruptiva, siendo además la del día 20 producto del mayor número de explosiones de alta energía de esta fase. Adicionalmente, se escogieron las muestras de la localidad de Choglontus (Fig. 6-22), lugar donde se recolectó la mayor cantidad en peso del material (mayor sedimentación) durante toda la erupción (Fig. 6-23).

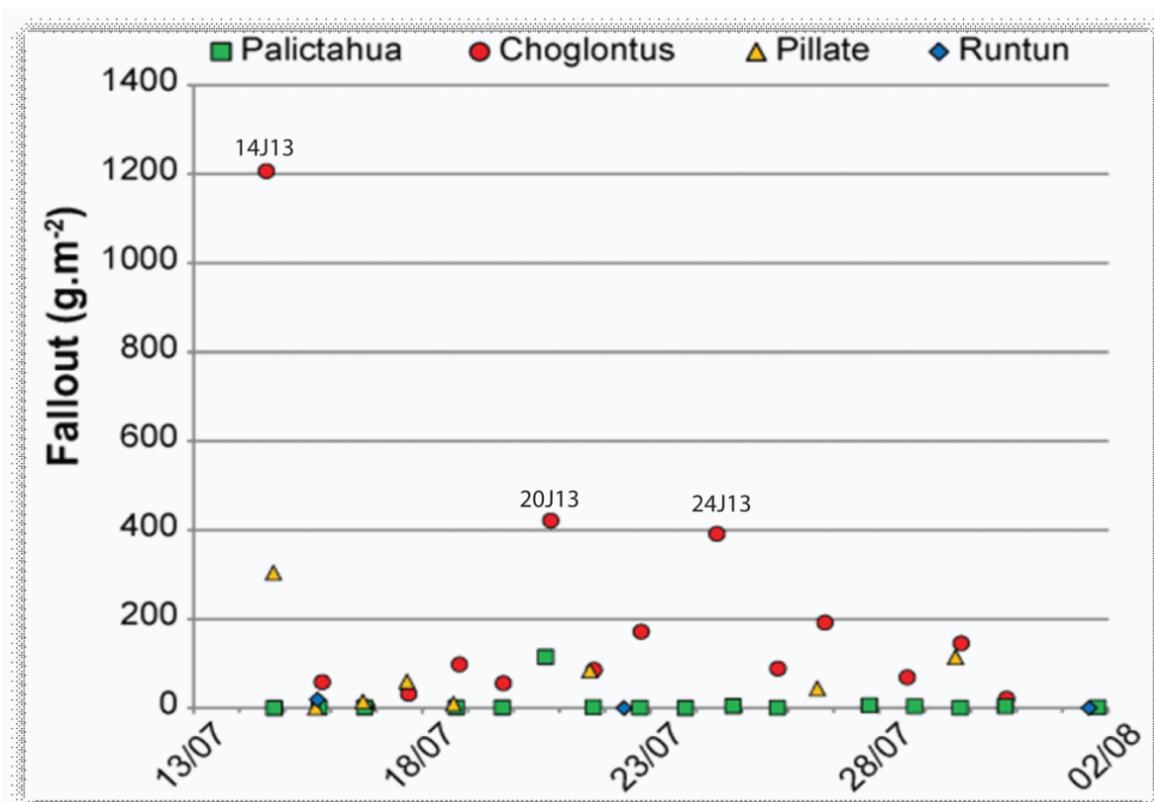


Figura 6-23. Caída de ceniza registrada en 4 localidades alrededor del volcán (Parra et al. en preparación). Se puede observar que la mayor sedimentación de ceniza durante el periodo eruptivo de julio-agosto 2013 ocurrió en la localidad de Choglontus ubicada al WSW del cráter mientras que es mínima en Runtún y Palictahua. La localidad de Pillate se encuentra al oeste del volcán.

Las muestras han sido designadas con un código que detalla el día de su recolección y contiene la ceniza acumulada en el tiempo que se indica a continuación.

- Muestra: 14J13, recolectada el 14/07/2013. Contiene la ceniza sedimentada entre las 6h46 y 14h20 del 14 de julio 2013 (TL).
- Muestra: 20J13, recolectada el 20/07/2013. Contiene ceniza sedimentada entre el 19 de julio 2013 a las 18h45 y el 20 de julio 2013 a las 19h35 (TL).
- Muestra: 24J13, recolectada el 24/07/2013. Contiene ceniza sedimentada entre el 22/07/2013 a las 19h00 y el 24/07/2013 a las 10h45 (TL).

### 6.3.1.1 Observaciones instrumentales y visuales

En las figuras 6-24 y 6-25 se observa que tasas más bajas de desgasificación están asociadas a un mayor número de explosiones vulcanianas (Steele, 2014), como ocurre en los días 17-21, 28 y 31 de julio. Además, a pesar de que para las muestras 20J13 y 24J13 se tiene un similar valor de sedimentación, el valor de desgasificación para la muestra 24J13 es mayor.

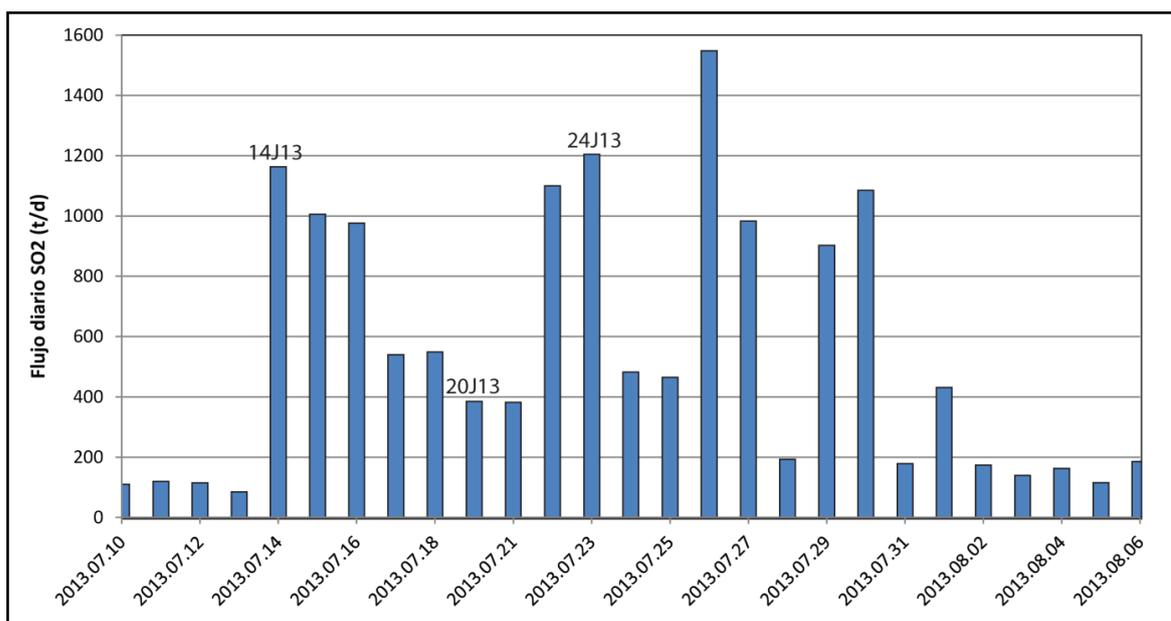


Figura 6-24 Esquema del flujo diario de SO<sub>2</sub> para la fase eruptiva de Julio 2013. (Hidalgo et al., 2014) Se indican las muestras recolectadas asociadas a su determinado valor de desgasificación.

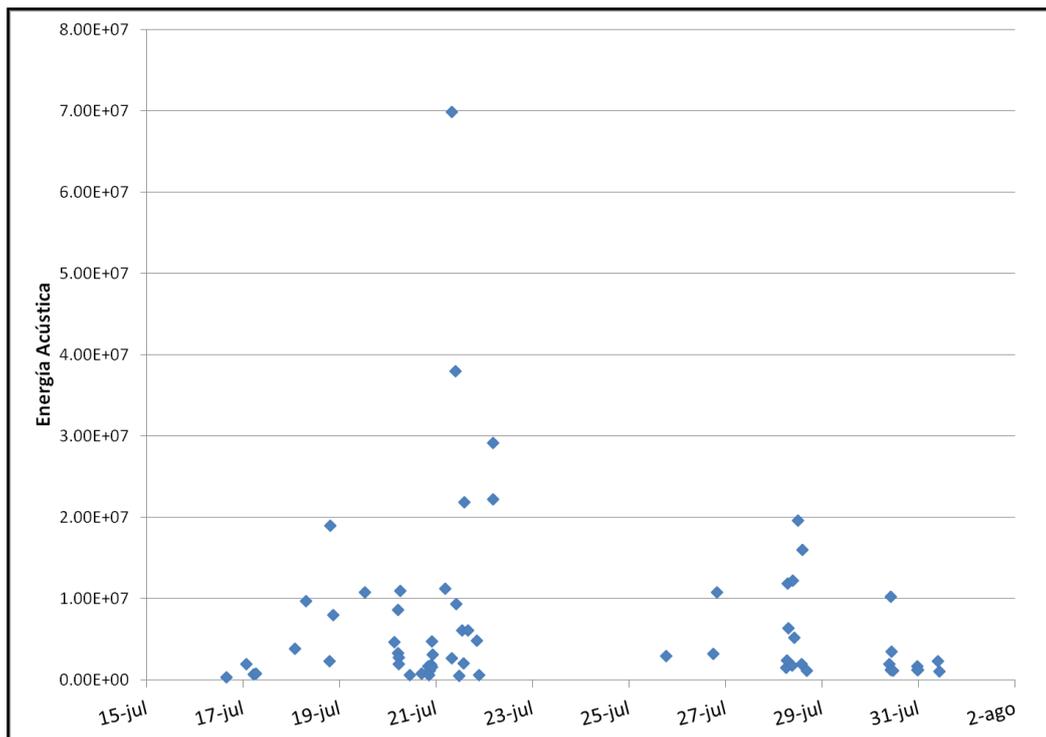


Figura 6-25 Dispersión en el tiempo de las explosiones con IRP (Infrasound Reduced Pressure; Hall et al., 2013)  $>100$  Pa calculadas a un Km del cráter (Steele, 2014) ocurridas durante la fase eruptiva de julio 2013. Estas explosiones pueden considerarse como vulcanianas de acuerdo al criterio de clasificación de Johnson, (2003).

Explosiones vulcanianas (Steele, 2014)	
Muestra	# explosiones
14J13	1
20J13	8
24J13	0

Tabla 3 Número de explosiones vulcanianas ocurridas durante el periodo de recolección de las muestras de julio 2013. Estas explosiones se clasifican como vulcanianas por presentar IRP  $>100$  Pa calculadas a 1km del cráter (Johnson, 2003).

- Observaciones visuales e instrumentales durante el tiempo de recolección de la muestra 14J13.

Previo a la erupción registrada el 14 de julio, el número de LP aumenta significativamente de 5 eventos, registrados el 11 de julio, a 92 eventos registrados el 13 de julio (Informe semanal OVT # 699). El día 14 de julio se registran 266 LP, la mayoría de los cuales ocurrieron desde 11 horas antes del evento explosivo

(Informe especial del volcán Tungurahua No. 14, IG EPN) (Informe semanal OVT #699).

Luego de la explosión ocurrida a las 6h45 (TL), una parte de la columna eruptiva se dirigió hacia el WSW, sobre la localidad de Choglontus (Fig. 6-23). Los flujos piroclásticos asociados a la explosión, produjeron una nube de ceniza de color blanquecino (nube co-piroclástica) que se dirigió hacia el W (Fig. 6-26).



*Figura 6-26 Nube de ceniza, desprendida del flujo piroclástico, dirigiéndose hacia el Oeste. Este flujo descendió a lo largo de la quebrada Juive Grande-La Pampa (Fuente: Informe semanal OVT # 699).*

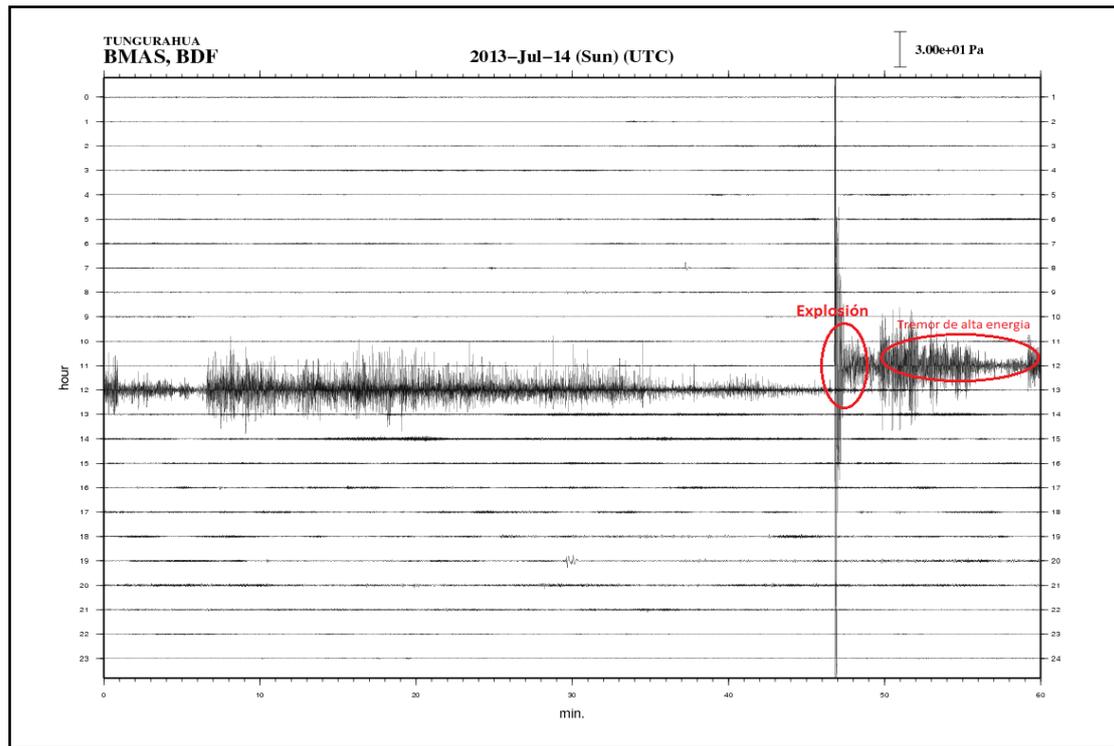


Figura 6-27 Registro del sensor de infrasonido de la estación BMAS para el día 14/07/2013 UTC.

- Observaciones visuales e instrumentales durante el tiempo de recolección de la muestra 20J13.

Durante la noche del 19 de julio (TL) se registró señal de tremor, asociada a emisión semicontinua de gases y ceniza, y durante la madrugada del 20 de julio (TL) ocurrieron explosiones (con cañonazos) (Fig. 6-28) acompañadas de vibración de ventanales. Se registraron 8 explosiones vulcanianas durante el tiempo de recolección de la muestra 20J13 (Steele, 2014). La columna eruptiva alcanzó hasta 3 km de altura durante este día y se reportó caída de ceniza en las localidades de Choglontus y Manzano.

El viento se dirigió hacia el SSW durante la madrugada y mañana del 20 de julio (NOAA Satellite and Information Service, 2014)

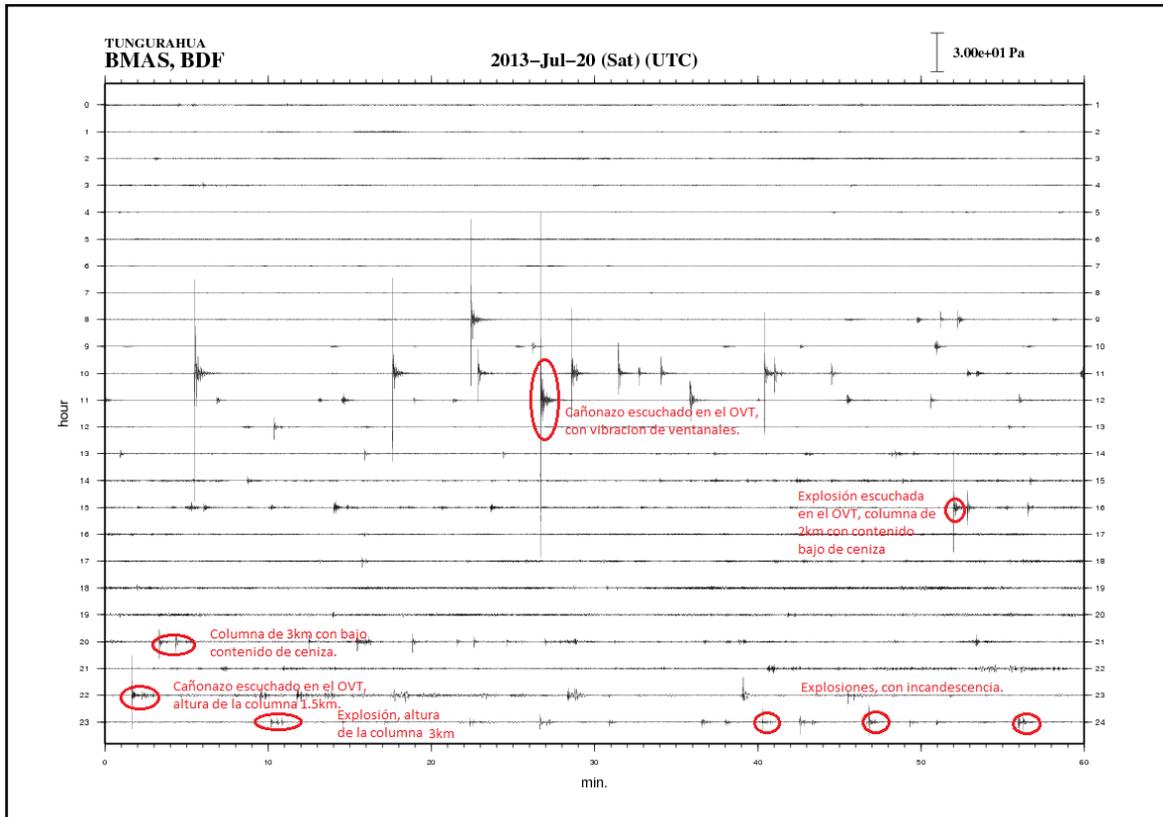


Figura 6-28. Registro del sensor de infrasonido de la estación BMAS para el día 20/07/2013 UTC. El reporte de explosiones, se registra con un valor elevado de componente acústica.

- Observaciones visuales e instrumentales durante el tiempo de recolección de la muestra 24J13.

Durante el día 23 y 24 se reporta columnas eruptivas con contenido moderado de ceniza que alcanzan 1-2 km. La emisión de estas columnas está asociada a bramidos de diferente intensidad. (Informe semanal OVT #701). La dirección del viento reportada para el día 23 es hacia el Oeste, mientras que para el día 24 es hacia el Noroeste y Oeste (NOAA Satellite and Information Service, 2014), (Fig. 6-29).

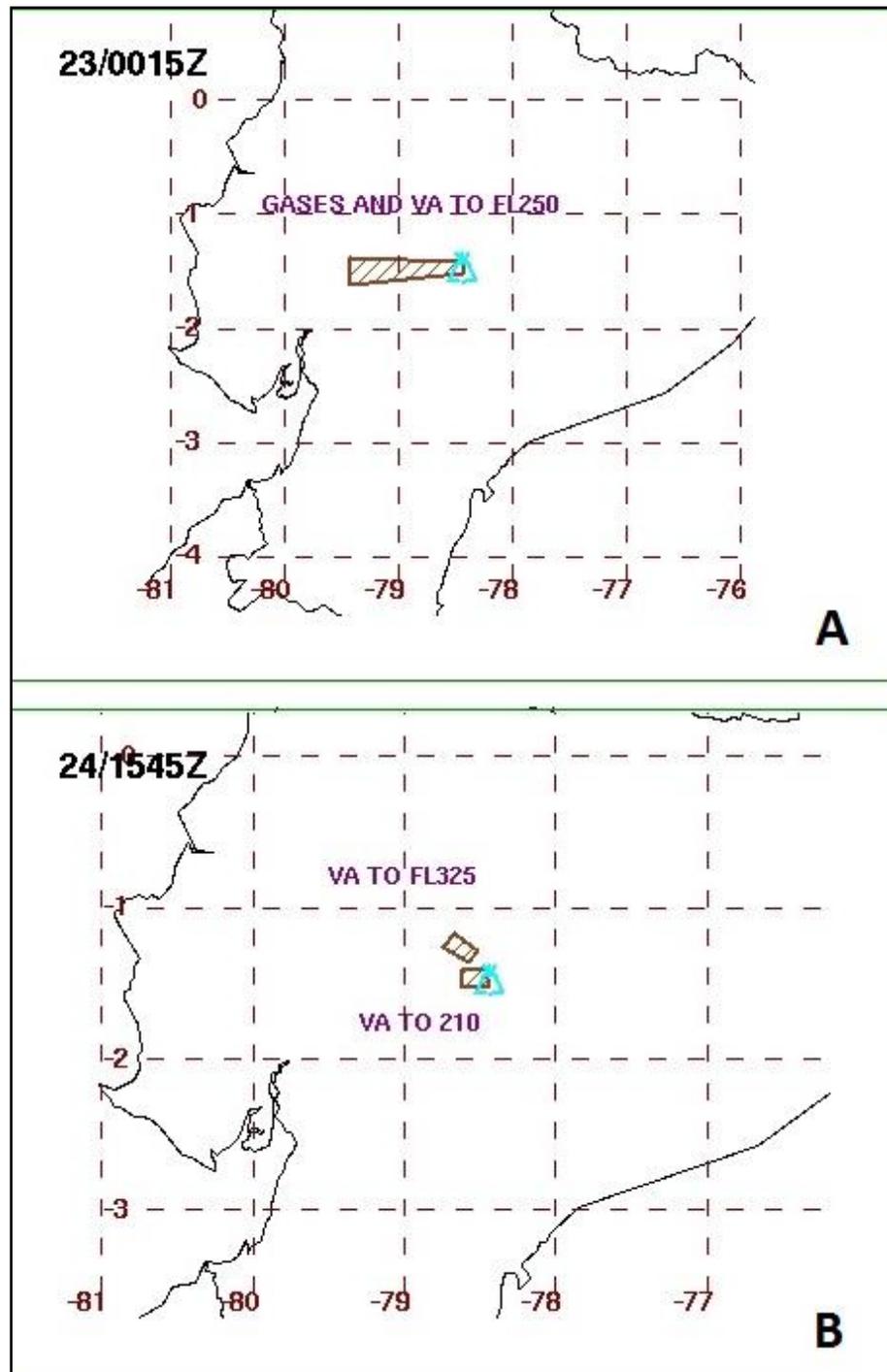


Figura 6-29. Se observa la columna de ceniza dirigiéndose al W, a 2.5 km snc el día 23/07/2013 a las 19h44 (TL). Mientras que el día 24/07/2013, a las 10h45 TL, se observa que la columna se dirige hacia el NW a 4.7 km snc y hacia el W a 1.4 km snc. (NOAA Satellite and Information Service, 2014).

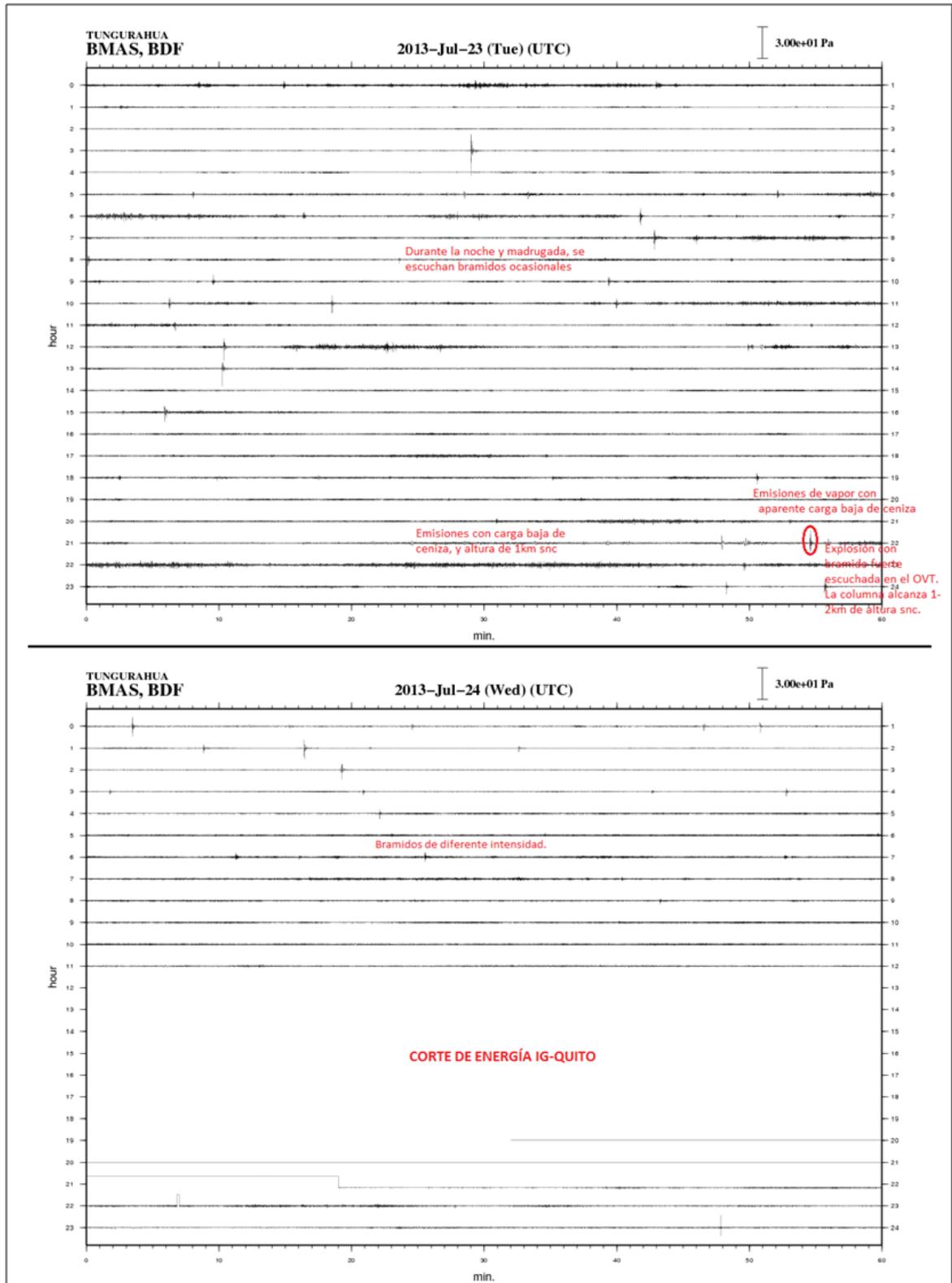


Figura 6-30 Registro del sensor de infrasonido de la estación BMAS para el día 23 y 24 de julio 2013 (UTC). Se observa la interrupción del registro debido a un corte programado de energía.

### 6.3.1.2 Morfología de los componentes

Para el análisis morfológico y la adquisición de imágenes de todas las muestras, con el instrumento Morphology G3, se usó el objetivo 5x excepto para la muestra 20J13, para la cual se utilizó el objetivo de aumento 10x. La gran angularidad característica de la muestra 20J13 (Fig. 6-31) puede relacionarse a una sobreestimación de sus morfologías por la utilización de un objetivo de enfoque diferente.

Para todos los casos, se reconoce una correlación lineal entre el aumento del tamaño de grano y la angularidad.

El valor promedio de angularidad para la muestra 14J13 es mayor que las obtenidas para la muestra 24J13 y grafican en la parte central-baja del esquema. Solamente las partículas pertenecientes a la muestra 14J13 que caen dentro de la fracción  $<0 \phi$ , poseen una alta angularidad. Sin embargo este dato no puede ser comparado con las otras dos muestras por falta de información a esta escala.

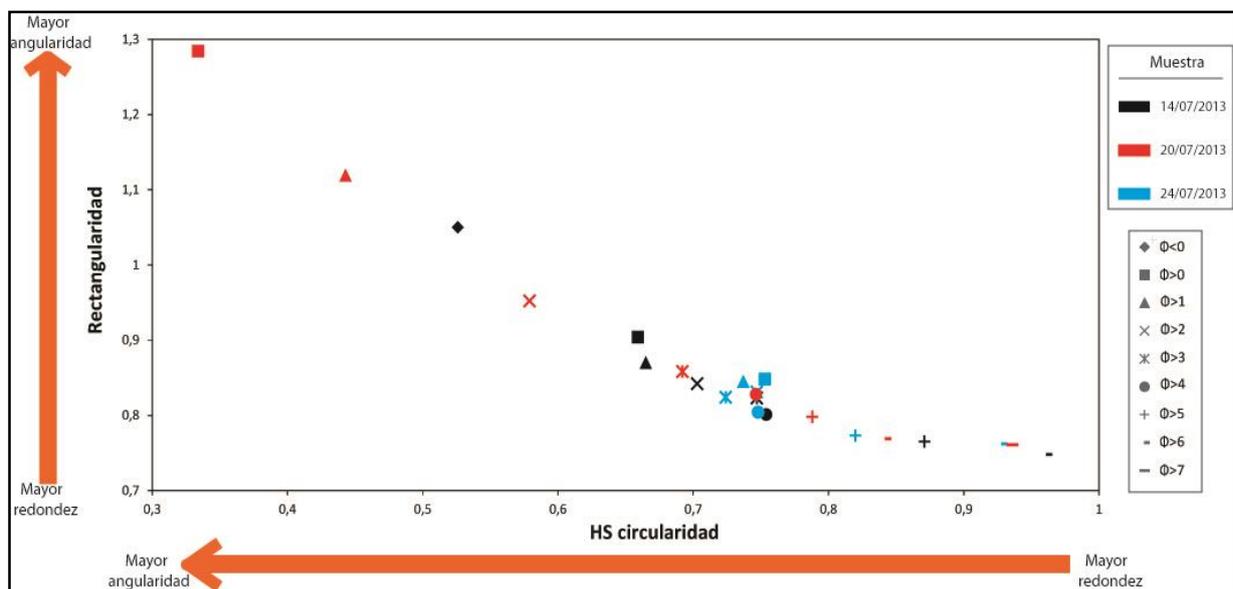


Figura 6-31 Diagrama HS circularidad vs Rectangularidad obtenidos para las muestras de julio 2013, analizados en intervalos de  $1 \phi$ . La rectangularidad está representado por la fórmula "perímetro/(2largo+2ancho)" (Anexo 8).

El promedio de elongación de la fracción que contiene a la moda de cada muestra es: 0.29, 0.305 y 0.28 para las muestras 14J13, 20J13 y 24J13, respectivamente. (Figura 6-32 6-32). En general, la elongación promedio de cada fracción analizada es mayor en la muestra 20J13 que en las muestras 14J13 y 24J13, y menor en la muestra 24J13 a sus equivalentes en las otras dos muestras.

La morfología, obtenida en el MG3, para las partículas más finas  $>5 \phi$  ( $<31 \text{ mm}$ ) sufre cierta distorsión, debido al desenfoque del objetivo al momento de tomar las imágenes, y por tanto no serían representativas de cada una de las muestras.

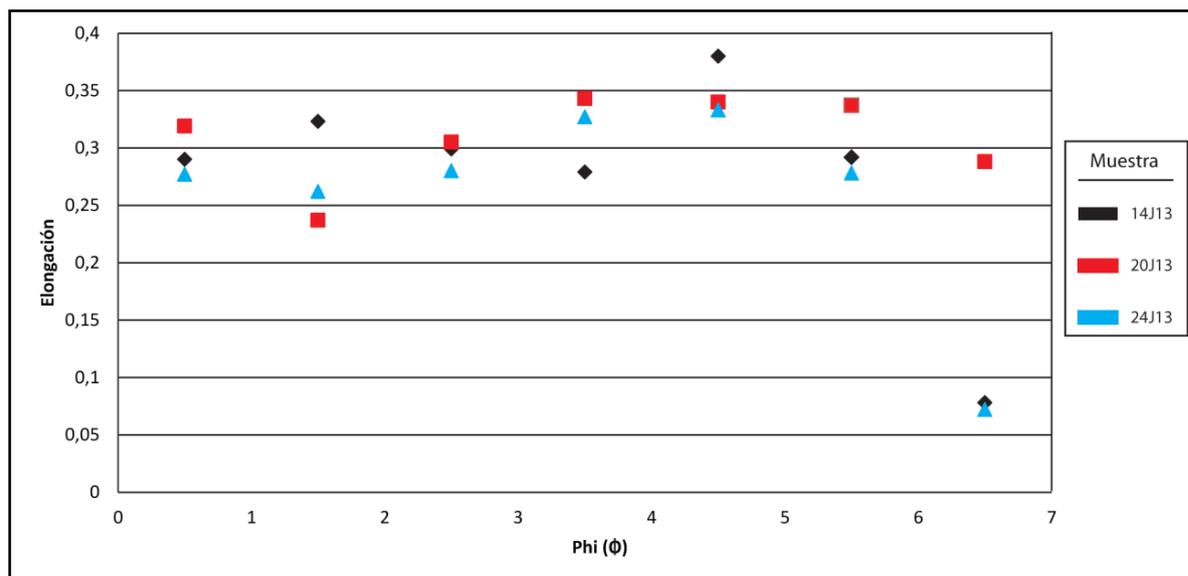


Figura 6-32 Diagrama de la Elongación vs Tamaño de grano, para las muestras tomadas durante julio 2013 analizados en intervalos de  $1 \phi$ .

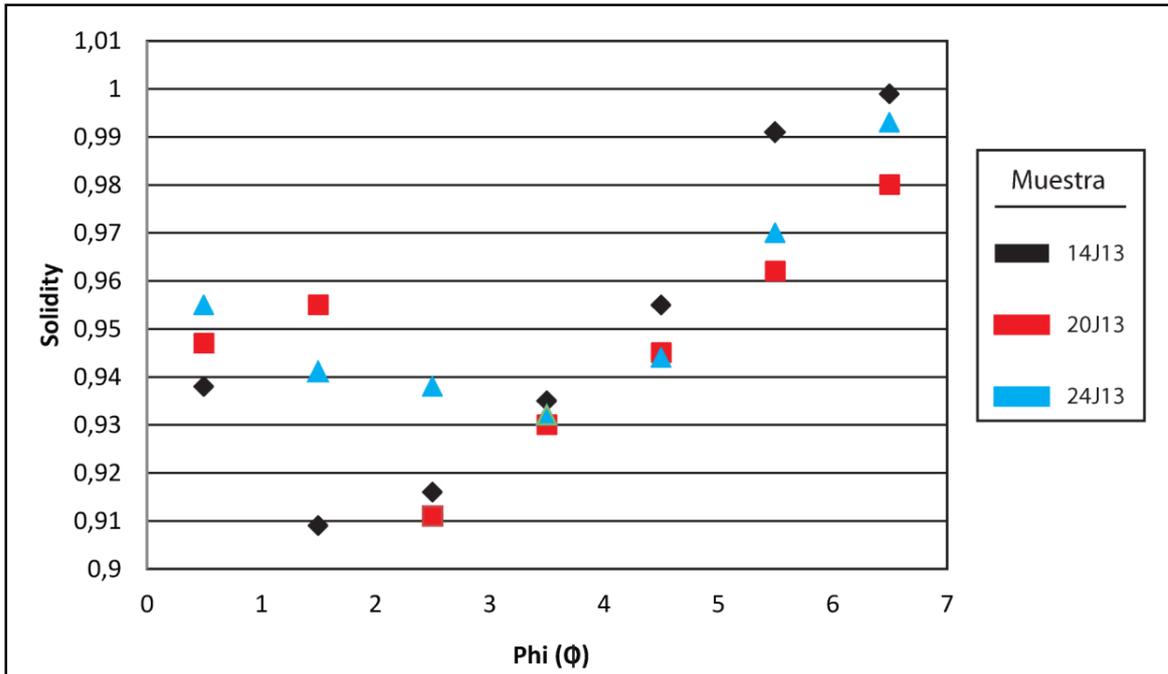
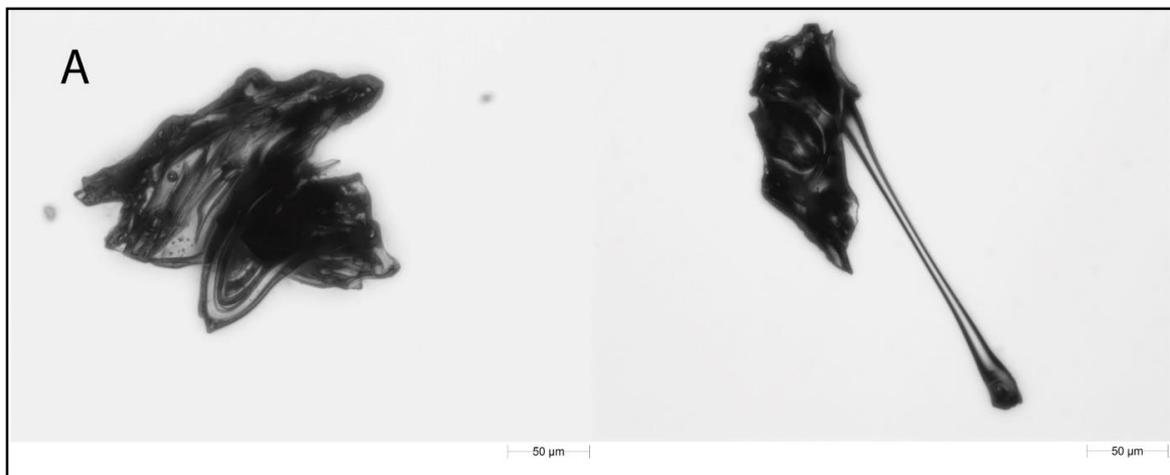


Figura 6-33 Esquema del parámetro Solidity vs Tamaño de grano, para las muestras tomadas durante julio 2013 analizados en intervalos de  $1 \phi$ .



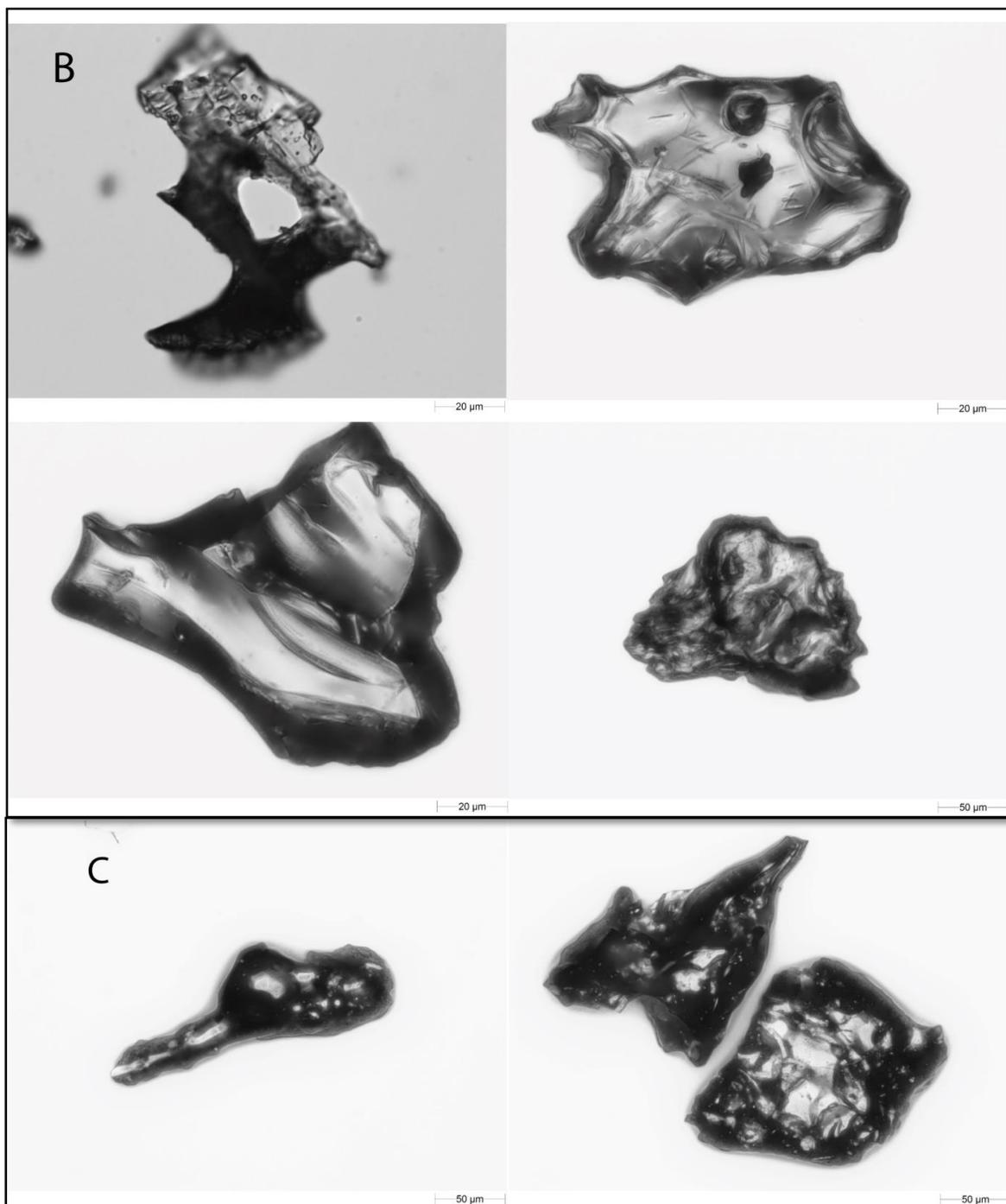


Figura 6-34 Morfologías presentes en las muestras A) 14J13, B) 20J13, C) 24J13. Fotografías tomadas en el MG3.

### 6.3.1.3 Componentes

El estudio de componentes en cada muestra está analizado en la fracción 315-500  $\mu\text{m}$ .

La muestra de ceniza 14J13 está compuesta por 42% wt cristales libres, 20% wt densos negros, 14% wt escorias, 12% wt material juvenil micro-vesiculado y 11% wt rocas alteradas (Fig. 6-35). Los cristales libres son plagioclasas y piroxenos. Algunas de las vesículas que constituyen las escorias son angulares mientras que la mayoría son redondas (Anexo 1-6). En ocasiones, el material juvenil micro-vesiculado presenta estructuras muy fluidales. El grupo de rocas muy oxidadas son principalmente escorias rojas.

En el caso de la muestra 20J13 la ceniza está compuesta por: 19% wt cristales libres, 27% wt densos negros, 38% wt escorias, 12% wt material juvenil micro-vesiculado y 1% wt rocas alteradas. A diferencia de la muestra anterior, el mineral mayoritario que conforma el grupo de cristales libres es la plagioclasa.

Por último, la muestra de ceniza 24J13 se compone de cristales libres 19%, densos negros 7%, escorias 38%, material juvenil micro-vesiculado 33% y rocas alteradas 1% (Fig. 6-35). La peculiaridad de esta muestra es el alto porcentaje de material vesiculado, alcanzando alrededor de 71% (material juvenil micro-vesiculado y escorias). A pesar de que esta muestra (24J13) posee similar sedimentación a la del 20J13 (Fig. 6-23) la primera fue recolectada durante un periodo de tiempo más amplio y está relacionada a un mayor flujo de  $\text{SO}_2$  (Fig. 6-24) así como menor número de explosiones (Fig. 6-22).

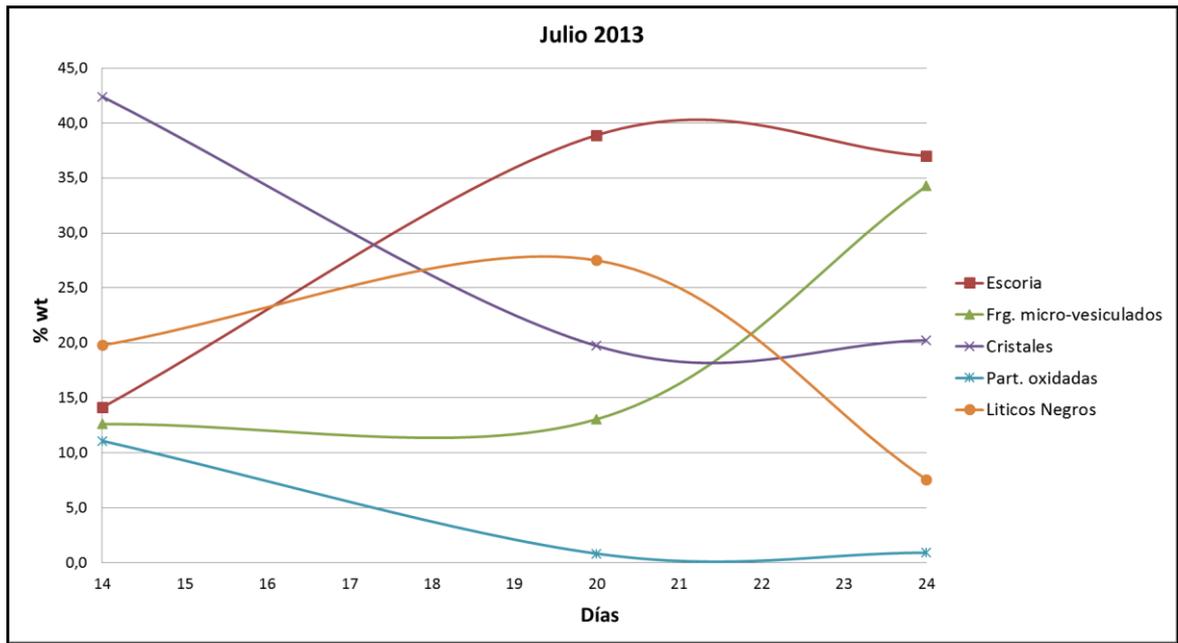


Figura 6-35. Porcentaje en peso de los componentes que conforman las muestras de julio 2013, analizados en la fracción 315-500  $\mu\text{m}$ . El rango de tamaño fue escogido considerando la disponibilidad de partículas y facilidad de manejo al momento de la separación de sus componentes.

### 6.3.1.4 Granulometría

La muestra 14J13, corresponde a una ceniza bimodal. Con una moda fina en  $72 \mu\text{m}$  ( $3.8\phi$ ) y una gruesa en  $768 \mu\text{m}$  ( $0.38\phi$ ). Esta muestra es la única con características bimodales de las tres muestras analizadas para julio 2013 (Fig. 6-36).

La muestra 20J13, al igual que la muestra 24J13, son cenizas unimodales (Fig. 6-36).

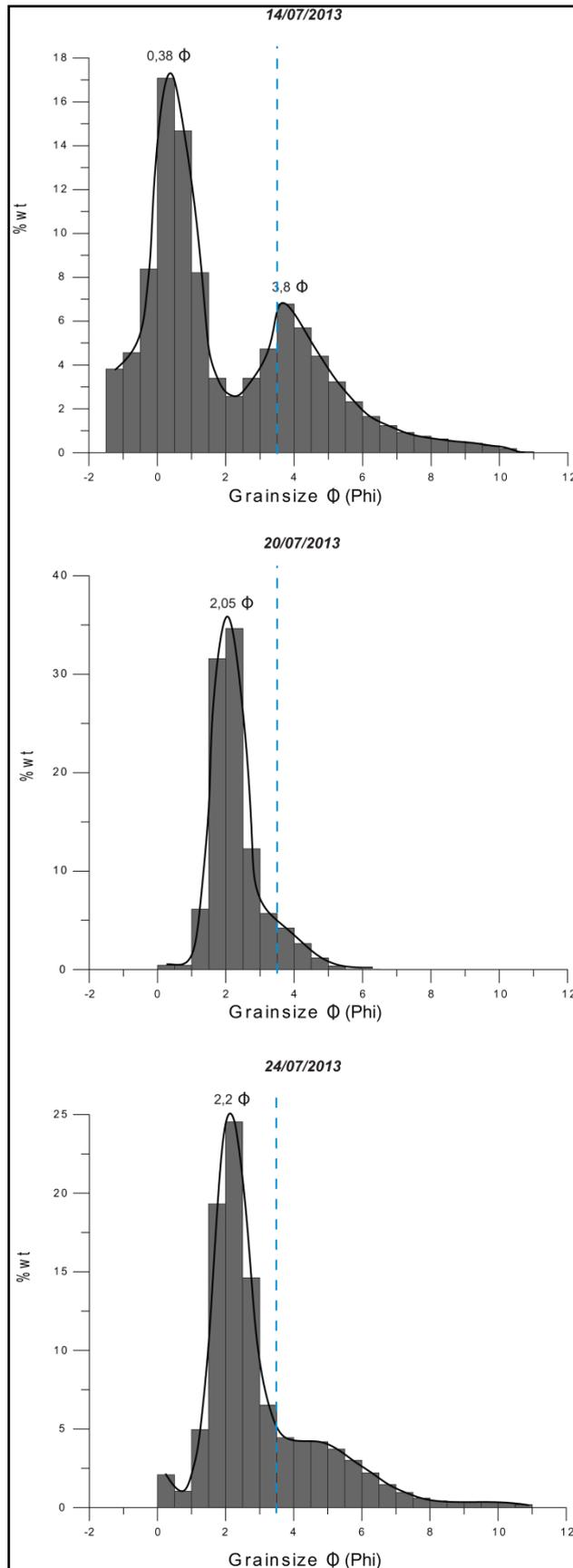


Figura 6-36 Distribución del tamaño de grano, representado en % de peso, analizado para las tres muestras de cenizas correspondientes al periodo julio-agosto 2013. El análisis incluye ensayo de tamizaje y granulometría láser, con superposición en  $90 \mu\text{m}$  ( $3.5\phi$ ).

Muestra	Moda ( $\phi$ )	Moda ( $\mu\text{m}$ )	Md $\phi$	$\sigma \phi$	$K_G$	Skl
14J13	0.38/3.8	768/72	1.82	2.26 (muy pobremente sorteado)	0.85 (platicúrtica)	0.48 (muy positiva)
20J13	2.05	241	2.18	0.70 (moderadamente sorteado)	1.39 (leptocúrtica)	0.31 (muy positiva)
24J13	2.2	217	2.92	1.57 (pobremente sorteado)	1.24 (leptocúrtica)	0.53 (muy positiva)

*Tabla 4 Tabla granulométrica comparativa para las muestras pertenecientes a la actividad eruptiva de julio-agosto 2013. Moda, valor obtenido utilizando el programa SFT. Media grafica ( $Md_\phi$ ), desviación estándar ( $\sigma \phi$ ), valor de curtosis ( $K_G$ ) y valor de asimetría (Skl) en base a la estadística grafica de Folk & Ward (1957). Las tres muestras presentan una cola de partículas finas por su valor de asimetría positiva.*

Las partículas finas  $<45 \mu\text{m}$  ( $>4.5 \phi$ ) de las muestras 14J13, 20J13 y 24J13 corresponden al 7.7% wt, 6.6% wt y 16.5% wt, respectivamente. El material juvenil micro-vesiculado presente en la muestra 24J13 alcanza el 33% wt, mientras que en las otras dos es del 13% wt.

## 7 CAPÍTULO VII

### DISCUSIÓN

#### 7.1 DISCUSIÓN.

##### 7.1.1 DESCRIPCIÓN DE LOS DINAMISMOS ERUPTIVOS

Los dinamismos en erupciones explosivas son muy complejos y dependen de un amplio número de parámetros, tales como: las características del sistema volcánico (ej. geometría del conducto), las características químicas y reológicas del magma involucrado, los mecanismos de ascenso y de fragmentación del magma (Sparks, 1978; Verhoogen, 1951).

#### **Modelo de la migración/residencia del magma para la actividad eruptiva Enero 2010-Julio 2013**

El presente modelo se basa en el análisis de los resultados geoquímicos, así como de las descripciones visuales e instrumentales. Como se determina en la sección 6.1, existen 4 muestras con características más básicas en un conjunto de muestras homogenizado, estas muestras fueron emitidas durante eventos altamente explosivos caracterizados por la generación de flujos piroclásticos y columnas eruptivas fuertes (erupción del: 28 de mayo 2010, 22 de noviembre 2010, 14 de diciembre 2012 y 14 de Julio 2013). Analizando estos resultados junto a los análisis obtenidos para el resto de fases eruptivas se considera el siguiente modelo dinámico de la migración/residencia del magma emitido por el volcán Tungurahua, modelo que es esquematizado en la Fig. 7-1. En 7-1a se representa una actividad semicontinua en sistema abierto (ej. fase junio-agosto 2010) la cual se generaría por recargas continuas de magma. En 7-1b se representa el ascenso y consecuente desgasificación, densificación y cristalización de un magma, lo cual genera una roca densa que actúa como tapón (plug) impidiendo la desgasificación posterior (Wright et al., 2007; Miwa y Toramaru, 2013). Este magma constituiría la parte residual de un magma estancado (Winter 2010) o provendría de una intrusión magmática caliente que permite la desgasificación y formación del tapón cerca a la superficie. Intrusiones magmáticas calientes de composición básica similares a lo que se propone en este modelo, han sido propuestas por Samaniego et al. (2011) para la

actividad eruptiva ocurrida entre 1999-2005 en el volcán Tungurahua. En la Fig. 7-1c se observa un periodo de inactividad debido a la formación del tapón, este periodo precede una fase de alta actividad eruptiva. El esquema 7-1d corresponde a una erupción volcánica con columna eruptiva fuerte que asciende varios km snc y genera descenso de flujos piroclásticos alrededor de los flancos. Esta erupción ocurre cuando la presión del gas bajo la roca densa que actúa como tapón se incrementa, hasta un punto en el cual esta roca falla de tal manera que el material solido/fundido y el gas son violentamente expulsados (Self et al., 1979; Wilson 1980). En 7-1e, la actividad eruptiva semicontinua es ejemplificada por la fase eruptiva noviembre-diciembre 2010 y es similar a la representada en el esquema 7-1a. En 7-1f hay el ingreso de un nuevo magma que podría o no generar nuevamente un tapón. La fase eruptiva Abril-Mayo 2011 prosigue a la fase noviembre-diciembre 2010 y sus inicios se caracterizan por erupciones discretas lo que indica que no se generó un tapón en el conducto. Las erupciones del 14 de diciembre de 2012 y 14 de julio de 2013 son las erupciones iniciales de las fases Diciembre 2012 y Julio-Agosto 2013 e indican la formación del tapón a finales de la fase eruptiva precedente a cada una de ellas.

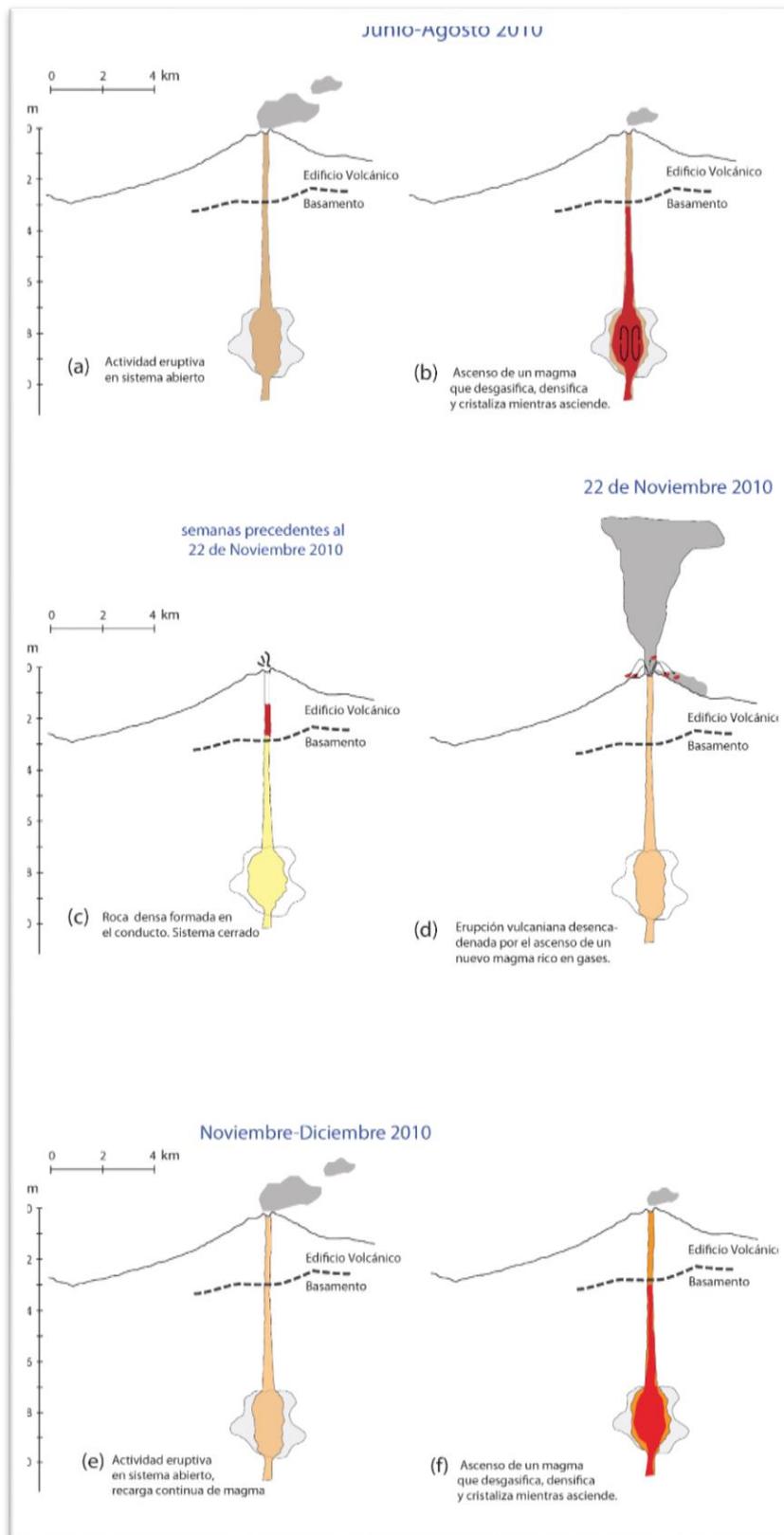


Figura 7-1. Modelo de la migración/estancia del magma basado en el resultado de análisis geoquímicos de depósitos piroclásticos. Esquema modificado de Samaniego et al. (2011). La fase eruptiva “marzo 2013” es ejemplo de la actividad eruptiva representada en el esquema 7-1a, mientras que “julio 2013” del esquema 7-1d.

### 7.1.1.1 Dinamismos eruptivos para marzo 2013

Basado en el análisis geoquímico realizado en escorias para las cenizas pertenecientes a la fase de marzo 2013 (Map-mar-13) (ver sección 6.1), se reconoce una característica más ácida de la muestra mencionada de entre todo el conjunto de muestras. Esta característica ácida estaría relacionado a la alta cristalinidad del magma emitido durante esta fase, enriqueciendo a la fase líquida (escorias) en sílice. La alta cristalinidad se evidencia por un alto porcentaje del componente “cristales libres” en todas las muestras pertenecientes a marzo.

- *Actividad volcánica con formación constante de una columna eruptiva débil (1/03/2013)*

El evento explosivo inicial podría estar relacionado al contacto del magma con agua subterránea, sin tener evidencia para confirmar este fenómeno, más que la gran cantidad de vapor emitido en la columna eruptiva durante este día. La poca altura de las columnas eruptivas indica baja energía de las explosiones.

Los componentes que conforman la ceniza de esta erupción contiene partículas oxidadas (5% wt) que corresponderían a la erosión del conducto, indicando un proceso de apertura y limpieza del conducto.

- *Erupciones en sistema abierto con altas tasas de desgasificación (8/03/13)*

Luego del 1 de marzo, la actividad eruptiva y el valor de desgasificación aumentan evidenciándose columnas eruptivas constantes con moderado a bajo contenido de ceniza. La desgasificación alcanza su máximo valor entre el 5-7 de marzo y este fenómeno está asociado a una baja tasa de sedimentación en relación al valor máximo registrado entre el día 13 y 14 de marzo.

La actividad eruptiva del 8 de marzo ocurre entre el cambio de una actividad en sistema abierto, evidenciado por alta desgasificación (5-7 de marzo), y una actividad vulcaniana intermitente (12-15 de marzo). Este día se caracteriza por emisiones de ceniza semi-constantes las cuales están acompañadas de valores de desgasificación altos.

*Actividad vulcaniana intermitente (14/03/13)*

Según Wright et al. (2012) la cristalinidad (cristales  $<35 \mu\text{m}$ ) de las partículas de ceniza emitidas por el volcán Tungurahua está controlada por la tasa de alimentación de magma (TAM) debido a que la TAM controlaría el tiempo disponible para la cristalización durante el ascenso del magma.

De esta manera sugiere una actividad vulcaniana intermitente a bajas TAM y periodos más continuos de erupción Estromboliana a altas TAM, asociada a una alta cristalinidad (mayor viscosidad) en la primera y bajas cristalinidades (menor viscosidad) en la segunda.

Pero contrariamente a lo que propone Wright et al. (2012) y considerando que la tasa de sedimentación diaria dada por (Bernard, 2014) (Fig. 6-23) es proporcional a la TAM, la actividad vulcaniana intermitente (13-14 de marzo, muestra 14M13) ocurre a TAM altas o al menos mayores a aquellas que generan una actividad discreta con ausencia o muy pocas erupciones Vulcanianas (ej. 2-10 de marzo). Se propone por tal razón que la alta cristalinidad y posterior actividad eruptiva vulcaniana intermitente estaría relacionada a una alta desgasificación del magma.

Se conoce que la desgasificación de un magma desencadena el proceso de cristalización (ej. Melnik y Spark, 1999) aumentando su viscosidad por: aumento de la cristalinidad (Ji, 2004), aumento de sílice (Shaw, 1972) o por enfriamiento del magma durante el ascenso (Cashman et al., 2001). Sparks (1997) propone altos gradientes de presión no lineal en el conducto, lo cual se da por cambios de viscosidad generados por la desgasificación y cristalización de microlitos, determinando que los mayores cambios ocurren a niveles superficiales. Otras consecuencias debido al aumento de la viscosidad en el magma es: 1. formación de burbujas más cerca de la superficie, 2. la mayor viscosidad va a aumentar de manera importante la fricción con las paredes del conducto (Parfitt y Wilson, 2008).

Durante el 13-14 de marzo se observan: grandes tasas de sedimentación, bajos valores de flujo de  $\text{SO}_2$  y mayor número de explosiones entre las cuatro muestras seleccionadas.

Considerando un modelo donde existe una columna de magma continua presente en el conducto volcánico, la alta desgasificación producida antes y entre los días 1-10 de marzo habría dejado un magma desgasificado en profundidad y con mayor viscosidad. Este magma alcanzaría la superficie de fragmentación a partir del día 11 de marzo, día en el que se observa un aumento en el número de erupciones vulcanianas y continua emitiéndose durante la recolección de la muestra 14M13.

Este magma más viscoso impediría una liberación pasiva de gases y más bien generaría zonas de mayor acumulación, los mismos que al liberarse producen grandes explosiones y fragmentación frágil. La fragmentación frágil que genera la muestra 14M13 (mayor angularidad), habría sido mayor a la ocurrida durante la generación de las muestras 1M13 y 8M13.

Los cambios de componentes entre las muestras 8M13 y 14M13 son mínimos, diferenciándose solamente en el aumento del componente “cristales libres” en la muestra 14M13.

A pesar de que el porcentaje en peso total (% wt) de material juvenil micro-vesiculado constituyente de la muestra 8M13 y 14M13 es bajo, se tiene una importante cantidad de material fino, que como se discute en la fase julio-agosto 2013 provendría de la abrasión de material juvenil micro-vesiculado en el conducto o en la columna eruptiva. Por esta razón la ausencia de material juvenil micro-vesiculado en la fracción 315-500  $\mu\text{m}$ , se debería a una total disminución de su tamaño ocasionada por abrasión en el conducto volcánico (Dufek et al., 2012; Dufek y Manga, 2008).

- Fuente de lava (17/03/2013)

El termino fuente de lava (lava fountaining) es utilizado para describir procesos ocurridos en lavas basálticas, los cuales generan estructuras fluidas como cabellos de Pelé. Este proceso se explica por una aceleración superficial debido a la expansión de gases (Heiken & Wohletz, 1985) y por una alimentación continua de magma.

Como propone Cashman (2004) para volcanes basálticos (ej. Volcán Estrómboli) una intensa actividad explosiva se espera como resultado de una rápida descompresión y ascenso del magma. Durante esta alta actividad explosiva el magma permanece en equilibrio con la fase de gas coexistente y la mezcla (gas + magma) se expande como en un sistema cerrado. La alta carga de ceniza descrita durante la alta actividad eruptiva ocurrida el 16/03/2013, sugiere un dinamismo similar al descrito por Cashman (2004). Este dinamismo permitiría que el magma ascienda hasta zonas más superficiales al momento de la fragmentación, conservando así las morfologías angulares de la ceniza emitida (muestra 17M13). Una fragmentación más superficial facilitaría una menor abrasión del material en el conducto lo cual explicaría el alto valor de angularidad de esta muestra.

La presencia de granos alargados poco vesiculados similares a los presentes en la muestra 17M13 (Fig. 6-17) ocurren cuando gotas de magma suficientemente calientes son emitidas durante una actividad eruptiva. Este alargamiento se produce durante el transporte del material a través de la atmósfera (Houghton et al., 2001).

La desgasificación durante esta alta actividad no fue medida debido a la hora de su ocurrencia (17h56TL), ya que los instrumentos de medida DOAS recolectan información hasta las 18h00. Se esperan para esta actividad altas tasas de desgasificación debido a su mayor porcentaje de material micro-vesiculado y escoria. El alto porcentaje de líticos densos estaría relacionados con la moda gruesa característica de este material y no implica necesariamente magma desgasificado como ocurre en las erupciones del 14/03/13 y 20/07/13.

### 7.1.1.2 Dinamismos eruptivos para julio 2013

#### *Erupción Vulcaniana con flujos piroclásticos (14/07/2013)*

Teóricamente, un tapón (plug) se forma por la zonificación de vesículas en la columna magmática, debido a la desgasificación (Wright y Cioni, 2007; Diller et al., 2006), siendo este material hacia la superficie más denso y aumentando el porcentaje de las vesículas con la profundidad (Burgisser et al, 2010; Clarke et al., 2007).

Los bloques de roca densa tomados de los depósitos de flujos piroclásticos y los bloques balísticos encontrados hasta 5 km de distancia del cráter, sugieren la formación de un tapón previo a la erupción registrada el 14 de julio de 2013. Estas características junto a la generación de una columna eruptiva fuerte de 8,5 km snc y la generación de flujos piroclásticos, constituyen evidencia de una explosión violenta y súbita la cual puede considerarse como vulcaniana (Self et al., 1979; Wilson 1980). Adicionalmente esta explosión generó una onda de presión acústica de 5327 Pa (Steele, 2014) la cual permite clasificar la erupción como vulcaniana (Johnson, 2003).

11 horas antes de la erupción del 14 de julio se registraron ~282 LP relacionados al ascenso de un volumen de magma rico en gases (Informe especial del volcán Tungurahua N° 14). Este evento habría sido el desencadenante de la erupción debido al aumento de la presión de los gases bajo el tapón.

La expulsión continua de material piroclástico que duró aproximadamente una hora y que prosiguió a la explosión vulcaniana, generó un material unimodal (768  $\mu\text{m}$ ; 0,38  $\Phi$ ) que se dirigió y depositó al occidente del cráter. Hacia la misma dirección se dirigió el material de ceniza muy fina (72  $\mu\text{m}$ , 3.8  $\Phi$ ) generada durante el descenso de los flujos piroclásticos dando una característica bimodal al depósito de caída (muestra 14J13). Este fenómeno es similar al ocurrido en agosto 2006 en el volcán Tungurahua el cual es discutido por Eychenne et al. (2012).

Se reconocen procesos de abrasión dentro del conducto y de los flujos piroclásticos. La abrasión dentro del conducto ocurre luego de la fragmentación

(Dufek et al., 2012) y permite liberar a los cristales juveniles y aquellos provenientes del conducto, de su matriz vítrea (Cas, 1983). El componente cristales libres alcanza de esta forma ~42% wt de la muestra de caída.

La abrasión ocurrida en los flujos piroclásticos, durante su descenso por los flancos del volcán (Dufek & Manga, 2008), es reconocida por una menor angularidad y menor elongación de la fracción de tamaño que contiene a la moda secundaria en la muestra 14J13 cuando se la compara a las partículas pertenecientes a las fracciones semejantes en las muestras 20J13 y 24J13.

El material que ascendió a superficie arrastró rocas del conducto depositándolas junto con los flujos piroclásticos y la caída de ceniza, alcanzando en esta última ~10% wt. Una parte de los cristales libres que se calcula para la muestra 14J13, podría corresponder a cristales no juveniles los cuales habrían sido abrasionados y liberados de su matriz (McPhie et al., 1993). Debido a que no se puede diferenciar entre cristales juveniles y no juveniles, tampoco se puede calcular el porcentaje exacto de material producto de la erosión del conducto que conforma la muestra de caída de ceniza. Sin embargo, considerando que para las muestras 20J13 y 24J13 el porcentaje de cristales libres (~20%) correspondería solamente a cristales juveniles, se toma a este valor como el porcentaje de cristales juveniles presentes en la muestra 14J13. De esta manera el porcentaje de material proveniente de la erosión alcanzaría en la muestra 14J13 entre 20 y 30% wt.

Por último, se considera que la fragmentación durante la erupción Vulcaniana ocurrió por una rápida descompresión por la destrucción del tapón y posteriormente la fragmentación ocurre por rápida aceleración evidenciada por material juvenil micro-vesiculado con vesículas alargadas (Cashman et al., 2001) (Anexo 1, Anexo 2).

#### *Actividad vulcaniana intermitente (20/07/2013)*

Al igual que lo que ocurre el 13 de marzo (muestra 14M13) de marzo, este día se observa grandes tasas de sedimentación y bajos valores de flujo de SO<sub>2</sub> al igual que el mayor número de explosiones entre las tres muestras seleccionadas. Esta

actividad, podría relacionarse a la emisión de un magma previamente desgasificado (entre el 14-19 de julio o antes) y por tanto más viscoso generando sobrepresiones en el conducto que acumulan volúmenes significantes de gas que al llegar a zonas superficiales son liberados generando explosiones vulcanianas y fragmentación frágil.

El componente de líticos negros en esta muestra alcanza el 26% wt y constituiría las partes más viscosas y menos vesiculadas del magma que impiden la salida de los gases magmáticos.

- *Erupciones en sistema abierto con altas tasas de desgasificación (24/07/2013).*

Una mayor tasa de alimentación de magma ocurrida a partir del 20/07/2013 habría permitido para este día el ascenso de magma desde zonas más profundas el cual estaría caracterizado por una mayor temperatura y menor viscosidad. Ambas características permiten el ascenso más rápido de los gases a través de la columna magmática. Se evidencia durante este día altas tasas de desgasificación y menores tasas de sedimentación considerando un lapso de tiempo similar que a la ocurrida durante el 20 de julio. Estas características provocan en superficie emisiones discretas con bramidos no muy fuertes y mayor presencia de material juvenil micro-vesiculado. El material juvenil micro-vesiculado, presente en altos porcentajes, es fácilmente abrasionado dentro del conducto o en la columna eruptiva generando una cola de material fino en la ceniza depositada (Dufek et al., 2012).

La fragmentación del material ocurre por la desgasificación y abrasión de la ceniza en la columna eruptiva que asciende desde el viento, la primera genera un material unimodal, mientras que la segunda genera un material muy fino proveniente de la abrasión del material juvenil micro-vesiculado.

La baja angularidad (alta redondez) promedio de la muestra 24J13 que es característico en todas las fracciones, evidencia menor resistencia a la abrasión de sus partículas. Esto estaría relacionado al alto porcentaje de material juvenil micro-vesiculado presente en la muestra (33% wt) el cual podría ser fácilmente abrasionado dentro del conducto volcánico (Dufek et al., 2012) luego de la

fragmentación. El material resultado de la abrasión correspondería a una ceniza extremadamente fina ( $<45 \mu\text{m}$ ) presente en mayor cantidad en la muestra 24J13.

La peculiaridad de esta muestra es el alto porcentaje de material vesiculado, alcanzando alrededor de 71% (material juvenil micro-vesiculado y escorias), lo que indicaría un sistema abierto durante la erupción o menor profundidad de la fuente.

En los datos obtenidos para las muestras de marzo 2013, se observa que el material con mayor angularidad es aquel proveniente de las erupciones más explosivas (14M13). Es posible que esta característica prevalezca en las erupciones de julio 2013, y sea la muestra 20J13 la más angular. Lastimosamente, como se ha indicado en el desarrollo del análisis morfológico, la morfología obtenida para la muestra 20J13 no es comparable a las otras dos, debido a la utilización de un diferente aumento del objetivo al momento de la adquisición de imágenes.

## 8 CAPITULO VIII

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 8.1 CONCLUSIONES

- Las observaciones visuales, junto al análisis de la tasa de caída de ceniza, emisión de SO<sub>2</sub> (medidas por el instrumento DOAS) e intensidad de las explosiones (medidas por los sensores de infrasonido), permitieron diferenciar los tipos de erupciones ocurridos en el volcán Tungurahua durante las fases de actividad eruptiva de marzo 2013 y julio-agosto 2013. Se reconocen 4 tipos: erupciones vulcanianas, en sistema abierto, vulcanianas intermitentes y fuentes de lava.
- La apertura del conducto volcánico al inicio de una fase eruptiva genera erosión. La erosión es de menor grado durante una actividad eruptiva débil (ej 1/03/2013) y muy acentuada durante una erupción vulcaniana (ej. 14/07/2013). La tasa de erosión disminuye a través del tiempo (en una misma fase eruptiva) con el desarrollo de nuevas explosiones y emisiones.
- La característica bimodal de la muestra 14J13, recolectada durante la erupción vulcaniana del 14/07/2013, se debe a la sedimentación de la ceniza proveniente de la columna eruptiva y de la nube de ceniza fina desprendida de los flujos piroclásticos.
- El estudio granulométrico, morfológico y de componentes realizado en secuencias de ceniza pertenecientes a estas dos fases eruptivas mencionadas, demuestra que sus partículas guardan características asociadas al dinamismo eruptivo bajo el cual se formaron. La descripción de estas características permiten conocer y describir de mejor manera los fenómenos que dieron su origen.
- La erupción en “sistema abierto” (ej. muestra 24J13), la cual está asociada a altos flujos de SO<sub>2</sub>, genera un depósito de caída piroclástica caracterizado por poca cantidad de ceniza y mayor % wt de partículas micro-vesiculadas. Esta actividad eruptiva se relaciona al ascenso de un magma caliente que da facilidad a la desgasificación.

- La actividad vulcaniana intermitente (explosiones con IRP > 100 Pa), ocurrida los días 13/03/2013 y 20/07/2013, está asociada a una mayor generación de ceniza y menores tasas de flujo de SO<sub>2</sub>. Sus partículas se caracterizan por poseer mayor angularidad que las generadas durante una erupción en sistema abierto y por un alto porcentaje de líticos negros.
- La alta desgasificación durante erupciones en sistema abierto desencadena la cristalización y aumento de la viscosidad de un magma profundo. Este magma desgasificado asciende y fragmenta durante una actividad vulcaniana intermitente generando un material con alta angularidad. La ocurrencia de las fuertes explosiones se asocia a la formación de zonas de acumulación de gases en la columna magmática y subsecuente liberación explosiva.
- Para las muestras de julio 2013, se observa una correlación entre el aumento del porcentaje de ceniza muy fina (<45 µm) y el aumento del material micro-vesiculado lo que se relaciona a procesos de abrasión de este último dentro del conducto y/o en los flujos piroclásticos.
- Las partículas de ceniza emitidas durante una intensa actividad eruptiva tipo fuente de lava (lava fountaining, ej. muestra 17M13) son los más angulares y alongadas debido a una fragmentación superficial del magma lo cual impide altas tasas de abrasión permitiendo la conservación de sus morfologías. Esta actividad se genera de una rápida descompresión y ascenso del magma.

## 8.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar imágenes de back-scattered electrons (BSE) en escorias pertenecientes a las muestras 20J13 y 24J13 con el fin de analizar su cristalinidad y confirmar que una actividad vulcaniana intermitente se debe a la alta cristalinidad del magma, como en el estudio Wright et al. (2012)..
- En posteriores estudios de comparación morfológica en cenizas, se recomienda realizar el análisis en un solo tipo de componentes a la vez (ej. escorias, líticos negros, etc.); con el fin de no tener influencia de materiales poco resistentes a la abrasión (ej. material juvenil micro-vesiculado) los

cuales son fácilmente redondeados ocultando las características morfológicas iniciales del material.

- Finalmente es importante determinar la relación que existe entre las tasas de alimentación del magma (TAM) y los datos de sedimentación diaria de cenizas calculada por Bernard, 2014.

## REFERENCIAS CITADAS

- Alfano, F., Bonadonna, C., & Gurioli, L. (2012). Insights into eruption dynamics from textural analysis: the case of the May, 2008, Chaitén eruption. *Bulletin of Volcanology*, *74*, 2095-2108.
- Arellano, S., Hall, M., Samaniego, P., Le-Pennec, J., Ruiz, G., Molina, I., & Yepes, H. (2008). Degassing patterns of Tungurahua volcano, Ecuador, during the 1999–2006 eruptive period deduced from spectroscopic remote measurements of SO<sub>2</sub> emissions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research.*, *162*, 151-162.
- Aspden, J., & Litherland, M. (1992). The geology and Mesozoic collisional history of the Cordillera Real, Ecuador. *Tectonophysics*, *205*, 187–204.
- Barberi, F., Coltelli, M., Ferrara, G., Innocenti, F., Navarro, J., & Santacroce, R. (1988). Plio-Quaternary volcanism in Ecuador. *Geological Magazine*, *125*, 1-14.
- Barragán, R., Geist, D., Hall, M., Larson, P., & Kurz, M. (1998). Subduction controls on the compositions of lavas from the Ecuadorian Andes. *Earth Planet Science Letters*, *154*, 153-166.
- Bernard, B., & Andrade, D. (2011). Volcanes cuaternarios del Ecuador Continental. Quito: IG-EPN/IRD.
- Bernard, B., Bustillos, J., Bridget, W., & Hidalgo, S. (2013). Influence of the wind direction variability on the quantification of tephra fallouts: December 2012 and March 2013 Tungurahua eruptions. *Avances en Ciencias e Ingenierías*(5), A14-21.

- Bernard, B. (2013). Homemade ashmeter: a low-cost, high-efficiency solution to improve tephra field-data collection for contemporary explosive eruptions. *Journal of Applied Volcanology*, 2, 1-9.
- Bernard, B., Hidalgo, S., Robin, C., Beate, B., & Quijozaca, J. (2014). The 3640–3510 BC rhyodacite eruption of Chachimbiro compound volcano, Ecuador: a violent directed blast produced by a satellite dome. *Bulletin of Volcanology*, 76, 849.
- Bernard, B. (2014). Base de datos de la tasa de caída de ceniza diaria. IG-EPN.
- Blundy, J., Cashman, K., & Humphreys, M. (2006). Magma heating by decompression-driven crystallization beneath andesite volcanoes. *Nature*, 446, 76-80.
- Bryant, J. A., Yogodzinski, G. M., Hall, M. L., & Lewicki, J. L. (2006). Geochemical Constraints on the Origin of Volcanic Rocks from the Northern Andean Volcanic Zone, Ecuador. *Journal of Petrology*, 1-29.
- Burgisser, A., Poussineau, S., Arbaret, L., Druitt, T., Giachetti, T., & Bourdier, J. (2010). Pre-explosive conduit conditions of the 1997 vulcanian explosions at Soufriere Hills Volcano, Montserrat: I. Pressure and vesicularity distributions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 194, 27-41.
- Bustillos, J., Le Penneç, J., Samaniego, P., Eychenne, J., Troncoso, L., Gonza, T., & Valverde, V. (2013). Estudio de los depósitos de ceniza del volcán Tungurahua-2010: Transición de estilo eruptivo. *Revista Politécnica*, 33(2), 131-148.
- Carey, S., & Bursik, M. (2001). Volcanic plumes. En H. Sigurdsson, B. Houghton, S. McNutt, H. Rymer, & J. Stix, *Encyclopedia of Volcanoes* (págs. 527-544). Londres: Academic Press.
- Cas, R. (1983). Submarine 'crystal tuffs': their origin using a lower Devonian example from southeastern Australia. *Geological magazine*, 120, 471-486.

- Cas, R., & Wright, J. (1987). *Volcanic successions*. Londres: The Oxford University Press: 528 pp.
- Cashman, K., Sturtevant, B., Papale, P., & Navon, O. (2001). Magmatic Fragmentation. En H. Sigurdsson, B. Houghton, S. McNutt, H. Rymer, & J. Stix, *Encyclopedia of Volcanoes* (págs. 421-430). Londres: Academic Press.
- Cashman, K. (2004). Volatile controls on magma ascent and eruption. En R. S. Sparks, & C. J. Hawkesworth, *The states of the planet: Frontiers and Challenges in Geophysics* (Vol. 150, págs. 109-124). American Geophysical Union.
- Clarke, A., Stephens, S., Teasdale, R., Sparks, R., & Diller, K. (2007). Petrology constraints on the decompression history of magma prior to vulcanian explosions at the Souffiere Hills volcano, Monserrat. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 161, 261–274.
- Coltelli, M., Miraglia, L., & Scollo, S. (2008). Characterization of shape and terminal velocity of tephra particles erupted during the 2002 eruption of Etna volcano, Italy. *Bulletin of Volcanology*, 70, 1103-1112.
- Diller, K., Clarke, A., Voight, B., & Neri, A. (2006). Mechanisms of conduit plug formation: Implications for vulcanian explosions. *Geophysical Research Letters*, 33, doi:10.1029/2006GL027391.
- Druitt, T. (1998). Pyroclastic density currents. En J. Gilbert , & R. Sparks, *The physics of explosive volcanic eruptions* (Vol. Publicación especial N°145). Londres: Geological Society.
- Dufek, J., & Manga, M. (2008). In situ production of ash in pyroclastic flows. *Journal of Geophysical Research*, 113, doi: 10.1029/2007JB005555.
- Dufek, J., Manga, M., & Patel, A. (2012). Granular disruption during explosive volcanic eruptions. *Nature Geoscience*, 5, 561-564.

- El Universo. (4 de 11 de 2002). Erupción de volcán Reventador paraliza parte de Ecuador. Obtenido de <http://www.eluniverso.com/>
- Eshel, G., Levy, G., U., M., & J., S. M. (2004). Critical Evaluation of the Use of Laser Diffraction for Particle-Size Distribution Analysis. *Soil Science, Society of America Journal*, 68, 36–743.
- Eychenne, J., & Le Pennec, J.-L. (2012). Sigmoidal particle density distribution in a subplinian scoria fall deposit. *Bulletin of Volcanology*, 2243-2249.
- Eychenne, J., Le-Pennec, J.-L., Troncoso, L., Gouhier, M., & Nedelec, J.-M. (2012). Causes and consequences of bimodal grain-size distribution of tefra fall deposited during August 2006 Tungurahua eruption (Ecuador). *Bulletin of Volcanology*, 187-205.
- Eychenne, J., Le-Pennec, J.-L., Ramón, P., & Yepes, H. (2013). Dynamics of explosive paroxysms at open-vent andesitic systems: High-resolution mass distribution analyses of the 2006 Tungurahua fall deposit (Ecuador). *Earth and Planetary Science Letters*, 361, 343-355.
- Folk, R., & Ward, W. (1957). Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27, 3-26.
- Francis, P., & Oppenheimer, C. (1993). *Volcanoes* (Segunda ed.). Oxford: Oxford University Press: 521 pp .
- Gutscher, M., Malavieille, J., Lallemand, A., & Collot, J.-Y. (1999). Tectonic segmentation of the North Andean margin: impact of the Carnegie Ridge collision. *Earth and Planetary Science Letters* 168 , 255-270.
- Hall, M., & Wood, C. (1985). Volcano-tectonic segmentation of the northern andes. *Geology*, 13, 203-207.

- Hall, M. L., Robin, C., Beate, B., Mothes, P., & Monzier, M. (1999). Tungurahua Volcano, Ecuador: structure, eruptive history and hazards. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 91, 1-21.
- Hall, M., Ramón, P., Mothes, P., Le Pennec, J., García, A., Samaniego, P., & Yepes, H. (2004). Volcanic eruptions with little warning: the case of volcan Reventador's surprise november 3, 2002 eruption. *Revista Geológica de Chile*, 31, 349-358.
- Hall, M., Samaniego, P., Le Pennec, J., & Johnson, J. (2008). Ecuadorian Andes volcanism: A review of Late Pliocene to present activity. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176, 1-6.
- Hall, M., Steele, A., Mothes, P., & Ruiz, M. (2013). Pyroclastic density currents (PDC) of the 16-17 August 2006 eruptions of Tungurahua volcano, Ecuador: Geophysical registry and characteristics. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 265, 78-93.
- Heiken, G., & Wohletz, K. (1985). *Volcanic ash*. London, England: University of California Press: 246 pp.
- Hidalgo, S., Battaglia, J., Bernard, B., Steele, A., Arellano, S., & Galle, B. (Marzo de 2014). Identifying open and closed system behaviors at Tungurahua volcano (Ecuador) using SO<sub>2</sub> and seismo-acoustic measurements. IG-EPN/IRD.
- Hoffer, G. (2008). *Fusion partielle d'un manteau métasomaté par un liquide adakitique: Approches géochimique et expérimentale de la genèse et de l'évolution des magmas de l'arrière-arc équatorien. PhD thesis*. Clermont-Ferrand, Francia: Université Blaise Pascal.
- Houghton , B., Wilson , C., & Pyle, D. (2001). Pyroclastic fall deposits. En H. Sigurdsson, B. Houghton, S. McNutt, H. Rymer, & J. Stix, *Encyclopedia of Volcanoes* (págs. 555-570). Londres: Academic Press.

- Hughes, R., & Pilatasig, L. (2002). Cretaceous and Tertiary terrane accretion in the Cordillera Occidental of the Andes of Ecuador. *Tectonophysics*, 345, 29–48.
- Jaillard, E., Ordoñez, M., Suarez, J., Toro, J., Iza, D., & Lugo, W. (2004). Stratigraphy of the late Cretaceous–Paleogene deposits of the Cordillera Occidental of central Ecuador: geodynamic implications. *Journal of South American Earth Sciences*, 17, 49–58.
- Ji, S. (2004). A generalized mixture rule for estimating the viscosity of solid liquid suspensions and mechanical properties of polyphase rocks and composite materials. *Journal of Geophysical Research*, 109, doi:10.1029/2004JB003124
- Johnson, J. (2003). Generation and propagation of infrasonic airwaves from volcanic explosions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 121, 1-14.
- Le Pennec, J., Hidalgo, S., Samaniego, P., Ramón, P., Yepes, H., & Eissen, J.-P. (2003). Magnitud de la erupción del 3 de noviembre del 2002 del volcán El Reventador. *Memorias, Quintas Jornadas en Ciencias de la Tierra*, 97-99.
- Le-Pennec, J., Samaniego, P., Eissen, J., Hall, M., Molina, I., Robin, C., Mothes, P., Yepes, H., Ramón, P., Monzier, M., Egred, J. (2005). *Los peligros volcánicos asociados con el Tungurahua* (Segunda edición modificada y aumentada ed.). Quito: Corporación Editora Nacional.
- Le Pennec, J., Jaya, D., Samaniego, P., Ramón, P., Moreno, S., Egred, J., & van der Plicht, J. (2008). The AD 1300–1700 eruptive periods at Tungurahua volcano, Ecuador, revealed by historical narratives, stratigraphy and radiocarbon dating. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176, 70-81.
- Le Pennec, J., Ruiz, A. G., Eissen, J., Hall, M., & Fornari, M. (2011). Identifying potentially active volcanoes in the Andes: Radiometric evidence for late

- Pleistocene-early Holocene eruptions at Volcán Imbabura, Ecuador. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 206, 121-135.
- Le Pennec, J., Ruiz, G., Ramón, P., Palacios, E., Mothes, P., & Yepes, H. (2012). Impact of tephra falls on Andean communities: The influences of eruption size and weather conditions during the 1999–2001 activity of Tungurahua volcano, Ecuador. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, in press.
- Le Pennec, J., de Saulieu, G., Samaniego, P., Jaya, D., & Gailler, L. (2013). A Devastating Plinian Eruption at Tungurahua Volcano Reveals Formative Occupation at ~1100 cal BC in Central Ecuador. *Radiocarbon*, 55, 1199-1214.
- Litherland, M., Aspden, J., & Jemielita, R. (1994). *The metamorphic belts of Ecuador*. England: British Geological Survey.
- Mader, H. M. (1998). Conduit flow and fragmentation. En J. S. Gilbert, & R. S. Sparks (Edits.), *The physics of explosive volcanic eruptions* (Vol. Publicación especial N°145, págs. 51-71). Londres: Geological Society.
- Malvern Instruments Ltd. (23 de Abril de 2014). Obtenido de <http://www.malvern.com/en/products/product-range/morphologi-range/morphologi-g3/default.aspx>
- McPhie, J., Doyle, M., & Allen, R. (1993). *Volcanic Textures: A guide to the interpretation of textures in volcanic rocks*. Tasmania: CODES: 196 pp.
- Melnik, O., & Sparks, R. (1999). Nonlinear dynamics of lava dome extrusion. *Nature*, 402, 37-41.
- Miwa, T., & Toramaru, A. (2013). Conduit process in vulcanian eruptions at Sakurajima volcano, Japan: Inference from comparison of volcanic ash with pressure wave and seismic data. *Bulletin of Volcanology*, 75, 685-697.

- Moitra, P., Gonnermann, H. M., Houghton, B. F., & Giachetti, T. (2013). Relating vesicle shapes in piroclasts to eruption styles. *Bulletin of Volcanology*, 75, 691-705.
- Monzier, M., Robin, C., Samaniego, P., Hall, M., Cotten, J., Mothes, P., & Arnaud, N. (1999). Sangay volcano, Ecuador: structural development, present activity and petrology. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 90, 49–79.
- Morrissey, M., & Mastin, L. (2001). Vulcanian eruptions. En H. Sigurdsson , B. Houghton, S. McNutt, H. Rymer, & J. Stix, *Encyclopedia of Volcanoes* (págs. 463-475). Londres: Academic Press.
- NOAA Satellite and Information Service. (20 de Febrero de 2014). *Volcanic ash advisories archive*. Recuperado el 10 de Abril de 2014, de <http://www.ssd.noaa.gov/VAAC/ARCH13/archive.html>
- Parfitt, E., & Wilson, L. (2008). *Fundamentals of Physical Volcanology*. Blackwell publishing: 230 pp.
- Parra, R., Bernard, B., Narváez, D., Le Pennec, J.-L., & Folch, A. (s.f.). Calibration of the Fall-3D model for a vulcanian scenario at Tungurahua volcano: insights from high-resolution field data of the July 2013 eruption. in press.
- Robin, C., Samaniego, P., Le Pennec , J., Mothes, P., & van der Plicht, J. (2008). Late holocene phases of dome growth and plinian activity at Guagua Pichincha volcano (Ecuador). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 175, 7-15.
- Samaniego, P., Monzier, M., Eissen, J.-P., Bourdon, E., Robin, C., Hall, M. L., Mothes, P., Cotten, J. (2003). Caraterización geoquímica del arco volcánico ecuatoriano. *Quintas Jornadas en Ciencias de la Tierra. Memorias* (págs. 27-29). Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Samaniego, P., Eissen, J., Le Pennec, J. L., Robin, C., Hall, M., Mothes, P., Cotten, J. (2008). Pre-eruptive physical conditions of El Reventador volcano

- (Ecuador) inferred from the petrology of the 2002 and 2004-05 eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176, 82-93.
- Samaniego, P., Le Pennec, J.-L., Claude, R., & Hidalgo, S. (2011). Petrological analysis of the pre-eruptive magmatic process prior to the 2006. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 199, 69-84.
- Self, S., Wilson, L., & Nairn, I. (s.f.). Vulcanian eruption mechanisms. *Nature*, 277, 440-443.
- Shaw, H. (1972). Viscosities of magmatic silicate liquids: An empirical method of prediction. *American Journal of Science*, 272, 870–893.
- Sparks, R. (1978). Dynamics of bubble formation and growth in magmas -review and analysis. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 3, 1-37.
- Sparks, R. (1997). Causes and consequences of pressurisation in lava dome eruptions. *Earth and Planetary Science Letters*, 150, 177-189.
- Spikings, R., Seward, D., Winkler, W., & Ruiz, G. (2000). Low-temperature thermochronology of northern Cordillera Real, Ecuador: Tectonic insights from zircon and apatite fission track analysis. *Tectonics*, 19, 649-668.
- Steele, A. (20 de 5 de 2014). Base de datos. Energía de las explosiones-IG-EPN.
- Verhoogen, J. (1951). Mechanics of ash formation. *American Journal of Science*, 249, 729-739.
- Von Hillebrandt, C. (1989). *Estudio geovulcanológico del complejo volcánico Cuicocha-Cotacachi y sus aplicaciones, provincia de Imbabura*. Quito: EPN.
- White, J., & Houghton, B. (2006). Primary volcanoclastic rocks. *Geology*, 34, 677-680.

- Wilson, L. (1980). Relationships between pressure, volatile content and ejecta velocity in three types of volcanic explosions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 8, 297-313.
- Winter, J. D. (2010). *Principles of Igneous and Metamorphic petrology*. New York: Pearson Prentice Hall: 702 pp.
- Wohletz, K. H., & Sheridan, M. F. (1979). A model of pyroclastic surge. *Geological Society of America*, 180, 177-194.
- Wohletz, K. (26 de 11 de 2013). *SFT Software (Sequential Fragmentation/Transport)*. Obtenido de <http://www.ees.lanl.gov/geodynamics/Wohletz/SFT.htm#Download>
- Wright, H. M., Cashman, K. V., Rosi, M., & Cioni, R. (2007). Breadcrust bombs as indicators of vulcanian eruption dynamics at Guagua Pichincha volcano, Ecuador. *Bulletin of Volcanology*, 69, 281-300.
- Wright, H., Cashman, K., Mothes, P., Hall, M., Ruiz, A., & Le Pennec, J. (2012). Estimating rates of decompression from textures of erupted ash particles produced by 1999–2006 eruptions of Tungurahua volcano, Ecuador. *The Geological Society of America*, 619-622.

## **ABREVIATURAS Y SIGLAS UTILIZADAS**

msnc        Metros sobre el nivel del cráter.

mbnc        Metros bajo el nivel del cráter.

msnm        Metros sobre el nivel del mar.

snc         Sobre el nivel del cráter.

VT         Sismo volcano-tectónico.

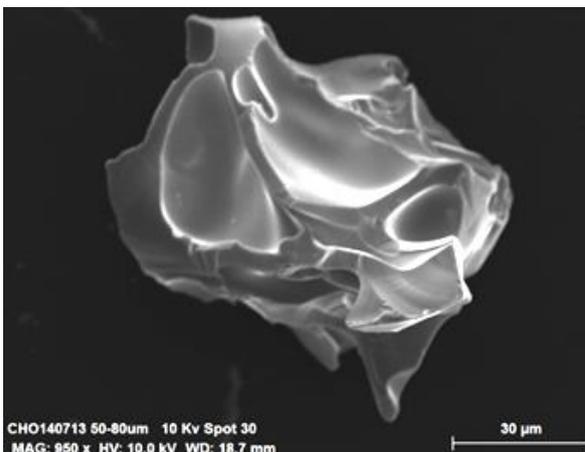
LP         Sismo de largo periodo.

IAS         Índice de actividad sísmica

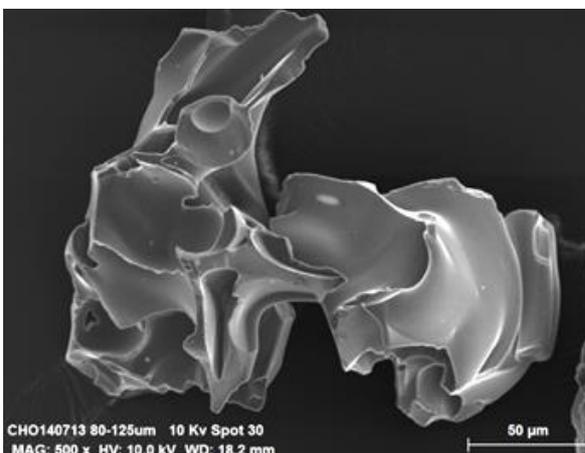
OVT        Observatorio del volcán Tungurahua

TL         Tiempo local

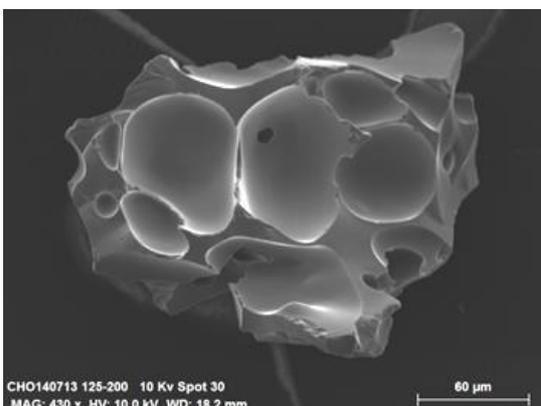
## ANEXOS



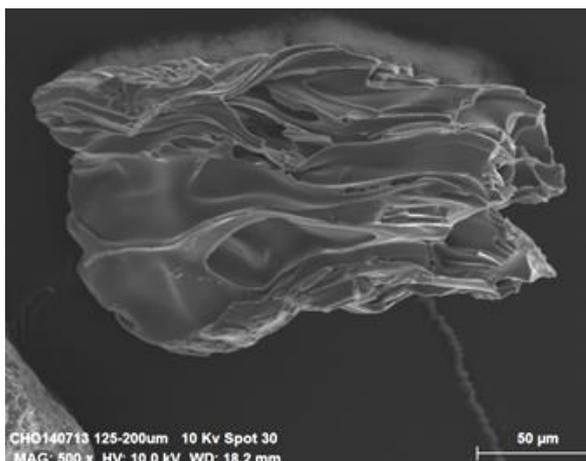
*Anexo 1 Muestra 14J13. Partícula de ceniza vesiculada poco angular. Vesículas ovoides y paredes delgadas de vesículas. Múltiple vesiculación evidenciado por paredes de vesículas deformadas (deformación plástica y crecimiento de vesículas en diferente momento). Esta partícula presenta bordes con fractura concoidea resultado de abrasión.*



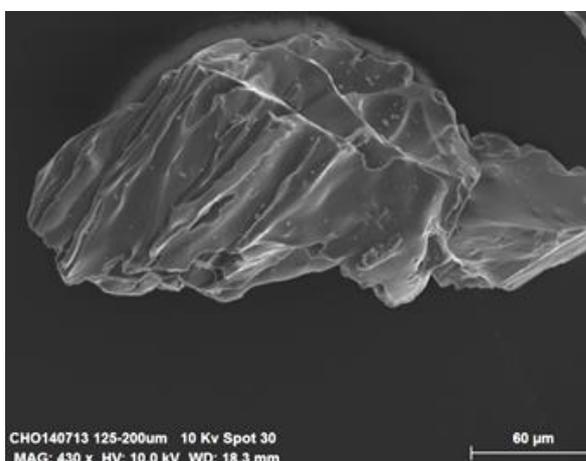
*Anexo 2 Muestra 14J13. Partícula de ceniza vesiculado subangular con paredes entre vesículas muy finas a muy gruesas. Multi- vesiculación evidenciado por vesículas deformadas (deformación plástica y crecimiento de vesículas en diferente momento). Esta partícula presenta bordes con fractura concoidea resultado de abrasión.*



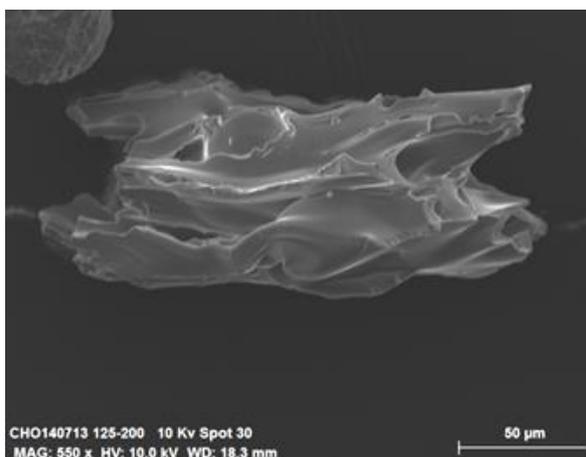
*Anexo 3 Muestra 14J13. Ceniza subangular muy vesiculada. Paredes entre vesículas delgadas. Múltiple vesiculación evidenciado por paredes de vesículas deformadas (deformación plástica y crecimiento de vesículas en diferente momento). Esta partícula presenta bordes con fractura concoidea resultado de abrasión.*



*Anexo 4 Muestra 14J13. Ceniza altamente vesiculada. Vesículas alargadas bien desarrolladas. Paredes delgadas entre vesículas.*



*Anexo 5 Muestra 14J13. Partícula de ceniza subangular. Vesículas exteriores muy alargadas con paredes delgadas de vesículas.*



*Anexo 6 Muestra 14J13. Fragmento juvenil muy vesiculado. Las vesículas son alargadas y las superficies fluidas. Las paredes entre vesículas son delgadas.*

*Anexo 7 Tabla de datos de elementos mayores y en trazas de muestras de productos de caída emitidos por el volcán Tungurahua desde Enero 2010-Julio 2013*

Muestra	Man-Feb-10	Man-Jul-10	BB-36A	BB-36B	Di-10	Man-May-11	Man-Di-11	Yui-May-12	CH-Ag-12	Run-Di-12	MAS-Di-12	Map-Mar-13	CH-May-13	ACH-Jul-13
Fase eruptiva relacionada	Enero-Marzo 2010	Mayo-Agosto 2010	Noviembre-Diciembre 2010	Noviembre-Diciembre 2010	Noviembre-Diciembre 2010	Abril-Mayo 2011	Noviembre-Diciembre 2011	Diciembre 2011-Julio 2012	ago-12	dic-12	dic-12	mar-13	Abril-Mayo 2013	Julio-Agosto 2013
Fecha de recolección	24/02/2010	08/07/2010	22/11/2010	22/11/2010	12/12/2010	03/05/2011	08/12/2011	31/05/2012	10/08/2012	16/12/2012	22/12/2012	13/03/2013	13/05/2013	14/07/2013
Lugar de recolección	Manzano	Manzano	Flujo piroclastico (Q. Palmaurco)	Flujo piroclastico (Q. Palmaurco)		Manzano	Manzano	Yuibug	Choglontus	Runtún	Masón	Mapayacu	Choglontus	Flujo piroclastico (Q. Achupashal)
Naturaleza	Cenizas	Cenizas	Roca densa (tapón)	Bomba	Cenizas	Cenizas	Cenizas	Cenizas	Cenizas	Cenizas	Cenizas	Cenizas	Cenizas	Roca densa (tapón)
Volcán	Tungurahua	Tungurahua	Tungurahua	Tungurahua	Tungurahua	Tungurahua	Tungurahua	Tungurahua	Tungurahua	Tungurahua	Tungurahua	Tungurahua	Tungurahua	Tungurahua
SiO <sub>2</sub> (wt%)	58,63	58,14	58,04	58,76	59,03	58,91	58,16	58,58	59,44	59,3	57,97	59,36	58,99	58,37
TiO <sub>2</sub> (wt%)	0,84	0,88	0,81	0,86	0,86	0,85	0,8	0,84	0,86	0,85	0,83	0,88	0,83	0,8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (wt%)	16,32	15,87	16,99	16,79	16,4	16,37	16,33	16,04	15,87	16,82	15,95	15,95	16,31	16,85
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> * (wt%)	7,49	7,51	7,36	7,3	7,2	7,25	7,07	7,18	7,48	7,18	7,58	7,41	7,07	6,99
MnO (wt%)	0,12	0,12	0,11	0,11	0,11	0,12	0,11	0,12	0,12	0,11	0,12	0,12	0,11	0,11
MgO (wt%)	4,65	4,55	4,23	4,02	4,18	4,36	4,47	4,31	4,54	4,01	4,87	4,25	4,16	4
CaO (wt%)	6,48	6,1	7,16	6,68	6,26	6,25	6,55	6,2	6,12	6,64	6,44	5,96	6,17	6,93
Na <sub>2</sub> O (wt%)	3,82	3,77	3,9	3,98	3,9	3,9	3,87	3,87	3,84	3,9	3,74	3,84	3,89	3,91
K <sub>2</sub> O (wt%)	1,73	1,81	1,64	1,8	1,86	1,81	1,77	1,88	1,87	1,85	1,74	1,89	1,81	1,72
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (wt%)	0,24	0,24	0,22	0,23	0,24	0,23	0,22	0,24	0,24	0,24	0,22	0,24	0,23	0,21
LOI (wt%)	-0,12	-0,12	-0,22	-0,08	-0,08	-0,14	-0,01	-0,07	0,13	-0,1	-0,04	-0,05	-0,08	-0,12
Total	100,2	98,87	100,24	100,44	99,95	99,91	99,34	99,2	100,53	100,8	99,41	99,84	99,49	99,76
Sc (ppm)	17,3	17,1	16,9	15,8	16,3	16,8	17,1	16,6	17,2	16,1	18	16,4	15,7	16,5
V (ppm)	172,5	171,9	172,5	172,4	166,6	162,2	155,3	158,6	163,5	168,2	170,3	173,5	160,9	165,8
Cr (ppm)	94,3	82,4	97,6	86,3	73,1	75,1	87,2	77	83	95,5	103,1	75,8	76	101,7
Co (ppm)	24,2	23,7	22,6	21,1	22,2	23,1	23,1	22,5	23,1	21,5	25	22,7	22	21,5

Ni (ppm)	51,5	46,9	48,2	43,3	42,8	43,9	44,4	42,6	47,9	43,3	52,3	42,7	42,1	44,3
Rb (ppm)	49,6	52,6	46,1	52,8	52,1	51,1	50,5	53,7	54,9	55,2	50,1	55,2	52,2	49,7
Sr (ppm)	577,2	551,5	615,8	596,6	570,9	561,9	580,4	548,6	543,1	578,4	550,1	529,8	558,4	596,6
Y (ppm)	16	16,3	14,8	15,2	15,5	15,4	14,7	15,6	15,9	15,7	15	15,3	14,5	14,2
Zr (ppm)	141,4	144,6	130,8	141,9	152,3	146,5	142,3	153,6	154	146,5	140	153	146,4	134,1
Nb (ppm)	6	5,6	4,8	6,5	5,9	6	5,3	6,6	6	6	5,2	5,5	5,3	5,3
Ba (ppm)	778,5	777,6	759	817,2	822,9	798,7	783,2	817,2	815	830,7	774,7	826,5	806,9	760,4
La (ppm)	18,5	19,4	17,8	18,9	19	19	18,6	19,5	19,4	19,4	17,8	20,2	18,7	17,9
Ce (ppm)	37,3	40,8	37,3	40,4	38,6	39,7	34,9	39,2	39,9	39,2	35,8	41,9	37,1	33,3
Nd (ppm)	20,2	20,9	19,2	20,1	20,8	20,3	20	21	21	21,2	19,4	21	20,2	19,2
Sm (ppm)	4,1	4,3	3,5	4	3,6	4,1	3,8	3	4,2	4,3	4	4,4	3,3	4,1
Eu (ppm)	1,1	1,1	1,1	1	1,2	1,2	1	1	1,1	1,1	1,2	1	1	1,1
Gd (ppm)	3,9	4	3,3	3,8	3,7	3,3	3,1	3,8	3,6	3,7	3,4	3,7	3,6	3,4
Dy (ppm)	3	3,1	2,8	2,8	2,9	2,9	2,8	2,9	3	2,9	2,8	2,9	2,7	2,7
Er (ppm)	1,6	1,6	1,4	1,5	1,7	1,5	1,5	1,6	1,5	1,4	1,3	1,6	1,2	1,5
Yb (ppm)	1,5	1,5	1,3	1,4	1,4	1,4	1,3	1,4	1,4	1,5	1,4	1,5	1,3	1,2
Th (ppm)	5,8	6,3	5,6	6,1	6,3	6	5,9	6,6	6,4	6,3	5,7	7,1	6,5	5,9

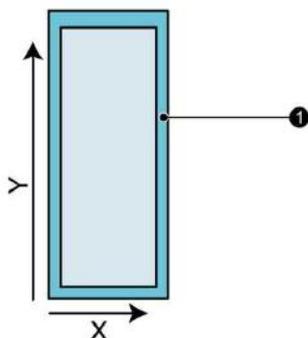
*Anexo 8 Descripción de los parámetros descriptivos de la morfología y geometría de partículas, calculados por el instrumento Morphology G3-Malvern. Documento de Malvern.*

This technical note provides definitions of the Morphological Parameters used in the Morphology Software. The parameters are:

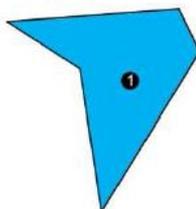
- **Id** – as objects are detected during the scan they are assigned this as a unique identifier. It represents the order in which they were found. Each frame is scanned vertically and successive frames are acquired in the Y direction then in the X direction.

$Id = 1..N$  where  $N =$  total particles found.

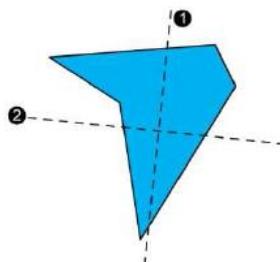
- **Centre X or Y position** – the position of the object's centre of mass relative to the nominal front left side of the slide. This is slightly different from the physical border of the slide due to the extra clearance ① built into the scanning software. Distances are reported in  $\mu\text{m}$ .



- **Area (pixels), Area (microns)** – the area is the visual projected area ① of the particle. This is reported in both pixels and in microns ( $\mu\text{m}$ ).

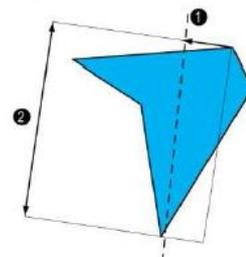


- **Major Axis ( $^\circ$ )** – the graphic below shows the Major Axis ① and the minor axis ②. The parameter is the angle of the Major Axis from a horizontal line. The Major Axis, also termed the *orientation*, and minor axis are reported in degrees and can take values between  $0^\circ$  and  $180^\circ$ . In the example below the Major Axis =  $95^\circ$ .

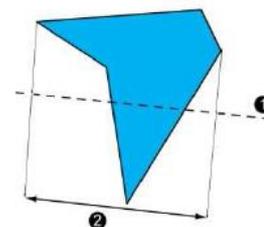


The Major Axis passes through the centre of mass of the object at an orientation corresponding to the minimum rotational energy of the shape. The minor axis passes through the centre of mass at right angles to the Major Axis.

- **Length** – all possible lines between two points on the perimeter are projected onto the Major Axis ① of the particle as shown below. The longest of these projections is the length ② of the particle:



- **Width** – all possible lines between two points on the perimeter are projected onto the minor axis ① of the particle as shown below. The longest of these projections is the Width ②:



- **Aspect Ratio** – this is the ratio of the Width to the Length of the particle (Width and Length are defined above). It is calculated as:

$$\text{Aspect Ratio} = \frac{\text{Width}}{\text{Length}}$$

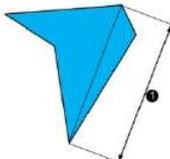
Aspect Ratio values are in the range 0 to 1. A rod, for example, would typically have a low Aspect Ratio.

- **Elongation** – this is 1-Aspect Ratio. It is calculated as:

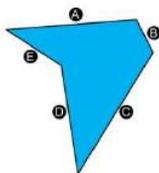
$$\text{Elongation} = 1 - \frac{\text{Width}}{\text{Length}}$$

Elongation values range from 0 to 1. A rod, for example, has a high Elongation.

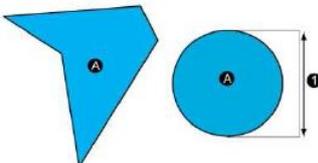
- **Max. Distance** – this is the furthest distance ① between any two points of the particle. Max. Distance, which is also known as the *maximal Feret diameter* or *caliper length*, is reported in  $\mu\text{m}$ .



- **Perimeter** – the total length of the object boundary in  $\mu\text{m}$ , calculated by summing the length of the boundary pixels. This includes an adjustment to take account of direction changes. The perimeter below is ① + ② + ③ + ④ + ⑤:



- **CE Diameter** – the diameter ① of a circle with the same area ② as the projected area of the particle image, shown below:



Here Particle area ① = Circle area ②. CE Diameter is reported in  $\mu\text{m}$ .

- **Circularity** – the ratio of the circumference of a circle equal to the object's projected area to the perimeter of the object. This is calculated as:

$$\text{Circularity} = \frac{2 \times \sqrt{\pi \times \text{Area}}}{\text{Perimeter}}$$

As described earlier in this chapter, a perfect circle has Circularity of 1.0, while a very narrow elongated object has a Circularity close to 0.

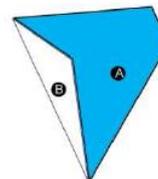
- **HS (High Sensitivity) Circularity** – the ratio of the object's projected area to the square of the perimeter of the object. This is calculated as:

$$\text{HS Circularity} = \frac{4 \times \pi \times \text{Area}}{\text{Perimeter}^2}$$

This is equivalent to squaring the numerator and denominator of the Circularity calculation to obtain a more sensitive measure when comparing particles of similar circularity. It is sometimes termed *compactness*.

A perfect circle has an HS Circularity of 1.0 while a narrow rod has an HS Circularity close to 0.

- **Convexity** – the perimeter of the convex hull of the object divided by its perimeter. The convex hull can be seen as the border created by an imaginary rubber band wrapped around the object. In the diagram below ① is the added "convexity area" of the particle ② surrounded by the convex hull:



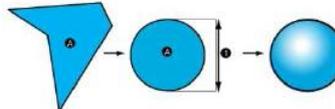
$$\text{Convexity} = \frac{\text{Perimeter of } A+B}{\text{Perimeter of } A}$$

The Convexity values are in the range 0 (least convex) to 1 (most convex). The Convexity is a measure of how "spiky" a particle is.

- **Solidity** – the object area divided by the area enclosed by the convex hull (see above).

$$\text{Solidity} = \frac{A}{A+B}$$

- **SE Volume** – the Spherical Equivalent (SE) Volume. This is the volume of a sphere with the same CE Diameter (see above) as the object:



The SE volume, measured in  $\mu\text{m}^3$ , is calculated as:

$$\text{Volume} = \frac{\pi \times \text{CEDiameter}^3}{6}$$

Anexo 9 Promedio, desviación estándar y moda de la elongación, HS circularidad, rectangularidad y solidity para diferentes fracciones de tamaños de partículas de ceniza. Se presenta número de partículas analizadas para cada fracción. Datos obtenidos a partir del instrumento Morphology G3

<b>140713</b>					
<b>Tamaño de grano</b>		<b>Promedio</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>Moda</b>	<b>Número de partículas de ceniza analizadas</b>
<b>Elongación</b>					
	<0	0.289	0.059	-	4
<1000um	>0	0.290	0.128		33
<500um	>1	0.323	0.137	0.092	179
<250um	>2	0.299	0.138	0.210	855
<125um	>3	0.279	0.152	0.137	373
<63um	>4	0.380	0.157	0.264	607
<32um	>5	0.292	0.130	0.307	2303
<15um	>6	0.078	0.038	0.065	26
<b>HS CIRCULARITY</b>					
	<0	0.526	0.073	-	4
<1000um	>0	0.659	0.092	0.66	33
<500um	>1	0.665	0.116	0.64	179
<250um	>2	0.703	0.108	0.80	855
<125um	>3	0.747	0.112	0.79	373
<63um	>4	0.754	0.124	0.82	607
<32um	>5	0.871	0.074	0.938	2303
<15um	>6	0.961	0.018	0.941	26
<b>Rectangularidad</b>					
	<0	1.05	0.06	1.08	4
<1000um	>0	0.904	0.048	0.850	33
<500um	>1	0.87	0.06	0.85	179
<250um	>2	0.842	0.048	0.82	855
<125um	>3	0.823	0.040	0.83	373
<63um	>4	0.801	0.037	0.79	607
<32um	>5	0.765	0.023	0.76	2303
<15um	>6	0.748	0.017	0.74	26
<b>Solidity</b>					
	<0	0.95	0.02	-	4
<1000um	>0	0.938	0.044	0.96	33
<500um	>1	0.909	0.050	0.942	179
<250um	>2	0.916	0.050	0.947	855
<125um	>3	0.935	0.046	0.962	373
<63um	>4	0.955	0.053	0.994	607
<32um	>5	0.991	0.018	1	2303
<15um	>6	0.999	0.002	1	26

<b>200713</b>					
<b>Tamaño de grano</b>		<b>Promedio</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>Moda</b>	<b>Número de partículas de ceniza analizadas</b>
<b>Elongación</b>					
<1000um	>0	0.319	0.133	0.303	28
<500um	>1	0.237	0.119	0.155	179
<250um	>2	0.305	0.174	0.224	114
<125um	>3	0.343	0.153	0.318	864
<63um	>4	0.340	0.152	0.32	6807
<32um	>5	0.337	0.146	0.399	35521
<15um	>6	0.288	0.133	0.302	82739
	>7	0.07	0.042	0.114	405
<b>HS CIRCULARITY</b>					
<1000um	>0	0.334	0.063	0.38	28
<500um	>1	0.443	0.08	0.39	179
<250um	>2	0.579	0.155	0.6	114
<125um	>3	0.692	0.143	0.8	864
<63um	>4	0.860	0.092	0.932	6807
<32um	>5	0.788	0.115	0.861	35521
<15um	>6	0.842	0.088	0.892	82739
	>7	0.936	0.037	0.953	405
<b>Rectangularidad</b>					
<1000um	>0	1.284	0.127	1.22	28
<500um	>1	1.119	0.099	1.12	179
<250um	>2	0.952	0.101	0.92	114
<125um	>3	0.858	0.077	0.83	864
<63um	>4	0.827	0.074	0.8	6807
<32um	>5	0.798	0.046	0.78	35521
<15um	>6	0.769	0.029	0.76	82739
	>7	0.761	0.023	0.75	405
<b>Solidity</b>					
<1000um	>0	0.947	0.022	0.927	28
<500um	>1	0.955	0.025	0.96	179
<250um	>2	0.911	0.116	0.976	114
<125um	>3	0.930	0.08	0.976	864
<63um	>4	0.962	0.05	0.986	6807
<32um	>5	0.962	0.048	0.992	35521
<15um	>6	0.980	0.028	1	82739
	>7	0.995	0.01	1	405

<b>240713</b>					
<b>Tamaño de grano</b>		<b>Promedio</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>Moda</b>	<b>Número de partículas de ceniza analizadas</b>
<b>Elongación</b>					
<1000um	>0	0.277	0.109		3
<500um	>1	0.262	0.122	0.091	253
<250um	>2	0.280	0.139	0.301	912
<125um	>3	0.327	0.149	0.261	5788
<63um	>4	0.333	0.147	0.385	41605
<32um	>5	0.278	0.132	0.312	112356
<15um	>6	0.072	0.043	0.036	652
<b>HS CIRCULARITY</b>					
<1000um	>0	0.753	0.041	0.73	3
<500um	>1	0.737	0.072	0.74	253
<250um	>2	0.747	0.092	0.79	912
<125um	>3	0.724	0.109	0.814	5788
<63um	>4	0.748	0.114	0.863	41605
<32um	>5	0.820	0.099	0.882	112356
<15um	>6	0.928	0.038	0.948	652
<b>Rectangularidad</b>					
<1000um	>0	0.848	0.035		3
<500um	>1	0.845	0.033	0.84	253
<250um	>2	0.831	0.034	0.82	912
<125um	>3	0.824	0.038	0.81	5788
<63um	>4	0.804	0.037	0.75	41605
<32um	>5	0.773	0.032	0.75	112356
<15um	>6	0.762	0.023	0.76	652
<b>Solidity</b>					
<1000um	>0	0.955	0.006		3
<500um	>1	0.941	0.03	0.943	253
<250um	>2	0.938	0.034	0.965	912
<125um	>3	0.932	0.044	0.965	5788
<63um	>4	0.944	0.047	0.979	41605
<32um	>5	0.970	0.037	1	112356
<15um	>6	0.993	0.01	1	652

<b>010313</b>					
<b>Tamaño de grano</b>		<b>Promedio</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>Moda</b>	<b>Número de partículas de ceniza analizadas</b>
<b>Elongación</b>					
<1000um	>0	0.304	0.107	0.26	7
<500um	>1	0.310	0.132	0.286	171
<250um	>2	0.295	0.136	0.231	2491
<125um	>3	0.259	0.122	0.248	9922
<63um	>4	0.222	0.124	0.166	2889
<32um	>5	0.287	0.141	0.155	444
<15um	>6	0.048	0.013	0.036	6
<b>HS CIRCULARITY</b>					
<1000um	>0	0.688	0.073	0.66/0.77	7
<500um	>1	0.758	0.079	0.76	171
<250um	>2	0.777	0.079	0.805	2491
<125um	>3	0.817	0.066	0.845	9922
<63um	>4	0.853	0.069	0.899	2889
<32um	>5	0.837	0.097	0.886	444
<15um	>6	0.939	0.045	0.948	6
<b>Rectangularidad</b>					
<1000um	>0	0.904	0.046	0.93	7
<500um	>1	0.827	0.033	0.820	171
<250um	>2	0.819	0.031	0.8	2491
<125um	>3	0.803	0.028	0.8	9922
<63um	>4	0.792	0.026	0.79	2889
<32um	>5	0.768	0.03	0.76	444
<15um	>6	0.748	0.008	0.74	6
<b>Solidity</b>					
<1000um	>0	0.951	0.029	0.95	7
<500um	>1	0.947	0.028	0.976	171
<250um	>2	0.949	0.029	0.963	2491
<125um	>3	0.962	0.022	0.978	9922
<63um	>4	0.974	0.02	0.979	2889
<32um	>5	0.979	0.028	1	444
<15um	>6	0.996	0.005	1	6

<b>080313</b>					
<b>Tamaño de grano</b>		<b>Promedio</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>Moda</b>	<b>Número de partículas de ceniza analizadas</b>
<b>Elongación</b>					
<1000um	>0	0.379	0.125	-	4
<500um	>1	0.253	0.132	0.227	59
<250um	>2	0.288	0.135	0.286	166
<125um	>3	0.322	0.138	0.356	1717
<63um	>4	0.325	0.143	0.262	11525
<32um	>5	0.272	0.130	0.226	46562
<15um	>6	0.07	0.04	0.036	400
<b>HS CIRCULARITY</b>					
<1000um	>0	0.660	0.089	-	4
<500um	>1	0.753	0.077	0.723	59
<250um	>2	0.751	0.106	0.806	166
<125um	>3	0.739	0.121	0.797	1717
<63um	>4	0.778	0.116	0.839	11525
<32um	>5	0.849	0.091	0.893	46562
<15um	>6	0.94	0.03	0.938	400
<b>Rectangularidad</b>					
<1000um	>0	0.871	0.046	-	4
<500um	>1	0.837	0.035	0.85	59
<250um	>2	0.830	0.041	0.81	166
<125um	>3	0.822	0.048	0.79	1717
<63um	>4	0.799	0.04	0.78	11525
<32um	>5	0.767	0.03	0.76	46562
<15um	>6	0.76	0.02	0.75	400
<b>Solidity</b>					
<1000um	>0	0.919	0.05		4
<500um	>1	0.945	0.033	0.965	59
<250um	>2	0.938	0.046	0.975	166
<125um	>3	0.936	0.053	0.973	1717
<63um	>4	0.956	0.046	0.987	11525
<32um	>5	0.98	0.031	1	46562
<15um	>6	1	0.01	1	400

<b>140313G</b>					
<b>Tamaño de grano</b>		<b>Promedio</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>Moda</b>	<b>Número de partículas de ceniza analizadas</b>
<b>Elongación</b>					
	<0	0.536	-	0.536	1
<1000um	>0	0.307	0.128	0.468	46
<500um	>1	0.267	0.122	0.118	242
<250um	>2	0.306	0.151	0.259	483
<125um	>3	0.352	0.154	0.298	3650
<63um	>4	0.342	0.156	0.331	21609
<32um	>5	0.288	0.137	0.266	48562
<15um	>6	0.065	0.041	0	270
<b>HS CIRCULARITY</b>					
	<0	0.564	-	0.564	1
<1000um	>0	0.694	0.054	0.69	46
<500um	>1	0.742	0.072	0.78	242
<250um	>2	0.743	0.102	0.84	483
<125um	>3	0.729	0.116	0.822	3650
<63um	>4	0.760	0.116	0.833	21609
<32um	>5	0.820	0.098	0.86	48562
<15um	>6	0.925	0.041	0.958	270
<b>Rectangularidad</b>					
	<0	0.88	-	0.88	1
<1000um	>0	0.870	0.027	0.89	46
<500um	>1	0.847	0.034	0.86	242
<250um	>2	0.828	0.036	0.83	483
<125um	>3	0.819	0.038	0.8	3650
<63um	>4	0.8	0.035	0.79	21609
<32um	>5	0.772	0.031	0.75	48562
<15um	>6	0.76	0.023	0.76	270
<b>Solidity</b>					
	<0	0.929	-	0.929	1
<1000um	>0	0.949	0.023	0.962	46
<500um	>1	0.947	0.028	0.97	242
<250um	>2	0.938	0.041	0.961	483
<125um	>3	0.938	0.049	0.974	3650
<63um	>4	0.953	0.045	0.981	21609
<32um	>5	0.973	0.035	1	48562
<15um	>6	0.992	0.012	1	270

<b>170313</b>					
<b>Tamaño de grano</b>		<b>Promedio</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>Moda</b>	<b>Número de partículas de ceniza analizadas</b>
<b>Elongación</b>					
<1000um	>0	0.284	0.088	0.288	37
<500um	>1	0.333	0.201	0.297	111
<250um	>2	0.351	0.188	0.278	904
<125um	>3	0.349	0.162	0.319	6829
<63um	>4	0.326	0.152	0.234	27422
<32um	>5	0.280	0.134	0.238	45978
<15um	>6	0.071	0.041	0.068	249
<b>HS CIRCULARITY</b>					
<1000um	>0	0.711	0.069	0.63	37
<500um	>1	0.667	0.176	0.74	111
<250um	>2	0.643	0.186	0.675	904
<125um	>3	0.672	0.162	0.815	6829
<63um	>4	0.754	0.132	0.826	27422
<32um	>5	0.833	0.097	0.884	45978
<15um	>6	0.933	0.037	0.961	249
<b>Rectangularidad</b>					
<1000um	>0	0.883	0.047	0.85	37
<500um	>1	0.867	0.067	0.83	111
<250um	>2	0.870	0.083	0.81	904
<125um	>3	0.847	0.077	0.8	6829
<63um	>4	0.806	0.054	0.79	27422
<32um	>5	0.772	0.037	0.76	45978
<15um	>6	0.759	0.021	0.75	249
<b>Solidity</b>					
<1000um	>0	0.957	0.022	0.931	37
<500um	>1	0.907	0.095	0.958	111
<250um	>2	0.893	0.096	0.951	904
<125um	>3	0.906	0.084	0.958	6829
<63um	>4	0.946	0.06	0.977	27422
<32um	>5	0.977	0.035	1	45978
<15um	>6	0.994	0.01	1	249

*Anexo 10 Resumen de este trabajo presentado para el encuentro Cities on Volcanoes 8, llevado a cabo del 9-13 de septiembre 2014 en Yogyakarta, Indonesia. Este trabajo fue aceptado para una presentación oral en dicho encuentro.*



**Cities on Volcanoes 8**  
 Living in Harmony with Volcano  
 Bridging the will of nature to society

category : Oral / Poster

**Eruptive dynamics based on ash sequence  
 analysis: the example of March and July  
 2013 eruptive phases at Tungurahua  
 volcano, Ecuador.**

**Diego Narvaez<sup>1</sup>, Benjamin Bernard<sup>1</sup>, Silvana Hidalgo<sup>1</sup>,  
 Sébastien Leibrandt<sup>2</sup>, Jean-Luc Le Pennec<sup>2</sup>, Julia  
 Eychenne<sup>3</sup>, Guilhem Douillet<sup>4</sup>**

**<sup>1</sup>Instituto Geofísico, Escuela Politécnica Nacional de  
 Quito. , <sup>2</sup> Clermont Université, Université Blaise Pascal,  
 Laboratoire Magmas et Volcans, <sup>3</sup>School of Earth  
 Sciences, University of Bristol, <sup>4</sup>Environmental  
 Sciences, Earth and Ludwig-Maximilians-Universitaet.**

**E-mail : [dnarvaez@igepn.edu.ec](mailto:dnarvaez@igepn.edu.ec)**

Ash fallout has been the most common phenomenon at Tungurahua volcano since its reawakening in 1999. The characterization of the ash is critical to understand the eruptive dynamics. We studied in detail the componentry, grain size, and morphology of 7 samples from the ash sequences belonging to the eruptive phases of March and July 2013. We chose these two phases because they display a different eruptive onset and evolution. The former initiated by discrete mild energy explosions leading progressively to an almost continuous activity with permanent ash emission. The latter started with a violent high energy explosion producing a 9 km high eruptive column and several pyroclastic flows. Our results show that despite the different energy of both eruptive onsets, the corresponding ash samples are characterized by a large amount of oxidized rocks, free crystals and

dense lithics associated to the vent cleaning and opening process. Most samples have unimodal grain size distributions except the one from July 14 that displays a secondary mode due to the elutriation of fine ash from the pyroclastic flows. The samples dominated by angular particles are associated to strong explosive activity. In both sequences, the percentage of juvenile material (pumice and scoria) increases with time after the onset, correlated with the evolution from discrete explosions to a more open-vent system, with almost continuous ash and gas emission. A positive correlation between the roundness, the pumice content and the amount of fine grained ash ( $> 4\phi$ ) is observed in July, probably linked to the low resistance of pumice to abrasion. Based on these results, the fine ash at Tungurahua is related to the elutriation of pyroclastic flows or the high abrasion of pumices. This fine ash has a greater impact on human and animal health and agriculture, representing a serious danger to the local settlements.

**Keywords :** Tungurahua, ash, eruptive dynamics