

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA EN GEOLOGÍA Y PETRÓLEOS

**LABORATORIO MIXTO INTERNACIONAL SISMOS Y VOLCANES EN
LOS ANDES DEL NORTE**

**CARACTERIZACIÓN DE LOS DINAMISMOS ERUPTIVOS DEL
PERIODO ERUPTIVO DE ENERO A MARZO DE 2010 DEL VOLCÁN
TUNGURAHUA CON BASE EN EL ESTUDIO GEOQUÍMICO DE LOS
DEPÓSITOS DE CENIZA Y SU RELACIÓN CON PARÁMETROS
GEOFÍSICOS, GRANULOMÉTRICOS Y DE COMPONENTES**

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

RAMOS CHÉRREZ EMILY GISSELE

emy_g98@hotmail.com

DIRECTOR: HIDALGO TRUJILLO SILVANA IVONNE, PhD

shidalgo@igepn.edu.ec

DMQ, agosto 2022

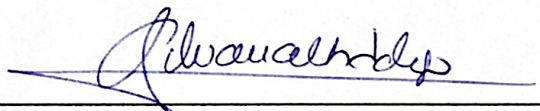
CERTIFICACIONES

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



EMILY GISSELE RAMOS CHÉRREZ

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Emily Gissele Ramos Chérrez, bajo mi supervisión.



PH.D. HIDALGO TRUJILLO SILVANA IVONNE
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

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

EMILY GISSELE RAMOS CHÉRREZ

PH. D. HIDALGO TRUJILLO SILVANA IVONNE

AGRADECIMIENTO

A mis padres Carmen y Fernando y mi abuelita Teresa, por construir con amor y sabiduría la persona que ahora soy y apoyar mis metas y sueños por más locos que a veces parezcan. Sin duda este logro más que pertenecerme a mí, es de ustedes.

A mi hermana Diana, mi más grande cómplice. Gracias por corregir y guiar con amor mis pasos, por siempre ser mi mediadora en medio del conflicto y por formar parte de los momentos más importantes y difíciles de mi vida.

A Fernanda y Yadira, mis niñas, las mejores amigas y compañeras de aventuras que la vida pudo brindarme, gracias por su amistad pura e incondicional. Se bien que sin su cariño, consejos y apoyo todo este trayecto hubiera sido mil veces más difícil. Ojalá la vida me siga otorgando la dicha de contar con ustedes y verlas crecer por muchísimos años más a pesar del trayecto que decidan tomar. Merecen comerse el mundo entero.

A mis niños, especialmente a Patricio, por la increíble familia que he podido encontrar en ustedes y de quienes he aprendido que cualquier problema es menor entre risas y anécdotas que hagan doler el estómago y que alegren el corazón. No saben cuánto animan mi vida con todo su amor y ocurrencias y lo bonito que es verlos crecer.

A Sebastián, gran amigo que por casualidad y fortuna se cruzó en mi vida. Gracias por brindarme una mano para continuar las innumerables veces que creí rendirme, por aguantar mi estrés, mis quejas y mi humor y más que nada por siempre ofrecer y llenar de tanto apoyo mi vida. Se bien que el destino tiene preparado cosas extraordinarias para ti.

A mis amigos de carrera con quienes tuve la oportunidad de convivir 5 años en donde los incidentes de las salidas de campo, la preocupación de no entender algo, la amistad y el deseo de dejar una huella nos unieron. Gracias por todo el conocimiento y compañerismo que logramos entre nosotros y que nos han llevado tan lejos.

A Isaac y mis abuelitos Humberto y María del Carmen quienes hoy no están más pero cuya presencia hace falta cada día. Gracias por enseñarme el valor de los buenos momentos y brindarme la fortaleza necesaria para enfrentar este mundo sin ustedes.

A mi directora, Ph. D. Silvana Hidalgo por guiar, enseñar y aportar en mí y en este trabajo su conocimiento. Gracias por su infinita paciencia para corregir entre risas mis errores las innumerables veces en las que las fórmulas no me funcionaban y los diagramas y datos no eran lo esperado y tenía que empezar desde cero.

DEDICATORIA

A mi hermano Adrián cuyo camino apenas empieza a forjarse y tiene una vida entera para seguir descubriendo este maravilloso mundo. Que tu curiosidad e inteligencia sigan creciendo a pasos gigantes y mientras me lo permitas, que sea acompañado de mi mano para guiar con sabiduría y amor tu camino.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
AGRADECIMIENTO	III
DEDICATORIA.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO	V
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
ÍNDICE DE ANEXOS	XI
RESUMEN	XII
ABSTRACT	XIII
1 CAPÍTULO I – INTRODUCCIÓN	1
1.1 Justificativos	2
1.2 Objetivo general.....	2
1.3 Objetivos específicos	2
1.4 Alcance	3
1.5 Marco teórico.....	4
Contexto Geológico	4
Cronología eruptiva de la erupción 1999-2016.....	7
Dinámica Eruptiva	10
1.6 Estudios Relacionados	16
2 CAPÍTULO II – METODOLOGÍA.....	18
2.1 Muestreo.....	18
2.2 Geoquímica	18
Análisis	18
Tratamiento de información.....	20
Evaluación de componentes.....	25
Tratamiento e interpretación de la información.....	28
3 CAPÍTULO III – RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	29
3.1 Resultados.....	29
Petrografía	29
Geoquímica de las fases eruptivas	31

Caracterización de los componentes mineralógicos	36
Condiciones de presión – temperatura pre-eruptivas	42
3.2 Conclusiones	47
3.3 Recomendaciones	49
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50
GLOSARIO DE ABREVIATURAS Y SIGLAS UTILIZADAS	58
ANEXOS.....	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. A) Mapa de volcanes cuaternarios del Ecuador continental que muestra la ubicación del volcán Tungurahua y los volcanes en erupción, activos, potencialmente activos y extintos o dormidos. Modificado de: Volcanes Cuaternarios del Ecuador Continental – Bernard y Andrade, 2011) Mapa de elevación digital del volcán Tungurahua, se destacan las poblaciones aledañas principales, las áreas de recolección de ceniza del estudio y la hidrología de la zona.....	4
Figura 1.2. Reconstrucción morfológica del volcán Tungurahua: a) antes del inicio de actividad, b) durante la construcción del edificio Tungurahua I y después del periodo de reposo que procede al primer colapso del flanco, c) después del primer colapso en el flanco oeste, d) al final de la construcción edificio Tungurahua II, e) después del colapso de la cumbre del Tungurahua II, f) actual con la construcción del edificio Tungurahua III. Tomado de: Bablon et al.,2018.....	6
Figura 1.3. Imágenes representativas de la evolución de la actividad eruptiva del volcán Tungurahua durante los meses de enero (A), febrero (B) y marzo (C) de 2010. Fotografías: Ramon P. (A ₁ , A ₂ , B ₁ y C ₁) y Bernard B. (A ₃ y B ₂).	8
Figura 1.4. A) Columna de ceniza emitida por el volcán Tungurahua durante la explosión vulcaniana del 14 de julio de 2013. Fotografía: Costales V., El Comercio. B) Actividad estromboliana del Tungurahua observada durante el monitoreo del 5 de abril de 2014. Fotografía: Vásconez F.	12
Figura 2.1. Imágenes de electrones retrodifusos (BSE) de tipos representativos de escorias y partículas vítreas miel. Los piroclastos han sido etiquetados de acuerdo con la fecha y lugar de recolección (A: Manzano - 06/01/2010; B: Manzano – 06/02/2010) y su clasificación en cuanto al tamaño de vesícula (Ma: Macrovesiculadas; Mi: Microvesiculadas; D: Densas). Escala A _{Ma} : 200 µm; A _{Mi} : 200 µm; A _D : 100 µm; B _{Ma} : 200 µm; B _{Mi} : 200 µm; B _D : 200 µm.	27
Figura 2.2. Imágenes de electrones retrodifusos (BSE) de tipos representativos de escorias y partículas vítreas negras. Los piroclastos han sido etiquetados de acuerdo con la fecha y lugar de recolección (C: Manzano - 06/02/2010; D: Manzano – 07/03/2010) y su clasificación en cuanto al tamaño de vesícula (Ma: Macrovesiculadas; Mi: Microvesiculadas; D: Densas). Escala C _{Ma} : 500 µm; C _{Mi} : 200 µm; C _D : 200 µm; D _{Ma} : 200 µm; D _{Mi} : 200 µm; D _D : 200 µm.	28
Figura 3.1. Clasificación geoquímica de productos de erupción del Tungurahua (roca total y ceniza) del periodo eruptivo de enero a marzo del 2010, marzo y julio de 2013 (Pazos G. 2022) y julio y agosto de 2006 (Samaniego et al., 2011).	30

Figura 3.2. Gráfico de barras de los componentes principales de las muestras de ceniza presentes en las fases eruptivas B, E y F definidas por Battaglia et al., (2019) de la erupción de enero a marzo de 2010 del volcán Tungurahua. Modificado de: Battaglia et al., 2019.

..... 33

Figura 3.3. Diagramas de Harker con elementos mayores seleccionados con respecto al contenido de sílica (SiO_2) con muestras del análisis de roca total (círculo rojo) y vidrio volcánico de cenizas del periodo eruptivo de enero a marzo de 2010, escorias y piedra pómez de las fases eruptivas de marzo y julio de 2013 (Pazos G. 2022) y andesitas del periodo eruptivo de julio y agosto de 2006 (Samaniego et al., 2011) del volcán Tungurahua. Las muestras de vidrio volcánico de enero a marzo de 2010 han sido clasificadas de acuerdo con las fases eruptivas determinadas por Battaglia et al., (2019) e identificadas durante este estudio (Fase B, E y F).

35

Figura 3.4. Diagrama ternario de clasificación para plagioclasas. A) Proyección de 39 muestras de plagioclasa en el sistema ternario Or-Ab-An. B) Ampliación de la Figura A). Las muestras de plagioclasa de enero a marzo de 2010 han sido clasificadas de acuerdo con las fases eruptivas determinadas por Battaglia et al., (2019) e identificadas durante este estudio (Fase B, E y F) y el agregado cristalino analizado para cada muestra (fenocristal o microlito).

37

Figura 3.5. Diagrama ternario de clasificación para ortopiroxenos y clinopiroxenos. A) Proyección de 34 muestras de ortopiroxeno en el sistema ternario Wo-En-Fs, B) Ampliación de la Figura A), C) Proyección de 11 muestras de clinopiroxeno en el sistema ternario Wo-En-Fs, D) Ampliación de la Figura C). Las muestras de piroxeno de enero a marzo de 2010 han sido clasificadas de acuerdo con las fases eruptivas determinadas por Battaglia et al., (2019) e identificadas durante este estudio (Fase B, E y F) y los cristales analizados para cada muestra (fenocristal o microlito).

38

Figura 3.6. Imágenes de electrones retrodifusos (BSE) de tipos representativos de escorias y partículas vítreas macrovesiculadas, microvesiculadas y densas de tonalidad negra y miel. Los piroclastos han sido etiquetados de acuerdo con su fase eruptiva y fecha de recolección, en ellas es posible observar zonaciones minerales en fenocristales subhédricos a euhédricos de plagioclasa (cristales gris oscuro) y piroxeno (cristales plomo claro). Escala: Fase B-arriba: 100 μm , abajo: 200 μm ; Fase E-arriba y abajo: 200 μm ; Fase F-arriba: 500 μm , abajo: 200 μm . Se observa el incremento progresivo de microlitos desde B hacia F, especialmente para el material denso.

39

Figura 3.7. A) Composiciones de plagioclasa graficados como An (mol. %) versus FeO (wt. %) y SiO_2 (wt.%) versus An (mol. %). B) Composiciones de piroxeno graficados Mg # versus Cr_2O_3 (wt.%) y SiO_2 (wt.%) versus Mg #. Las muestras de plagioclasa y piroxeno de enero

a marzo de 2010 han sido clasificadas de acuerdo con su fecha de recolección y las fases eruptivas determinadas por Battaglia et al., (2019) que han sido identificadas durante este estudio (Fase B, E y F), además de la zona de análisis de cada agregado cristalino (B: bordes; N+1: núcleos e interiores)..... 40

Figura 3.8a. Comparación de series temporales geofísicas. Las líneas punteadas de color rojo delimitan el inicio y final de 6 fases eruptivas (a) a (f), descritos en el estudio de Battaglia et al. (2019) mientras que los periodos de baja (LEA) y alta (HEA) actividad explosiva se distinguen por fondos de color amarillo y naranja, respectivamente (Battaglia et al., 2019 e Hidalgo et al., 2015). De manera general, la figura describe las variaciones temporales de 5 parámetros geofísicos (DVMD: duración de la medición válida diaria de SO₂, masa diaria de SO₂, número de explosiones, energía de explosión y la amplitud sísmica acumulativa diaria) a lo largo de las fases eruptivas a, b, c, d, e y f del periodo eruptivo comprendido entre enero a marzo de 2010 del volcán Tungurahua. Recuperado de: Battaglia et al., (2019). 45

Figura 3.8b. Comparación temporal de parámetros geoquímicos analizados para las 3 fases eruptivas (Fase B ~ azul, E ~ verde y F ~ vino) identificadas en el presente estudio, de muestras de ceniza del periodo eruptivo de enero a marzo de 2010 del volcán Tungurahua. Las líneas punteadas de color rojo delimitan el inicio y final de las 6 fases eruptivas definidas en el estudio de Battaglia et al. (2019), mientras que los periodos de baja (LEA) y alta (HEA) actividad explosiva se distinguen por fondos de color amarillo y naranja, respectivamente (Battaglia et al., 2019 e Hidalgo et al., 2015). La barra de error de los diagramas de caja corresponde a la desviación estándar (2 sigma). Modificado de: Battaglia et al. (2019). SiO₂: contenido de SiO₂ en el vidrio de la ceniza, An: contenido de An en las plagioclasas, Mg#: Mg# de los piroxenos, Temperatura: temperatura estimada en base a los geobarómetros de Putirka (2008)..... 46

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Síntesis de actividad sísmica y emisiones de SO ₂ del volcán Tungurahua durante la fase eruptiva de enero a marzo del 2010 y su comparación con el mes de diciembre de 2009. Recuperado de: Resúmenes mensuales del volcán Tungurahua 2010.	9
Tabla 3.1. Análisis seleccionados de roca total y ceniza a granel de productos de erupción del Tungurahua de enero a marzo del 2010.	30

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo I – Códigos utilizados en el software RStudio para la elaboración de diagramas y ploteo de datos	59
Anexo II – Set de datos	75
Anexo III – Imágenes de electrones retrodifusos de muestras de ceniza de las fases B, E y F del periodo eruptivo de enero a marzo de 2010 del volcán Tungurahua.....	81

RESUMEN

El presente trabajo muestra y detalla el análisis geoquímico de muestras de ceniza volcánica obtenidas a partir del periodo eruptivo comprendido entre enero a marzo de 2010 del volcán Tungurahua. Su comprensión y correlación con parámetros geofísicos, granulométricos y de componentes han permitido caracterizar los procesos geoquímicos vinculados a la actividad superficial y dinámica eruptiva de 3 de las 6 fases eruptivas descritas por Battaglia et al. (2019), por medio del análisis de composición normativa, formulas estructurales y geotermometría aplicados a datos de elementos mayores de plagioclasas, piroxenos y vidrio volcánico y el estudio de imágenes BSE.

Durante las 3 fases analizadas (B, E y F) los análisis geoquímicos muestran composiciones andesíticas homogéneas para todo el periodo eruptivo y composiciones dacíticas a traquidacíticas para el vidrio volcánico, con claras distinciones en el contenido de sílice para cada fase (mayor contenido para la fase B y mejor contenido para la fase E) que son indicativos de pulsos de magma máfico que entran en el sistema durante la fase eruptiva.

Por otra parte, las variaciones geoquímicas de cada fase muestran diferentes procesos involucrados tales como una cristalización y fragmentación magmática importante que da lugar a la formación de una barrera reológica y un estrechamiento del conducto volcánico durante la fase B, un cambio a composiciones más máficas con menor diferenciación resultado de un vaciado de la cámara magmática y una posterior mezcla composicional con un magma máfico (corroborado con la aplicación de diagramas de composición de plagioclasa An vs. FeO) para la fase E y finalmente tendencias geoquímicas con menor diferenciación por tiempos más cortos de evolución y permanencia dentro del sistema para la fase F.

Así también, los resultados de la aplicación de geotermómetros para sistemas volcánicos, propuestos por Putirka (2008), muestran temperaturas de evolución magmática para el Tungurahua entre 950 a 1000 °C y contenidos de agua menores al 4%, valores que coinciden con los resultados obtenidos por Samaniego et al. (2011) y Andújar et al. (2017).

Este trabajo muestra de esta manera que el análisis geoquímico complementario a parámetros geofísicos, granulométricos y de componentes, provee indicios sobre la actividad volcánica superficial y los dinamismos eruptivos, además de constituir y/o proporcionar una herramienta de comparación para otros volcanes de carácter andesítico.

PALABRAS CLAVE: Tungurahua, Geoquímica, Diagramas de Harker, Diagramas Ternarios, Dinámica Eruptiva, Geotermómetros.

ABSTRACT

The present work shows and details the geochemical analysis of volcanic ash samples obtained from the eruptive period from January to March 2010 of the Tungurahua volcano. Its understanding and correlation with geophysical, granulometric, and component parameters have made it possible to characterize the geochemical processes linked to the surface activity and eruptive dynamics of 3 of 6 eruptive phases described by Battaglia et al. (2019) through the analysis of normative composition, structural formulas and geothermometry applied to data of major elements of plagioclases, pyroxenes and volcanic glass and the study of BSE images.

During the 3 phases analyzed (B, E, and F), the geochemical analyzes show homogeneous andesitic compositions for the entire eruptive period and dacitic to trachydacitic compositions for the volcanic glass, with clear distinctions in the silica content for each phase (highest content for the phase B and lowest content for phase E) that are indicative of mafic magma pulses entering in the system during the eruptive period.

On the other hand, the geochemical variations of each phase show different processes involved, such as a significant magmatic crystallization and fragmentation process that gives rise to the formation of a rheological barrier and a narrowing of the volcanic conduit during phase B, a change to more mafic compositions with less differentiation resulting from an emptying of the magma chamber and a subsequent compositional mixing with a mafic magma (corroborated with the application of An vs. FeO plagioclase composition diagrams) for the E phase and finally geochemical trends with less differentiation for shorter times of evolution and permanence within the system for phase F.

Likewise, the results of the application of geothermometers for volcanic systems, proposed by Putirka (2008), show magmatic evolution temperatures for the Tungurahua between 950 and 1000 °C and water contents less than 4%, values that coincide with the results obtained by Samaniego et al. (2011) and Andujar et al. (2017).

In this way, this work shows that the complementary geochemical analysis to geophysical, granulometric, and component parameters, provides clues about the superficial volcanic activity and the eruptive dynamisms, in addition to constitute and provide a comparison tool for other andesitic volcanoes.

KEYWORDS: Tungurahua, Geochemistry, Harker Diagrams, Ternary Diagrams, Eruptive Dynamic, Geothermometers.

1 CAPÍTULO I – INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, varios de los ciclos eruptivos más recientes del volcán Tungurahua han sido analizados con el objetivo de entender su dinámica eruptiva. El más reciente, comprendido entre septiembre de 1999 y marzo de 2016 incluye una serie de fases eruptivas con patrones variables (erupciones vulcanianas, estrombolianas, fuentes piroclásticas, emisiones continuas o esporádicas de ceniza y piroclastos, desgasificación pasiva, entre otros; Battaglia et al., 2019) separadas entre sí por episodios o periodos de quiescencia de carácter transitorio.

Si bien dentro de la literatura, ciertos trabajos y publicaciones se han encargado de la descripción de la fase eruptiva comprendida entre enero y marzo de 2010 con el análisis de parámetros físicos como registros sismo-acústicos y de SO₂ (Battaglia et al., 2019) y granulométricos, de componentes (Acuña, 2017), ninguno se ha centrado en la caracterización geoquímica de los componentes emitidos durante la erupción.

Es importante analizar el vínculo existente entre los parámetros geofísicos, de componentes, granulométricos y geoquímicos que se puedan medir y coleccionar durante una erupción, de tal manera que se pueda obtener una perspectiva e interpretación más amplia y multiparamétrica asociada a la actividad volcánica superficial y los dinamismos eruptivos. En este caso, en vista de que se dispone de los datos geofísicos, el análisis de componentes y la granulometría, para la fase enero-marzo 2010 del volcán Tungurahua se ha analizado la composición geoquímica del vidrio de los productos emitidos durante dicha fase eruptiva con el fin de establecer su relación con los demás parámetros disponibles. Este tipo de estudio puede constituir y/o proporcionar una herramienta de comparación para otros volcanes de carácter andesítico.

1.1 Justificativos

El presente proyecto de integración curricular se enfocará en el análisis geoquímico de elementos mayores en fragmentos de ceniza volcánica emitidos durante la fase eruptiva de enero a marzo de 2010 del Volcán Tungurahua, así como de la comparación con los dinamismos eruptivos definidos por parámetros geofísicos y petrológicos descritos previamente en la literatura, con el fin de comprender la evolución del magma en las zonas más superficiales del conducto volcánico. Se pretende de esta manera proporcionar un vasto panorama mediante una caracterización química vinculada a los principales procesos y parámetros que controlan las transiciones presentes en la actividad volcánica y la dinámica eruptiva del volcán Tungurahua (tasa de suministro, viscosidad, contenido de volátiles del magma, permeabilidad del conducto volcánico, entre otros; Battaglia 2019), además de constituir una herramienta de comparación e interpretación potencialmente aplicable con volcanes de carácter andesítico similar.

1.2 Objetivo general

Analizar e interpretar las composiciones en elementos mayores del vidrio de muestras de ceniza volcánica emitidas durante la fase eruptiva comprendida entre los meses de enero a marzo de 2010 del volcán Tungurahua y establecer una comparación con la dinámica eruptiva definida por los parámetros geofísicos y petrológicos descritos previamente en la literatura.

1.3 Objetivos específicos

- Sistematizar los análisis geoquímicos de elementos mayores para muestras de ceniza volcánica obtenidas para la fase eruptiva enero-marzo del 2010 del volcán Tungurahua.
- Determinar las características y diferencias geoquímicas que definen las sub-fases establecidas en base a los parámetros geofísicos y de componentes para esta fase eruptiva según Battaglia et al., 2019.
- Calcular las condiciones pre-eruptivas de la fase enero-marzo del 2010 del volcán Tungurahua mediante el uso de geotermobarómetros experimentales para sistemas volcánicos propuestos en la literatura.

1.4 Alcance

- I. Descripción de la actividad eruptiva superficial del volcán Tungurahua durante la fase eruptiva comprendida entre enero a marzo del 2010 observada y fundamentada en los informes mensuales del Observatorio Vulcanológico del Tungurahua (OVT).
- II. Revisión teórica y metodológica estudios relacionados en la actividad y dinámica eruptiva del 2010 del volcán Tungurahua (Bustillos J., 2014; Acuña K., 2017; Battaglia et al., 2019), para la descripción y caracterización de los parámetros y procesos involucrados.
- III. Depuración de datos de elementos mayores analizados en muestras de ceniza de la fase eruptiva comprendida entre enero a marzo del 2010 del volcán Tungurahua, por medio de microsonda electrónica CAMECA-Camebax SX-100 perteneciente al laboratorio de Magmas y Volcanes de la Universidad de Clermont-Auvergne.
- IV. Cálculo de fórmulas estructurales en muestras minerales de clinopiroxeno, ortopiroxeno, plagiocasa y olivino.
- V. Cálculo de composición normativa de muestras de vidrio volcánico por medio del uso de la norma CIPW.
- VI. Elaboración de diagramas ternarios para los sistemas An-Ab-Or y Wo-Fs-En de muestras minerales de piroxeno y plagioclasa, por medio de los paquetes de software “ggplot2” extensión “ggtern” para el lenguaje de cálculo estadístico R en el software RStudio.
- VII. Elaboración de diagramas de Harker de muestras de vidrio volcánico por medio del paquete de software “ggplot2” para el lenguaje de cálculo estadístico R en el software RStudio.
- VIII. Cálculo y descripción de condiciones pre-eruptivas mediante la aplicación de geotermómetros y geobarómetros para sistemas volcánicos de Putirka (2008) en muestras de elementos mayores de minerales y vidrio volcánico.
- IX. Inter-comparación de datos mediante la generación de diagramas en función de tiempo de parámetros físicos y geoquímicos.

1.5 Marco teórico

Contexto Geológico

Geología Regional

Sobre la cordillera Real, en el centro del Ecuador entre las provincias de Tungurahua y Chimborazo se localiza el estratovolcán Tungurahua (UTM: 17S 784041.4; 9837510.6; Figura 1.1 A) con una altura de 5 023 m snm. Se destaca por un gran relieve de 3 200 m, flancos empinados (30° - 35°) y una forma cónica característica con un diámetro basal de 14 km y 300 m en su cráter (Figura 1.1 B).

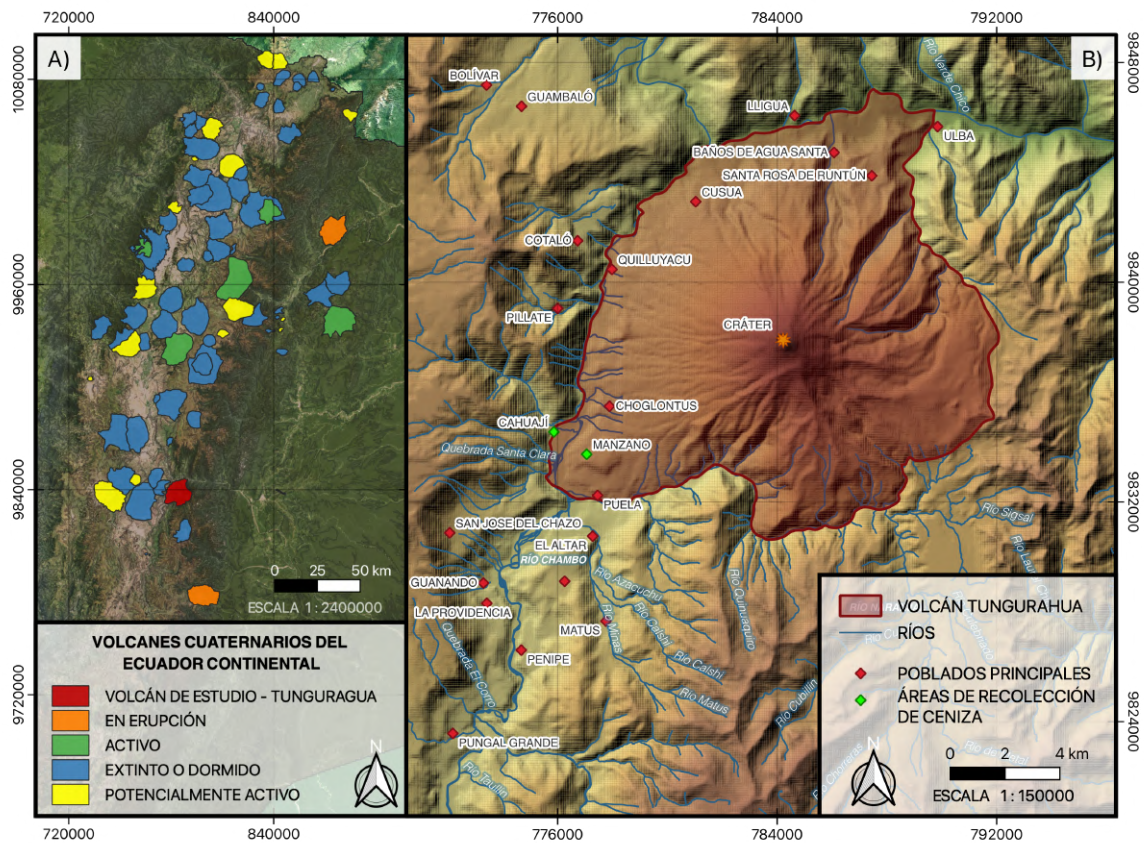


Figura 1.1. A) Mapa de volcanes cuaternarios del Ecuador continental que muestra la ubicación del volcán Tungurahua y los volcanes en erupción, activos, potencialmente activos y extintos o dormidos. Modificado de: *Volcanes Cuaternarios del Ecuador Continental – Bernard y Andrade, 2011*) Mapa de elevación digital del volcán Tungurahua, se destacan las poblaciones aledañas principales, las áreas de recolección de ceniza del estudio y la hidrología de la zona.

Consta de 3 edificios volcánicos sucesivos entre sí, Tungurahua I, Tungurahua II y Tungurahua III, siendo el último el más reciente y activo que se ha construido por encima de los otros dos edificios que han sufrido deslizamientos (colapsos sectoriales) de gran magnitud ocurridos hace ~33 000 y ~3 100 años AP (Hall et al., 1999; Le Pennec et al., 2008; Bablon et al., 2018).

Tungurahua I (Edificio viejo)

El desarrollo de este edificio ocurrió por la acumulación de productos volcánicos de erupciones acontecidas entre 770 000 y 350 000 años sobre el basamento metamórfico de la Cordillera Real (Barberi et al., 1988). Las reliquias de su existencia son evidenciables en la actualidad por las superficies inclinadas del flanco norte donde actualmente se ubican Santa Rosa de Runtún y Pondoá y que son producto de flujos de lava andesíticos básicos a andesíticos, así como también en las lavas presentes en el flanco sur y oriental del volcán (Figura 1.2 b y c). Su última fase de actividad se caracterizó por un volcanismo de carácter silíceo que dio lugar a los flujos de lava dacíticos de Runtún y Minsas. La destrucción de este edificio fue producto de un gran deslizamiento y explosión ocurrida hace 33 000 años AP que desencadenaron una avalancha de escombros que formó las terrazas donde actualmente se asientan los poblados de Penipe, San José de Chazo, La Providencia, Guanando, Pillate y Cotaló (Le Pennec et al., 2005; 2013).

Tungurahua II (Edificio intermedio)

Posterior a un periodo de reposo y erosión de los residuos del edificio Tungurahua I (Figura 1.2 d y e), se empezó a construir un cono intermedio denominado Tungurahua II. Estudios radiométricos y geomorfológicos muestran que su actividad se dio entre 30 000 y 3 100 años AP durante los cuales generó varias series de flujos de lava que se depositaron a lo largo del flanco sur del complejo (sector de Tiacos) y los valles de Patate y Ulba (Le Pennec et al., 2005); asimismo, es destacable un evento eruptivo de gran magnitud ocurrido hace 11 200 años AP en el cual productos volcánicos como escorias y cenizas cubrieron al cantón Guano y la ciudad de Riobamba (Ramón y Almeida, 1991; Le Pennec et al., 2005). El colapso de este cono intermedio probablemente se debió al colapso gravitacional de su flanco occidental de prominente pendiente en conjunto con la intrusión en el edificio volcánico de un magma dacítico, resultado de ello se formó una caldera de avalancha visible actualmente en el flanco sur del volcán además de las planicies de depósitos de escombros que actualmente constituyen las comunidades de Cotaló y Pillate y parte de los valles de los ríos Chambo y Patate (Le Pennec et al., 2005; Bustillos et al., 2011).

Tungurahua III (Edificio joven)

Finalmente el edificio volcánico más joven denominado Tungurahua III se construye desde hace 3 000 años AP (Le Pennec et al., 2005; 2013; Figura 1.2 f), superponiéndose a la caldera de avalancha del flanco occidental del Tungurahua II y a los flujos de lava del Tungurahua I ocupando así la tercera parte de la zona occidental del complejo volcánico. Se distingue de manera clara por sus pronunciadas pendientes (30° a 35°), además de presentar una actividad eruptiva regular (modera a fuerte) de periodicidad aproximada de ~1 siglo.

Su actividad volcánica a lo largo del tiempo ha revelado varios episodios y fases eruptivas que se han caracterizado por caídas regionales de tefra, flujos piroclásticos, de escombros y lava en bloques, lahares y fuertes explosiones (Hall et al., 1999; Le Pennec et al., 2008) que describen la actividad del Tungurahua entre moderada a alta y lo sitúan entre los volcanes más activos de los Andes Ecuatorianos. (Samaniego et al., 2011, Le Pennec et al., 2012).

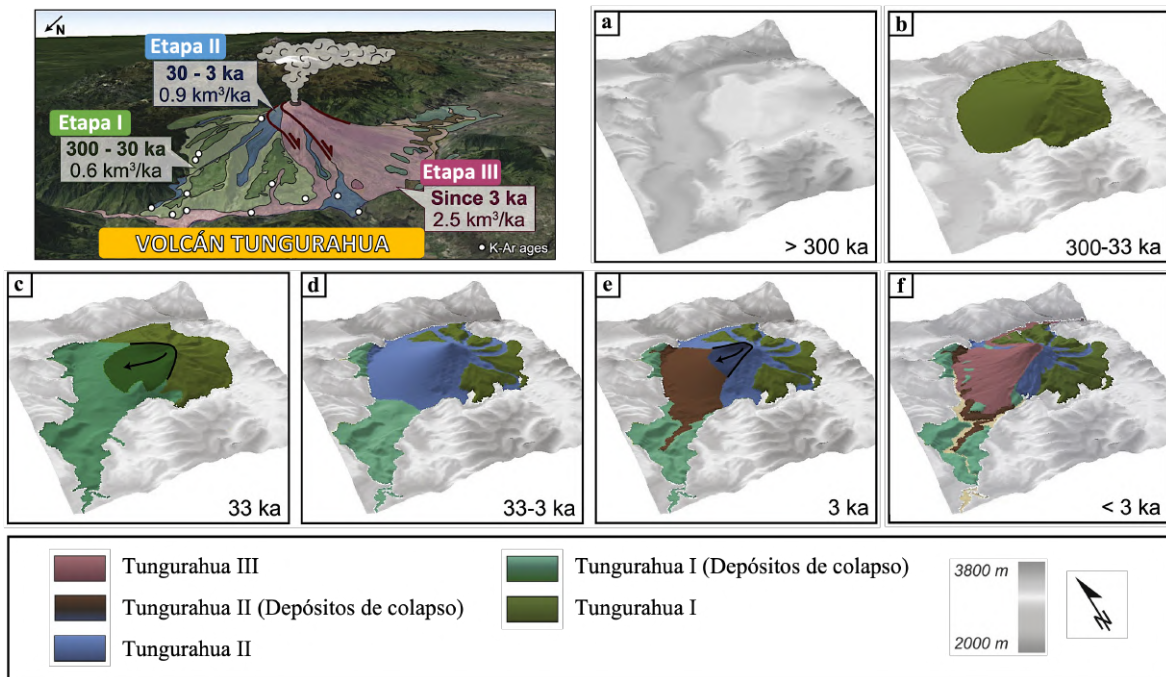


Figura 1.2. Reconstrucción morfológica del volcán Tungurahua: a) antes del inicio de actividad, b) durante la construcción del edificio Tungurahua I y después del periodo de reposo que precede al primer colapso del flanco, c) después del primer colapso en el flanco oeste, d) al final de la construcción edificio Tungurahua II, e)

después del colapso de la cumbre del Tungurahua II, f) actual con la construcción del edificio Tungurahua III. Tomado de: Bablon et al., 2018.

Por otra parte, su localización cercana a las ciudades de Ambato (33 km al Noroeste) y Baños de Agua Santa (8 km al Norte) las convierte en localidades con alta vulnerabilidad al igual que pequeños poblados y comunidades ubicados en las faldas del volcán, entre los cuales se encuentran: Ulba, Santa Rosa de Runtún, Cusua, Quilluyacu, Cotaló, Pillate, Chonglotús, Cahuají, Manzano, Puela y El Altar (Figura 1.1 B).

Cronología eruptiva de la erupción 1999-2016

Varias erupciones significativas registradas desde septiembre de 1999, después de un periodo de inactividad de 75 años, describieron una nueva fase eruptiva del volcán Tungurahua que se prolongó hasta marzo del 2016.

Durante este tiempo es posible destacar varias fases eruptivas con intensa actividad tales como julio – agosto de 2006 (gran evento de paroxismo; Eychenne et al., 2012), febrero de 2008, enero – marzo de 2010, mayo – julio de 2010, noviembre – diciembre de 2010, abril – mayo 2011, noviembre – diciembre de 2011, diciembre de 2011 – julio de 2012, agosto de 2012, diciembre de 2012, marzo de 2013, abril – mayo de 2013, julio – agosto de 2013, octubre 2013, febrero de 2014, abril del 2015 y febrero – marzo de 2016 (Hidalgo et al., 2015).

Para el presente trabajo se tomó en consideración la actividad eruptiva de la fase comprendida entre enero a marzo del 2010, para la cual datos de sismicidad, actividad superficial y valores de SO₂ se resumen a continuación a partir de informes mensuales del Observatorio del Volcán Tungurahua (OVT-IG-EPN) emitidos por el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional y también sintetizados en Battaglia et al. (2019).

Fase eruptiva de enero a marzo del 2010

De acuerdo con informes mensuales presentados por el OVT-IG-EPN (Observatorio Del Volcán Tungurahua), la fase eruptiva del volcán Tungurahua durante el 2010 empieza con leves signos de sismicidad que se manifiestan a mediados de Diciembre del 2009 con un total de 15 de sismos volcano – tectónicos (VT's) registrados durante todo el mes y que

podrían ser indicativos de un reajuste del sistema y presurización hacia un equilibrio entre la presión de la cámara y la presión litostática y/o ligeras intrusionas de magma donde todavía no hay manifestaciones superficiales (Resumen Mensual Tungurahua OVT – IG – EPN, diciembre de 2009).

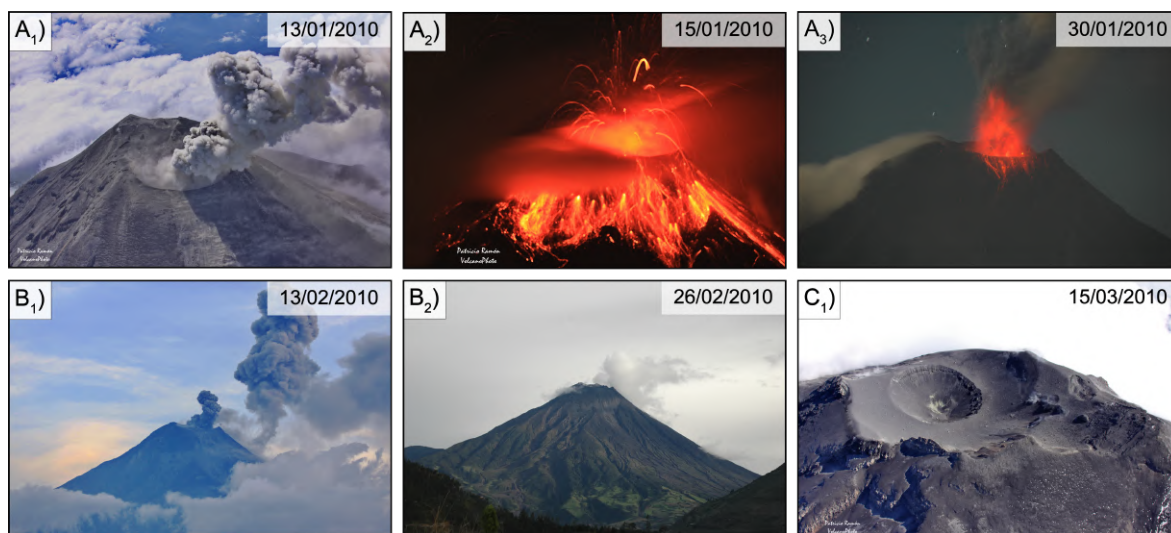


Figura 1.3. Imágenes representativas de la evolución de la actividad eruptiva del volcán Tungurahua durante los meses de enero (A), febrero (B) y marzo (C) de 2010. Fotografías: Ramon P. (A₁, A₂, B₁ y C₁) y Bernard B. (A₃ y B₂).

Para enero del 2010, la actividad sísmica había presentado un incremento en el que se registró una variación semanal aproximada entre 8 a 171 eventos sísmicos en los que predominaban aquellos de largo periodo (LP's), disminuciones de sismos volcano – tectónicos (VT's), con un total de 8 registrados, un total de 722 explosiones y 503 emisiones y un promedio de 2576 t/d de SO₂. Actividad que se vio acompañada de eventos superficiales en los que fue visible columnas eruptivas generadas por explosiones, emisiones y fuentes de lava, además de caídas de ceniza (Figura 1.3 A₁, A₂, A₃) que afectaron a los poblados ubicados en cercanías al volcán tales como Bilbao, Pillate, Choglontús, El Manzano y Cahují.

Febrero de 2010, a su vez, alcanzó los máximos niveles de actividad eruptiva durante la fase, además de constituir un punto de inflexión debido a una consiguiente actividad decreciente registrada a partir de la segunda mitad del mes (16 de febrero de 2010), la cual estaría asociada a una ausencia de cañonazos vinculados a las explosiones, incremento de emisiones de ceniza y ocurrencia de flujos piroclásticos, actividad que se prolongaría

hasta marzo de 2010 (Figura 1.3 B₁, B₂). La sismicidad total en este mes presentó un total de 1 785 eventos sísmicos (entre 73 a 310 eventos semanales) de los cuales 745 fueron LP's; por otra parte, se registraron 4 sismos VT's, 473 emisiones, 563 explosiones y valores promedio de 1451 t/d de SO₂.

Superficialmente continuaron visibles las columnas eruptivas generadas por explosiones y emisiones de abundante material piroclástico que se acumuló parcialmente en los bordes del cráter volcánico, flujos piroclásticos de tamaño pequeño que descendieron por el flanco NW, fuentes de lava y caídas de ceniza relativamente grandes que alcanzaron distancias mayores a 2 km y afectaron a nuevas poblaciones como Chontapamba, Yuibug, Puela, Palictahua, Penipe, Cevallos, Quero y Mocha.

Marzo concluyó la fase eruptiva con una disminución de actividad superficial, descensos en los niveles de sismicidad con un total de 253 eventos (213 LP's), 26 emisiones y 5 explosiones y valores promedio de 98 t/d de SO₂; por el contrario, el número de sismos VT's incrementaron en relación con febrero con un total de 9 registrados. La actividad volcánica superficialmente también presentó un descenso a lo largo del mes cambiando de moderada-alta a baja y/o nula y que se manifestó con una tenue actividad fumarólica en el borde NE del cráter y la zona superior del flanco NNW y la generación de dos fisuras paralelas que también presentaron actividad fumarólica y se ubicaban bajo del borde (Figura 1.3 C₁).

Durante ese mes es destacable mencionar dos explosiones vulcanianas ocurridas los días 02 y 19, en las cuales se produjeron columnas eruptivas de 3 y 1 km, respectivamente, y afectaron a las poblaciones de Pillate y Motilonos, Choglontús, El Manzano, Cahujá y Juive.

Tabla 1.1. Síntesis de actividad sísmica y emisiones de SO₂ del volcán Tungurahua durante la fase eruptiva de enero a marzo del 2010 y su comparación con el mes de diciembre de 2009. Recuperado de: Resúmenes mensuales del volcán Tungurahua 2010.

TOTAL MENSUAL						
PERIODO	Sismicidad total	LP	VT	Emisiones	Explosiones	SO₂ (t)
DIC./2009	51	36	15	0	0	8137
ENE./2010	1509	276	8	503	722	79875
FEB./2010	1785	745	4	473	563	40654
MAR./2010	253	213	9	26	5	3049

PROMEDIO DIARIO

PERÍODO	Sismicidad total	LP	VT	Emisiones	Explosiones	SO₂ Valor Medio (t/d)
DIC./2009	1.65	1.16	0.48	0	0	262
ENE./2010	97.09	17.68	0.39	32.45	46.58	2576
FEB./2010	63.76	26.6	0.14	16.89	20.12	1451
MAR./2010	8.16	6.87	0.29	0.84	0.16	98

Dinámica Eruptiva

El estudio de la dinámica eruptiva de un volcán resulta un desafío cuando su estilo eruptivo tiende a presentar variaciones; estas transiciones de actividad volcánica dependerán de factores que afectarán la actividad superficial del volcán y que serán evidenciables física y químicamente en la textura, distribución de tamaño, composición, viscosidad y contenido de volátiles, burbujas y cristales que se han preservado en los productos volcánicos (ceniza, piroclastos, lava, gases, entre otros) (Cashman y McConnell 2005; Battaglia et al., 2019) y que ayudarán a determinar las condiciones de ascenso, almacenamiento y tasa de descarga del magma (Jaupart and Allegre 1991; Melnik and Sparks 1999; Cashman 2004).

La evolución de la dinámica eruptiva comprenderá de esta manera una correlación y estudio simultáneo e integrado entre la observación visual de fenómenos y datos de parámetros acústicos, sísmicos, físicos, químicos, mineralógicos, de componentes, distribución granulométrica y emisiones de SO₂ que caractericen y amplíen el entendimiento de los procesos y mecanismos de erupción que rigen durante las diferentes fases de actividad eruptiva (Battaglia et al., 2019).

Patrones y estilos eruptivos del Tungurahua

A lo largo de periodo eruptivo entre enero a marzo del 2010, el volcán Tungurahua ha presentado una alta variabilidad en sus estilos eruptivos exhibiendo transiciones entre explosiones vulcanianas y estrombolianas, fuentes piroclásticas, desgasificaciones pasivas y emisiones piroclásticas continuas o esporádicas que han definido cada una de las fases de actividad superficial (Battaglia et al., 2019). Debido a que varios de estos patrones son comunes en volcanes andesíticos es posible realizar una descripción que sintetice y ejemplifique eventos del Tungurahua tal como se presenta a continuación:

Explosiones Vulcanianas

Son explosiones de corta duración (minutos) que resultan de la descompresión repentina de un conducto que contiene magma vesiculado cristalino que actúa como un tapón que sella el sistema y promueve la alta sobrepresión del conducto (Hammer et al., 1999; Takeuchi et al., 2005; Cashman y McConnell, 2005; D'Oriano et al., 2005); los productos volcánicos resultantes suelen ser bloques balísticos densos que al ser expulsados en columnas eruptivas y flujos piroclásticos de alta velocidad (cientos de metros por segundo) permiten la limpieza del conducto volcánico y una consecuente transición a estilos eruptivos efusivos (Francis y Oppenheimer, 1993; Melnik y Sparks, 2002b; Melnik et al., 2005); así también, la emisión de cenizas durante la actividad vulcaniana muestran una mezcla entre fragmentos juveniles y no juveniles producto de erupciones freatomagmáticas y magmáticas (Heiken y Wohletz, 1985).

La generación de este tapón puede ser resultado de:

- I. la disolución de volátiles y la cristalización de microlitos, los cuales aumentan la viscosidad y la fuerza del magma (Sparks, 1997; Stix et al., 1997); y
- II. la descompresión repentina y violenta de una columna magmática provocando el colapso de las vesículas y la densificación del magma (Hammer et al., 1999; Takeuchi et al., 2005; D'Oriano et al., 2005; Cashman y McConnell, 2005; Diller et al., 2006).

Un claro ejemplo de un evento vulcaniano en el Tungurahua es la explosión del 14 de julio de 2013, una de las más enérgicas a nivel mundial produciendo una energía de infrasonido mayor a los 5 000 Pa y una columna de ceniza de 15 km. Estudios realizados por Gaunt et al., 2020 indican posibles intrusiones magmáticas juveniles en el edificio volcánico que se estancaron por restos magmáticos de fases eruptivas anteriores los cuales formaron un tapón denso y rígido (permeabilidad: 10^{-17} a 10^{-18} m² y resistencia a la tracción: 9 a 13 MPa) que dio lugar a la presurización del conducto por una acumulación de gas y la resistencia del tapón a la extrusión magmática (Figura 1.4 A).

Explosiones Estrombolianas

Actividad caracterizada por explosiones efusivas de corta duración (minutos), débiles y discretas, de bolsas, grupos de burbujas o grandes burbujas de gas presurizado (slug flow y chug flow) que al liberarse periódicamente hacia la superficie en un conducto abierto se expanden rápidamente despidiendo partículas de magma y ceniza y en ocasiones fragmentos líticos que rodean al viento y / o conducto volcánico (Taddeucci J. et al., 2002;

2015). Este tipo de explosiones volcánicas suelen eyectar piroclastos que alcanzan apenas cientos de metros de altura y nubes de ceniza que forman una pluma boyante que puede alcanzar alturas menores a 1 km (Patrick et al., 2007). Para su generación es necesaria la acción de magmas poco viscosos en donde el contenido volátil inicial y la segregación de gas es limitada, otorgándole la capacidad de ascender de manera lenta a través del conducto volcánico (Pioli L. et al., 2008; Francis y Oppenheimer, 1993).

Los depósitos estrombolianos de ceniza en este caso serán consecuencia de un incremento en la presurización y viscosidad del magma debido a una cristalización sin-eruptiva (Roggensack et al., 1997; Marianelli et al., 2005), además de la acción de fragmentación hidromagmática (Martin y Nemeth, 2006) por un alto contenido inicial de agua en el magma.

En el volcán Tungurahua es común que posterior a un evento eruptivo vulcaniano se produzca actividad de tipo estromboliana; ejemplo de ello, el 5 de abril del 2014 se produce una erupción estromboliana que siguió a una violenta explosión de carácter vulcaniano generada el día anterior. Durante este evento se evidenció columnas de ceniza, gases y material piroclástico que alcanzaban alturas mayores a los 5 km y señales de tremor que indicaban un continuo ascenso de magma hacia el cráter del volcán (Volcano Discovery, 2013; Figura 1.4 B).



Figura 1.4. A) Columna de ceniza emitida por el volcán Tungurahua durante la explosión vulcaniana del 14 de julio de 2013. Fotografía: Costales V., El Comercio. B) Actividad estromboliana del Tungurahua observada durante el monitoreo del 5 de abril de 2014. Fotografía: Vásconez F.

Desgasificaciones pasivas

La desgasificación volcánica pasiva es un fenómeno en el cual los volcanes activos disipan superficialmente la energía que es transportada por el magma (Oppenheimer, 2003; 2011), esta energía constituye una gran fracción de masa/energía que se libera diariamente y que suele estar acompañada en ocasiones de desgasificaciones activas en las que “chorros” de gas sobrepresurizado emanan de manera explosiva. El objetivo de cuantificar los valores diarios de liberación de SO₂ permiten correlacionarlos con datos geofísicos que proporcionen series de tiempo para las fases eruptivas y los periodos de reposo o quiescencia (Tamburello et al., 2012; Hidalgo et al., 2015).

Uno de los estudios que ejemplifica ampliamente este fenómeno es el de Hidalgo et al., 2015; en el cual se analiza la desgasificación de SO₂ del volcán Tungurahua entre los años de 2007 a 2013; por medio de él, ejemplifica el comportamiento volcánico mediante el cálculo de las tasas de emisión másica diaria promedio de SO₂ para los periodos de reposo, y las fases de larga y corta duración.

Parámetros que controlan la variación de actividad superficial

Los estilos eruptivos y sus transiciones durante la dinámica eruptiva de un volcán pueden ser resultado de cambios presentes en las propiedades del magma tales como composición, viscosidad, permeabilidad, contenido de burbujas, cristales y volátiles, tasa de descarga, etc.; así también como de condiciones físicas del conducto volcánico y viento, es decir, su geometría y apertura, respectivamente. Debido a la importancia que tienen estos parámetros del magma, a continuación se describe la implicación de cada uno en la actividad superficial.

Fragmentación magmática

La fragmentación magmática se da cuando se produce la descompresión y ruptura de un magma multifásico compuesto de burbujas, roca fundida y en ciertos casos cristales (TJ Jones et al., 2022). En volcanes andesíticos como el Tungurahua donde el contenido de silíceo es mayor y por ende existe mayor viscosidad, esta ruptura de burbujas puede resultar más compleja debido a una resistencia de las burbujas a la expansión, esto puede inducir una sobre-presurización que fuerce la separación del magma; es decir, se tendrá como resultado piroclastos compuestos por remanentes de paredes de burbujas (Rust y Cashman 2004; 2011). Ciertos parámetros resultan importantes a considerar dentro de

este fenómeno como ocurre con la porosidad – permeabilidad y viscosidad del magma que promoverán o disiparán la sobrepresión del gas; así también, la presencia de cristales puede influir en la nucleación, coalescencia de burbujas y expansión afectando a la fragmentación al cambiar las propiedades mecánicas del magma (Shea 2017).

Por otra parte, los regímenes de descarga también intervienen en el fenómeno de fragmentación ya que en el caso de una tasa de baja descarga el magma ascenderá por medio de una desgasificación parcial sin producirse fragmentación (Melnik et al., 2005).

Composición y viscosidad

En el análisis de productos volcánicos, es común encontrar que estos preservan características importantes que proporcionan información única sobre la historia del magma; en este caso, datos sobre composición y textura en piroclastos pueden ayudar a esclarecer escenarios de ascenso, desgasificación, cristalización y erupción (Cashman and McConnell, 2005); un claro ejemplo de esto es la saturación de agua de una masa fundida (magma), la cual al ser descomprimida resulta en la cristalización de fases anhidras, este fenómeno ha servido ampliamente para documentar fases efusivas y discontinuas en volcanes andesíticos y dacíticos (Cashman 1992; Hammer et al. 1999, 2000; Martel et al. 2000; Nakada et al. 1995).

Por otra parte, es conocido que el cambio de composición también afecta al comportamiento reológico de una masa fundida, el cambio de cristalinidad, la formación de burbujas y la pérdida de volátiles pueden inducir un incremento o disminución de la viscosidad (dependiendo del caso) que influirá en las condiciones de almacenamiento y ascenso del magma, lo cual puede ser un factor clave en el tipo de erupción a generarse (Cashman y McConnell, 2005; Melnik y Sparks 2002a, 2002b; Couch et al. 2003; Hammer et al., 2003)

Permeabilidad y porosidad

No obstante, también existen casos en los que las transiciones entre un comportamiento eruptivo y otro, la magnitud y la frecuencia eruptiva no dependen como tal de variaciones en la composición mineral, el contenido de volátiles y gas, etc, sino de factores físicos como la permeabilidad del magma y la desgasificación (favorecida por la formación de vesículas en las zonas superiores del conducto volcánico) que por un lado inhibirán la explosión y la sobrepresión de gas que por otra parte generará las condiciones para una fragmentación explosiva (Melnik et al., 2005; Heap et al., 2014a y 2014b).

Así mismo, la viscosidad también tendrá un rol importante que actuará en conjunto con la permeabilidad y porosidad; varios estudios han demostrado que el efecto de “soldadura” o “welding” aumenta la viscosidad y la resistencia y disminuye la porosidad y permeabilidad de los materiales volcánicos (Melnik et al., 2005; Vasseur et al., 2013; Wright y Cashman, 2014).

1.6 Estudios Relacionados

Si bien el enfoque de este trabajo se centra en el estudio geoquímico de muestras de ceniza para caracterizar la actividad y dinámica eruptiva del periodo eruptivo entre enero a marzo del 2010 del volcán Tungurahua, existen otras variables que pueden vincularse para proporcionar un marco y perspectiva más amplia en cuanto a la comprensión y caracterización de la dinámica eruptiva del mismo, así como también la de volcanes que presenten características y comportamientos similares. De esta manera, se resume a continuación las principales publicaciones que han permitido el desarrollo, interpretación y conocimiento de la temática estudiada en el presente trabajo.

Una de las primeras publicaciones presentadas para la actividad eruptiva del volcán Tungurahua durante el 2010 fue presentada por Bustillos J. el cual exhibe un estudio estructural, morfológico y litológico en muestras de ceniza de los periodos explosivos de enero, febrero, mayo y noviembre de 2010. Sus análisis e interpretaciones describen así la transición desde la apertura paulatina del conducto volcánico hasta la formación de un “tapón” en superficie, detonantes para un cambio de un estilo eruptivo estromboliano a uno vulcaniano.

Krupskaia Acuña en su trabajo de titulación (2017), describe mediante el análisis granulométrico, químico y la clasificación de componentes en cenizas de la fase eruptiva comprendida entre enero a marzo de 2010 del volcán Tungurahua. Sus resultados desprenden una clasificación de componentes litológicos que varían en proporción y granulometría a lo largo de 6 subfases eruptivas definidas por características eruptivas diferentes, además de asignar una fuente magmática relativamente homogénea para las erupciones de este periodo.

En 2019, Battaglia y colaboradores proporcionan un modelo para la dinámica del conducto volcánico del Tungurahua durante la fase eruptiva comprendida entre diciembre de 2009 y marzo de 2010 describiendo su actividad durante 6 episodios definidos de acuerdo con los cambios en la evolución temporal de parámetros geofísicos como la amplitud sísmica acumulada diariamente, energía de explosión, número de explosiones, masa diaria observada de SO_2 y duración de la medición válida diaria de SO_2 (DVMD).

Usando estas distinciones fue posible la identificación de una variación en la dinámica eruptiva sin cambios significativos de SO_2 durante la transición de desgasificaciones continuas y actividad estromboliana a desgasificaciones explosivas acompañadas de explosiones vulcanianas, variabilidad que sería producto de la creación de una barrera

reológica o “tapón” poco profundo, localizado 1km por debajo de la cima del volcán. Por otra parte, el monitoreo petrológico vinculado a las interpretaciones geofísicas también sugiere que esta transición es evidente en la distribución de tamaño de grano y componentes de las cenizas, proporcionando así una perspectiva única de los procesos físicos que controlan la actividad volcánica superficial del Tungurahua y constituir una herramienta general de comprensión volcánica y detección de cambios en actividad (Battaglia et al., 2019).

2 CAPÍTULO II – METODOLOGÍA

2.1 Muestreo

La información obtenida para el desarrollo de este trabajo de integración curricular es producto de muestras recolectadas en campo por cenizómetros (recipientes plásticos de 20 cm de diámetro y 20 cm de altura) ubicados estratégicamente considerando 3 factores importantes, el régimen dominante de vientos en la zona del volcán, los poblados con reporte frecuente de caída de ceniza y la distribución de depósitos de erupciones anteriores; es así como durante el 6 de enero y 6 de febrero en la zona de Manzano y 7 de marzo en la zona de Cahujá se procedió a la recolección de ceniza inmediatamente después de cada evento importante y dependiendo a su vez de la intensidad que presentó cada fase explosiva y del material acumulado mayor o igual a 1mm en el recolector más distal (Bustillos, 2011).

2.2 Geoquímica

Análisis

Las muestras de ceniza obtenidas durante la etapa de recolección fueron posteriormente analizadas con la microsonda electrónica CAMECA SX-100 del Laboratorio de Magmas y Volcanes de la Universidad de Clermont-Auvergne, obteniendo así datos de elementos mayores cuyo procesamiento y análisis se detallan a continuación:

Microsonda Electrónica CAMECA-Camebax SX-100

El microanálisis de sonda electrónica consiste en una técnica ampliamente utilizada para determinar fases minerales, composición química y elementos traza que comúnmente sustituyen componentes principales de una determinada muestra. Su configuración se compone de tres módulos principales:

- Cañón de electrones: Instalado en una cámara de vacío donde se encarga de generar un haz de electrones que incide sobre la muestra y proporciona información de este.
- Microscopio óptico: Se encarga de la identificación y reconocimiento de los puntos de interés sobre la superficie de la muestra previo al análisis cuantitativo. En él, una cámara dispositivo de carga acoplada (CDD) permite la observación de muestras

en luz reflejada e imágenes de secciones delgadas en luz polarizada transmitida (John Wiley & Sons, 2018).

- Detectores: Se encargan de la recolección de luz visible generada una vez el haz de electrones incide en el punto de interés de la muestra proporcionan información sobre la estructura cristalina, la topografía y el peso atómico de los elementos de la superficie del espécimen. Estos datos se combinan con los espectrómetros de dispersión de energía con el fin de realizar una verificación general de la composición y de los elementos principales del punto de interés analizado.

Las condiciones de operación para el análisis mineral fueron 15 kV de tensión de aceleración, 15 nA de corriente y tiempo de conteo de 10 s para cada elemento analizado (análisis puntual). Por otro lado, las condiciones de operación para el análisis de vidrio fueron 15kV de tensión de aceleración, 8 nA de corriente y tiempo de conteo de 10 s (análisis no enfocado) 5 μm de haz desenfocado. El porcentaje de error estimado para un solo análisis se encuentra alrededor de 2 a 5% para concentraciones de elementos menores al 10% y de 1% mayores al 10%.

Los productos obtenidos a partir del análisis de microsonda electrónica comprenden datos de elementos mayores de 165 muestras de piroxenos, plagioclasas, olivinos y vidrio volcánico, además de 33 imágenes en electrones retrodifusos (BSE) de cenizas que fueron clasificadas como componentes de escorias vítreas miel macrovesiculadas, escorias vítreas miel microvesiculadas, escorias vítreas negras macrovesiculadas, escorias vítreas negras microvesiculadas, partículas vítreas miel densas y partículas vítreas negras densas.

Procesamiento de datos y análisis de resultados

La primera etapa consistió en la depuración de elementos mayores obtenidos por la microsonda electrónica CAMECA SX-100, de los cuales se excluyeron los valores fuera de los rangos de error aceptables para cada uno de los minerales y/o materiales analizados (ortopiroxeno, clinopiroxeno, plagioclasa, olivino y vidrio). Generalmente estos errores se asocian a especímenes de hidrógeno y helio no identificables por la microsonda y que suelen ser parte común de la composición mineral de minerales hidratados, así también, otros errores pueden presentarse por la preparación de las muestras (limpieza, pulido, imperfecciones e irregularidades de la superficie de las muestras y demás), la precisión del instrumento, entre otros.

Tratamiento de información

Fórmulas estructurales minerales

Si bien los análisis obtenidos por medio de la microsonda electrónica dan como resultado datos de elementos mayores de puntos de interés en las muestras de ceniza, es necesario el cálculo de su química mineral para observar los cambios y comportamiento que puedan presentar o producirse a lo largo de la fase eruptiva.

Este procedimiento como tal implica la conversión de unidades de cantidad (óxidos) y normalizaciones que permitan obtener valores que puedan utilizarse bajo las convenciones de fórmulas de uso común. El procedimiento básico para este cálculo es:

- I. Proporción Molecular: Dividir el porcentaje en peso de cada óxido por el peso molecular del óxido.
- II. Proporción Catiónica y Aniónica: Multiplicar el número de cationes presentes en la fórmula del óxido por su proporción molecular (realizar el mismo procedimiento, pero utilizando el número de aniones para obtener la proporción aniónica).
- III. Normalización del Número de Oxígenos: Multiplicar la proporción catiónica de cada óxido por su constante de normalización (número de oxígenos en la fórmula deseada) y dividirlo por la suma total de las proporciones catiónicas.
- IV. Normalización Catiónica: Multiplicar el número de oxígenos normalizado de cada óxido por el número de cationes por oxígeno en la fórmula de óxido.

Para la simplificación de este procedimiento se utilizó la hoja de cálculo de fórmulas minerales de olivino, piroxeno y feldespato "normalization.v17.xls" obtenida a partir de la página web "*Integrating Research and Education - Mineral Formulae Recalculation*" del *Centro de Recursos de Educación Científica* (SERC).

Es necesario tener en consideración que el procedimiento de cálculo de fórmulas estructurales puede variar para minerales que contengan hierro tal como ocurre con el piroxeno y el olivino ya que el haz de electrones no posee la capacidad de diferenciar entre los estados de valencia del hierro (Fe^{+2} y Fe^{+3}); para ello será necesario el cálculo de dichas proporciones asumiendo un equilibrio perfecto en la carga y sitios catiónicos llenos dentro de estructura mineral.

Finalmente, el cálculo de los miembros finales de los sistemas Enstatita - Wollastonita - Forsterita (En - Wo - Fs) en piroxenos y Anortita - Albita - Ortoclasa (An - Ab - Or) en plagioclasas, se realizaron con los valores obtenidos para la normalización catiónica de cada óxido aplicados a las siguientes fórmulas:

Sistema de Clasificación En-Wo-Fs ~ Piroxenos:

$$XWo = \frac{Ca}{Ca+Mg+FeT}; \quad XEn = \frac{Mg}{Ca+Mg+FeT}; \quad XFs = \frac{FeT}{Ca+Mg+FeT} \quad (1)$$

Sistema de Clasificación An-Ab-Or ~ Plagioclasas:

$$XAn = \frac{Ca}{Ca+Na+K}; \quad XAb = \frac{Na}{Ca+Na+K}; \quad XOr = \frac{K}{Ca+Na+K} \quad (2)$$

Diagramas Ternarios

Los diagramas ternarios fueron realizados por medio del software RStudio con ayuda del paquete “ggplot2” extensión “ggtern”, el cual permitió el ploteo de los miembros finales de 44 muestras de clinopiroxeno y ortopiroxeno en el sistema de clasificación En - Wo - Fs y 39 muestras de plagioclasa en el sistema de clasificación An - Ab - Or. El código utilizado se detalla en el Anexo I.

Composición normativa del vidrio – Norma CIPW

Dentro del análisis de muestras de ceniza también es necesario el estudio de la evolución de la composición del vidrio volcánico a lo largo de cada una de las fases de actividad volcánica, para ello es posible obtener su composición normativa mediante la aplicación de la Norma CIPW propuesta en 1931 por los petrólogos Cross, Iddings, Pirsson y Washington. Esta norma consiste en un conjunto de componentes minerales idealizados que se calculan a partir de un análisis químico de una roca total con el fin de utilizarse como punto de comparación o clasificación de los “minerales” reales que tendrían la capacidad de cristalizar si el enfriamiento de una roca se diera bajo condiciones ideales de equilibrio (Hollocher K. 2004). Debido a que el procedimiento de cálculo de esta norma es extenso, para los cálculos de composición normativa de las muestras de vidrio volcánico del presente estudio se optó por el uso la hoja de cálculo “CIPW Norm Hollocher.xls” del trabajo “An Excel spreadsheet for CIPW norm calculation” realizado por Hollacher K.T. (2005).

Diagramas de Harker

Los diagramas de Harker fueron realizados gracias al software RStudio con ayuda del paquete “ggplot2”, este permitió observar el comportamiento y evolución del vidrio volcánico de las muestras de ceniza durante enero, febrero y marzo de 2010 al utilizar diagramas de tipo X-Y en donde se generan correlaciones positivas y/o negativas comparar el contenido del SiO₂ y un óxido (Al₂O₃, MgO, Na₂O, TiO₂, FeO, CaO, K₂O, P₂O₅, etc.). El código utilizado se detalla en el Anexo I.

Geotermobarómetros para sistemas volcánicos

La estimación de presión y temperatura constituyen herramientas esenciales que permiten tener conocimiento y mejor comprensión del funcionamiento interno de los sistemas volcánicos y los procesos vinculados al mismo.

El uso de geotermobarómetros calibrados experimentalmente permiten de esta manera la estimación de dichas condiciones de presión y temperatura utilizando datos de elementos mayores de pares de especímenes vinculados entre sí para encontrar un equilibrio químico entre sus reactantes y productos en el que exista una diferencia significativa entre su entropía (termómetro) o volumen (barómetro). Por tal motivo, los geotermómetros y geobarómetros utilizados para pares minerales de plagioclasas y piroxenos utilizados para el desarrollo de este trabajo se detallan a continuación:

Geotermómetro de plagioclasa – vidrio

Putirka en 2005b propone una simplificación sencilla para la ecuación de cálculo de temperatura para la asociación plagioclasa – vidrio, a partir de una revisión de los termómetros de Sugawara (2001) y Ghiorso et al., (2002), los cuales proporcionaban los predictores más precisos de temperatura, pero cuyo modelo resultaba poco útil para sistemas hidratados y temperaturas menores a 1100 °C. Su ecuación se presenta a continuación:

$$\begin{aligned} \frac{10^4}{T[K]} = & 6.12 - 0.257 \ln \left(\frac{X_{An}^{pl}}{X_{CaO}^{liq} (X_{AlO_{1.5}}^{liq})^2 (X_{SiO_2}^{liq})^2} \right) - 3.166(X_{CaO}^{liq}) \\ & - 3.137 \left(\frac{X_{AlO_{1.5}}^{liq}}{X_{AlO_{1.5}}^{liq} + X_{SiO_2}^{liq}} \right) + 1.216(X_{An}^{pl})^2 - 2.475 \times 10^{-2}(P[bar]) \\ & + 0.2166(H_2O^{liq}) \end{aligned} \quad (3)$$

donde:

$$H_2O(wt\%) = 25.95 - 0.0032T[^\circ C] \ln \left(\frac{X_{An}^{pl}}{X_{CaO}^{liq} (X_{AlO_{1.5}}^{liq})^2 (X_{SiO_2}^{liq})^2} \right) \quad (3a)$$

$$X_{An}^{pl} = \frac{X_{CaO}^{pl}}{(X_{CaO}^{pl} + X_{NaO_{0.5}}^{pl} + X_{KO_{0.5}}^{pl})} \quad (3b)$$

$$X_{Ab}^{pl} = \frac{X_{NaO_{0.5}}^{pl}}{(X_{CaO}^{pl} + X_{NaO_{0.5}}^{pl} + X_{KO_{0.5}}^{pl})} \quad (3c)$$

Es necesario tener en consideración que para esta ecuación las estimaciones del contenido de agua tienden a ser sensibles a la temperatura, es decir, un error de $\pm 1,0\%$ en peso de H_2O puede provocar un error de ± 38 °C en la temperatura (Putirka 2008). Además, se recomienda su uso para condiciones de composición naturales similares a las composiciones experimentales originales.

En cuanto al barómetro de plagioclasa – vidrio, este no ha sido utilizado en este estudio para el cálculo de la presión debido a que su ecuación ha presentado deficiencias en su funcionamiento para ciertos conjuntos de datos. Si bien la ecuación presentada en la recopilación de Putirka (2005b; ecuación 4) funciona bien para modelos naturales similares a los experimentales, aún se necesitan nuevas pruebas que desarrollen y corrijan la formulación de esta.

$$\begin{aligned}
P[\text{kbar}] = & -42.1 + 4.94 \times 10^{-2} T[\text{K}] + 1.16 \times 10^{-2} T[\text{K}] \ln \left(\frac{X_{Ab}^{pl} X_{AlO_{1.5}}^{liq} X_{CaO}^{liq}}{X_{An}^{pl} X_{NaO_{0.5}}^{pl} X_{SiO_2}^{liq}} \right) \\
& - 382.3 (X_{SiO_2}^{liq})^2 + 514.2 (X_{SiO_2}^{liq})^3 - 19.6 \ln(X_{Ab}^{pl}) - 139.8 (X_{CaO}^{liq}) \\
& + 287.2 (X_{NaO_{0.5}}^{liq}) + 163.9 (X_{KO_{0.5}}^{liq})
\end{aligned} \tag{4}$$

Geotermómetro y geobarómetro de dos piroxenos

Dentro de la comprensión de sistemas volcánicos puede ser crucial ilustrar el equilibrio sub-solidus entre dos fases minerales, en este caso, estudios basados en la partición de la enstatita + ferrosilita entre el clinopiroxeno y ortopiroxeno propuesto por Brey y Köhler en 1990, obtuvieron una fórmula para el cálculo de la temperatura utilizando fracciones catiónicas calculadas sobre una base 6 oxígenos. Su ecuación se detalla a continuación y funciona con mayor precisión para sistemas máficos donde el $Mg\#^{cpx}$ es mayor a 0,75.

$$\begin{aligned}
\frac{10^4}{T[^\circ\text{C}]} = & 13.4 - 3.4 \ln \left(\frac{X_{EnFs}^{cpx}}{X_{EnFs}^{opx}} \right) + 5.59 \ln(X_{Mg}^{cpx}) - 8.8 (Mg\#^{cpx}) + 23.85 (X_{Mn}^{opx}) \\
& + 6.48 (X_{FmAl_2SiO_6}^{opx}) - 2.38 (X_{Di}^{cpx}) - 0.044 P[\text{kbar}]
\end{aligned} \tag{5}$$

Mercier et al. (1984) mediante su estrategia de regresión permite calibrar un geobarómetro independiente de la temperatura, con restricciones similares en $Mg\#^{cpx}$, valores de ajuste de $R^2 = 0,68$ y un error de $\pm 3,7$ kbar; de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
P[\text{kbar}] = & -279.8 + 293 (X_{Al(VI)}^{opx}) + 455 (X_{Na}^{opx}) + 229 (X_{Cr}^{opx}) + 519 (X_{Fm_2Si_2O_6}^{opx}) \\
& - 563 (X_{En}^{opx}) + 371 (X_{Di}^{opx}) + 327 (a_{En}^{opx}) + \frac{1.19}{K_f}
\end{aligned} \tag{6}$$

donde:

$$a_{En}^{opx} = \left(\frac{0.5 X_{Mg}^{opx}}{X_{Ca}^{opx} + 0.5 X_{Mg}^{opx} + 0.5 X_{Fe^{2+}}^{opx} + X_{Mn}^{opx} + X_{Na}^{opx}} \right) \left(\frac{0.5 X_{Mg}^{opx}}{0.5 X_{Fe^{2+}}^{opx} + X_{Fe^{3+}}^{opx} + X_{Al(VI)}^{opx} + X_{Ti}^{opx} + X_{Cr}^{opx} + 0.5 X_{Mg}^{opx}} \right); \tag{6a}$$

$$X_{En}^{opx} = \left(X_{Fm_2Si_2O_6}^{opx} \right) \frac{X_{Mg}^{opx}}{(X_{Mg}^{opx} + X_{Mn}^{opx} + X_{Fe}^{opx})}; \tag{6b}$$

$$X_{Di}^{opx} = \left(X_{CaFmSi_2O_6}^{opx} \right) \frac{X_{Mg}^{opx}}{\left(X_{Mg}^{opx} + X_{Mn}^{opx} + X_{Fe}^{opx} \right)} ; y \quad (6c)$$

$$K_f = \frac{X_{Ca}^{opx}}{\left(1 - X_{Ca}^{cpx} \right)} \quad (6d)$$

Además, si se toma en consideración a la temperatura dentro de la ecuación como propone Papike et al. (1974), la presión puede incrementar presentando un ajuste de $R^2= 0,82$ y un error de $\pm 2,8$ kbar. La ecuación se expresaría de la siguiente manera:

$$P[kbar] = -94.25 + 0.045T[^\circ C] + 187.7 \left(X_{Al(VI)}^{opx} \right) + 246.8 \left(X_{Fm_2Si_2O_6}^{opx} \right) - 212.5 \left(X_{En}^{opx} \right) + 127.5 \left(a_{En}^{opx} \right) - \frac{1.66}{K_f} - 69.4 \left(X_{EnFs}^{cpx} \right) - 133.9 \left(a_{Di}^{cpx} \right) \quad (7)$$

donde:

$$a_{Di}^{cpx} = \frac{X_{Ca}^{cpx}}{X_{Ca}^{cpx} + 0.5X_{Mg}^{cpx} + 0.5X_{Fe^{2+}}^{cpx} + X_{Mn}^{cpx} + X_{Na}^{cpx}} \quad (7a)$$

Evaluación de componentes

De manera simultánea al análisis químico realizado por la microsonda electrónica CAMECA SX-100, se obtuvieron 33 imágenes por medio de Backscatter Electron Imaging (BSE), técnica de barrido de microscopía electrónica que se encarga de la detección de gradientes en los números atómicos. Se analizaron 3 grupos de componentes (macrovesiculados, microvesiculados y densos) para cada uno de los periodos eruptivos de enero, febrero y marzo detallados dentro de este trabajo, su clasificación fue tomada del trabajo de titulación de Acuña K. (2017) el cual considera el color, textura y tamaño de vesículas como criterios de categorización, de la siguiente manera:

Escorias vítreas miel macrovesiculadas

Partículas escoriáceas caracterizadas por una tonalidad miel brillante y translúcida, cuentan con la presencia de agregados cristalinos (fenocristales y microlitos) de diversas tonalidades. Sus vesículas poseen irregularidad tanto en forma (bordes angulares, semicirculares y presencia de filamentos puntiagudos) como tamaño siendo estas mayores a 30 μm (Figura 2.1 A_{Ma} y B_{Ma}).

Escorias vítreas miel microvesiculadas

Partículas escoriáceas diferenciadas por la presencia de vesículas con geometrías ovoides, elípticas y circulares que tienden a ser más regulares que las vesículas de partículas vítreas miel microvesiculadas (Figura 2.1 A_{Mi} y B_{Mi}) su tamaño es menor a 30 μm , aproximadamente, no evidencia la presencia de filamentos puntiagudos y poseen tonalidades miel claras y apariencia brillante.

Partículas vítreas miel densas

Partículas de tonalidad café translúcido a miel claro de geometrías semiangular a angular. La poca o nula cantidad de vesículas permite una observación más clara de los cristales (fenocristales y microlitos) presentes dentro de su estructura (apariciencia masiva; Figura 2.1 A_D y B_D), los cuales pueden otorgarle tonalidades verdosas cuando son observadas en binocular.

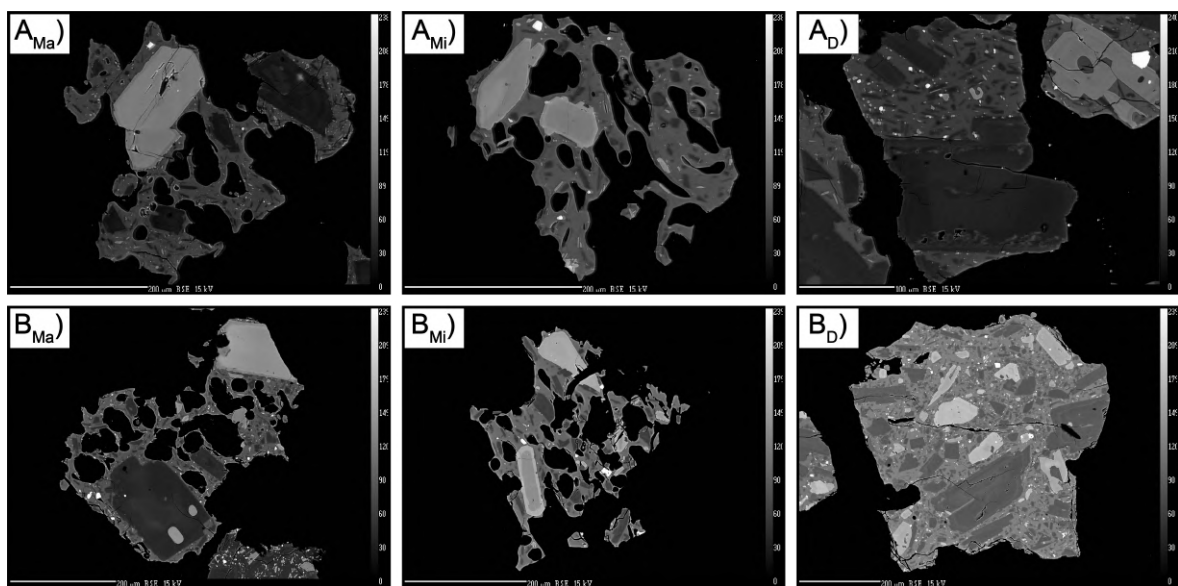


Figura 2.1. Imágenes de electrones retrodifusos (BSE) de tipos representativos de escorias y partículas vítreas miel. Los piroclastos han sido etiquetados de acuerdo con la fecha y lugar de recolección (A: Manzano - 06/01/2010; B: Manzano - 06/02/2010) y su clasificación en cuanto al tamaño de vesícula (Ma: Macrovesiculadas; Mi: Microvesiculadas; D: Densas). Escala A_{Ma} : 200 μm ; A_{Mi} : 200 μm ; A_D : 100 μm ; B_{Ma} : 200 μm ; B_{Mi} : 200 μm ; B_D : 200 μm .

Escorias vítreas negras macrovesiculadas

Partículas escoriáceas de tonalidad negra y apariencia brillante ($\geq 70\%$ al del vidrio volcánico), de geometría vesicular semirregular, puntiaguda, ovoide y circular y tamaño mayor a las 100 μm . Presenta fenocristales y microlitos de gran tamaño y tonalidades que van desde gris claro a oscuro (Figura 2.2 C_{Ma} y D_{Ma}).

Escorias vítreas negras microvesiculadas

Partículas escoriáceas caracterizadas por su gran número de vesículas menores a 100 μm , de geometría irregular a semirregular, ovoide y elipsoidal y la presencia de filamentos puntiagudos alrededor de las vesículas (Figura 2.2 C_{Mi} y D_{Mi}). Poseen tonalidad gris oscuro a negro con apariencia visual vítrea brillante ($\geq 70\%$ al del vidrio volcánico) y ligera translucidez debido a la alta presencia de vesículas y poca cantidad de cristales que suelen ser de tamaño pequeño (usualmente $\leq 75 \mu\text{m}$).

Partículas vítreas negras densas

Partículas vítreas definidas por su geometría angular y regular, la poca o nula presencia de vesículas, aspecto masivo, tonalidad negra y brillo vítreo ($\geq 70\%$ al del vidrio volcánico). Posee gran cantidad de cristales de tamaño heterogéneo, con estructura claramente definida dentro de una matriz vítrea lo que le otorga su apariencia masiva y sólida (Figura 2.2 C_D y D_D).

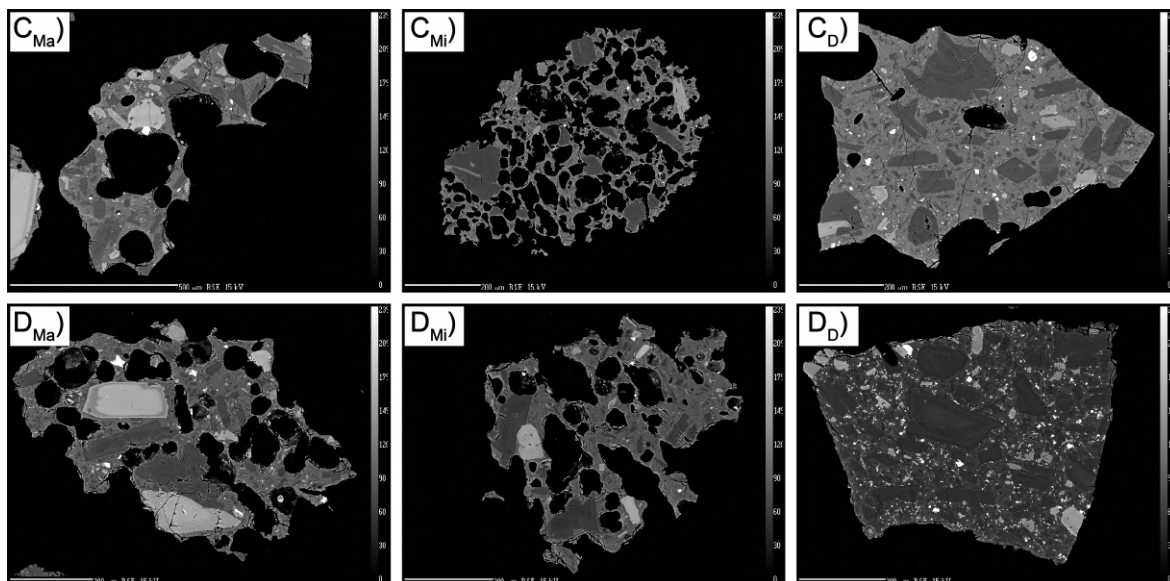


Figura 2.2. Imágenes de electrones retrodifusos (BSE) de tipos representativos de escorias y partículas vítreas negras. Los piroclastos han sido etiquetados de acuerdo con la fecha y lugar de recolección (C: Manzano - 06/02/2010; D: Manzano - 07/03/2010) y su clasificación en cuanto al tamaño de vesícula (Ma: Macrovesiculadas; Mi: Microvesiculadas; D: Densas). Escala C_{Ma} : 500 μm ; C_{Mi} : 200 μm ; C_D : 200 μm ; D_{Ma} : 200 μm ; D_{Mi} : 200 μm ; D_D : 200 μm .

Tratamiento e interpretación de la información

Como fuente primaria para el desarrollo del proyecto, se realizó una recopilación de literatura (libros, artículos científicos, tesis, entre otros) referente al episodio eruptivo de enero a marzo de 2010 del volcán Tungurahua, la misma que serviría para realizar comparaciones de los patrones generados con la dinámica eruptiva definida previamente por parámetros geofísicos y petrológicos y del mismo modo comprender la evolución del magma en la zona más superficial del conducto volcánico.

3 CAPÍTULO III – RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Resultados

Petrografía

Los análisis de roca total muestran una composición andesítica homogénea con valores entre 57,60% - 57,83% en peso de SiO₂, 1,73% - 1,75% en peso de K₂O y 3,90% - 3,93% en peso de Na₂O (5,65% en peso de Na₂O + K₂O) (valores normalizados en base anhidra, 5 muestras; Tabla 3.1). Para las muestras de ceniza (*Bulk*), estos valores son similares en contenido de SiO₂ con valores de 58,43% en peso, mientras que el contenido de Na₂O y K₂O presenta valores de 3,81% y 1,71%, respectivamente (5,53% en peso de Na₂O + K₂O) (valores normalizados en base anhidra, 1 muestra; Tabla 3.1, Figura 3.1), esta distribución de muestras en composiciones andesíticas dentro del diagrama de clasificación de TAS, parece presentar similitud a la de muestras de roca total del periodo eruptivo de julio y agosto de 2006 analizadas en el trabajo de Samaniego et al. (2011) (57,97% en peso de SiO₂ y 5,66% en peso de Na₂O + K₂O, 6 muestras; Figura 3.1 y 3.3 – elipses color rojo), excepto por un grupo de 3 muestras que van hacia el campo dacítico (61,40 a 65,70% en peso de SiO₂ y 6,33 a 7,27% en peso de Na₂O + K₂O, 3 muestras; Figura 3.1).

Por otra parte, las muestras de vidrio de la matriz muestran composiciones que al ser trazadas en un diagrama de clasificación de TAS se clasifican en el campo dacítico y traquidacítico presentando valores entre 62,87 a 67,66% en peso de SiO₂ y 6,50 a 7,90% en peso de Na₂O + K₂O (30 muestras; Figura 3.1), de entre ellas se han exceptuado 4 muestras, una clasificada en el campo riolítico (70,96 wt. % de SiO₂ y 7,66 wt. % de Na₂O + K₂O) y tres que alcanzan de manera dispersa los valores más altos de Na₂O + K₂O (63,85 a 66,38 wt. % de SiO₂ y 8,65 a 9,15 wt. % de Na₂O + K₂O). Cuando se comparan estos datos con las muestras de vidrio volcánico de escorias y piedra pómez de las fases eruptivas de marzo y julio de 2013 analizadas texturalmente en el trabajo de titulación de Pazos G. (2022), se observa que estas abarcan rangos más amplios de Na₂O + K₂O y se clasifican de manera predominante dentro del campo traquidacítico y en menor proporción en el campo dacítico (61,54 a 68,64% en peso de SiO₂ y 6,06 a 8,93% en peso de Na₂O + K₂O; Figura 3.1).

De manera general, el conjunto mineralógico principal se compone de plagioclasa, ortopiroxeno, clinopiroxeno y en menor número cristales de olivino; estos análisis

conducen con los resultados presentados por Samaniego et al., 2011 y Battaglia et al., 2019 donde también se describe la presencia de magnetita dentro de la mineralogía principal de los productos eruptivos del volcán Tungurahua.

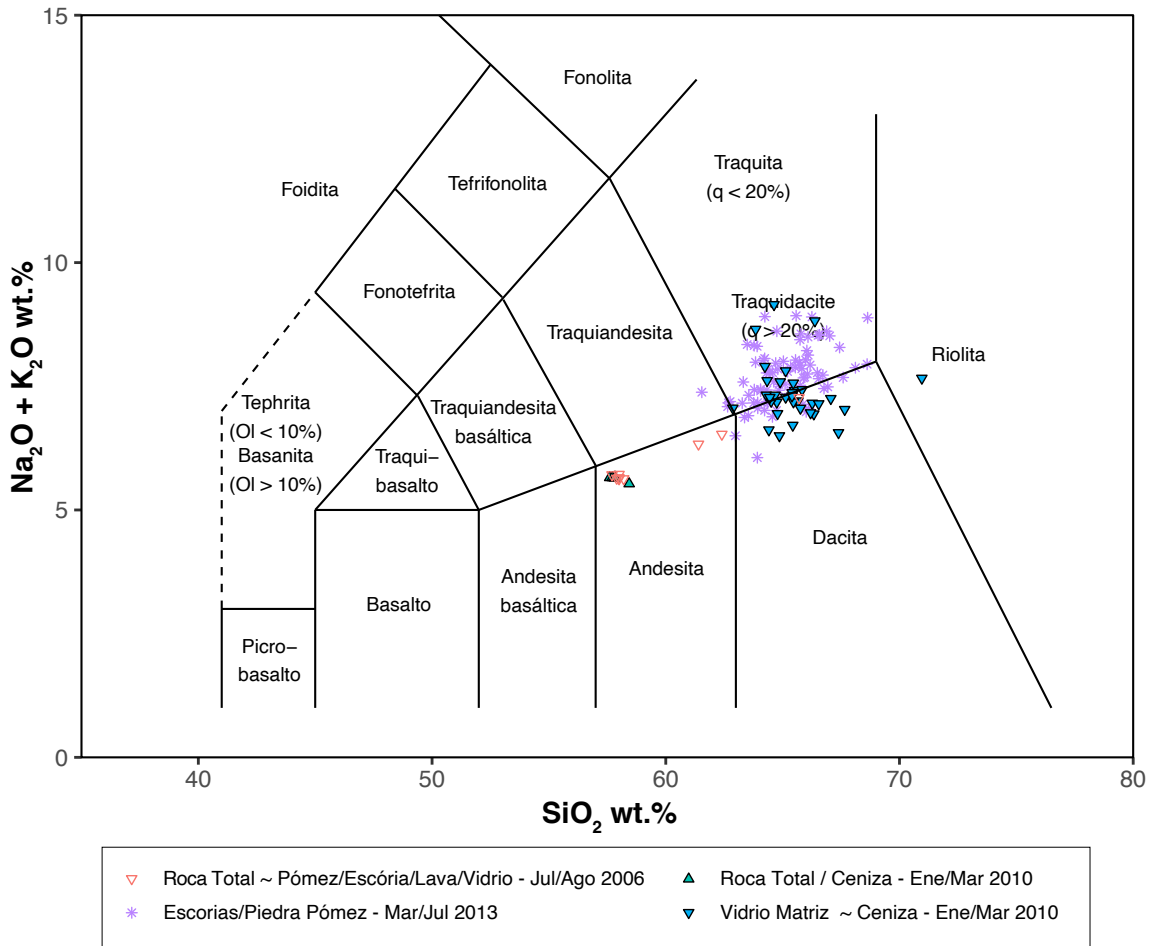


Figura 3.1. Clasificación geoquímica de productos de erupción del Tungurahua (roca total y ceniza) del periodo eruptivo de enero a marzo del 2010, marzo y julio de 2013 (Pazos G. 2022) y julio y agosto de 2006 (Samaniego et al., 2011).

Tabla 3.1. Análisis seleccionados de roca total y ceniza a granel de productos de erupción del Tungurahua de enero a marzo del 2010.

MUESTRA	MAN-ENE-10-6	MAN-ENE-10-12	MAN-FEB-10-6	MAN-FEB-10-24	CAH-MAR-10-7
FECHA DE RECOLECCIÓN	6/1/10	12/1/10	6/2/10	24/2/10	7/3/10
LUGAR DE RECOLECCIÓN	Manzano	Manzano	Manzano	Manzano	Cahuají
FASE	B	C	E	E	F
MUESTRA	Roca Total	Roca Total	Roca Total	Ceniza (Bulk)	Roca Total

<i>SiO₂ (Wt. %)</i>	57,60%	57,71%	57,80%	58,43%	57,83%
<i>TiO₂ (Wt. %)</i>	0,86%	0,89%	0,88%	0,84%	0,88%
<i>Al₂O₃ (Wt. %)</i>	16,53%	16,48%	16,68%	16,27%	16,84%
<i>Fe₂O₃* (Wt. %)</i>	7,40%	7,41%	7,25%	7,47%	7,17%
<i>Mn₂O₃ (Wt. %)</i>	0,24%	0,24%	0,24%	0,13%	0,24%
<i>MgO (Wt. %)</i>	4,74%	4,71%	4,55%	4,63%	4,43%
<i>CaO (Wt. %)</i>	6,78%	6,72%	6,78%	6,46%	6,77%
<i>Na₂O (Wt. %)</i>	3,92%	3,90%	3,91%	3,81%	3,93%
<i>K₂O (Wt. %)</i>	1,73%	1,75%	1,74%	1,72%	1,73%
<i>P₂O₅ (Wt. %)</i>	0,19%	0,19%	0,18%	0,24	0,18%
TOTAL	100%	100%	100%	100%	100%

Geoquímica de las fases eruptivas

Para la interpretación de resultados se tomó a consideración las fases y parámetros definidos por Battaglia et al., 2019 para el periodo eruptivo de enero a marzo de 2010 del volcán Tungurahua; de entre ellas, los datos obtenidos para este estudio (Anexo II) describen las fases B, E y F y sus características geoquímicas se definen a continuación:

Fase B – 03 a 10 de enero de 2010

Se presenta como una de las fases con mayor variación geoquímica con contenidos de SiO₂ entre 64,30 a 70,96 wt.% en el análisis del vidrio volcánico (12 muestras), su relación negativa con ciertos óxidos como CaO, FeO, Al₂O₃ y MgO (Figura 3.3 A, B, C, D) muestra la cristalización de las fases minerales principales que componen a las muestras de ceniza tales como plagioclasas, clinopiroxenos, ortopiroxenos y olivinos.

Debido a este proceso de cristalización, la fase magmática remanente se enriquecerá en volátiles y óxidos con los que posea una relación positiva como ocurre con el K₂O, generando un incremento de la viscosidad del magma y de la presión interna la cual dará lugar a proceso de fragmentación magmática por exsolución de gas que acompañado de la baja actividad explosiva y el incremento de emisiones de SO₂ presentes durante este episodio (3073 ± 1140 t/d durante el episodio; Battaglia et al., 2019; Figura 3.8) explicarían la posible formación de un tapón o barrera reológica; es decir, se genera una zona menos permeable, más densa y viscosa en la columna magmática que produce actividad superficial estromboliana.

Otro factor importante dentro de la variación geoquímica de esta fase puede deberse a un cambio en la cristalinidad del magma, es decir, existe una distinción de color en el material vítreo debido a cambios composicionales de rango limitado en la cristalinidad que darían lugar a la predominancia de fragmentos juveniles vesiculados de color miel (> 85 %) y menor porcentaje de cristales libres, material accidental y juveniles de color oscuro (Figura 3.2).

La actividad superficial durante esta fase presentó emisiones de vapor y ceniza dominadas por material juvenil color miel que alcanzaban los 4,1 km sobre el nivel del cráter (Washington VAAC) y que incrementaban en volumen hacia el final del episodio, plumas de ceniza y fuentes piroclásticas débiles vinculadas a procesos de ventilación, incremento de episodios de tremor armónico de gran amplitud alcanzando un IAS de nivel 6 (actividad moderada – alta; Resumen Mensual Tungurahua OVT – IG – EPN, enero de 2010) y emisiones de bloques hasta alturas de 800 m snc (Acuña K., 2017). Los picos de actividad se registraron entre el 6 y 9 de enero, días en los cuales fue posible percibir bramidos y pequeñas fuentes de lava (Resumen Mensual Tungurahua OVT – IG – EPN, enero de 2010).

Fase E – 24 de enero a 24 de febrero de 2010

La fase eruptiva E se define por ser la que menor variación geoquímica presenta en comparación con las otras fases (B y F) con contenidos de sílica entre 62,87 a 66,55 wt % para el vidrio volcánico (19 muestras); su comportamiento presenta correlaciones negativas con CaO, Al₂O₃, Na₂O y MgO (Figura 3.3 A, C, D y E) y positivas con K₂O y FeO (Figura 3.3 B y F) abarcando rangos cortos de diferenciación y composiciones ligeramente más máficas que para la fase B.

Estas composiciones ligeramente más máficas que las del episodio anterior podrían ser resultado de una inyección o de la participación de un magma de composición más máfica, cuyo ascenso estaría impulsado por una despresurización magmática producto de una destrucción total o parcial del tapón o barrera reológica generada durante la fase B, y el vaciado parcial del material juvenil previamente presente en el conducto volcánico.

La liberación explosiva del gas, el incremento de componentes juveniles negros (> 85 %), vesiculados (escoriáceo) y densos y la disminución de fragmentos color miel con un reciclaje de material decreciente (Figura 3.2), así como el engrosamiento del tamaño de

grano hacia el final del episodio, mostrarían evidencia de una transición hacia un proceso eruptivo de carácter vulcaniano (Battaglia et al., 2019; Acuña 2017).

En cuanto a la actividad superficial, las emisiones de ceniza alcanzaron columnas entre 1000 a 4000 m snc (Acuña 2017) concomitantes a explosiones energéticas que se acompañan de bramidos y cañonazos. El incremento progresivo de estas explosiones significativas presenta un máximo entre el 11 y el 16 de febrero, fecha a partir de la cual existe un decremento de energía, emisiones de SO₂ (1729 ± 1272 t/d; Battaglia et al., 2019; Figura 3.8), MSA (amplitud sísmica media), así también como la ocurrencia de pequeños flujos piroclásticos primarios (Resumen Mensual Tungurahua OVT – IG – EPN, febrero de 2010). Estos factores en conjunto con actividad vulcaniana “pura” como se menciona en el informe mensual del OVT – IG – EPN del mes de febrero de 2010 y Battaglia et al., 2019, son factores indicativos de un posible cambio en la geometría del conducto volcánico o taponamiento progresivo por una disminución del suministro de magma y temperatura para finales de este episodio.

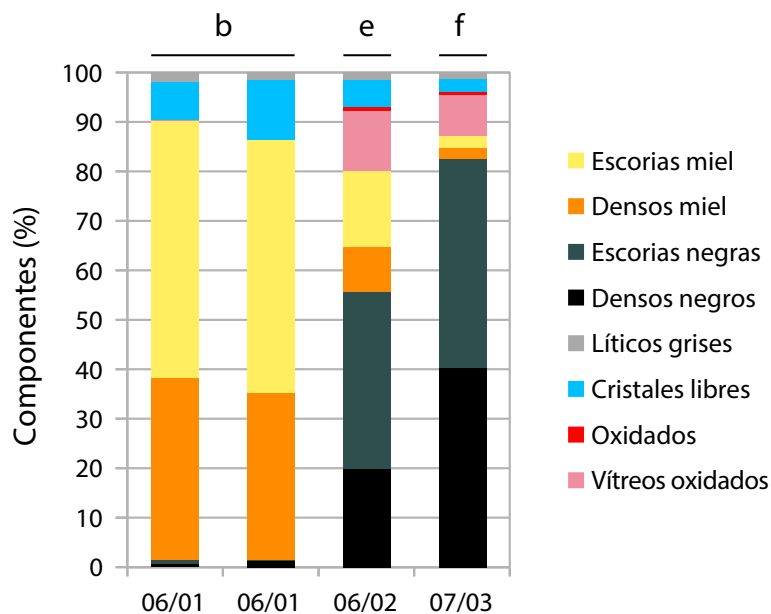


Figura 3.2. Gráfico de barras de los componentes principales de las muestras de ceniza presentes en las fases eruptivas B, E y F definidas por Battaglia et al., (2019) de la erupción de enero a marzo de 2010 del volcán Tungurahua. Modificado de: Battaglia et al., 2019.

Fase F – 25 de febrero al 07 de marzo de 2010

Esta fase corresponde al último periodo de la secuencia eruptiva y presenta composiciones máficas con rangos de sílica para el vidrio volcánico similares a las de la fase E (63,85 a 66,38 wt. % de SiO₂; 3 muestras; Figura 3.3). Si bien la cantidad de muestras vítreas, muy restringida para este episodio, no permite establecer una relación o tendencia composicional clara, se puede dilucidar a leves rasgos una relación negativa con el FeO, CaO y TiO₂ (Figura 3.3 B, D y G) y positiva con Al₂O₃, MgO, Na₂O, K₂O y P₂O₅ (Figura 3.3 A, C, E, F, y H). Estas tendencias pueden asociarse a un origen juvenil y más máfico (generado durante el episodio E) que ha tenido menor tiempo para evolucionar debido a su corta permanencia dentro del sistema.

Estas características también se ven reflejadas en las emisiones esporádicas de ceniza (1500 a 3000 m snc; Acuña 2017), las cuales presentan un incremento de material vítreo oxidado, líticos grises y componentes miel reciclados de la chimenea y una ligera disminución de componentes juveniles negros vesiculados y densos (> 80 %; Figura 3.2), así como, emisiones de gas residual (emisión promedio de 1807 ± 1394 t/d), disminución de actividad sísmica sin tremores significativos y eventos transitorios de LP's y el cese progresivo de actividad hasta su desaparición total (Battaglia et al., 2019; Figura 3.8).

A modo de comparación, las muestras pertenecientes a las fases eruptivas de marzo y julio de 2013 analizadas en los trabajos de titulación de Narváez D. (2014) y Pazos G. (2022) han sido graficadas en el diagrama de Harker para elementos mayores junto con los datos del presente estudio. Los resultados muestran composiciones homogéneas para el vidrio de los productos volcánicos emitidos en ambos periodos (marzo y julio de 2013 y enero a marzo de 2010) por el volcán Tungurahua con valores de 61,54 a 70,96 wt. % de SiO₂ (114 muestras; Figura 3.3). En cuanto a la relación del contenido de sílica versus el contenido en peso de elementos mayores, ambas bases de datos parecen seguir un comportamiento general similar con tendencias inversamente proporcionales para el caso del Al₂O₃, FeO, MgO, CaO y Na₂O (Figura 3.3 A, B, C y D) y directamente proporcionales para el K₂O y TiO₂ (Figura 3.3 E y F).

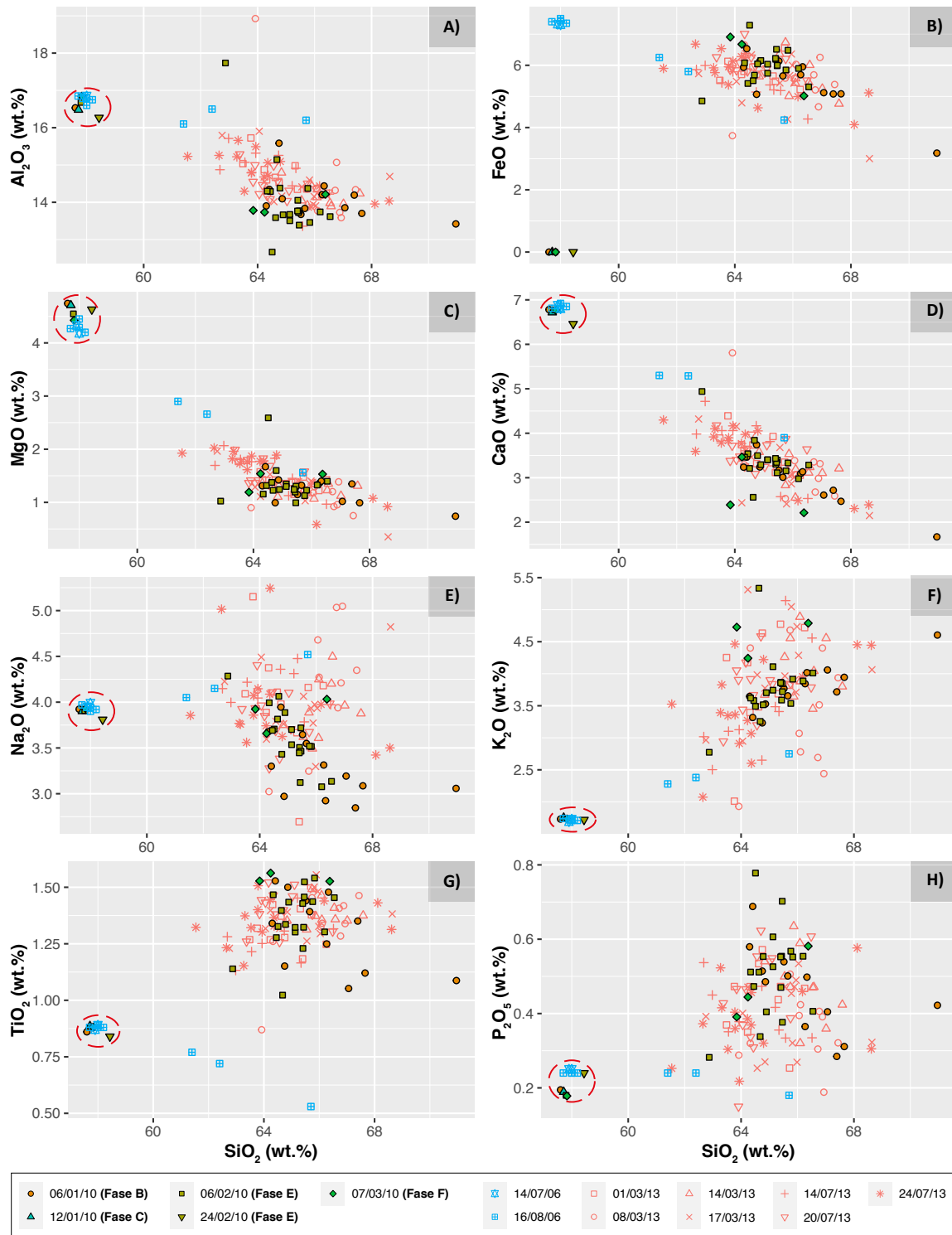


Figura 3.3. Diagramas de Harker con elementos mayores seleccionados con respecto al contenido de sílica (SiO_2) con muestras del análisis de roca total (círculo rojo) y vidrio volcánico de cenizas del periodo eruptivo de enero a marzo de 2010, escorias y piedra pómez de las fases eruptivas de marzo y julio de 2013 (Pazos G. 2022) y andesitas del periodo eruptivo de julio y agosto de 2006 (Samaniego et al., 2011) del volcán Tungurahua. Las muestras de vidrio volcánico de enero a marzo de 2010 han sido clasificadas de acuerdo con

las fases eruptivas determinadas por Battaglia et al., (2019) e identificadas durante este estudio (Fase B, E y F).

Caracterización de los componentes mineralógicos

La ceniza producida durante la erupción de enero a marzo de 2010 del volcán Tungurahua posee variaciones en cuanto al contenido y forma que poseen los fenocristales y microlitos de plagioclasa, clinopiroxeno y ortopiroxeno.

La ceniza de la fase B se caracteriza por presentar fenocristales de gran tamaño ($> 50 \mu\text{m}$) subhédricos a euhédricos con zonaciones (Figura 3.6) que predominan en la plagioclasa y en menor cantidad en el piroxeno, sus rangos de composición ubican estas muestras minerales dentro del sistema Or-Ab-An en campos que abarcan desde la labradorita hasta la andesina en el caso de los fenocristales de plagioclasa (An_{45-62} , Ab_{36-51} , Or_{2-7} ; Figura 3.4), y un campo más restringido de labradorita para los microlitos (An_{54-58} , Ab_{40-43} ; Or_{2-3} ; Figura 3.4); por otra parte, en el caso del ortopiroxeno y clinopiroxeno las muestras son más restringidas para esta fase eruptiva clasificando tanto a fenocristales como microlitos en el sistema Wo-En-Fs en los campos de enstatita y augita, respectivamente (Wo_{4-5} , En_{65-69} , Fs_{27-31} ; Wo_{37-39} , En_{43-44} , Fs_{17-20} , respectivamente; Figura 3.5 B y D).

La fase E, a su vez, presenta fenocristales de tamaño aun mayor que para la fase anterior ($> 100 \mu\text{m}$), con formas predominantemente subhédricas y en menor proporción euhédricas y zonaciones presentes solo en ciertos cristales de plagioclasa y piroxeno. Su composición a diferencia de la fase B tiende a ser mucho más amplia a pesar de que se clasifica dentro del sistema Or-Ab-An en los mismos campos minerales de labradorita a andesina a los fenocristales (An_{45-67} , Ab_{32-52} , Or_{1-5} ; Figura 3.4) y labradorita a los microlitos (An_{52-57} , Ab_{41-45} , Or_{2-3} ; Figura 3.4); así también, en el sistema Wo-En-Fs el comportamiento de las muestras de ortopiroxeno genera dos concentraciones distintas, una con menor contenido de Fs (Wo_{4-10} , En_{63-71} , Fs_{24-27} ; Figura 3.5 B y D, elipse naranja) y otra con mayor contenido de Fs (Wo_{3-5} , En_{64-67} , Fs_{29-31} ; Figura 3.5 B y D, elipse roja), ambas localizadas en el campo de la enstatita; en el caso del clinopiroxeno, las muestras parecen presentar una mayor dispersión entre sí, sin concentraciones claras pero con ubicación en el campo de la augita.

Para esta fase eruptiva, es posible observar en las imágenes de electrones retrodifusos (Figura 3.6) que las muestras de ceniza parecen presentar un mayor volumen de microlitos y microfenocristales en la matriz vítrea que la fase B.

Diagrama Ternario - Sistema Or–Ab–An

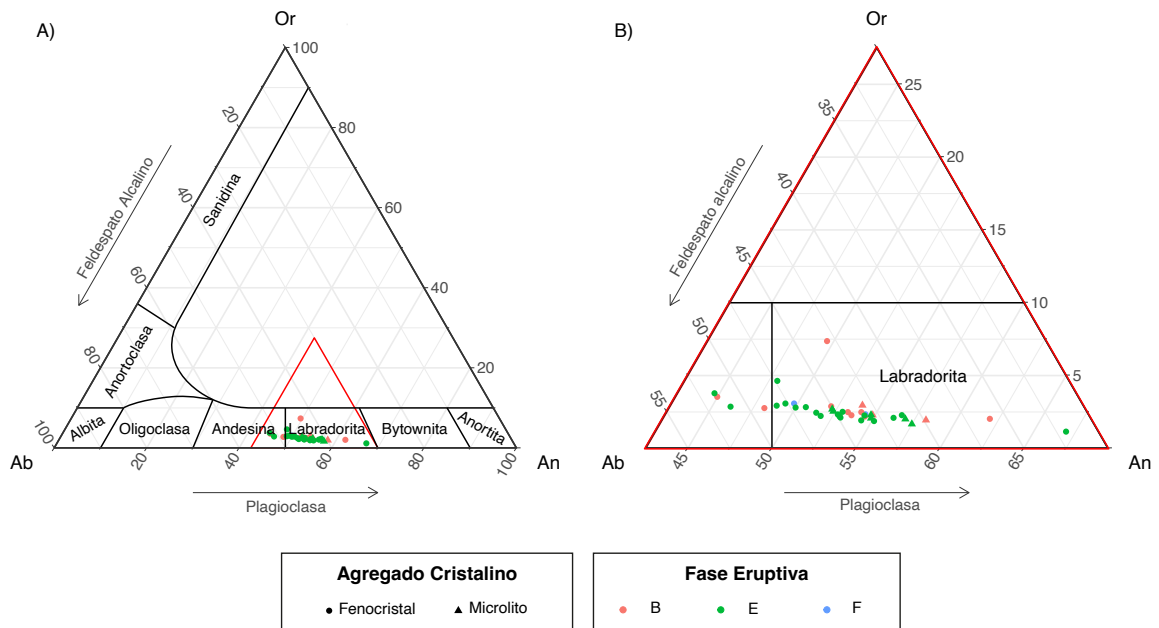
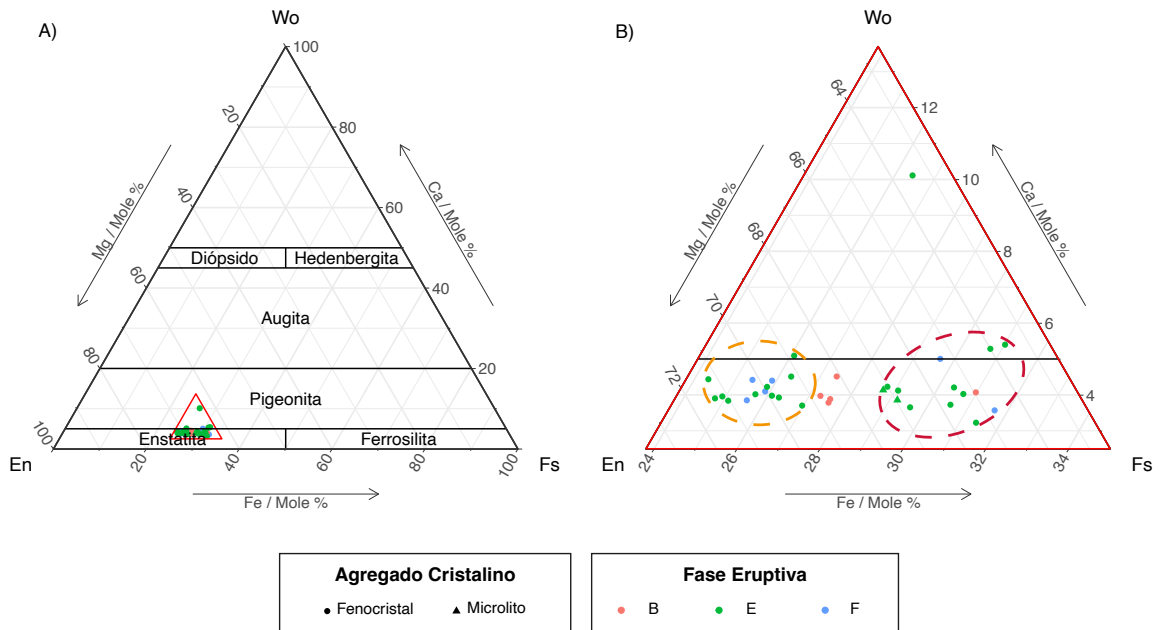


Figura 3.4. Diagrama ternario de clasificación para plagioclasas. A) Proyección de 39 muestras de plagioclasa en el sistema ternario Or-Ab-An. B) Ampliación de la Figura A). Las muestras de plagioclasa de enero a marzo de 2010 han sido clasificadas de acuerdo con las fases eruptivas determinadas por Battaglia et al., (2019) e identificadas durante este estudio (Fase B, E y F) y el agregado cristalino analizado para cada muestra (fenocristal o microlito).

Por último, la fase F posee una gran similitud a la fase E en cuanto al tamaño, forma y zonación cristalina, una de las distinciones clave para esta fase se enfoca en la proporción volumétrica de los microlitos y microfenocristales, ya que a diferencia de la anterior fase, este parece presentar visualmente un incremento de ellos en la matriz vítrea de los granos de ceniza analizados mediante imágenes de electrones retrodifusos (Figura 3.6). Por otra parte, la composición de los minerales de plagioclasa y piroxeno de las cenizas de este episodio también arroja valores ligeramente más altos para su clasificación en los sistemas ternarios Or-Ab-An y Wo-En-Fs que los de la fase E a pesar de que su clasificación ubica dentro del mismo campo mineral de labradorita a las muestras de plagioclasa (An_{50-56} , Ab_{42-47} , Or_{2-3} ; sistema Or-Ab-An; Figura 3.4) y enstatita – augita a las muestras de ortopiroxeno y clinopiroxeno, respectivamente (Wo_4-5 , En_{65-71} , Fs_{26-32} ; Wo_{39} , En_{43} , Fs_{18} , respectivamente; sistema Wo-En-Fs; Figura 3.5 B y D). El corto intervalo de reposo entre erupciones y la composición similar que poseen las muestras a la fase E tanto del vidrio como de los cristales confirman una escala de cristalización más corta entre el episodio E y F y una rápida salida del sistema como se había mencionado anteriormente.

Diagrama Ternario - Sistema Wo-En-Fs

Ortopiroxeno



Clinopiroxeno

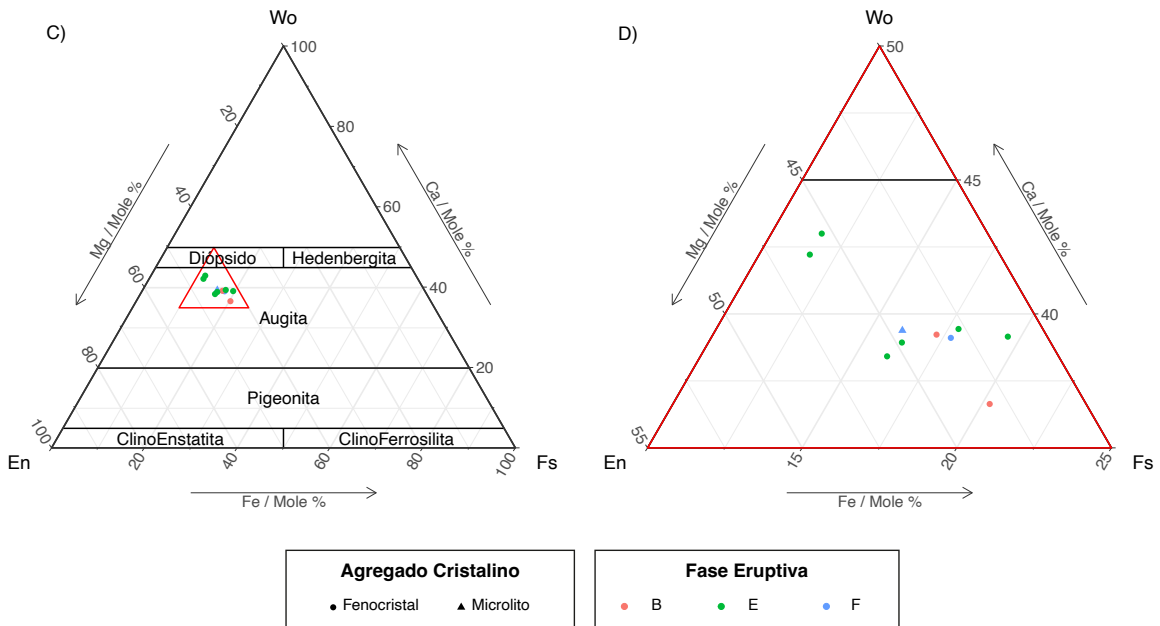


Figura 3.5. Diagrama ternario de clasificación para ortopiroxenos y clinopiroxenos. A) Proyección de 34 muestras de ortopiroxeno en el sistema ternario Wo-En-Fs, B) Ampliación de la Figura A), C) Proyección de 11 muestras de clinopiroxeno en el sistema ternario Wo-En-Fs, D) Ampliación de la Figura C). Las muestras de piroxeno de enero a marzo de 2010 han sido clasificadas de acuerdo con las fases eruptivas determinadas por Battaglia et al., (2019) e identificadas durante este estudio (Fase B, E y F) y los cristales analizados para cada muestra (fenocristal o microlito).

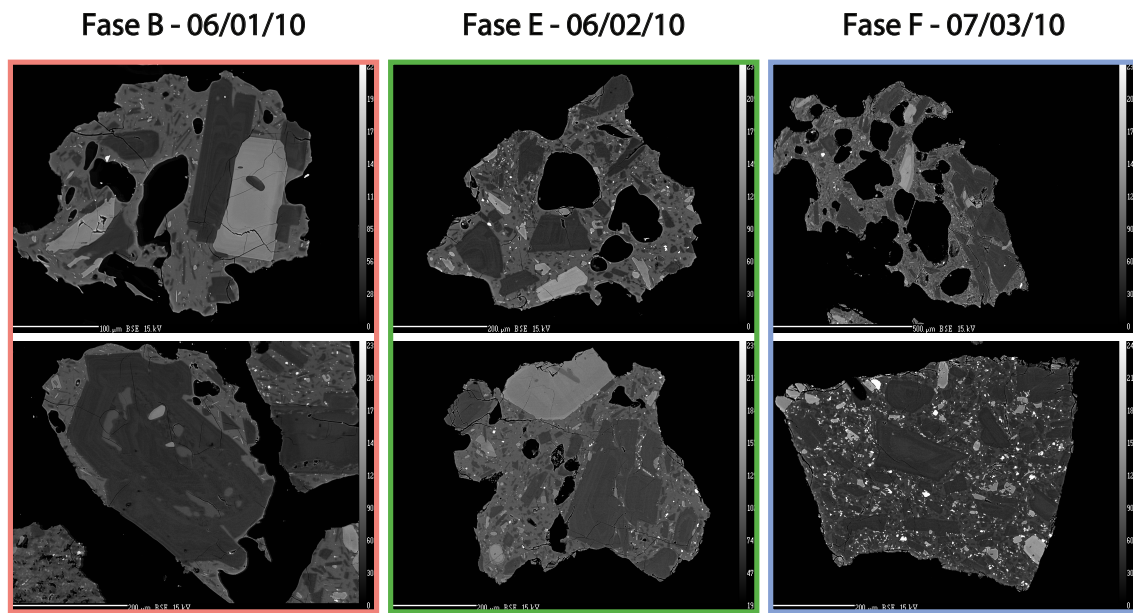


Figura 3.6. Imágenes de electrones retrodifusos (BSE) de tipos representativos de escorias y partículas vítreas macrovesiculadas, microvesiculadas y densas de tonalidad negra y miel. Los piroclastos han sido etiquetados de acuerdo con su fase eruptiva y fecha de recolección, en ellas es posible observar zonaciones minerales en fenocristales subhédricos a euhédricos de plagioclasa (cristales gris oscuro) y piroxeno (cristales plomo claro). Escala: Fase B-arriba: 100 μm , abajo: 200 μm ; Fase E-arriba y abajo: 200 μm ; Fase F-arriba: 500 μm , abajo: 200 μm . Se observa el incremento progresivo de microlitos desde B hacia F, especialmente para el material denso.

De manera general, es importante recalcar que la población de microlitos para las tres fases eruptivas está dominada volumétricamente por labradorita y en menor cantidad por enstatita y augita, este caso la composición más limitada de las muestras de microlitos indicaría que sus fases minerales comprenden el último equilibrio químico del magma antes de que este haya logrado un enfriamiento por completo. Así mismo, el alto contenido de K_2O (3,84 a 5,33 wt. %; 33 muestras) y bajo contenido de MgO (1,30 a 0,74 wt. %; 33 muestras) en las muestras de vidrio volcánico, pueden ser indicativos de un fraccionamiento importante producido dentro de la cámara magmática o el conducto, previo a su extrusión.

Por otra parte, debido a que la plagioclasa y el piroxeno son las fases minerales más abundantes dentro de las muestras de ceniza del periodo eruptivo de enero a marzo de 2010 del volcán Tungurahua, y en general en las muestras del Tungurahua, resulta

interesante verificar si existe una relación entre los parámetros como el contenido de anortita o magnesio con elementos mayores como el SiO_2 , Cr_2O_3 y FeO .

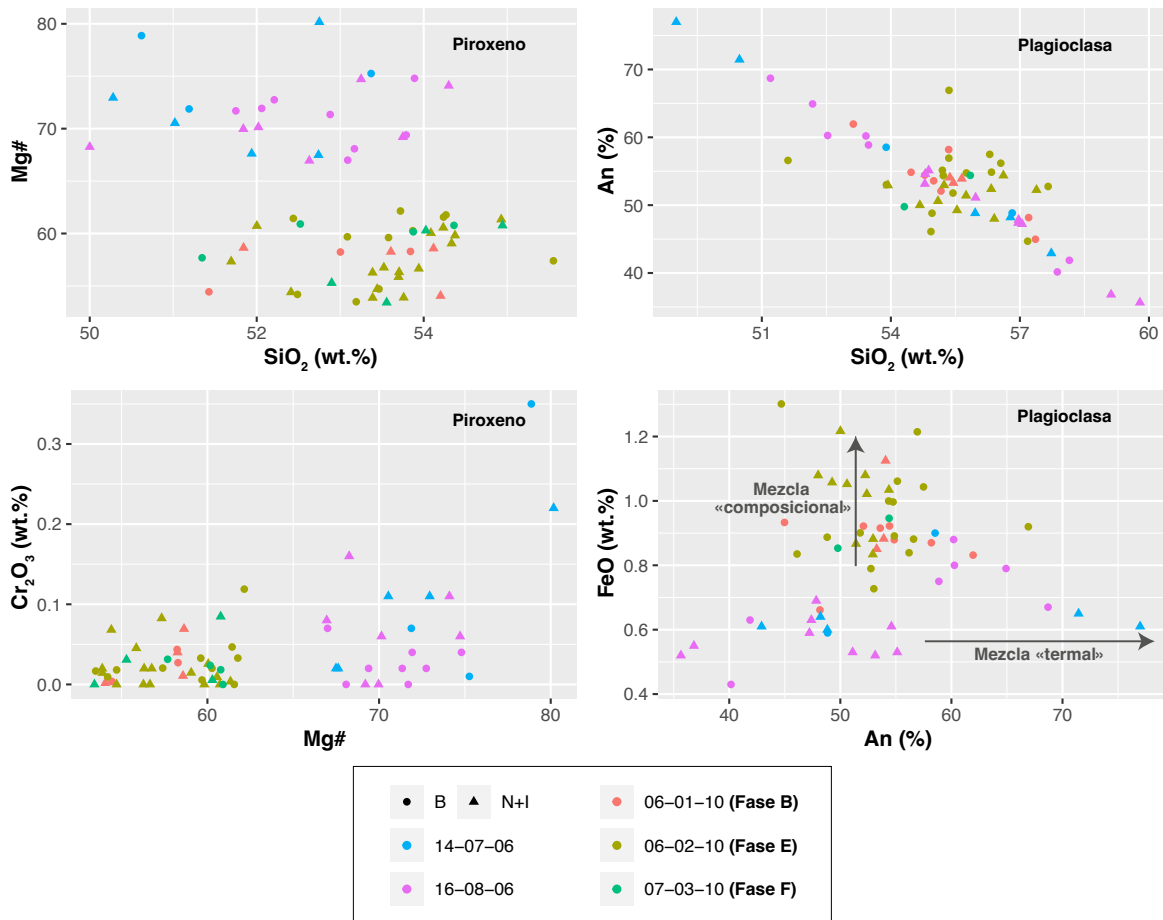


Figura 3.7. A) Composiciones de plagioclasa graficados como An (mol. %) versus FeO (wt. %) y SiO_2 (wt.%) versus An (mol. %). B) Composiciones de piroxeno graficados Mg # versus Cr_2O_3 (wt.%) y SiO_2 (wt.%) versus Mg #. Las muestras de plagioclasa y piroxeno de enero a marzo de 2010 han sido clasificadas de acuerdo con su fecha de recolección y las fases eruptivas determinadas por Battaglia et al., (2019) que han sido identificadas durante este estudio (Fase B, E y F), además de la zona de análisis de cada agregado cristalino (B: bordes; N+1: núcleos e interiores).

Como es posible observar en la Figura 3.7, el diagrama de composición de plagioclasa An (mol. %) versus FeO (wt. %), muestra una distribución general de datos en la que existe un incremento de FeO (wt. %) sin una variación importante en el contenido de An (An_{45-67} ; 38 muestras) sugiriendo un escenario de mezcla composicional; este comportamiento parece ser más claro para las muestras de 2010 y en particular de la fase E cuyos bordes parecen predominar en contenidos moderados y en menor proporción contenidos altos de FeO (0,73 a 1,30 en peso de FeO , 15 muestras), mientras que los núcleos e interiores tienden

a evolucionar desde contenidos moderados a altos de FeO (0,83 a 1,22 wt.% FeO; 11 muestras). Por otro lado, en lo que respecta a las fases B y F, las variaciones principales ocurren el contenido de anortita de las muestras (Fase B – B: 44,97 a 61,95 mol. % de An; N+I: 53,27 a 54,07 mol. % de An; Fase F – B: 49,77 a 54,39 mol. % de An), mientras que tanto los bordes como núcleos e interiores de los agregados cristalinos se agrupan en composiciones moderadas de FeO (Fase B – B: 0,66 a 0,93 wt. % de FeO; N+I: 0,85 a 1,13 wt. % de FeO; Fase F – B: 0,85 a 0,95 wt. % de FeO). En este caso, las variaciones composicionales de FeO más marcadas para el episodio E que para los episodios B y F, reflejarían la influencia de una recarga magmática más máfica dentro de la cámara. Estos resultados difieren de los datos analizados en el estudio de Samaniego et al. (2011) para muestras del periodo eruptivo de julio y agosto de 2006, los cuales reflejan un comportamiento inverso con un incremento progresivo en el contenido de An (mol. %) sin un aumento proporcional de Fe, indicativo de un proceso de mezcla térmica dominante.

El diagrama de composición de SiO₂ en la plagioclasa versus An (mol. %) también muestra comportamientos que difieren entre ambos grupos de datos; en el caso de las muestras de plagioclasa del periodo eruptivo de julio y agosto de 2006 los datos presentan una buena correlación negativa, es decir, el contenido de anortita disminuye a medida que incrementa el SiO₂, por el contrario, las muestras del periodo eruptivo de enero a marzo de 2010 parecen agruparse dentro de un rango de composición de An y SiO₂ específico (An₄₅₋₆₇ y 51,61 a 57,66 wt. % de SiO₂; 38 muestras) sin tendencias específicas para cada fase por individual y generando una dispersión de los datos.

En los diagramas de composición de Mg# en el piroxeno versus Cr₂O₃ y SiO₂, el parámetro que define y distingue el comportamiento de las muestras de ambos periodos eruptivos es su Mg#; para ambos casos tanto el contenido de Cr₂O₃ (0 a 0,12 wt. % de Cr₂O₃, 42 muestras – periodo eruptivo enero a marzo de 2010; 0 a 0,16 wt. wt. % de Cr₂O₃, 21 muestras – periodo eruptivo julio y agosto de 2006) como de SiO₂ (51,35 a 55,55 wt. % de SiO₂, 42 muestras – periodo eruptivo enero a marzo de 2010; 50 a 54,3 wt. wt. % de SiO₂, 21 muestras – periodo eruptivo julio y agosto de 2006) parece no presentar grandes variaciones, mientras que el Mg# para las muestras del periodo eruptivo de julio y agosto de 2006 es mayor (Mg#_{67 – 75}; 21 muestras) que el de las muestras emitidas durante del periodo de enero a marzo de 2010 (Mg#_{53 – 62}; 42 muestras).

Finalmente, la Figura 3.8 a modo de comparación muestra una serie temporal en el que se evidencian los cambios de los parámetros de vigilancia (DVMD, SO₂, número de

explosiones, energía de explosión y amplitud sísmica acumulada diariamente) para las 6 fases definidas y caracterizadas en el trabajo de Battaglia et al. (2019) del periodo eruptivo entre enero y marzo del 2010 del volcán Tungurahua, en la parte inferior se generaron diagramas de caja con los promedios y desviación estándar de los principales parámetros geoquímicos analizados en los minerales del presente estudio (contenido de SiO₂, anortita, Mg# y la temperatura calculada por medio de geotermómetros) para las fases eruptivas B, E y F.

A partir de ellos es posible inferir que el contenido de anortita en las muestras de plagioclasa parece no presentar grandes rangos de variación entre un episodio y otro; en cuanto al Mg# en las muestras de piroxeno este parece incrementar mientras que el contenido de sílice presenta un comportamiento inverso disminuyendo hacia el final del periodo eruptivo.

Condiciones de presión – temperatura pre-eruptivas

Complementariamente a la información que pueden proporcionar los datos geoquímicos de la ceniza, de manera más limitada la composición de las muestras permite obtener un esbozo sobre las condiciones pre-eruptivas que rigieron durante el episodio eruptivo. En él, las asociaciones entre pares minerales o el desarrollo de cierto mineral en equilibrio con el magma (*melt*) pueden ser de gran ayuda al momento de comprender la historia y/o evolución de un episodio eruptivo gracias al estudio de las condiciones de temperatura y/o presión que han regido a lo largo del mismo.

Para el desarrollo de este trabajo se tomó a consideración el geotermobarómetro de dos piroxenos y el de plagioclasa – vidrio cuya formulación ha sido recopilada por Putirka (2008) con enfoque en sistemas volcánicos.

Las restricciones consideradas para los resultados obtenidos en el análisis del geotermómetro de plagioclasa – vidrio fueron que estos cumplieran con:

1. los valores establecidos para el coeficiente K_D de la prueba de equilibrio para la relación (Ab-An) entre la matriz vítrea y el mineral ($T > 1050\text{ °C} = 0.1 \pm 0.11$; $T < 1050\text{ °C} = 0.25 \pm 0.05$; Putirka, 2008); y
2. el debido cuidado en la estimación de contenido de agua ya que pueden provocar cambios y/o errores de $\pm 38\text{ °C}$ en el cálculo de la temperatura por cada $\pm 1,0\text{ wt. \%}$ de H₂O (Putirka 2008).

Por lo consiguiente, para el análisis de 19 pares adyacentes en equilibrio de bordes de plagiocasa y vidrio se fijaron condiciones de contenido de agua entre 2,5 y 3 wt. % y presiones magmáticas de aproximadamente 200 MPa (establecidas en base a los análisis de composición normativa y los valores de Samaniego et al., 2011). De los 19 pares analizados, 18 cumplieron con las restricciones previamente establecidas y mostraron una evolución magmática a temperaturas promedio de $961,3 \pm 16$ °C para todo el episodio eruptivo.

Al analizar estos cambios de temperatura por fases eruptivas, los resultados muestran que la fase B obtuvo una temperatura estimada de 961 ± 12 °C, la fase E una temperatura estimada de 962 ± 16 °C y la fase F una temperatura estimada de 955 ± 11 °C. Debido a que los 3 valores de temperatura se encuentran en rangos de error similares y la variación entre ellas no es significativa, se ha interpretado que la temperatura de evolución magmática parece mantenerse en equilibrio a lo largo de todo el episodio eruptivo, con una posible disminución lenta y progresiva de la temperatura a final de este, lo cual podría vincularse al cese de actividad volcánica (Figura 3.8b). Esta temperatura es equivalente a la obtenida por Samaniego et al. (2011) para el magma andesítico de la erupción de 2006, siendo esta de 964 ± 26 °C.

En cuanto al geobarómetro de dos piroxenos, los pares minerales considerados fueron seleccionados en base a cristales de ortopiroxeno y clinopiroxeno que permanecían en contacto, patrones de zonación química similar y bordes con formas preferentemente euhedrales; así también, los resultados obtenidos debían cumplir con el valor del coeficiente K_D de la prueba de equilibrio para la relación (Fe-Mg) entre el ortopiroxeno y clinopiroxeno (1.09 ± 0.14 ; Putirka, 2008). En este caso, el número de relaciones establecidas entre pares minerales resultan deficientes para establecer y describir la temperatura de cada fase estudiada por individual, por lo que de manera general la temperatura estimada obtenida es de 1007 °C para todo el episodio eruptivo ($n = 5$ pares), idéntica a la temperatura obtenida por Samaniego et al. (2011) en base a los pares de piroxenos en equilibrio. Por otra parte, igual que en Samaniego et al. (2011), a comparación de la temperatura obtenida por medio de la formulación de la relación plagioclasa – vidrio, este valor resulta ser más alto por lo que los autores proponen que esto puede ser indicativo de fases tempranas de cristalización para los piroxenos.

Ciertos análogos experimentales que usan condiciones composicionales experimentales similares a las del vidrio de la matriz de la ceniza de este estudio, como el modelo de solubilidad de Moore et al. (1998) (64 a 65 wt. % de SiO_2 ; 3 – 4 wt. % H_2O), sugieren que los magmas del volcán Tungurahua pueden haber evolucionado en condiciones de

subsaturación de agua. Asimismo, estudios en productos eruptivos de periodos anteriores (julio y agosto de 2006) como el de Samaniego et al. (2011), ya mencionado, y Andújar et al. (2017), utilizan dos métodos distintos para el cálculo de las condiciones pre – eruptivas (geotermobarómetro de plagioclasa – vidrio y de dos piroxenos y experimentos de cristalización, respectivamente), obteniendo en ambos casos temperaturas entre 950 a 1000 °C para los magmas del volcán Tungurahua; por otra parte, las estimaciones del contenido de agua para ambos estudios difiere, en el estudio de Samaniego et al. (2011) el contenido de agua utilizado en los geotermobarómetros está fijado al 3 wt. %, mientras que en el estudio de Andújar este valor incrementa a 5 – 6 wt. % de H₂O, si bien este incremento en la estimación de agua puede provocar cambios y/o errores de ± 38 °C por cada ±1,0 wt. % de H₂O como se había mencionado anteriormente, los autores indican que los magmas que residen en el reservorio superior del volcán Tungurahua (del que provendrían los productos volcánicos de este estudio) presentaron temperaturas y contenidos de agua menores, además de estar más desgasificados que los del reservorio inferior.

De manera general, los resultados obtenidos por los geotermobarómetros indicarían que los magmas del Tungurahua han evolucionado en condiciones de temperatura entre 950 a 1000 °C y contenidos de agua menores a 4% en peso, lo cual se corroboraría con el nulo contenido de anfíboles en los productos volcánicos del Tungurahua de la fase de enero a marzo de 2010.

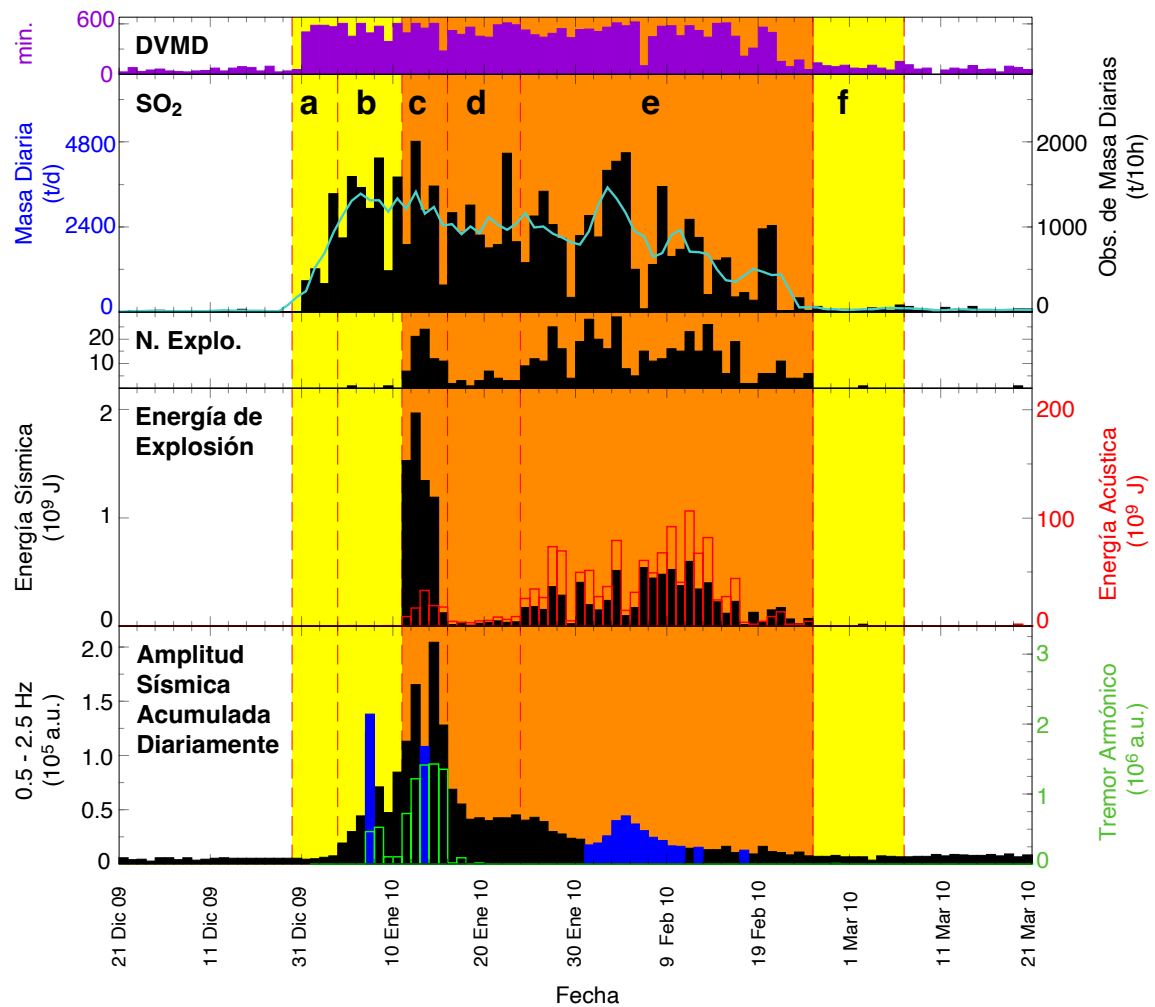


Figura 3.8a. Comparación de series temporales geofísicas. Las líneas punteadas de color rojo delimitan el inicio y final de 6 fases eruptivas (a) a (f), descritos en el estudio de Battaglia et al. (2019) mientras que los periodos de baja (LEA) y alta (HEA) actividad explosiva se distinguen por fondos de color amarillo y naranja, respectivamente (Battaglia et al., 2019 e Hidalgo et al., 2015). De manera general, la figura describe las variaciones temporales de 5 parámetros geofísicos (DVMD: duración de la medición válida diaria de SO_2 , masa diaria de SO_2 , número de explosiones, energía de explosión y la amplitud sísmica acumulativa diaria) a lo largo de las fases eruptivas a, b, c, d, e y f del periodo eruptivo comprendido entre enero a marzo de 2010 del volcán Tungurahua. Recuperado de: Battaglia et al., (2019).

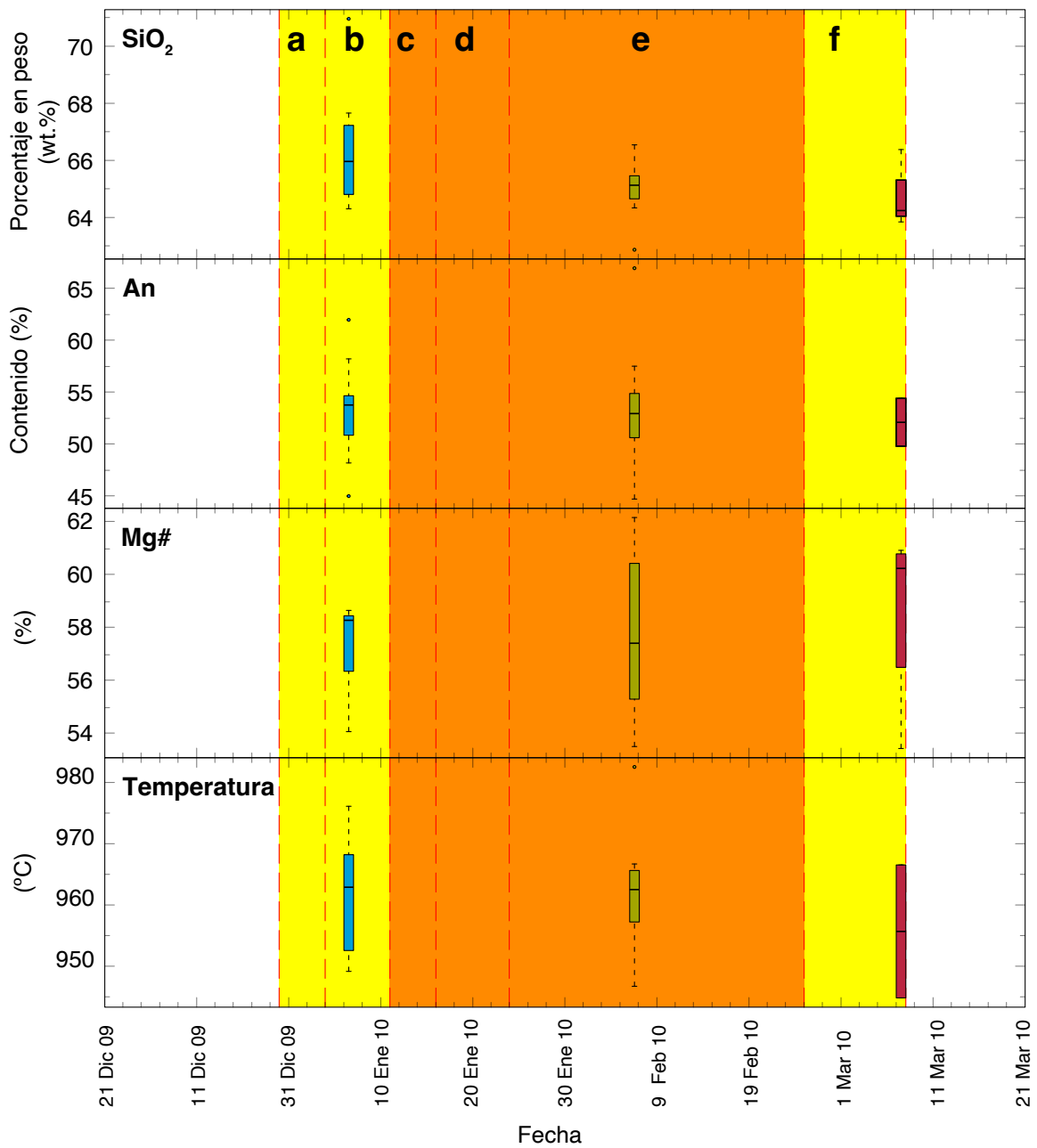


Figura 3.9b. Comparación temporal de parámetros geoquímicos analizados para las 3 fases eruptivas (Fase B ~ azul, E ~ verde y F ~ vino) identificadas en el presente estudio, de muestras de ceniza del periodo eruptivo de enero a marzo de 2010 del volcán Tungurahua. Las líneas punteadas de color rojo delimitan el inicio y final de las 6 fases eruptivas definidas en el estudio de Battaglia et al. (2019), mientras que los periodos de baja (LEA) y alta (HEA) actividad explosiva se distinguen por fondos de color amarillo y naranja, respectivamente (Battaglia et al., 2019 e Hidalgo et al., 2015). La barra de error de los diagramas de caja corresponde a la desviación estándar (2 sigma). Modificado de: Battaglia et al. (2019). SiO₂: contenido de SiO₂ en el vidrio de la ceniza, An: contenido de An en las plagioclasas, Mg#: Mg# de los piroxenos, Temperatura: temperatura estimada en base a los geobarómetros de Putirka (2008).

3.2 Conclusiones

- Los análisis geoquímicos en roca total y ceniza (*bulk*) muestran composiciones andesíticas homogéneas para todo el periodo eruptivo, mientras que los análisis del vidrio volcánico indican rangos composicionales dacíticos y traquidacíticos más dispersos y amplios.
- El análisis de elementos mayores de las muestras vítreas distingue composicionalmente 3 de las 6 fases eruptivas clasificadas previamente en el trabajo de Battaglia et al. (2019), estas corresponden a las fases B, E y F y se distinguen entre sí por la variación geoquímica que presenta cada una siendo la fase B la que mayor contenido de sílica posee (64,30 a 70,96 wt.% de SiO₂) y la fase E la que menor contenido presenta (62,87 a 66,55 wt % de SiO₂). Esto es una evolución inversa a la esperada en una diferenciación magmática en sistema cerrado y por lo tanto podría ser indicativo de un pulso de magma más máfico ingresando al sistema durante esta fase eruptiva, en acuerdo con lo propuesto por Battaglia et al. (2019) y Acuña (2017) en base a parámetros geofísicos y a los componentes de la ceniza.
- La mayor variación geoquímica que presenta la fase B ha sido interpretada como resultado de un proceso de cristalización importante el cual genera un incremento de viscosidad del magma e impulsa un proceso fragmentación magmática por exsolución de gas. Este efecto produce un incremento de las emisiones de SO₂ que acompañado de una baja actividad explosiva (actividad estromboliana) explican la formación de una barrera reológica y el estrechamiento progresivo del conducto volcánico.
- Para la fase E, el contraste que presenta con la variación geoquímica de la fase B muestra que las composiciones de esta fase son más máficas con rangos de diferenciación química más cortos, los mismos que pueden ser resultado de un vaciado parcial o total de la cámara magmática (una vez destruido la barrera reológica de la fase B) y una posterior mezcla composicional con un magma más máfico inyectado durante fases anteriores. Como resultado, la dinámica eruptiva transiciona a un estilo eruptivo puramente vulcaniano donde predominan componentes juveniles negros.
- En cuanto a la fase F, la poca diferenciación de las muestras y su similitud a la fase E revelan un tiempo de evolución y permanencia en el sistema más corto en comparación con las otras dos fases. Por otra parte, las observaciones superficiales

y características geofísicas de esta fase también describen el cese de la actividad volcánica.

- Las agrupaciones de agregados cristalinos indican que la población de microlitos está dominada por labradorita y en menor cantidad por enstatita y augita, además de que su composición más restringida señalaría el último equilibrio que el magma sufrió antes de un enfriamiento total. Con respecto a los fenocristales, estos se componen por labradorita, andesina, enstatita y augita.
- El diagrama de composición de plagioclasa An (mol. %) versus FeO (wt. %), muestra una distribución en los datos que marca una tendencia de mezcla composicional (rasgo que predomina en las muestras de la fase E) y que confirmarían la interpretación de una inyección y mezcla de una magma más máfico para la fase E.
- Los diagramas de composición de piroxeno Mg# versus Cr_2O_3 y SiO_2 versus Mg# distinguen a las muestras de este periodo eruptivo al ser comparadas con las muestras del periodo eruptivo de julio y agosto de 2006 por su menor contenido de magnesio.
- Las condiciones de temperatura obtenidas mediante la aplicación de los geotermobarómetros de dos piroxenos y plagioclasa-vidrio en sistemas volcánicos de Putirka (2008), coinciden con los resultados obtenidos por Samaniego et al. (2011) y Andújar et al. (2017) para el estudio de los productos volcánicos del periodo eruptivo de julio y agosto de 2006. Los valores muestran temperaturas de evolución magmática para el Tungurahua entre 950 a 1000 °C y contenidos de agua menores al 4%.
- Si bien, los resultados obtenidos por los geotermobarómetros de Putirka (2008) muestran que la temperatura parece permanecer constante a lo largo del episodio eruptivo y empieza a disminuir durante la última fase, resulta indispensable obtener información sobre las fases que no han podido ser analizadas en este estudio (fase A, C y D), debido a que si existen incrementos de temperatura, éstos podrían ser concordantes con las intrusiones y/o inyecciones magmáticas que se encargarían de calentar el sistema y que han sido interpretadas previamente por otros autores para este periodo eruptivo.

3.3 Recomendaciones

- Se recomienda que la recolección de muestras para estudios similares abarque información detallada de todas las fases del episodio eruptivo para periodos de tiempo más cortos con el fin de comprender de mejor manera la evolución temporal que presentan los parámetros que controlan la dinámica eruptiva.
- En estudios posteriores es recomendable realizar cálculos de la proporción volumétrica de microlitos y fenocristales para cada fase eruptiva de manera que complemente a la información geoquímica analizada.
- Se recomienda verificar los parámetros y condiciones experimentales bajo los que funciona cada geotermobarómetro, si bien las formulaciones pueden ser ajustables a varios grupos de datos, existen casos en los que el margen de error de temperatura y/o presión a calcular pueden disminuir si estos son aplicados a modelos naturales similares a los experimentales.
- En estudios posteriores se sugiere complementar y comparar los resultados obtenidos por medio de análisis geoquímicos con análisis texturales, morfologramométricos y modales de los productos eruptivos a estudiar con el fin de caracterizar de mejor manera a cada fase eruptiva.
- Finalmente, de manera complementaria al uso de geotermobarómetros para sistemas volcánicos, se recomienda usar el sistema ternario Qz-Ab-Or como geobarómetro con el fin de cuantificar el efecto de cristalización impulsada por descompresión en composiciones *melts* saturados de agua (Tuttle & Bowen, 1958; Cashman y Blundy, 2000).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Acuña Mondragón, K. E. (2017). Análisis de las cenizas del Tungurahua (granulométrico, de componentes y químico) en la primera fase eruptiva de 2010 (enero-marzo). (Bachelor's thesis, Quito, 2017).
- [2] Allaire, J. J. (2011). RStudio (2022.07.1+554) [Software de Ordenador]. RStudio, Inc. <https://www.rstudio.com>
- [3] Almeida, E. & Ramón, P. (1991). Las erupciones históricas del volcán Tungurahua. Boletín Geológico Ecuatoriano, 2, 89-138.
- [4] Andújar, J., Martel, C., Pichavant, M., Samaniego, P., Scaillet, B., & Molina, I. (2017). Structure of the plumbing system at Tungurahua volcano, Ecuador: insights from phase equilibrium experiments on July–August 2006 eruption products. *Journal of Petrology*, 58(7), 1249-1278.
- [5] Bablon, M., Quidelleur, X., Samaniego, P., Le Pennec, J. L., Lahitte, P., Liorzou, C., ... & Hidalgo, S. (2018). Eruptive chronology of Tungurahua volcano (Ecuador) revisited based on new K-Ar ages and geomorphological reconstructions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 357, 378-398.
- [6] Barberi, F., Coltelli, M., Ferrara, G., Innocenti, F., Navarro, J. M., & Santacroce, R. (1988). Plio-quadernary volcanism in Ecuador. *Geological Magazine*, 125(1), 1-14.
- [7] Battaglia, J., Hidalgo, S., Bernard, B., Steele, A., Arellano, S., & Acuña, K. (2019). Autopsy of an eruptive phase of Tungurahua volcano (Ecuador) through coupling of seismo-acoustic and SO₂ recordings with ash characteristics. *Earth and Planetary Science Letters*, 511, 223-232.
- [8] Brady, J., College, S., & Perkins, D. (2022, 2 mayo). Mineral Formulae Recalculation. Teaching Phase Equilibria. Recuperado de: <https://serc.carleton.edu/18592>
- [9] BREY, G. P., & Köhler, T. (1990). Geothermobarometry in four-phase lherzolites II. New thermobarometers, and practical assessment of existing thermobarometers. *Journal of Petrology*, 31(6), 1353-1378.
- [10] Bustillos J. (2010). Transición del estilo eruptivo durante las erupciones andesíticas en sistema abierto: Contribución al estudio de los depósitos de ceniza del volcán Tungurahua. Tesis de Master 2, Universidad de Nice Sophia Antipolis, Francia, 48 pp.
- [11] Bustillos, J. E., Le-Pennec, J., Samaniego, P., Eychenne, J., Troncoso, L., Ordóñez, J., & Gonza, T. (2014). Transición del estilo eruptivo durante las

- erupciones andesíticas en sistema abierto:" Contribución al estudio de los depósitos de ceniza del volcán Tungurahua-2010". *Revista Politécnica*, 33(1).
- [12] Bustillos, J., Le Pennec, J. L., & Gonza, T. (2011). VOLCÁN TUNGURAHUA: ESTUDIO MORFOLÓGICO Y TEXTURAL DE LOS DEPÓSITOS DE CENIZA EN LA FASE EXPLOSIVA DEL 2010.
- [13] Bustillos, J., Samaniego, P., Robin, C., Barba, D., Ramón, P., & Le Pennec, J. L. (2011). Las avalanchas de escombros del volcán Tungurahua. In *7mas Jornadas en Ciencias de la Tierra y Primer encuentro sobre Riesgos y Desastres*, Quito 2011.
- [14] Cashman, K. V. (1992). Groundmass crystallization of Mount St. Helens dacite, 1980–1986: a tool for interpreting shallow magmatic processes. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 109(4), 431-449.
- [15] Cashman, K. V. (2004). Volatile controls on magma ascent and eruption. Washington DC American Geophysical Union Geophysical Monograph Series, 150, 109-124.
- [16] Cashman, K. V., & Blundy, J. (2000). Degassing and crystallization of ascending andesite and dacite. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 358(1770), 1487-1513.
- [17] Cashman, K. V., & McConnell, S. M. (2005). Multiple levels of magma storage during the 1980 summer eruptions of Mount St. Helens, WA. *Bulletin of Volcanology*, 68(1), 57-75.
- [18] Couch, S., Sparks, R. S. J., & Carroll, M. R. (2003). The kinetics of degassing-induced crystallization at Soufriere Hills Volcano, Montserrat. *Journal of Petrology*, 44(8), 1477-1502.
- [19] D., & H. (2018, 24 diciembre). TAS diagram template. Stack Overflow. <https://stackoverflow.com/questions/53918035/use-a-diagram-as-background-template-in-a-plot>
- [20] D’Oriano, C., Poggianti, E., Bertagnini, A., Cioni, R., Landi, P., Polacci, M., & Rosi, M. (2005). Changes in eruptive style during the AD 1538 Monte Nuovo eruption (Phlegrean Fields, Italy): the role of syn-eruptive crystallization. *Bulletin of Volcanology*, 67(7), 601-621.
- [21] Diller, K., Clarke, A. B., Voight, B., & Neri, A. (2006). Mechanisms of conduit plug formation: Implications for vulcanian explosions. *Geophysical Research Letters*, 33(20).

- [22] Eychenne, J., & Le Pennec, J. L. (2012). Sigmoidal particle density distribution in a subplinian scoria fall deposit. *Bulletin of volcanology*, 74(10), 2243-2249.
- [23] Eychenne, J., Le Pennec, J. L., Troncoso, L., Gouhier, M., & Nedelec, J. M. (2012). Causes and consequences of bimodal grain-size distribution of tephra fall deposited during the August 2006 Tungurahua eruption (Ecuador). *Bulletin of Volcanology*, 74(1), 187-205.
- [24] Francis, P. W., & Oppenheimer, C. (1993). *Volcanoes: a planetary perspective*. Oxford University Press, Oxford, 521 pp.
- [25] Gaunt, H. E., Burgisser, A., Mothes, P. A., Browning, J., Meredith, P. G., Criollo, E., & Bernard, B. (2020). Triggering of the powerful 14 July 2013 vulcanian explosion at tungurahua volcano, Ecuador. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 392, 106762.
- [26] Ghiorso, M. S., Hirschmann, M. M., Reiners, P. W., & Kress III, V. C. (2002). The pMELTS: A revision of MELTS for improved calculation of phase relations and major element partitioning related to partial melting of the mantle to 3 GPa. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 3(5), 1-35.
- [27] 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), 1-21.
- [28] Hammer, J. E., & Rutherford, M. J. (2003). Petrologic indicators of preeruption magma dynamics. *Geology*, 31(1), 79-82.
- [29] Hammer, J. E., Cashman, K. V., & Voight, B. (2000). Magmatic processes revealed by textural and compositional trends in Merapi dome lavas. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 100(1-4), 165-192.
- [30] Hammer, J. E., Cashman, K. V., Hoblitt, R. P., & Newman, S. (1999). Degassing and microlite crystallization during pre-climactic events of the 1991 eruption of Mt. Pinatubo, Philippines. *Bulletin of Volcanology*, 60(5), 355-380.
- [31] Heap, M. J., Kolzenburg, S., Russell, J. K., Campbell, M. E., Welles, J., Farquharson, J. I., & Ryan, A. (2014a). Conditions and timescales for welding block-and-ash flow deposits. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 289, 202-209.
- [32] Heap, M. J., Lavallée, Y., Petrakova, L., Baud, P., Reuschle, T., Varley, N. R., & Dingwell, D. B. (2014b). Microstructural controls on the physical and mechanical properties of edifice-forming andesites at Volcan de Colima, Mexico. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(4), 2925-2963.

- [33] Heiken, G., & Wohletz, K. (1985). Volcanic ash. University Presses of California, Chicago, Harvard & MIT.
- [34] Hidalgo, S., Battaglia, J., Arellano, S., Steele, A., Bernard, B., Bourquin, J., ... & Vásquez, F. (2015). SO₂ degassing at Tungurahua volcano (Ecuador) between 2007 and 2013: Transition from continuous to episodic activity. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 298, 1-14.
- [35] Hollocher, K. (2004). CIPW norm calculation program. Geology Department, Union College.
- [36] Hollocher, K.T. (2005). An Excel spreadsheet for CIPW norm calculation. Department of Geology, Union College, Schenectady, NY, p.12308.
- [37] Instituto Geofísico - Escuela Politécnica Nacional. (2009, diciembre). Resumen Mensual - Actividad del Volcán Tungurahua, diciembre de 2009. Recuperado de: <https://www.igepn.edu.ec/tungurahua-informes/tung-mensuales/tung-m-2009/9032-informe-mensual-tungurahua-dic-1/file>
- [38] Instituto Geofísico - Escuela Politécnica Nacional. (2010, enero). Resumen Mensual - Actividad del Volcán Tungurahua, enero de 2010. Recuperado de: <https://www.igepn.edu.ec/tungurahua-informes/tung-mensuales/tung-m-2010/9021-informe-mensual-tungurahua-enero-5/file>
- [39] Instituto Geofísico - Escuela Politécnica Nacional. (2010, febrero). Resumen Mensual - Actividad del Volcán Tungurahua, febrero de 2010. Recuperado de: <https://www.igepn.edu.ec/tungurahua-informes/tung-mensuales/tung-m-2010/9022-informe-mensual-tungurahua-febrero-5/file>
- [40] Instituto Geofísico - Escuela Politécnica Nacional. (2010, marzo). Resumen Mensual - Actividad del Volcán Tungurahua, marzo de 2010. Recuperado de: <https://www.igepn.edu.ec/tungurahua-informes/tung-mensuales/tung-m-2010/9025-informe-mensual-tungurahua-marzo-5/file>
- [41] Jaupart, C., & Allègre, C. J. (1991). Gas content, eruption rate and instabilities of eruption regime in silicic volcanoes. *Earth and Planetary Science Letters*, 102(3-4), 413-429.
- [42] Jones, T. J., Cashman, K. V., Liu, E. J., Rust, A. C., & Scheu, B. (2022). Magma fragmentation: a perspective on emerging topics and future directions. *Bulletin of Volcanology*, 84(5), 1-8.
- [43] Le Pennec, J. L., 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(3), 1199-1214.

- [44] Le Pennec, J. L., Jaya, D., Samaniego, P., Ramón, P., Yáñez, S. M., 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(1), 70-81.
- [45] Le Pennec, J. L., Ruiz, G. A., 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*, 217, 91-103.
- [46] Le Pennec, J. L., Samaniego, P., Eissen, J. P., Hall, M., Molina, I., Robin, C., ... & Egred, J. (2005). *Los peligros volcánicos asociados con el Tungurahua*. Quito: Corporación Editora Nacional.
- [47] Marianelli, P., Sbrana, A., Métrich, N., & Cecchetti, A. (2005). The deep feeding system of Vesuvius involved in recent violent strombolian eruptions. *Geophysical research letters*, 32(2).
- [48] Martel, C., Dingwell, D. B., Spieler, O., Pichavant, M., & Wilke, M. (2000). Fragmentation of foamed silicic melts: an experimental study. *Earth and Planetary Science Letters*, 178(1-2), 47-58.
- [49] Martin, U., & Németh, K. (2006). How Strombolian is a “Strombolian” scoria cone? Some irregularities in scoria cone architecture from the Transmexican Volcanic Belt, near Volcan Ceboruco, (Mexico) and Al Haruj (Libya). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 155(1-2), 104-118.
- [50] Melnik, O., & Sparks, R. S. J. (1999). Nonlinear dynamics of lava dome extrusion. *Nature*, 402(6757), 37-41.
- [51] Melnik, O., & Sparks, R. S. J. (2002a). Dynamics of magma ascent and lava extrusion at Soufrière Hills Volcano, Montserrat. *Geological Society, London, Memoirs*, 21(1), 153-171.
- [52] Melnik, O., & Sparks, R. S. J. (2002b). Modelling of conduit flow dynamics during explosive activity at Soufrière Hills Volcano, Montserrat. *Geological Society, London, Memoirs*, 21(1), 307-317.
- [53] Melnik, O., & Sparks, R. S. J. (2005). Controls on conduit magma flow dynamics during lava dome building eruptions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110(B2).
- [54] Melnik, O., Barmin, A. A., & Sparks, R. S. J. (2005). Dynamics of magma flow inside volcanic conduits with bubble overpressure buildup and gas loss through permeable magma. *Journal of volcanology and geothermal research*, 143(1-3), 53-68.

- [55] Mercier, J. C. C., Benoit, V., & Girardeau, J. (1984). Equilibrium state of diopside-bearing harzburgites from ophiolites: geobarometric and geodynamic implications. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 85(4), 391-403.
- [56] Moore, G., & Carmichael, I. S. E. (1998). The hydrous phase equilibria (to 3 kbar) of an andesite and basaltic andesite from western Mexico: constraints on water content and conditions of phenocryst growth. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 130(3), 304-319.
- [57] Moore, G., Vennemann, T., & Carmichael, I. S. E. (1998). An empirical model for the solubility of H₂O in magmas to 3 kilobars. *American Mineralogist*, 83(1-2), 36-42.
- [58] Nakada, S., Miyake, Y., Sato, H., Oshima, O., & Fujinawa, A. (1995). Endogenous growth of dacite dome at Unzen volcano (Japan), 1993–1994. *Geology*, 23(2), 157-160.
- [59] Narváez, D. (2014). Caracterización de los dinamismos eruptivos de los períodos de actividad de marzo y julio 2013 del volcán Tungurahua, con base en el estudio morfologranulométrico, geoquímico y modal de los productos de caída. Proyecto previo a la obtención de título de ingeniero geólogo. EPN.
- [60] National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2010). Washington VAAC 2010 Volcano Ash Advisory Archive - Satellite Products and Services Division / Office of Satellite and Product Operations. Washington VAAC 2010 - Volcano Ash Advisory Archive of Tungurahua Volcano. Recuperado de: <https://www.ssd.noaa.gov/VAAC/ARCH10/archive.html#TUNG>
- [61] Oppenheimer, C., Pyle, D. M., & Barclay, J. (Eds.). (2003). Volcanic degassing. Geological Society of London.
- [62] Papike, J. J. (1974). Amphiboles and pyroxenes: Characterization of other than quadrilateral components estimates of ferric iron from microprobe data. In *Geological Society of America Abstract with Programs* (Vol. 6, pp. 1053-1054).
- [63] Patrick, M. R., Harris, A. J., Ripepe, M., Dehn, J., Rothery, D. A., & Calvari, S. (2007). Strombolian explosive styles and source conditions: insights from thermal (FLIR) video. *Bulletin of volcanology*, 69(7), 769-784.
- [64] Pazos, G. (2022). Análisis textural de los depósitos de ceniza emitidos por el volcán Tungurahua durante las fases eruptivas de marzo y julio 2013 y su relación con el dinamismo eruptivo. Trabajo de titulación previo a la obtención del título de ingeniera geóloga. EPN
- [65] Pioli, L., Erlund, E., Johnson, E., Cashman, K., Wallace, P., Rosi, M., & Granados, H. D. (2008). Explosive dynamics of violent Strombolian eruptions: the

- eruption of Parícutin Volcano 1943–1952 (Mexico). *Earth and planetary science letters*, 271(1-4), 359-368.
- [66] Putirka, K. D. (2008). Thermometers and barometers for volcanic systems. *Reviews in mineralogy and geochemistry*, 69(1), 61-120.
- [67] R (R 3.3.0+). (1993). [Software de Ordenador]. GNU. <https://www.r-project.org>
- [68] Roggensack, K., Hervig, R. L., McKnight, S. B., & Williams, S. N. (1997). Explosive basaltic volcanism from Cerro Negro volcano: influence of volatiles on eruptive style. *Science*, 277(5332), 1639-1642.
- [69] Rust, A. C., & Cashman, K. V. (2004). Permeability of vesicular silicic magma: inertial and hysteresis effects. *Earth and Planetary Science Letters*, 228(1-2), 93-107.
- [70] Rust, A. C., & Cashman, K. V. (2011). Permeability controls on expansion and size distributions of pyroclasts. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 116(B11).
- [71] Samaniego, P., Le Pennec, J. L., Robin, C., & Hidalgo, S. (2011). Petrological analysis of the pre-eruptive magmatic process prior to the 2006 explosive eruptions at Tungurahua volcano (Ecuador). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 199(1-2), 69-84.
- [72] Shea, T. (2017). Bubble nucleation in magmas: a dominantly heterogeneous process? *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 343, 155-170.
- [73] Sparks, R. S. J. (1997). Causes and consequences of pressurisation in lava dome eruptions. *Earth and Planetary Science Letters*, 150(3-4), 177-189.
- [74] Stix, J., Torres, R. C., Narváez, L., Raigosa, J. A., Gómez, D., & Castonguay, R. (1997). A model of vulcanian eruptions at Galeras volcano, Colombia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 77(1-4), 285-303.
- [75] Sugawara, T. (2001). Ferric iron partitioning between plagioclase and silicate liquid: thermodynamics and petrological applications. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 141(6), 659-686.
- [76] Taddeucci, J., Pompilio, M., & Scarlato, P. (2002). Monitoring the explosive activity of the July–August 2001 eruption of Mt. Etna (Italy) by ash characterization. *Geophysical Research Letters*, 29(8), 71-1.
- [77] Taddeucci, J., Pompilio, M., & Scarlato, P. (2004). Conduit processes during the July–August 2001 explosive activity of Mt. Etna (Italy): inferences from glass chemistry and crystal size distribution of ash particles. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 137(1-3), 33-54.

- [78] Takeuchi, S., Nakashima, S., Tomiya, A., & Shinohara, H. (2005). Experimental constraints on the low gas permeability of vesicular magma during decompression. *Geophysical research letters*, 32(10).
- [79] Tamburello, G., Aiuppa, A., Kartzas, E. P., McGonigle, A. J. S., & Ripepe, M. (2012). Passive vs. active degassing modes at an open-vent volcano (Stromboli, Italy). *Earth and Planetary Science Letters*, 359, 106-116.
- [80] Tungurahua volcano (Ecuador) update: strombolian activity. (2013, 5 abril). Volcano Discovery. Recuperado 24 de junio de 2022, de <https://www.volcanodiscovery.com/es/tungurahua/news/43725/Tungurahua-volcano-Ecuador-update-strombolian-activity.html>
- [81] Tuttle, O. F., & Bowen, N. L. (1958). Origin of granite in the light of experimental studies in the system NaAlSi₃O₈-KAlSi₃O₈-SiO₂-H₂O.
- [82] Vasseur, J., Wadsworth, F. B., Lavallée, Y., Hess, K. U., & Dingwell, D. B. (2013). Volcanic sintering: timescales of viscous densification and strength recovery. *Geophysical Research Letters*, 40(21), 5658-5664.
- [83] Wiley, J., Heath, J., & Kusserow, A. (2018). *Electron Probe Microanalysis* (2.a ed.). Essential Knowledge Briefings. Recuperado de: <https://www.essentialknowledgebriefings.com/downloads/electron-probe-microanalysis-second-edition/>
- [84] Wright, H. M., & Cashman, K. V. (2014). Compaction and gas loss in welded pyroclastic deposits as revealed by porosity, permeability, and electrical conductivity measurements of the Shevlin Park Tuff. *Bulletin*, 126(1-2), 234-247.

GLOSARIO DE ABREVIATURAS Y SIGLAS UTILIZADAS

AP	Años antes del presente
BSE	Back – scattered Electrons: Electrones retrodifusos
CDD	Dispositivo de carga acoplada
DVMD	Daily - validated measurement duration: duración de la medición válida diaria
HEA	High explosive activity: Actividad explosiva alta
IAS	Index of seismic activity: índice de actividad sísmica
IG - EPN	Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional
ka	Miles de años
kV	Kilovoltios
LEA	Low explosive activity: Actividad explosiva baja
LP's	Long period seismicity: Sismicidad de largo periodo
m snc	Metros sobre el nivel del cráter
m snm	Metros sobre el nivel del mar
m²	Metros cuadrados
Ma	Millones de años
mm	Milímetros
mol. %	Porcentaje en moles
MPa	Megapascales
MSA	Median seismic amplitudes: Amplitudes sísmicas medias
nA	Nanoamperio
°C	Grados centígrados
OVT	Observatorio del volcán Tungurahua
Pa	Pascales
SERC	Centro de Recursos de Educación Científica
t/d	Toneladas diarias
TAS	Total alkali silica
UTM	Universal transverse mercator
VAAC	Volcanic Ash Advisory Center: Centro de alerta de cenizas volcánicas
VT	Volcano-tectonic earthquakes: Sismos volcano – tectónicos
wt. %	Porcentaje en peso
µm	Micrómetros

ANEXOS

Anexo I – Códigos utilizados en el software RStudio para la elaboración de diagramas y ploteo de datos

Gráfico de muestras de piroxenos y plagioclasas de ceniza del volcán Tungurahua del periodo de enero a marzo de 2010 en los sistemas ternarios Or-An-Ab y Wo-En-Fs

```
# TÍTULO: "Diagramas Ternarios"
```

```
# FUNCIONES
```

```
library("ggplot2")
```

```
library("ggtern")
```

```
library("ggpubr")
```

```
library(readxl)
```

```
# LECTURA DE DATOS
```

```
CPX <- read_excel ("Desktop/PROYECTO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR/DATOS FINAL/CPX.xlsx")
```

```
OPX <- read_excel ("Desktop/PROYECTO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR/DATOS FINAL/OPX.xlsx")
```

```
PLG <- read_excel ("Desktop/PROYECTO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR/DATOS FINAL/PLG.xlsx")
```

```
# FUNCIÓN DE EXTRACCIÓN DE LEYENDAS DE GGPLOTS
```

```
extract_legend <- function(my_ggp) {
```

```
  step1 <- ggplot_gtable(ggplot_build(my_ggp))
```

```

step2 <- which (sapply(step1$grobs, function(x) x$name) == "guide-box")

step3 <- step1$grobs[[step2]]

return(step3)

}

# CONSTRUCCIÓN DE SISTEMAS TERNARIOS

# Construcción del sistema ternario Wo-En-Fs para piroxenos

SegmentPX=data.frame(lx=c(0.5,0.275),
ly=c(0,0.45),lz=c(0.5,0.275),lxend=c(0.475,0.25),lyend=c(0.05,0.5),lzend=c(0.475,0.25))

p <- data.frame(xp=c (0,0.5,0), yp=c(1,0.5,0.5), zp=c(0,0,0.5), series="white")

# Construcción del sistema ternario Or-An-Ab para plagioclasas

SegmentPLG=data.frame(lx=c(0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 0.9, 0.64, 0, 0), ly=c(0, 0, 0, 0, 0, 0.1,
0.36, 0.9, 0.1), lz=c(0.9, 0.7, 0.5, 0.3, 0.1, 0, 0, 0.1, 0.9), lxend=c(0.1, 0.29, 0.45,
0.5969014085, 0.8, 0.8, 0.59, 0.59, 0.55), lyend=c(0.1, 0.1, 0.1, 0.12, 0.1, 0.1, 0.3, 0.3, 0.1),
lzend=c(0.8, 0.61, 0.45, 0.2830985915, 0.1, 0.1, 0.11, 0.11, 0.35))

# DIAGRAMA TERNARIO ORTOPIROXENOS - SISTEMA WO-EN-FS

# Ploteo y clasificación de datos

WoEnFoOPX=ggtern (data = OPX, aes( x = En, y = Wo, z = Fs)) +

  geom_point (aes(colour = Fase, shape = MicroFen)) +

  geom_segment (data = SegmentPX, aes(x = lx, y = ly, z = lz, xend = lxend, yend = lyend,
zend = lzend)) +

  labs (title = "Diagrama Wo-En-Fs ~ Ortopiroxeno", shape = "Agregado Cristalino", colour
= "Fase Eruptiva")+

  geom_polygon(data=opx.lims,color='red', alpha=0,size=0.5) +

  custom_percent ("Mole %") +

```

```

theme_bw () +
theme_showarrows () +
geom_Tline (Tintercept=c(0.05, 0.2, 0.45, 0.5)) + annotate(geom = 'text',
  x = c (0.73125,0.24375,0.4375,0.3375,0.39375,0.13125),
  y = c (0.025,0.025,0.125,0.325,0.475,0.475),
  z = c (0.24375,0.73125,0.4375,0.3375,0.13125,0.39375),
  label = c("Enstatita", "Ferrosilita", "Pigeonita", "Augita", "Diópsido", "Hedenbergita"))

# Zoom de datos
opx.lims = data.frame(En = c (0.7370, 0.625, 0.625), Wo = c (0.025, 0.1370, 0.025), Fs =
c(0.238, 0.238, 0.35))

# Creación de diagrama ternario
ZWoEnFoOPX = WoEnFoOPX + tern_limits(T=max(opx.lims$Wo), L=max(opx.lims$En),
R=max(opx.lims$Fs)) + labs (title = "Zoomed")
OPXlegend <- extract_legend (WoEnFoOPX)
grid.arrange(arrangeGrob (ZWoEnFoOPX + theme(legend.position="none"), WoEnFoOPX
+ theme(legend.position="none")), OPXlegend, nrow=1)

# DIAGRAMA TERNARIO CLINOPIROXENOS - SISTEMA WO-EN-FS

# Ploteo y clasificación de datos
WoEnFoCPX=ggtern (data = CPX, aes( x = En, y = Wo, z = Fs)) +
  geom_point (aes(colour = Fase, shape = MicroFen)) +
  geom_polygon (data=p, aes(x=xp, y=yp, z=zp, fill=series), colour="white", size=0.25) +
  geom_polygon(data=cpx.lims,color='red', alpha=0,size=0.5) +
  scale_fill_manual(values=as.character(unique(p$series))) +

```

```

geom_segment (data = SegmentPX,
aes(x=lx,y=ly,z=lz,xend=lxend,yend=lyend,zend=lzend)) +
  custom_percent ("Mole %") +
  theme_bw () +
  theme_showarrows () +
  labs (title="Diagrama En-Fs-Wo ~ Clinopiroxeno", shape = "Agregado Cristalino", colour
= "Fase Eruptiva") +
  geom_Tline (Tintercept=c(0.05, 0.2, 0.45, 0.5)) + annotate(geom = 'text',
  x = c (0.73125,0.24375,0.4375,0.3375,0.39375,0.13125),
  y = c (0.025,0.025,0.125,0.325,0.475,0.475),
  z = c (0.24375,0.73125,0.4375,0.3375,0.13125,0.39375),
  label =
c("ClinoEnstatita", "ClinoFerrosilita", "Pigeonita", "Augita", "Diópsido", "Hedenbergita"))

# Zoom de datos
cpx.lims = data.frame(En = c (0.55, 0.4, 0.4), Wo = c(0.35, 0.5, 0.35), Fs = c(0.1, 0.1, 0.25))

# Creación de diagrama ternario
ZWoEnFoCPX = WoEnFoCPX + tern_limits(T=max(cpx.lims$Wo), L=max(cpx.lims$En),
R=max(cpx.lims$Fs)) + labs (title = "Zoomed")
CPXlegend <- extract_legend (WoEnFoCPX)
grid.arrange(arrangeGrob (ZWoEnFoCPX + theme(legend.position="none"), WoEnFoCPX
+ theme(legend.position="none")), CPXlegend, nrow=1)

# DIAGRAMA TERNARIO PLAGIOCLASAS - SISTEMA OR-AN-AB
# Ploteo y clasificación de datos
OrAbAn=ggtern (data = PLG, aes( x =Ab , y = Or, z = An)) +

```

```

geom_point (aes(colour = Fase, shape = MicroFen)) +
geom_segment          (data          =          SegmentPLG,
aes(x=lx,y=ly,z=lz,xend=lxend,yend=lyend,zend=lzend)) +
custom_percent ("Mole %") +
geom_polygon(data=plg.lims, color='red', alpha=0,size=0.5) +
theme_bw () +
theme_showarrows () +
labs (title="Diagrama Or-Ab-An", shape = "Agregado Cristalino", colour = "Fase
Eruptiva") +
annotate (geom = 'text',
x = c (0.05, 0.2, 0.385, 0.565, 0.75, 0.9, 0.72, 0.32),
y = c (0.05, 0.05, 0.05, 0.05, 0.05, 0.05, 0.23, 0.63),
z = c (0.9, 0.75, 0.565, 0.385, 0.20, 0.05, 0.05, 0.05),
angle = c (0, 0, 0, 0, 0, 0, 60, 60),
label = c ("Anortita","Bytownita","Labradorita","Andesina","Oligoclasa","Albita",
"Anortoclasa", "Sanidina"))

# Zoom de datos
plg.lims = data.frame(Ab = c (0.575, 0.3, 0.3), Or = c(0, 0, 0.275), An = c(0.425, 0.7, 0.425))

# Creación de diagrama ternario
ZOrAbAn = OrAbAn + tern_limits(T=max(plg.lims$Or), L=max(plg.lims$Ab),
R=max(plg.lims$An)) + labs (title = "Zoomed")

PLGlegend <- extract_legend (OrAbAn)

grid.arrange( arrangeGrob (ZOrAbAn + theme(legend.position="none"), OrAbAn +
theme(legend.position="none")), PLGlegend, nrow=1)

```

Gráfico de muestras de roca total y vidrio volcánico del volcán Tungurahua de los periodos julio-agosto de 2006, enero-marzo de 2010 y marzo y julio de 2013 en diagramas de correlación de Harker

```
# TÍTULO: "Diagramas de Harker"
```

```
# ANOTACIONES: La clasificación de color (colour), símbolo (shape) y relleno (fill) para los datos de esta gráfica han sido asignados manualmente con la función "scale_shape_manual", su omisión dentro del código permite la clasificación con una variable concreta del set de datos utilizado, o a su vez, un color, símbolo o relleno específico.
```

```
# FUNCIONES
```

```
library("readxl")
```

```
library("ggplot2")
```

```
library("patchwork")
```

```
library("ggpubr")
```

```
# LECTURA DE DATOS
```

```
DatNorm <- read_excel ("Desktop/PROYECTO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR/DATOS FINAL/DatNorm.xlsx")
```

```
DatNorm <- read_excel ("Desktop/Tesis 2022a/Datos Discusión/AllData.xlsx")
```

```
# CONSTRUCCIÓN DE DIAGRAMAS
```

```
# SiO2 vs TiO2
```

```
TiO2<-ggplot (DatNorm, aes (x=SiO2, y=TiO2, shape = Fecha, colour = Fecha, fill= Fecha))+
```

```
Labs (y = "TiO[2]* (wt.%)", x= "SiO[2]* (wt.%)") +
```

```
geom_point() +
```

```

scale_shape_manual(values = c(0,21,22,23,1,24,2,11,3,12,4,6,25,8)) +

scale_colour_manual(values = c("#F8766D", "black", "black", "black", "#F8766D", "black",
"#F8766D", "#00B0F6", "#F8766D", "#00B0F6", "#F8766D", "#F8766D", "black",
"#F8766D")) +

scale_fill_manual(values = c("#F8766D", "#E58700", "#A3A500", "#00BA38", "#F8766D",
"#00C0AF", "#F8766D", "#00B0F6", "#F8766D", "#00B0F6", "#F8766D", "#F8766D",
"#A3A500", "#F8766D"))

# SiO2 vs Al2O3

Al2O3<-ggplot(DatNorm, aes(x=SiO2, y=Al2O3,shape = Fecha, colour = Fecha, fill=
Fecha))+

labs(y = "Al[2]*O[3]* (wt.%)", x= "SiO[2]* (wt.%)") +

geom_point() +

scale_shape_manual(values = c(0,21,22,23,1,24,2,11,3,12,4,6,25,8))+

scale_colour_manual(values = c("#F8766D", "black", "black", "black", "#F8766D", "black",
"#F8766D", "#00B0F6", "#F8766D", "#00B0F6", "#F8766D", "#F8766D", "black",
"#F8766D")) +

scale_fill_manual(values = c("#F8766D", "#E58700", "#A3A500", "#00BA38", "#F8766D",
"#00C0AF", "#F8766D", "#00B0F6", "#F8766D", "#00B0F6", "#F8766D", "#F8766D",
"#A3A500", "#F8766D"))

# SiO2 vs FeO

FeO<-ggplot(DatNorm, aes(x=SiO2, y=FeO, shape = Fecha, colour = Fecha, fill= Fecha))+

labs(y = "FeO (wt.%)", x= "SiO[2]* (wt.%)") +

geom_point() +

scale_shape_manual(values = c(0,21,22,23,1,24,2,11,3,12,4,6,25,8))+

scale_colour_manual(values = c("#F8766D", "black", "black", "black", "#F8766D", "black",
"#F8766D", "#00B0F6", "#F8766D", "#00B0F6", "#F8766D", "#F8766D", "black",
"#F8766D")) +

```

```

scale_fill_manual(values = c("#F8766D", "#E58700", "#A3A500", "#00BA38", "#F8766D",
"#00C0AF", "#F8766D", "#00B0F6", "#F8766D", "#00B0F6", "#F8766D", "#F8766D",
"#A3A500", "#F8766D"))

```

```

# SiO2 vs MgO

```

```

MgO<-ggplot(DatNorm, aes(x=SiO2, y=MgO, shape = Fecha, colour = Fecha, fill= Fecha))+

```

```

labs(y = "MgO (wt.%)", x= "SiO[2]* (wt.%)") +

```

```

geom_point() +

```

```

scale_shape_manual(values = c(0,21,22,23,1,24,2,11,3,12,4,6,25,8))+

```

```

scale_colour_manual(values = c("#F8766D", "black", "black", "black", "#F8766D", "black",
"#F8766D", "#00B0F6", "#F8766D", "#00B0F6", "#F8766D", "#F8766D", "black",
"#F8766D")) +

```

```

scale_fill_manual(values = c("#F8766D", "#E58700", "#A3A500", "#00BA38", "#F8766D",
"#00C0AF", "#F8766D", "#00B0F6", "#F8766D", "#00B0F6", "#F8766D", "#F8766D",
"#A3A500", "#F8766D"))

```

```

# SiO2 vs CaO

```

```

CaO<-ggplot(DatNorm, aes(x=SiO2, y=CaO, shape = Fecha, colour = Fecha, fill= Fecha))+

```

```

labs(y = "CaO (wt.%)", x= "SiO[2]* (wt.%)") +

```

```

geom_point() +

```

```

scale_shape_manual(values = c(0,21,22,23,1,24,2,11,3,12,4,6,25,8)) +

```

```

scale_colour_manual(values = c("#F8766D", "black", "black", "black", "#F8766D", "black",
"#F8766D", "#00B0F6", "#F8766D", "#00B0F6", "#F8766D", "#F8766D", "black",
"#F8766D")) +

```

```

scale_fill_manual(values = c("#F8766D", "#E58700", "#A3A500", "#00BA38", "#F8766D",
"#00C0AF", "#F8766D", "#00B0F6", "#F8766D", "#00B0F6", "#F8766D", "#F8766D",
"#A3A500", "#F8766D"))

```

```

# SiO2 vs Na2O

```

```

Na2O<-ggplot(DatNorm, aes(x=SiO2, y=Na2O, shape = Fecha, colour = Fecha, fill=
Fecha))+

```

```

labs(y = "Na[2]*O (wt.%)", x= "SiO[2]* (wt.%)") +

```



```

geom_point() +

scale_shape_manual(values = c(0,21,22,23,1,24,2,11,3,12,4,6,25,8)) +

scale_colour_manual(values = c("#F8766D", "black", "black", "black", "#F8766D", "black",
"#F8766D", "#00B0F6", "#F8766D", "#00B0F6", "#F8766D", "#F8766D", "black",
"#F8766D")) +

scale_fill_manual(values = c("#F8766D", "#E58700", "#A3A500", "#00BA38", "#F8766D",
"#00C0AF", "#F8766D", "#00B0F6", "#F8766D", "#00B0F6", "#F8766D", "#F8766D",
"#A3A500", "#F8766D"))

# SiO2 vs K2O

K2O<-ggplot(DatNorm, aes(x=SiO2, y=K2O,shape = Fecha, colour = Fecha, fill= Fecha))+

labs(y = "K[2]*O (wt.%)", x= "SiO[2]* (wt.%)") +

geom_point() +

scale_shape_manual(values = c(0,21,22,23,1,24,2,11,3,12,4,6,25,8)) +

scale_colour_manual(values = c("#F8766D", "black", "black", "black", "#F8766D", "black",
"#F8766D", "#00B0F6", "#F8766D", "#00B0F6", "#F8766D", "#F8766D", "black",
"#F8766D")) +

scale_fill_manual(values = c("#F8766D", "#E58700", "#A3A500", "#00BA38", "#F8766D",
"#00C0AF", "#F8766D", "#00B0F6", "#F8766D", "#00B0F6", "#F8766D", "#F8766D",
"#A3A500", "#F8766D"))

# SiO2 vs P2O5

P2O5<-ggplot(DatNorm, aes(x=SiO2, y=P2O5,shape = Fecha, colour = Fecha, fill=
Fecha))+

labs(y = "P[2]*O[5]* (wt.%)", x= "SiO[2]* (wt.%)") +

geom_point() +

scale_shape_manual(values = c(0,21,22,23,1,24,2,11,3,12,4,6,25,8)) +

scale_colour_manual(values = c("#F8766D", "black", "black", "black", "#F8766D", "black",
"#F8766D", "#00B0F6", "#F8766D", "#00B0F6", "#F8766D", "#F8766D", "black",
"#F8766D")) +

```

```
scale_fill_manual(values = c("#F8766D", "#E58700", "#A3A500", "#00BA38", "#F8766D",
"#00C0AF", "#F8766D", "#00B0F6", "#F8766D", "#00B0F6", "#F8766D", "#F8766D",
"#A3A500", "#F8766D"))
```

```
# SiO2 vs MnO
```

```
MnO<-ggplot(DatNorm, aes(x=SiO2, y=MnO, shape = Fecha, colour = Fecha, fill= Fecha))+
```

```
labs(y = "MnO (wt.%)", x= "SiO[2]* (wt.%)") +
```

```
geom_point() +
```

```
scale_shape_manual(values = c(0,21,22,23,1,24,2,11,3,12,4,6,25,8)) +
```

```
scale_colour_manual(values = c("#F8766D", "black", "black", "black", "#F8766D", "black",
"#F8766D", "#00B0F6", "#F8766D", "#00B0F6", "#F8766D", "#F8766D", "black",
"#F8766D")) +
```

```
scale_fill_manual(values = c("#F8766D", "#E58700", "#A3A500", "#00BA38", "#F8766D",
"#00C0AF", "#F8766D", "#00B0F6", "#F8766D", "#00B0F6", "#F8766D", "#F8766D",
"#A3A500", "#F8766D"))
```

```
# CREACIÓN DE DIAGRAMAS DE HARKER
```

```
ggarrange(Al2O3,FeO,MgO,CaO,Na2O,K2O,TiO2,P2O5, ncol=2, nrow = 4,
common.legend = TRUE, legend="bottom")
```

Gráfico de muestras de roca total y vidrio volcánico del volcán Tungurahua de los periodos julio-agosto de 2006 y enero-marzo de 2010 en el diagrama de clasificación TAS (Total Alkali Silica)

```
#TÍTULO: Diagrama de TAS
```

```
# ANOTACIONES: La clasificación de color (colour), símbolo (shape) y relleno (fill) para los datos de esta gráfica han sido asignados manualmente con la función "scale_shape_manual", su omisión dentro del código permite la clasificación con una variable concreta del set de datos utilizado, o a su vez, un color, símbolo o relleno específico. Este código ha sido modificado a partir de la plantilla del Diagrama de TAS publicado en la página web "Stack Overflow" por Dawn y Henrik (2018), el mismo que puede ser encontrado en el siguiente enlace web: https://stackoverflow.com/questions/53918035/use-a-diagram-as-background-template-in-a-plot
```

```
# FUNCIONES
```

```
library(ggplot2)
```

```
library('readxl')
```

```
# LECTURA DE DATOS
```

```
ADATA <- read_excel("Desktop/Tesis 2022a/Datos Discusión/ADData.xlsx")
```

```
d = data.frame(x = c(40, 80), y = c(0,15))
```

```
theme_set(theme_bw(base_size=15))
```

```
# CONSTRUCCIÓN DE DIAGRAMA DE TAS
```

```
p <- ggplot(data=d, mapping=aes(x=x, y=y)) +
```

```
  geom_blank() +
```

```
  theme(panel.grid.major = element_blank(),
```

```

panel.grid.minor = element_blank() +
scale_y_continuous(limits=c(0,15), expand = c(0, 0)) +
scale_x_continuous(limits=c(35,80), expand = c(0, 0)) +
labs(y=expression(Na[2]*O + K[2]*O*~ wt~'%'), x=expression(SiO[2]*~ wt~'%'))+
annotate("segment", x=45, xend=45, y=1, yend=5)+
annotate("segment", x=45, xend=52, y=5, yend=5)+
annotate("segment", x=52, xend=69, y=5, yend=8)+
annotate("segment", x=76.5, xend=69, y=1, yend=8)+
annotate("segment", x=69, xend=69, y=8, yend=13)+
annotate("segment", x=45, xend=61.32, y=5, yend=13.7)+
annotate("segment", x=52, xend=52, y=1, yend=5)+
annotate("segment", x=57, xend=57, y=1, yend=5.9)+
annotate("segment", x=63, xend=63, y=1, yend=6.9)+
annotate("segment", x=52, xend=49.4, y=5, yend=7.3)+
annotate("segment", x=57, xend=53.05, y=5.9, yend=9.25)+
annotate("segment", x=63, xend=57.6, y=6.9, yend=11.7)+
annotate("segment", x=41, xend=45, y=3, yend=3)+
annotate("segment", x=41, xend=41, y=1, yend=3)+
annotate("segment", x=41, xend=41, y=3, yend=7, linetype="dashed")+
annotate("segment", x=41, xend=45, y=7, yend=9.4, linetype="dashed")+
annotate("segment", x=45, xend=52.5, y=9.4, yend=14)+
annotate("segment", x=49.4, xend=45, y=7.3, yend=9.4)+
annotate("segment", x=53, xend=48.4, y=9.3, yend=11.5)+
annotate("segment", x=57.6, xend=50.3, y=11.7, yend=15)

```

```

tas <- p + annotate("text", label = "Basalto", x = 48.5, y = 2.7, size=4)+
  annotate("text", label = "Andesita\nbasáltica", x = 54.5, y = 3, size=4)+
  annotate("text", label = "Andesita", x = 60, y = 3.5, size=4)+
  annotate("text", label = "Dacita", x = 67.5, y = 4.2, size=4)+
  annotate("text", label = "Riolita", x = 73, y = 8, size=4)+
  annotate("text", label = "Traqui-\nbasalto", x = 48.8, y = 5.7, size=4)+
  annotate("text", label = "Traquiandesita\nbasáltica", x = 52.9, y = 6.8, size=4)+
  annotate("text", label = "Traquiandesita", x = 57.9, y = 8.2, size=4)+
  annotate("text", label = "Traquidacite\n(q > 20%)", x = 65, y = 9, size=4)+
  annotate("text", label = "Traquita\n(q < 20%)", x = 62.5, y = 11.5, size=4)+
  annotate("text", label = "Picro-\nbasalto", x = 43.1, y = 2.1, size=4)+
  annotate("text", label = "Basanita\n(OI > 10%)", x = 43.5, y = 5.8, size=4)+
  annotate("text", label = "Tephrita\n(OI < 10%)", x = 43.5, y = 7, size=4)+
  annotate("text", label = "Fonotefrita", x = 48.9, y = 9.4, size=4)+
  annotate("text", label = "Tefrifonolita", x = 52.9, y = 11.6, size=4)+
  annotate("text", label = "Fonolita", x = 57.2, y = 13.5, size=4)+
  annotate("text", label = "Foidita", x = 44, y = 12, size=4)

```

```
# PLOTEO DE DATOS
```

```

tas + geom_point(data = ADATA, aes(x=SiO2, y=Na2O+K2O, shape = ID, colour = ID, fill=
ID), size=1.5) +
  theme(panel.border = element_rect(colour = "black", fill=NA, size=0.5)) +
  scale_shape_manual(values = c(8,6,24,25)) +
  scale_colour_manual(values = c("#B983FF", "#F8766D", "black", "black")) +
  scale_fill_manual(values = c("#B983FF", "#F8766D", "#00C0AF", "#00B0F6"))

```

o

```
theme(panel.border = element_rect(colour = "black", fill=NA, size=0.5)) +  
scale_shape_manual(values = c(6,24,25)) +  
scale_colour_manual(values = c("#F8766D", "black")) +  
scale_fill_manual(values = c("#F8766D", "#00C0AF"))
```

Gráfico de muestras de roca total y vidrio volcánico del volcán Tungurahua de los periodos julio-agosto de 2006 y enero-marzo de 2010 en diagramas de composición SiO₂ vs. Mg#, Mg# vs. Cr₂O₃, SiO₂ vs. An y An vs. FeO

```
#TÍTULO: "Diagramas de Composición"
```

```
# FUNCIONES
```

```
library("ggplot2")
```

```
library("ggtern")
```

```
library("ggpubr")
```

```
library(readxl)
```

```
# LECTURA DE DATOS
```

```
PLG10 <- read_excel("Desktop/Tesis 2022a/Datos Discusión/PLG10.xlsx")
```

```
PX10 <- read_excel("Desktop/Tesis 2022a/Datos Discusión/PX10.xlsx")
```

```
# DIAGRAMAS DE COMPOSICIÓN DE PIROXENO
```

```
# Diagrama SiO2 vs Mg#
```

```
MgSi<-ggplot(PX10, aes(x= SiO2, y= Mg))+
```

```
  labs(y = "Mg#", x= "SiO2* (wt.%)") +
```

```
  geom_point(aes(shape = Zona, colour = Fecha))
```

```
# Diagrama Mg# vs Cr2O3
```

```
MgCr<-ggplot(PX10, aes(x= Mg, y= Cr2O3))+
```

```
  labs(y = "Cr2*O3* (wt.%)", x= "Mg#") +
```

```
  geom_point(aes(shape = Zona, colour = Fecha))
```

```
#DIAGRAMAS DE COMPOSICIÓN DE PLAGIOCLASA
```

```
# Diagrama SiO2 vs An
```

```
AnSi<-ggplot(PLG10, aes(x= SiO2, y= An))+
```

```
  labs(y = "An (%)", x= "SiO[2]* (wt.%)") +
```

```
  geom_point(aes(shape = Zona, colour = Fecha))
```

```
# Diagrama An vs FeO
```

```
AnFe<-ggplot(PLG10, aes(x= An, y= FeO))+
```

```
  labs(y = "FeO (wt.%)", x= "An") +
```

```
  geom_point(aes(shape = Zona, colour = Fecha))
```

```
# CREACIÓN DE DIAGRAMAS DE COMPOSICIÓN DE PLAGIOCLASA Y PIROXENO
```

```
ggarrange(MgSi, AnSi, MgCr, AnFe, ncol=2, nrow = 2, common.legend = TRUE,  
legend="bottom")
```


Anexo II – Set de datos

Tabla de datos de elementos mayores de muestras minerales de plagioclasa de ceniza volcánica emitida durante el periodo eruptivo de enero a marzo de 2010 del volcán Tungurahua.

Fecha	Muestra	Análisis	SiO ₂ (wt. %)	TiO ₂ (wt. %)	Al ₂ O ₃ (wt. %)	Cr ₂ O ₃ (wt. %)	FeO ⁺ (wt. %)	MnO (wt. %)	MgO (wt. %)	CaO (wt. %)	Na ₂ O (wt. %)	K ₂ O (wt. %)	TOTAL	An (%)	Ab (%)	Or (%)
6/1/10	MZ6/1 - 001/1.	G1/PLG1 - B	54,99	0,00	27,58	0,00	0,92	0,00	0,00	10,55	4,80	0,38	99,22	53,59	44,13	2,27
	MZ6/1 - 010/1.	G2/PLG2 - B	55,16	0,00	26,92	0,00	0,92	0,06	0,00	10,41	4,97	0,48	98,93	52,08	45,03	2,89
	MZ6/1 - 013/1.	G3/PLG1 -	55,37	0,00	27,19	0,00	1,13	0,03	0,00	10,84	4,81	0,42	99,78	54,07	43,44	2,49
	MZ6/1 - 025/1.	G1/PLG2 -	58,59	0,00	24,85	0,00	2,04	0,04	0,00	8,71	4,17	1,09	99,48	49,60	43,04	7,37
	MZ6/1 - 028/1.	G1/PLG3 -	53,13	0,00	28,85	0,00	0,83	0,02	0,00	12,17	3,91	0,33	99,25	61,95	36,02	2,03
	MZ6/1 - 030/1.	G2/PLG1 - B	54,79	0,00	27,44	0,00	0,92	0,00	0,00	10,88	4,79	0,37	99,20	54,43	43,39	2,18
	MZ6/1 - 035/1.	G2/PLG1 - B	57,20	0,00	26,66	0,00	0,66	0,00	0,00	9,56	5,38	0,46	99,94	48,17	49,07	2,77
	MZ6/1 - 38 / 1.	G2/PLG2 -	55,65	0,00	27,31	0,00	0,88	0,03	0,00	10,78	4,77	0,50	99,92	53,90	43,14	2,96
	MZ6/1 - 004/1.	G1/PLG2 - B	57,36	0,00	25,68	0,00	0,93	0,00	0,00	8,91	5,64	0,59	99,12	44,97	51,49	3,54
	MZ6/1 - 040/1.	G2/PLG3 -	54,47	0,00	27,65	0,00	0,88	0,00	0,00	11,05	4,77	0,39	99,21	54,85	42,86	2,29
	MZ6/1 - 043/1.	G3/PLG2 -	55,34	0,00	28,37	0,00	0,87	0,00	0,00	11,47	4,34	0,32	100,71	58,19	39,86	1,94
MZ6/1 - 008/1.	G2/PLG1 - N	55,45	0,00	27,36	0,00	0,85	0,00	0,00	10,45	4,80	0,41	99,32	53,27	44,24	2,49	
6/2/10	MZM - 001/1.	G1/PLG1 - B	53,90	0,00	28,52	0,00	0,73	0,00	0,00	11,61	4,56	0,28	99,60	53,02	44,87	2,12
	MZM - 010/1.	G2/PLG2 - B	55,20	0,00	27,46	0,00	1,06	0,04	0,00	10,76	4,74	0,38	99,63	55,14	42,99	1,87
	MZM - 014/1.	G2/PLG3 - I	55,10	0,00	27,41	0,00	1,05	0,02	0,00	10,79	4,74	0,39	99,49	50,60	46,57	2,83
	MZM - 017/1.	G3/PLG5 - B	56,34	0,00	26,86	0,00	0,89	0,01	0,00	10,05	5,26	0,52	99,93	54,86	43,07	2,07
	MZM - 002/1.	G1/PLG1 - B	51,61	0,00	29,96	0,00	0,88	0,00	0,00	13,44	3,54	0,19	99,63	56,59	41,13	2,28
	MZM - 020/1.	G4/PLG6 - B	55,22	0,00	27,43	0,00	1,00	0,03	0,00	10,36	4,84	0,35	99,23	54,35	43,73	1,92
	MZM - 021/1.	G4/PLG7 - N	53,93	0,00	28,07	0,00	0,83	0,00	0,00	11,44	4,60	0,39	99,27	52,92	44,88	2,20
	MZM - 022/1.	G4/PLG7 - B	57,18	0,00	25,73	0,00	1,30	0,00	0,00	9,38	5,12	0,76	99,47	44,69	51,53	3,78
	MZM - 025/1.	G1/PLG1 - B	57,66	0,00	26,38	0,00	0,79	0,02	0,00	9,06	5,54	0,47	99,91	52,75	44,92	2,33

	MZM - 026/1.	G1/PLG2 - B	55,44	0,00	27,77	0,00	0,90	0,01	0,00	11,00	4,74	0,31	100,18	51,79	45,99	2,23
	MZM - 003/1.	G1/PLG1 - I	56,40	0,00	26,82	0,00	1,08	0,03	0,00	9,85	5,14	0,46	99,78	48,00	47,36	4,63
	MZM - 040/1.	G2/PLG -	56,33	0,00	26,77	0,00	1,02	0,05	0,00	10,06	5,11	0,47	99,82	52,38	45,07	2,54
	MZM - 054/1.	G2/PLG1 - B	54,96	0,00	27,78	0,00	0,89	0,00	0,00	11,03	4,79	0,35	99,79	48,82	48,25	2,93
	MZM - 055/1.	G2/PLG1 - N	55,24	0,00	27,56	0,00	0,88	0,00	0,00	11,01	4,90	0,33	99,92	52,95	44,55	2,51
	MZM - 057/1.	G2/PLG2 -	55,75	0,00	26,68	0,00	1,00	0,02	0,00	10,46	4,90	0,36	99,17	54,75	42,96	2,30
	MZM - 061/1.	G3/PLG1 -	57,39	0,00	26,08	0,00	1,08	0,04	0,00	8,90	5,67	0,63	99,79	52,24	45,07	2,69
	MZM - 064/1.	G4/PLG1 - N	55,54	0,09	27,13	0,00	1,06	0,05	0,13	10,68	5,03	0,40	100,10	49,26	47,66	3,08
	MZM - 009/1.	G2/PLG2 - B	54,93	0,00	27,97	0,00	0,84	0,02	0,00	10,85	4,45	0,34	99,40	46,10	51,03	2,86
	MZN - 101/1.	G2/PLG2 - N	56,62	0,00	26,49	0,00	1,03	0,00	0,00	9,75	5,21	0,51	99,62	54,38	43,36	2,26
	MZN - 069/1.	G1/PLG1 - N	55,75	0,00	26,99	0,00	0,87	0,00	0,00	10,41	5,11	0,38	99,50	51,41	46,14	2,45
	MZN - 073/1.	G1/PLG2 -	55,35	0,00	27,62	0,00	1,21	0,00	0,00	10,72	5,10	0,44	100,43	56,93	41,05	2,01
	MZN - 081/1.	G3/PLG1 -	56,30	0,00	26,51	0,00	1,04	0,02	0,00	9,68	5,29	0,49	99,33	57,49	40,84	1,67
	MZN - 082/1.	G1/PLG1 -	55,35	0,00	27,21	0,00	0,92	0,02	0,00	10,62	4,94	0,42	99,48	66,93	31,92	1,15
	MZN - 096/1.	G1/PLG - I	54,67	0,00	27,70	0,00	1,22	0,02	0,00	10,79	4,68	0,38	99,47	50,01	47,19	2,80
	MZN - 099/1.	G2/PLG -	56,56	0,00	27,02	0,00	0,84	0,01	0,00	10,34	4,93	0,45	100,14	56,19	41,72	2,10
7/3/ 10	C3 - 110/1.	G2/PLG - B	55,85	0,00	26,99	0,00	0,95	0,01	0,00	10,20	5,06	0,41	99,46	54,39	43,27	2,34
	C3 - 116/1.	G4/PLG1 - B	54,31	0,00	27,81	0,00	0,85	0,04	0,00	11,29	4,50	0,34	99,14	49,77	47,14	3,08

MZ: Manzano, C3: Cahujá; G: Grano; PLG: Plagioclasa; B: Borde, I: Interior, N: Núcleo. *Hierro total como FeO

Tabla de datos de elementos mayores de muestras minerales de clinopiroxeno y ortopiroxeno de ceniza volcánica emitida durante el periodo eruptivo de enero a marzo de 2010 del volcán Tungurahua.

Fecha	Muestra	Análisis	SiO ₂ (wt. %)	TiO ₂ (wt. %)	Al ₂ O ₃ (wt. %)	Cr ₂ O ₃ (wt. %)	FeO ⁺ (wt. %)	MnO (wt. %)	MgO (wt. %)	CaO (wt. %)	Na ₂ O (wt. %)	K ₂ O (wt. %)	P ₂ O ₅ (wt. %)	TOTAL	Wo (%)	En (%)	Fs (%)	Mg# (%)
6/1/10	MZ6/1 - 012/1.	G3/OPX -	54,12	0,35	0,70	0,01	17,58	0,37	24,86	2,00	0,01	0,01	0,00	100,01	3,97	68,76	27,27	58,58
	MZ6/1 - 016/1.	G1/OPX1 -	53,84	0,39	0,93	0,03	17,90	0,42	25,01	1,92	0,04	0,01	0,00	100,49	3,78	68,65	27,56	58,29
	MZ6/1 - 020/1.	G2/OPX1 - B	53,00	0,37	1,38	0,04	17,39	0,44	24,25	2,24	0,06	0,01	0,00	99,19	4,51	68,09	27,40	58,23
	MZ6/1 - 032/1.	G1/OPX1 - N	53,61	0,26	1,09	0,04	17,77	0,48	24,81	1,95	0,03	0,00	0,00	100,05	3,88	68,56	27,55	58,26
	MZ6/1 - 037/1.	G2/OPX1 -	54,20	0,35	0,78	0,00	19,60	0,47	23,06	2,01	0,07	0,08	0,00	100,62	4,07	64,96	30,97	54,05
	MZ6/1 - 017/1.	G1/CPX1 - B	51,43	0,85	1,55	0,00	12,39	0,36	14,80	17,50	0,32	0,04	0,00	99,24	36,64	43,12	20,24	54,44
	MZ6/1 - 006/1.	G2/CPX1 - N	51,84	0,87	2,48	0,07	10,71	0,23	15,18	19,02	0,37	0,00	0,00	100,78	39,23	43,54	17,23	58,64
6/2/10	MZM - 015/1.	G3/OPX - I	53,52	0,44	1,19	0,02	18,21	0,50	23,90	2,05	0,05	0,03	0,00	99,90	4,14	67,16	28,71	56,76
	MZM - 027/1.	G1/OPX1 - N	54,93	0,24	0,81	0,00	16,40	0,50	26,03	1,96	0,04	0,04	0,00	100,96	3,84	71,05	25,11	61,34
	MZM - 028/1.	G1/OPX1 - B	54,24	0,33	0,92	0,00	16,05	0,43	25,70	1,99	0,07	0,00	0,00	99,72	3,96	71,13	24,91	61,56
	MZM - 030/1.	G1/OPX -	53,71	0,40	1,16	0,02	18,77	0,43	24,19	2,08	0,11	0,06	0,00	100,92	4,12	66,81	29,07	56,31
	MZM - 033/1.	G2/OPX -	53,87	0,40	1,14	0,02	16,56	0,35	25,12	2,11	0,04	0,00	0,00	99,62	4,22	69,92	25,86	60,27
	MZM - 004/1.	G1/OPX1 - N	52,41	0,39	1,36	0,07	19,44	0,41	23,19	1,99	0,04	0,00	0,00	99,30	4,02	65,28	30,69	54,40
	MZM - 043/1.	G3/OPX1 - N	53,44	0,44	0,88	0,00	19,57	0,53	23,64	1,86	0,02	0,00	0,00	100,40	3,73	65,74	30,53	54,71
	MZM - 044/1.	G3/OPX1 - B	53,19	0,45	0,95	0,02	19,78	0,52	22,74	2,69	0,08	0,00	0,00	100,42	5,40	63,59	31,01	53,49
	MZM - 049/1.	G1/OPX - N	54,33	0,32	0,77	0,01	17,35	0,44	25,03	1,86	0,04	0,00	0,00	100,16	3,70	69,33	26,97	59,05
	MZM - 050/1.	G1/OPX - B	53,46	0,38	0,70	0,02	19,38	0,47	23,41	2,09	0,06	0,00	0,00	99,98	4,21	65,42	30,38	54,71
	MZM - 056/1.	G2/OPX1 - N	53,76	0,42	0,74	0,01	19,37	0,50	22,65	2,60	0,05	0,02	0,00	100,14	5,28	64,00	30,72	53,89
	MZM - 062/1.	G3/OPX1 - N	53,94	0,34	0,83	0,00	18,35	0,47	23,99	2,11	0,03	0,04	0,00	100,11	4,23	67,01	28,76	56,65
	MZM - 007/1.	G1/OPX2 - N	54,38	0,48	1,41	0,00	17,00	0,38	25,31	1,98	0,02	0,04	0,00	101,00	3,92	69,78	26,29	59,82
	MZM - 019/1.	G4/CPX -	52,00	0,68	1,90	0,00	10,01	0,29	15,47	18,71	0,27	0,00	0,00	99,32	38,93	44,81	16,26	60,72
	MZM - 005/1.	G1/CPX1 - I	51,14	0,62	3,55	0,38	7,16	0,18	15,66	20,65	0,32	0,00	0,00	99,66	43,00	45,37	11,63	68,63
	MZM - 006/1.	G1/CPX1 - B	52,49	0,88	3,46	0,01	11,23	0,36	13,28	17,53	0,39	0,12	0,00	99,73	39,15	41,27	19,57	54,19

	MZM - 065/1.	G4/CPX1 - N	51,35	0,50	3,26	0,39	7,13	0,17	15,85	20,17	0,33	0,02	0,00	99,17	42,21	46,15	11,64	68,98
	MZN - 103/1.	G2/OPX -	53,39	0,29	0,65	0,00	18,49	0,50	23,79	1,91	0,03	0,01	0,00	99,06	3,86	66,96	29,19	56,27
	MZN - 071/1.	G1/OPX1 - N	54,23	0,29	0,82	0,01	16,52	0,32	25,37	2,02	0,03	0,00	0,00	99,61	4,02	70,30	25,68	60,56
	MZN - 072/1.	G1/OPX1 - B	53,09	0,55	3,25	0,01	16,21	0,36	24,00	2,47	0,13	0,02	0,00	100,08	5,09	68,83	26,08	59,69
	MZN - 079/1.	G3/OPX1 - N	53,70	0,33	1,08	0,05	18,74	0,56	23,71	1,81	0,04	0,00	0,00	100,02	3,65	66,75	29,60	55,86
	MZN - 080/1.	G3/OPX1 - B	53,58	0,38	1,39	0,03	16,89	0,40	24,93	2,26	0,05	0,02	0,00	99,93	4,51	69,19	26,30	59,61
	MZN - 090/1.	G3/OPX1 - B	54,27	0,39	1,24	0,03	15,86	0,37	25,63	1,95	0,03	0,03	0,00	99,81	3,90	71,33	24,76	61,77
	MZN - 094/1.	G4/OPX -	54,09	0,38	1,35	0,03	16,57	0,36	24,90	1,97	0,03	0,00	0,00	99,67	3,98	69,92	26,10	60,05
	MZN - 095/1.	G4/OPX - B	55,55	0,81	4,11	0,02	14,68	0,46	19,78	4,38	0,39	0,52	0,20	100,90	10,11	63,46	26,43	57,40
	MZN - 097/1.	G1/OPX1 - N	53,39	0,41	1,32	0,02	19,91	0,46	23,25	1,60	0,04	0,00	0,00	100,41	3,23	65,37	31,40	53,87
	MZN - 098/1.	G1/OPX1 - B	53,72	0,40	1,51	0,12	15,49	0,43	25,43	2,20	0,05	0,00	0,00	99,36	4,44	71,23	24,34	62,15
	MZN - 076/1.	G2/CPX1 - N	51,69	0,71	2,20	0,08	10,98	0,34	14,75	18,94	0,44	0,00	0,00	100,13	39,44	42,73	17,84	57,33
	MZN - 077/1.	G2/CPX1 - B	52,44	0,68	2,01	0,05	9,98	0,29	15,90	18,66	0,31	0,03	0,00	100,34	38,42	45,55	16,04	61,44
7/3/10	C3 - 108/1.	G1/OPX -	53,88	0,42	1,14	0,02	16,59	0,42	25,06	2,20	0,01	0,00	0,00	99,73	4,40	69,71	25,89	60,16
	C3 - 111/1.	G2/OPX - N	54,03	0,29	0,81	0,01	16,70	0,36	25,35	2,06	0,03	0,01	0,00	99,63	4,10	70,03	25,88	60,29
	C3 - 112/1.	G3/OPX - N	53,56	0,31	0,76	0,00	20,17	0,50	23,13	1,77	0,02	0,00	0,00	100,22	3,57	64,75	31,68	53,42
	C3 - 113/1.	G3/OPX - I	54,94	0,48	3,43	0,08	14,86	0,30	23,01	2,02	0,25	0,27	0,00	99,63	4,42	70,17	25,41	60,77
	C3 - 117/1.	G4/OPX - N	52,90	0,42	1,16	0,03	18,59	0,48	22,98	2,45	0,05	0,00	0,00	99,06	5,00	65,35	29,65	55,29
	C3 - 122/1.	G2/OPX - B	54,36	0,34	1,10	0,02	16,51	0,42	25,57	1,94	0,01	0,00	0,00	100,27	3,85	70,59	25,56	60,77
	C3 - 105/1.	G1/CPX -	52,52	0,81	2,15	0,00	10,03	0,29	15,63	19,22	0,29	0,00	0,00	100,96	39,38	44,57	16,05	60,91
	C3 - 118/1.	G1/CPX - B	51,35	0,73	2,08	0,03	10,95	0,29	14,93	18,83	0,34	0,00	0,00	99,52	39,11	43,14	17,75	57,68

MZ: Manzano, C3: Cahuají; G: Grano; OPX: Ortopiroxeno, CPX: Clinopiroxeno; B: Borde, I: Interior, N: Núcleo. *Hierro total como FeO

Tabla de datos de elementos mayores de muestras de vidrio de ceniza volcánica emitida durante el periodo eruptivo de enero a marzo de 2010 del volcán Tungurahua.

Fecha	Muestra	Análisis	SiO ₂ (wt. %)	TiO ₂ (wt. %)	Al ₂ O ₃ (wt. %)	Cr ₂ O ₃ (wt. %)	FeO ⁺ (wt. %)	MnO (wt. %)	MgO (wt. %)	CaO (wt. %)	Na ₂ O (wt. %)	K ₂ O (wt. %)	P ₂ O ₅ (wt. %)	Total	Qz	Ab	Or	An	Cor	Qz' (%)	Or' (%)	Ab' (%)
6/1/10	MZ6/1 - 002/1.	G1/V	65,66	1,39	13,83	0,00	5,66	0,14	1,32	3,01	3,55	3,65	0,50	98,71	23,95	30,29	21,81	11,15	0,00	25,57	16,36	58,06
	MZ6/1 - 005/1.	G1/V	65,52	1,44	13,67	0,03	6,14	0,01	1,15	3,17	3,65	3,77	0,54	99,08	23,11	31,05	22,40	9,88	0,00	25,30	17,75	56,95
	MZ6/1 - 009/1.	G2/V	64,30	1,34	13,90	0,00	5,93	0,08	1,31	3,24	3,68	3,64	0,58	98,01	21,92	31,65	21,92	10,84	0,00	23,98	16,15	59,87
	MZ6/1 - 014/1.	G3/V	64,86	1,50	14,09	0,04	6,14	0,16	1,42	3,24	2,97	3,53	0,49	98,44	26,35	25,47	21,10	13,07	0,66	27,56	16,13	56,31
	MZ6/1 - 019/1.	G1/V	66,27	1,25	14,21	0,05	5,70	0,07	1,36	3,09	3,31	3,84	0,37	99,51	24,30	28,09	22,75	12,58	0,00	25,47	15,93	58,60
	MZ6/1 - 026/1.	G2/V	67,39	1,35	14,19	0,04	5,08	0,08	1,35	2,72	2,85	3,72	0,28	99,05	29,53	24,29	22,10	11,70	1,24	30,28	18,52	51,20
	MZ6/1 - 027/1.	G2/V	64,75	1,15	15,58	0,00	5,07	0,06	0,99	3,74	3,95	3,23	0,51	99,04	21,12	33,59	19,27	15,31	0,02	21,29	9,52	69,19
	MZ6/1 - 031/1.	G2/V	66,33	1,48	14,44	0,01	5,95	0,14	1,40	3,13	2,92	4,02	0,50	100,32	25,91	24,62	23,58	12,23	0,76	27,47	18,18	54,34
	MZ6/1 - 034/1.	G/V	70,96	1,09	13,42	0,01	3,18	0,04	0,74	1,67	3,06	4,60	0,42	99,19	32,14	26,06	27,42	5,53	1,40	33,74	26,28	39,98
	MZ6/1 - 036/1.	G2/V	67,06	1,05	13,85	0,01	5,12	0,16	1,02	2,61	3,19	4,06	0,40	98,55	26,65	27,33	24,29	10,42	0,44	27,91	19,41	52,68
	MZ6/1 - 039/1.	G2/V	67,66	1,12	13,70	0,00	5,08	0,03	0,99	2,47	3,09	3,94	0,31	98,39	28,63	26,49	23,64	10,31	0,63	29,57	19,60	50,83
MZ6/1 - 044/1.	G3/V	64,41	1,53	14,34	0,00	6,53	0,06	1,67	3,47	3,30	3,32	0,69	99,32	24,23	28,01	19,68	12,76	0,66	26,09	14,69	59,22	
6/2/10	MZM - 012/1.	G/V2	65,41	1,23	14,05	0,00	6,19	0,14	1,26	3,30	3,51	3,87	0,47	99,43	22,37	29,70	22,93	11,23	0,00	24,45	16,78	58,78
	MZM - 018/1.	G3/V	66,20	1,30	13,74	0,00	5,90	0,10	1,33	2,98	3,08	3,89	0,55	99,06	26,24	26,23	23,11	11,22	0,38	27,88	18,47	53,66
	MZM - 023/1.	G4/V	65,46	1,46	13,39	0,01	5,99	0,00	0,99	3,11	3,72	3,85	0,70	98,67	23,24	31,82	22,99	8,55	0,00	25,65	19,33	55,03
	MZM - 024/1.	G4/V	64,51	1,33	12,67	0,06	7,29	0,18	2,59	3,21	3,71	3,49	0,78	99,80	20,79	31,31	20,62	7,60	0,00	25,09	19,43	55,47
	MZM - 031/1.	G1/V	62,87	1,14	17,74	0,04	4,85	0,02	1,02	4,94	4,29	2,77	0,28	99,97	16,06	36,22	16,37	20,90	0,00	15,58	0,62	83,80
	MZM - 036/1.	G2/V1	64,68	1,02	15,14	0,00	5,68	0,16	1,23	3,84	4,06	3,26	0,34	99,41	19,46	34,52	19,32	13,47	0,00	20,82	10,93	68,25
	MZM - 039/1.	G2/V2	65,13	1,30	13,67	0,00	5,74	0,14	1,35	3,40	3,54	3,74	0,53	98,54	22,77	30,29	22,40	10,47	0,00	25,02	17,30	57,67
	MZM - 041/1.	G2/V	65,46	1,52	13,77	0,01	6,00	0,09	1,31	3,40	3,46	3,72	0,38	99,12	23,41	29,45	22,10	11,12	0,00	25,45	16,77	57,79
	MZM - 048/1.	G3/V	64,90	1,43	13,66	0,00	6,15	0,09	1,24	3,29	3,89	3,70	0,40	98,77	21,02	33,17	22,10	8,98	0,00	23,67	17,92	58,41
	MZM - 058/1.	G2/V	65,44	1,32	13,73	0,01	6,51	0,10	1,19	3,34	3,12	3,59	0,55	98,90	25,74	26,65	21,39	12,90	0,00	26,88	15,85	57,27
MZM - 063/1.	G3/V	64,78	1,34	14,38	0,00	6,04	0,15	1,60	3,50	3,43	3,52	0,55	99,29	22,68	29,11	20,86	13,53	0,00	24,13	13,64	62,23	

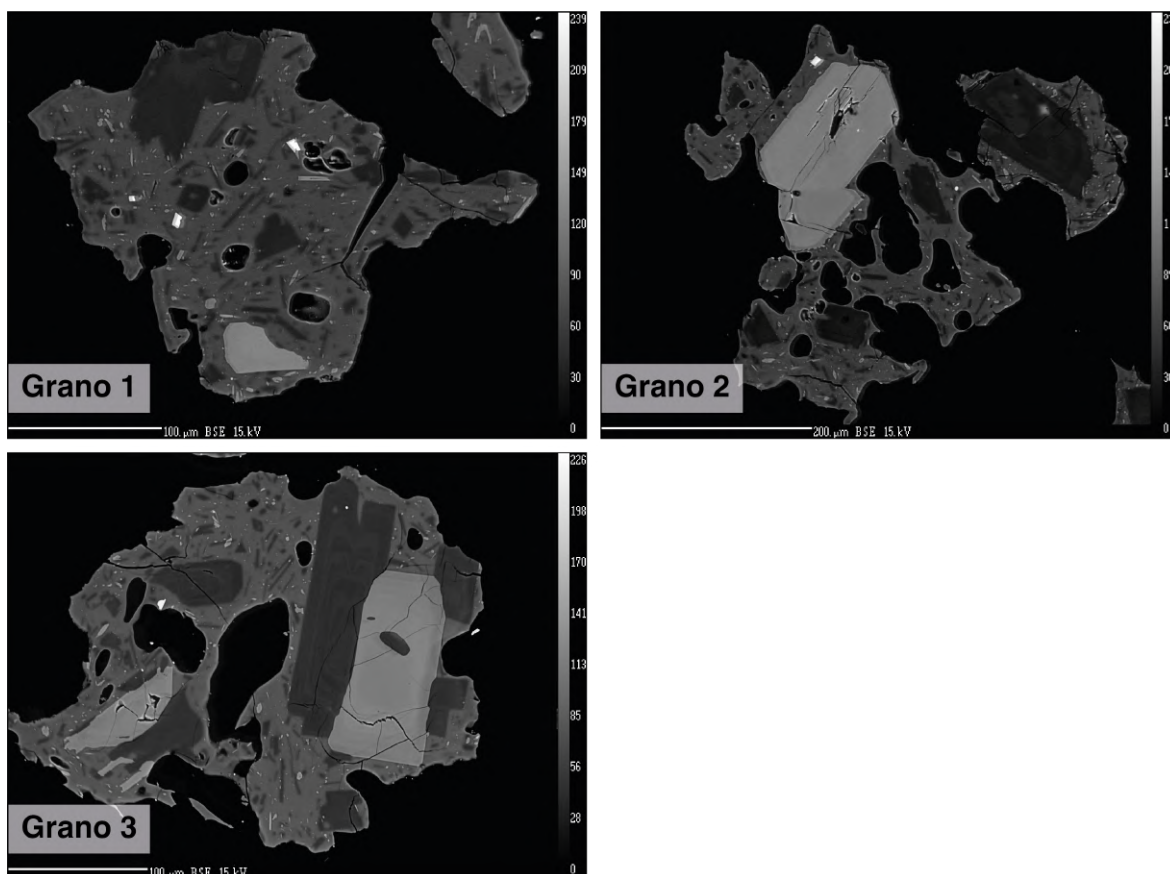
	MZM - 068/1.	G4/V	64,45	1,28	14,29	0,03	5,42	0,06	1,32	3,54	3,69	3,58	0,47	98,12	21,58	31,73	21,51	12,04	0,00	23,26	14,51	62,23
	MZN - 074/1.	G/V	65,83	1,54	13,46	0,00	6,48	0,06	1,23	3,33	3,52	3,92	0,55	99,92	23,12	29,70	23,11	9,34	0,00	25,82	19,19	54,99
	MZN - 075/1.	G/V	65,40	1,43	13,77	0,01	6,22	0,00	1,24	3,43	3,45	3,86	0,55	99,36	23,12	29,28	22,87	10,72	0,00	25,33	17,59	57,08
	MZN - 085/1.	G1/V	64,34	1,47	14,30	0,01	6,08	0,07	1,16	3,46	3,99	3,62	0,51	99,01	19,94	34,02	21,57	10,47	0,00	22,14	15,53	62,34
	MZN - 088/1.	G2/V	66,55	1,45	13,62	0,02	5,31	0,16	1,40	3,29	3,14	4,01	0,41	99,34	25,22	26,65	23,82	11,26	0,00	26,93	18,47	54,59
	MZN - 089/1.	G2/V2	65,76	1,44	14,37	0,00	5,85	0,21	1,13	3,15	3,52	3,54	0,57	99,53	24,42	29,87	20,92	11,95	0,38	25,76	15,34	58,90
	MZN - 092/1.	G3/V	65,13	1,32	13,51	0,01	6,03	0,05	1,30	3,40	3,70	4,11	0,61	99,17	20,88	31,48	24,41	8,16	0,00	23,86	20,69	55,45
	MZN - 102/1.	G2/V	64,63	1,40	13,59	0,01	5,51	0,05	1,38	2,56	3,82	5,33	0,51	98,77	16,60	32,58	31,85	4,23	0,00	19,46	31,07	49,48
7/3/10	C3 - 109/1.	G1/V	66,38	1,53	14,21	0,02	5,02	0,08	1,53	2,21	4,03	4,79	0,58	100,38	18,83	33,93	28,13	6,50	0,00	21,26	24,22	54,52
	C3 - 115/1.	G4/V	64,24	1,56	13,73	0,03	6,68	0,20	1,54	3,46	3,66	4,24	0,44	99,80	18,77	30,89	25,06	8,53	0,00	22,10	20,70	57,20
	C3 - 121/1.	G2/V	63,85	1,53	13,78	0,01	6,91	0,14	1,19	2,39	3,92	4,73	0,39	98,83	17,07	33,51	28,19	6,06	0,00	20,01	25,30	54,69

MZ: Manzano, C3: Cahuaji; G: Grano; V: Vidrio. *Hierro total como FeO

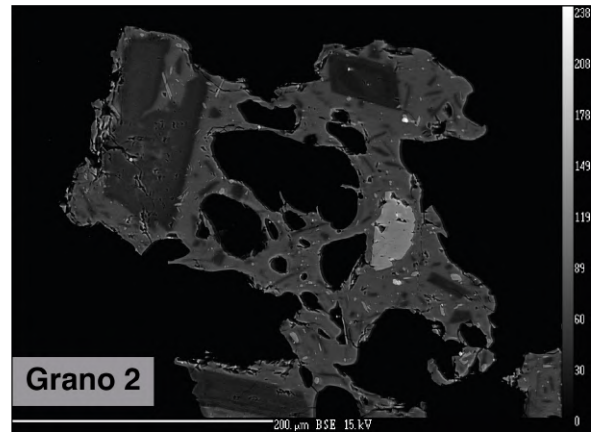
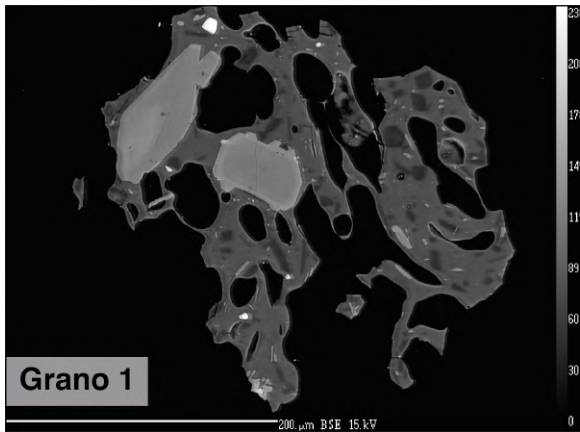
Anexo III – Imágenes de electrones retrodifusos de muestras de ceniza de las fases B, E y F del periodo eruptivo de enero a marzo de 2010 del volcán Tungurahua

FASE B

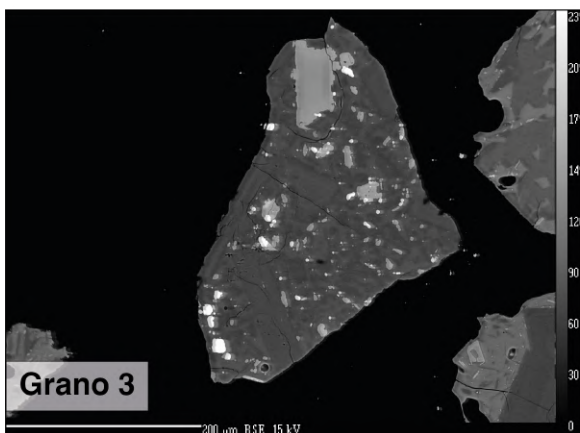
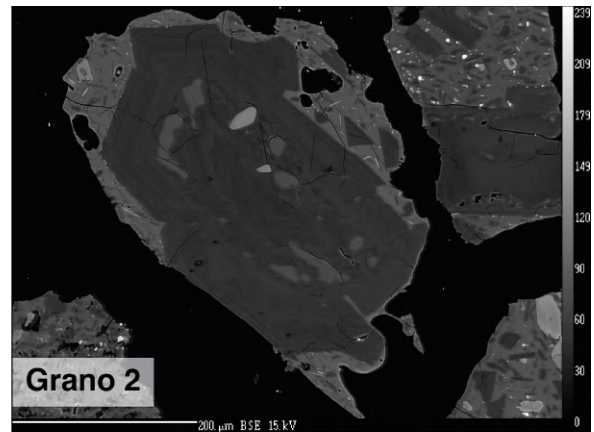
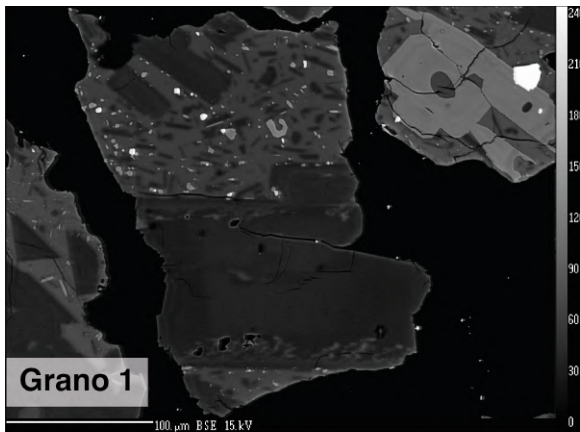
Manzano Macro 06/01/2010 (MZ-6/1)



Manzano Micro 06/01/2010 (MZ-6/1)

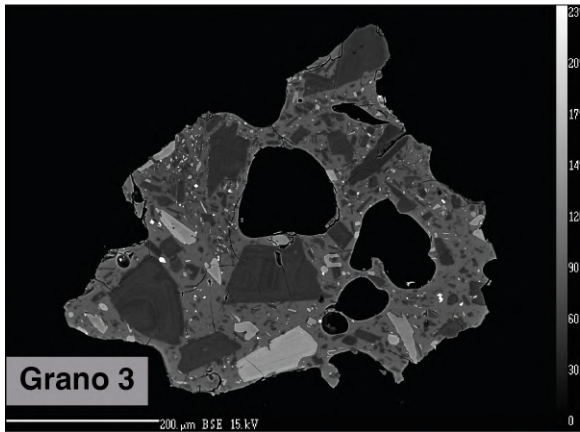
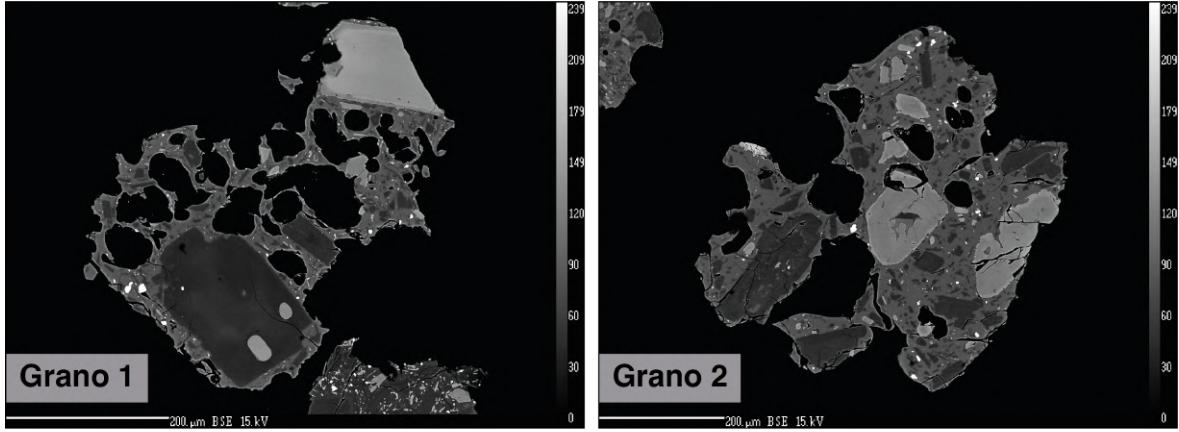


Manzano Denso 06/01/2010 (MZ-6/1)

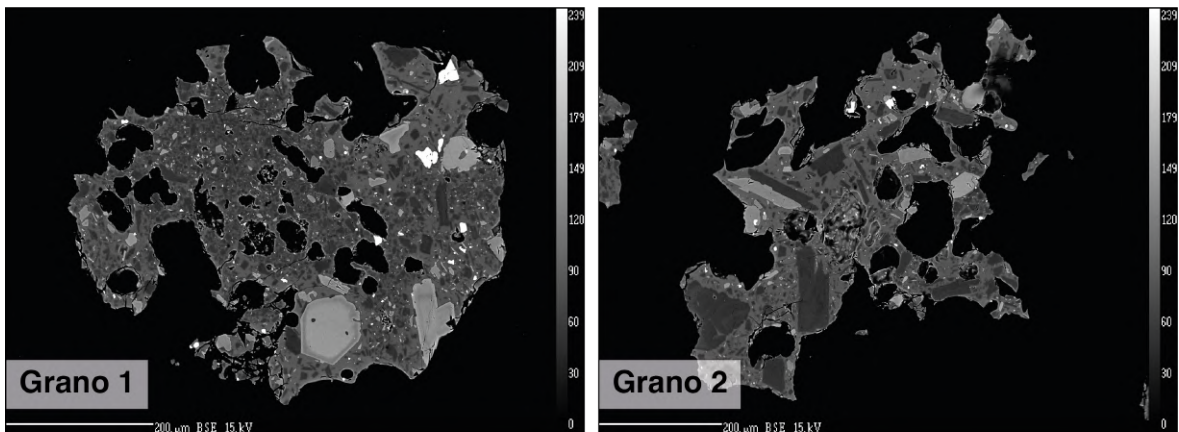


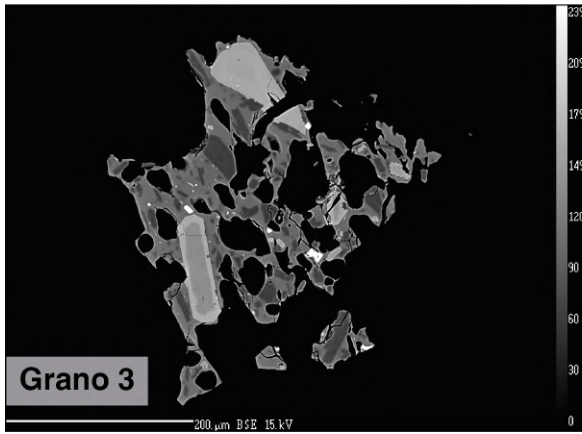
FASE E

Manzano Miel Macro 06/02/2010 (MZM)

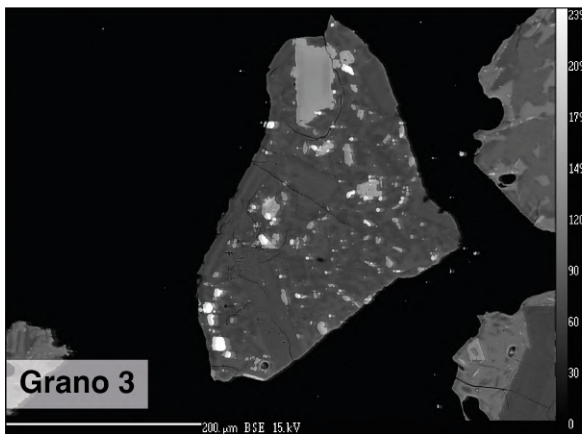
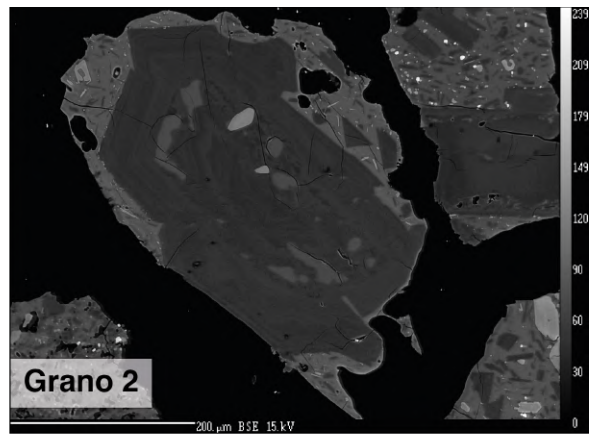
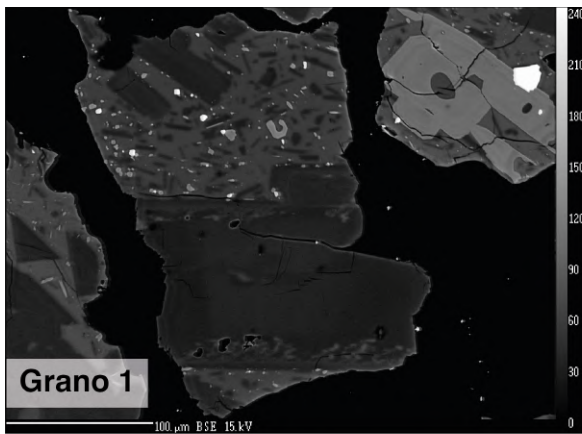


Manzano Miel Micro 06/02/2010 (MZM)

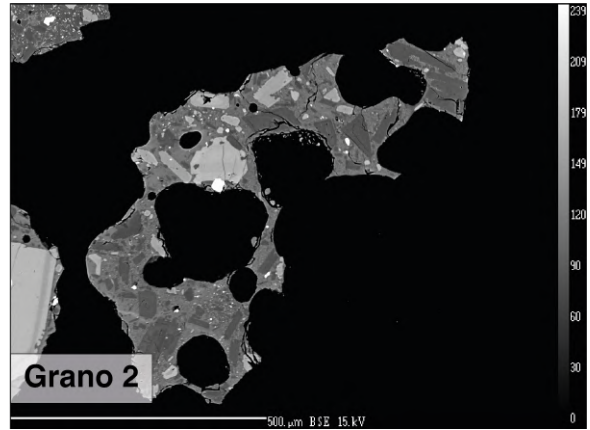
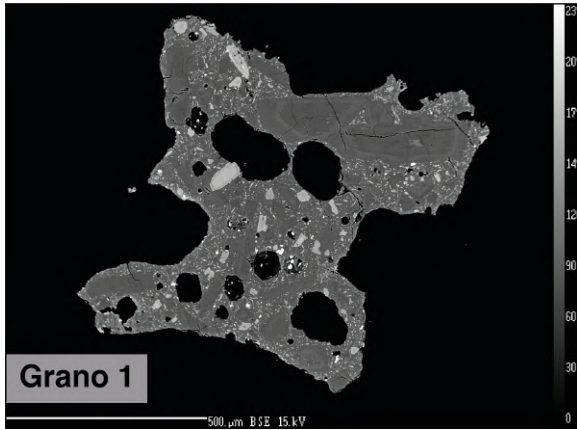




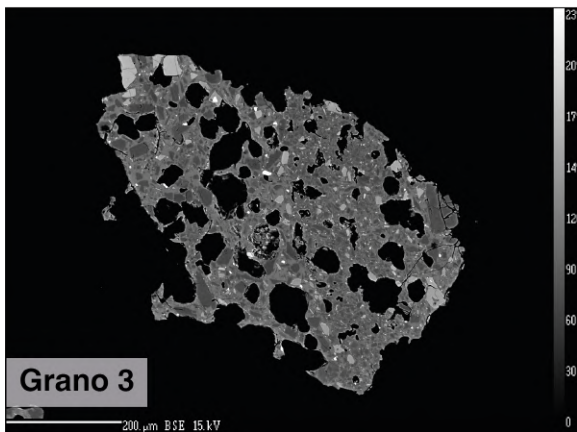
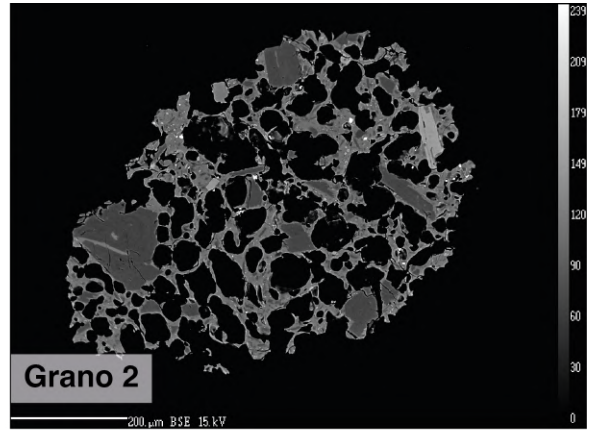
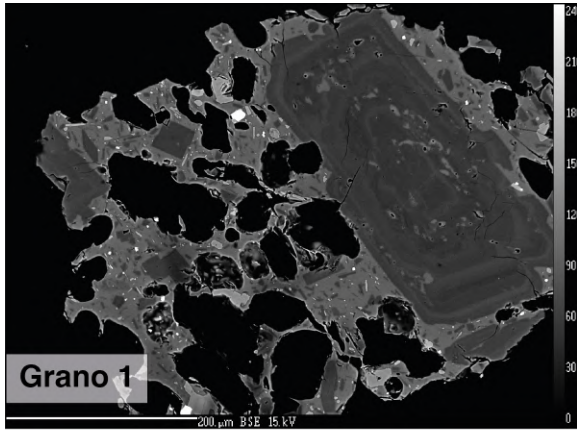
Manzano Miel Denso 06/02/2010 (MZM)



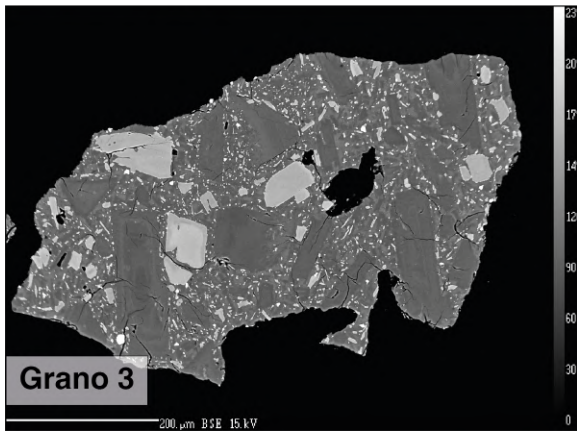
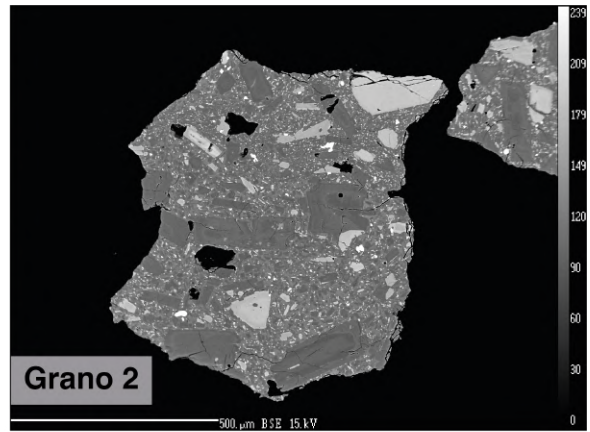
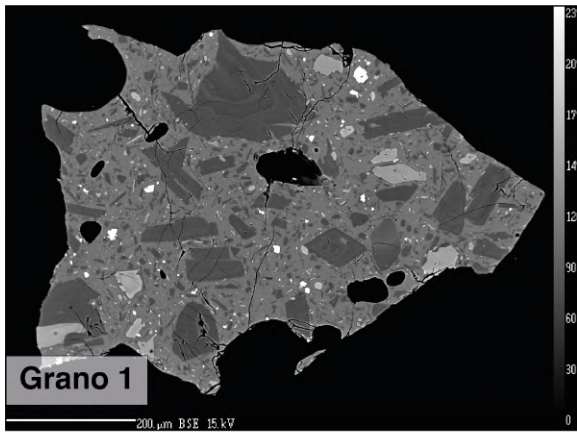
Manzano Negro Macro 06/02/2010 (MZN)



Manzano Negro Micro 06/02/2010 (MZN)

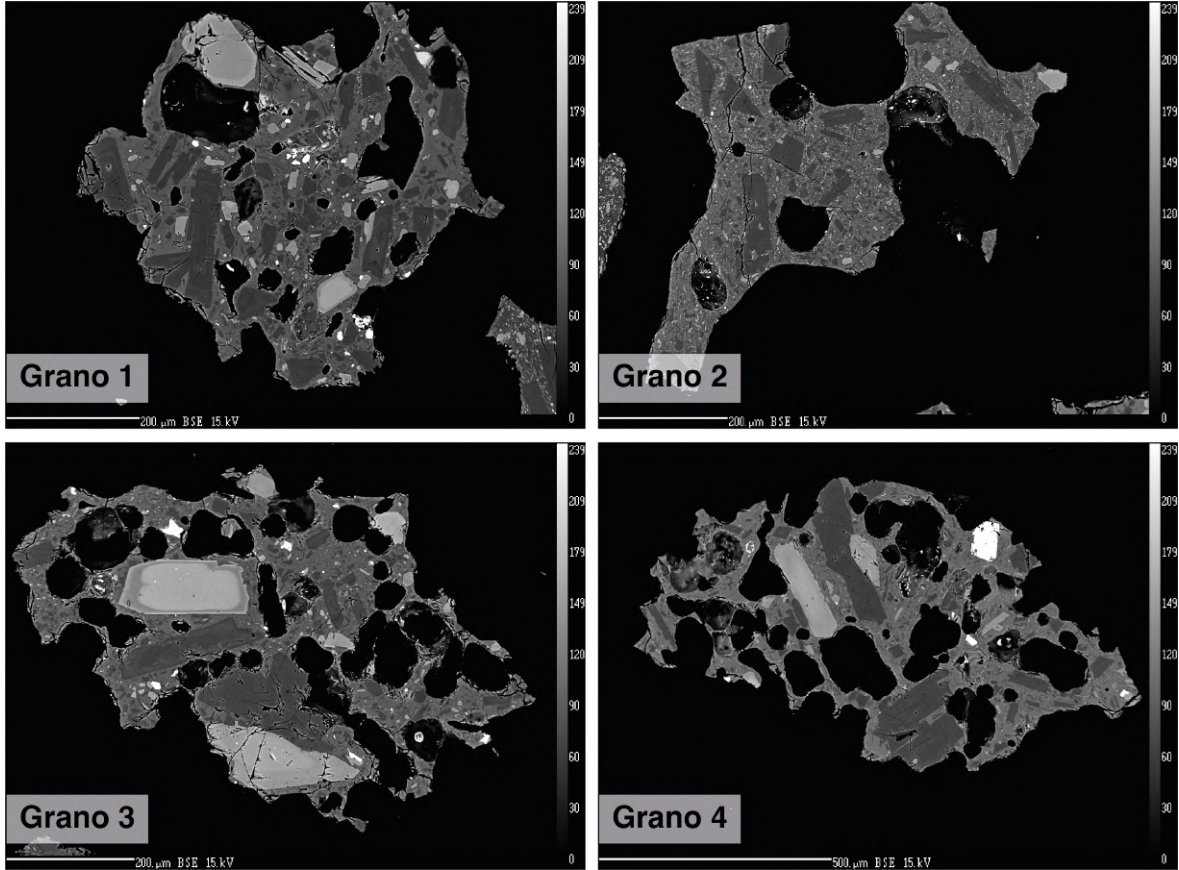


Manzano Negro Denso 06/02/2010 (MZN)

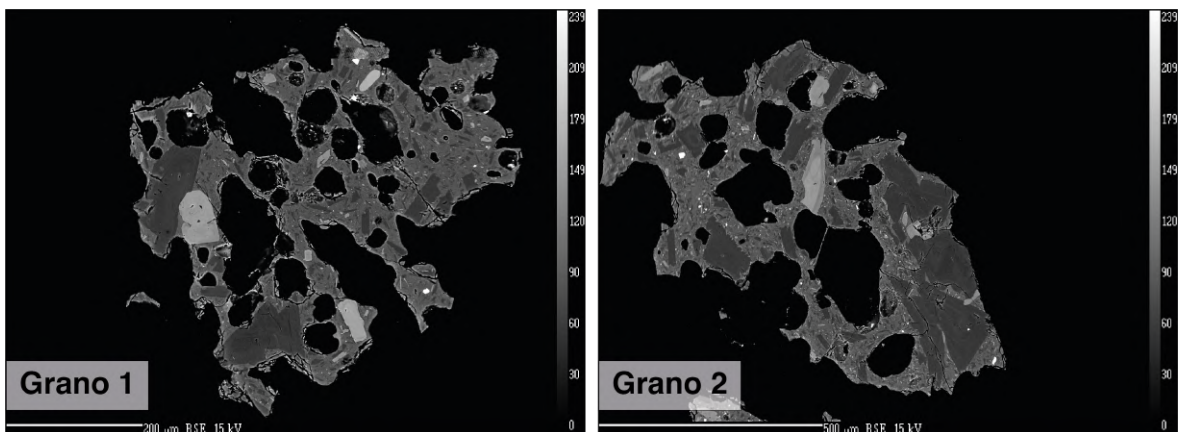


FASE F

Cahuaji Macro 07/03/2010 (C3)



Cahuaji Micro 07/03/2010 (C3)



Cahuaji Denso 07/03/2010 (C3)

