

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN GEOLOGÍA Y
PETRÓLEOS**

**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**

PAZOS MARÍN GABRIELA ALEXANDRA

gabriela.pazos@epn.edu.ec

DIRECTOR: PhD. NARVÁEZ RIVADENEIRA DIEGO FERNANDO

diego.narvaez@epn.edu.ec

CODIRECTORA: PhD. HIDALGO TRUJILLO SILVANA IVONNE

shidalgo@igepn.edu.ec

Quito, marzo 2022

DECLARACIÓN

Yo, Gabriela Alexandra Pazos Marín, declaro bajo juramento que el trabajo aquí escrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Gabriela Alexandra Pazos Marín

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Gabriela Alexandra Pazos Marín, bajo mi supervisión.

PhD. Narváez Rivadeneira Diego Fernando
Director del proyecto

PhD. Hidalgo Trujillo Silvana Ivonne
Codirectora del proyecto

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por estar siempre presente junto a mí y ayudarme a culminar esta etapa de mi vida. Su compañía y bendición me han brindado la fortaleza necesaria para alcanzar este objetivo.

Agradezco a mis padres, Sandra y Virgilio, por brindarme todo su amor, sabiduría y consejo, los cuales me han permitido convertirme en la persona que soy ahora. Gracias también por su infinita paciencia durante los momentos difíciles que acarrea la vida universitaria, sin su ayuda esta meta hubiese sido imposible de cumplir. Los amo mucho.

A mi hermana, Andrea, por escucharme y apoyarme en cada decisión. Tu cariño, perseverancia y fuerza de carácter siempre serán un modelo para mí. Te amo mucho.

A mis abuelitos Carlos, Maysita y mi angelito Lucía, por apoyarme y acompañarme durante todo el camino. Siempre tendrán un lugar especial en mi corazón.

A toda mi familia, especialmente a mis tías Elizabeth, Lourdes, María y Cecilia. Su constante motivación me ha permitido desarrollar este trabajo.

A mi amor bonito, Jonathan, por acompañarme a lo largo de la carrera y enseñarme que en la vida siempre hay tiempo para compartir con los seres queridos. Gracias por todas las risas y momentos compartidos, definitivamente no hubiese sido lo mismo sin ti.

A mis mejores amigos, Sebas y Juan por haber coincidido aquel primer día de clases en el edificio de nivelación, y por brindarme todo su apoyo y amistad hasta el día de hoy.

A todos mis maestros a lo largo de la carrera, por enseñarme a comprender lo amplia y hermosa que es la Geología. Gracias por compartir todo su conocimiento y por su contribución para formar jóvenes profesionales de excelencia. Agradezco especialmente a mi director, Diego, y codirectora, Silvana, por su tiempo y las correcciones realizadas. Sin su apoyo y ayuda la realización de este trabajo no hubiera sido posible.

A todas las personas que he conocido durante mi estancia en la Poli y que ahora puedo llamarlos amigos, cada uno me ha dejado una enseñanza que valoraré por el resto de mi vida, muchas gracias.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	i
ÍNDICE DE FIGURAS	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	ix
RESUMEN.....	x
ABSTRACT.....	xi
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Desarrollo de este trabajo.....	2
1.3. Justificativos	3
1.4. Objetivos.....	3
1.4.1 Objetivo general.....	3
1.4.2 Objetivos específicos.....	4
1.5. Alcance	4
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1. Contexto geológico y actividad reciente del volcán Tungurahua.....	5
2.1.1. Contexto geológico.....	5
2.1.2. Actividad reciente del volcán Tungurahua.....	9
2.2. Dinamismos eruptivos y estudios de caso en el volcán Tungurahua	11
2.2.1. Actividad eruptiva de la fase “marzo 2013”	11
2.2.2. Actividad eruptiva de la fase “julio 2013”	11
2.3. Aporte de la CSD en la comprensión de los dinamismos eruptivos.....	12
3. METODOLOGÍA.....	15
3.1. Descripción de Softwares	15
3.1.1. ImageJ (Fiji).....	15
3.1.2. <i>Plug-in “Trainable Weka Segmentation”</i>	16
3.1.3. <i>CSDSlice 5.0.</i>	17
3.1.4. <i>CSDCorrections</i>	17
3.1.5. <i>CEmin</i>	19
3.2. Métodos utilizados para el cálculo de Nv y la tasa de ascenso magmático.....	20
3.2.1. Densidad numérica de volumen (Nv).....	20
3.2.2. Tasa de Ascenso Magmático	22

3.2.3.	Método utilizado para el cálculo del contenido de agua	25
3.3.	Proceso metodológico	26
4.	RESULTADOS	32
4.1.	Comparación del método manual versus semiautomáticos	32
4.2.	Curvas de Distribución de Tamaño	37
4.3.	Nucleación y Cristalinidad	41
4.4.	Contenidos de agua	42
4.5.	Velocidades de Ascenso	43
4.6.	Tasa de Descompresión	44
5.	DISCUSIÓN	46
5.1.	Discusión metodológica	46
5.1.1.	Método manual vs semiautomático	46
5.1.2.	Método Batch vs CSDCorrections	47
5.1.3.	Cálculo del contenido de agua	48
5.1.4.	Fuentes de error	49
5.2.	Aportes a la comprensión de la actividad del Tungurahua	51
5.2.1.	Hábitos cristalinos e Interpretación de CSD	51
5.2.2.	Características de la fase de marzo 2013	52
5.2.3.	Características de la fase de julio 2013	56
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	62
6.1.	Conclusiones	62
6.2.	Recomendaciones	63
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65
	ABREVIATURAS Y SIGLAS UTILIZADAS	74
	ANEXOS	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: División geomorfológica de la Cordillera de Los Andes. Se tienen 3 secciones: Andes del Norte, Andes Centrales y Andes del Sur. Modificado de Ramos, V.A. (2010).....	5
Figura 2: División morfotectónica del Ecuador. De oeste a este se tienen: 1) Antearco Costero, 2) Cordillera Occidental, 3) Valle Interandino, 4) Cordillera Real, 5) Zona Subandina y 6) Cuenca Oriente. Modificado de Bès de Berc et al. (2005).....	6
Figura 3: Ubicación geográfica del volcán Tungurahua entre las provincias de Tungurahua y Chimborazo. Obtenido de Parra et al. (2016).....	7
Figura 4: Dimensiones de Intersección. Tres posibles definiciones de largo y ancho. 1) Considerando cristales irregulares como paralelepípedos, medidas de largo y ancho son ortogonales entre sí. 2) Un enfoque diferente utilizando la misma figura utiliza el mínimo ancho de la intersección y el largo ortogonal. 3) Considerando una elipse, el largo y ancho son los ejes mayor y menor de dicha figura. Obtenido de Higgins, M D (2000).....	14
Figura 5: Posibles formas de aparición de un cristal cúbico en una sección delgada de acuerdo con su orientación respecto a un plano de intersección. Obtenido de Higgins, M D (2000).....	14
Figura 6: (a) Imagen BSE correspondiente a la muestra de ceniza recolectada el 01/03/2013 en la localidad de Choglontus, SW del Volcán Tungurahua (Narváez, 2014). (b) Imagen TWS clasificada y post-procesada mediante <i>Photoshop</i> . Los colores indican: rojo, plagioclasas; verde, piroxenos; celeste, vesículas; lila, matriz; amarillo: fondo.....	16
Figura 7: Figuras geométricas relacionadas con diferentes hábitos cristalinos. Cada número indica el valor de un eje principal. Obtenido de Sahagian y Proussevitch (1998).....	17
Figura 8: Resultado obtenido en la hoja de cálculo <i>CSDSlice 5.0</i> para una muestra aleatoria. Los ejes principales están establecidos como: “x” (largo), “y” (intermedio), “z” (corto). El valor de R ² corresponde al coeficiente de determinación para la estimación de los hábitos cristalinos.....	17
Figura 9: Interfaz de usuario del programa <i>CSDCorrections</i> (Higgins, 2000). Los cuadrados de colores indican los espacios donde el usuario debe ingresar los datos adquiridos durante el análisis en 2 dimensiones.....	18
Figura 10: Resultados de tamaño del programa <i>CSDCorrections</i> . El recuadro rojo indica la CSD 3D. Φ : Porcentaje de fase mineral. Nv: Densidad numérica de volumen (número de cristales por unidad de volumen).....	19
Figura 11: Panel de control del software <i>CEmin</i> . El panel está conformado por 4 subpaneles cuyos datos deben ser ingresados por el usuario mediante una estimación de tipo prueba y error. La figura muestra los valores ingresados para la muestra “14-03-Sc”.....	20
Figura 12: Ventana “vista” del software <i>CEmin</i> . En esta ventana el usuario puede seleccionar cualquier píxel de la imagen y obtener su valor dentro de la escala de grises.....	20

Figura 13: CSD correspondientes a una familia de sólidos que poseen diferentes hábitos cristalinos obtenidas mediante el programa <i>CSDCorrectios</i>	22
Figura 14: Relación Cl versus H ₂ O de inclusiones magmáticas contenidas en plagioclasas y piroxenos reportado en Myers et al. (2014).....	25
Figura 15: Resumen de la metodología. 1) Selección de imágenes BSE. 2) Pre-procesamiento en <i>Adobe Photoshop</i> que incluye cambio de color de fondo, ajustes de brillo y contraste. 3) Sin-procesamiento, clasificación utilizando el <i>plug-in</i> TWS. 4) Post-procesamiento, corrección de grietas y separación de cristales. 5) Análisis de partículas. 6) Determinación de hábitos cristalinos. 7) Cálculo de la CSD. 8) Cálculo de Nv con el método <i>Batch</i> . 9) Cálculo de la velocidad de ascenso.....	29
Figura 16: Material juvenil micro-vesiculado observado bajo lupa binocular. Clastos sub-translúcidos con vesiculación moderada a alta y en ocasiones aspecto fibroso. Obtenido de Narváez (2014).....	30
Figura 17: Material juvenil macro-vesiculado observado bajo lupa binocular. Vidrio negruzco, clastos con vesículas observables a simple vista, en algunos casos muy brillantes. Obtenido de Narváez (2014).....	30
Figura 18: Resultados de la comparación, las imágenes de la izquierda tienen un procesamiento manual y las de la derecha semiautomático. (a) y (b): “mars13-3c”; (c) y (d): “14-03-Sc”; (e) y (f): “17-03-sa”; (g) y (h): “14-07-s1”; (i) y (j): “08-03-s4”.....	33
Figura 19: Comparación entre CSD obtenidas a partir de los métodos manual y semiautomático para las muestras seleccionadas. (a) “mars13-3c”, (b) “14-03-Sc”, (c) “17-03-sa”, (d) “14-07-s1”, (e) “08-03-s4”.....	35
Figura 20: (a) Resultado de la extracción de plagioclasas utilizando el software <i>CEmin</i> . (b) Resultado de la clasificación mediante el <i>plug-in</i> TWS. (c) Comparación de las CSD resultantes de ambos métodos (<i>CEmin</i> y TWS). Muestra: “14-03-Sc”.....	36
Figura 21: Ejemplo de imágenes BSE correspondientes a las muestras “01-03-Sa”, “08-03-S3”, “14-03-Sa”, “17-03-Sa”, “14-07-S1”, “july13-1a”, “20-07-S1”, “24-07-S3” analizadas en el presente estudio.....	38
Figura 22: CSD correspondientes al material juvenil recolectado durante las fases eruptivas de marzo y julio 2013 del volcán Tungurahua. Las curvas muestran un aumento de la densidad poblacional con la disminución del tamaño de cristales. Sin embargo, algunas presentan un cambio de tendencia en los tamaños cercanos a 1 μm	39
Figura 23: CSD que no presentan una disminución de la densidad poblacional para los tamaños cercanos a 1 μm	40
Figura 24: CSD asociadas al evento vulcaniano sucedido el 14 de julio del 2013 en el volcán Tungurahua. El grupo A (azul) muestra baja densidad poblacional, mientras que el grupo B (naranja) muestra una alta densidad poblacional.....	40

Figura 25: Variación de la densidad numérica de microlitos (Nv) en el material juvenil recolectado durante las fases de marzo y julio 2013 del volcán Tungurahua. El día 14 de julio presenta 2 grupos de muestras: A) con bajos valores de Nv, y B) con altos valores de Nv.....	41
Figura 26: Variación del contenido de plagioclasas (Φ) en el material juvenil recolectado durante las fases de marzo y julio 2013 del volcán Tungurahua.....	42
Fig. 27: Variación de las velocidades de ascenso en el material juvenil recolectado durante las fases marzo y julio 2013 del Volcán Tungurahua. El día 14 de julio presenta 2 grupos de muestras: A) que posee bajos valores de velocidad y B) que presenta altos valores.....	44
Figura 28: Tasas de descompresión calculadas en el material juvenil recolectado durante las fases eruptivas marzo y julio 2013 del volcán Tungurahua. El gráfico indica la misma tendencia que las velocidades de ascenso. El día 14 de julio presenta 2 grupos de muestras: A) con bajas tasas de descompresión, y B) con altas tasas de descompresión.....	45
Figura 29: Relación directamente proporcional entre los valores de Nv (densidad numérica de microlitos) obtenidos mediante los métodos <i>Batch</i> y <i>CSDCorrections</i> . La línea entrecortada representa la relación directa de ambas variables.....	48
Figura 30: Variación del orden de magnitud en las velocidades calculadas dependiendo del método utilizado para el cálculo del contenido de agua (Cw).....	49
Figura 31: Velocidades de ascenso para diferentes volcanes alrededor del mundo. Obtenido de Cassidy et al. (2018).....	50
Figura 32: Flujo observado de SO ₂ medido durante la fase eruptiva marzo 2013 del volcán Tungurahua, se muestran con otros colores los valores registrados para los días: 01, 08, 13, 14 y 17 de marzo, que son el objeto de este estudio. Obtenido de Hidalgo et al. (2015).....	53
Figura 33: Contenido de sílice medido en el vidrio volcánico correspondiente al material juvenil recolectado durante la fase eruptiva marzo 2013 del volcán Tungurahua.....	54
Figura 34: Velocidades calculadas en el material juvenil recolectado durante la fase de marzo 2013 del volcán Tungurahua. Las bajas velocidades están relacionadas a un aumento en la viscosidad del magma en respuesta al alto porcentaje de cristalinidad e incremento de SiO ₂ ...54	54
Figura 35: Contenidos de H ₂ O calculados mediante el método de regresión lineal para el material juvenil recolectado durante la fase eruptiva marzo 2013 del volcán Tungurahua. El gráfico muestra bajos valores de H ₂ O, típicos de muestras de ceniza. Sin embargo, un contenido mayor se observa para el día 17 de marzo.....	55
Figura 36: Velocidades de ascenso calculadas en el material juvenil recolectado durante la fase eruptiva julio 2013 del volcán Tungurahua. El 14 de julio indica 2 grupos de muestras, el grupo A, que posee bajas velocidades; y el grupo B, que posee altas velocidades.....	56
Figura 37: Densidad numérica de volumen de microlitos (Nv) determinada en el material juvenil recolectado durante la fase eruptiva julio 2013 del volcán Tungurahua. El 14 de julio indica 2	

grupos de muestras, el grupo A, que posee bajas valores de N_v ; y el grupo B, que posee altos valores de N_v	57
Figura 38: (a) Muestra “july13-1a” correspondiente al grupo A para el evento eruptivo del 14 de julio del 2013 en el volcán Tungurahua. (b) Muestra “14-07-s2” correspondiente al grupo B recolectada durante el mismo evento.	57
Figura 39: Tasas de nucleación y crecimiento idealizadas en función de la temperatura. Bajas tasas de enfriamiento resultan en rápido crecimiento y bajas nucleación (T_a). Al contrario, altas tasas de enfriamiento permiten un crecimiento lento y rápida nucleación produciendo muchos cristales finos (T_b). Tasas muy altas de enfriamiento producen vidrio (T_c). Obtenido de Winter (2014).....	58
Figura 40: Flujo observado de SO_2 medido durante la fase eruptiva julio 2013 del volcán Tungurahua. Obtenido de Hidalgo et al. (2015).....	59
Figura 41: Cristalinidad de plagioclasas determinada en las muestras del material juvenil recolectado durante la fase eruptiva julio 2013 del volcán Tungurahua.....	60
Figura 42: Densidad numérica de microlitos (N_v) calculadas en el material juvenil recolectado durante la fase eruptiva de julio 2013 del volcán Tungurahua.....	60
Figura 43: Contenidos de agua calculados en el material juvenil recolectado durante la fase eruptiva de julio 2013 del volcán Tungurahua.....	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Actividad eruptiva del volcán Tungurahua durante los días: 01, 08, 13-14, 16-17 de marzo. Recuperado de Narváez (2014), Hidalgo et al. (2015). Se consideran explosiones vulcanianas a aquellas explosiones cuyo IRP (<i>Infrasound Reduced Pressure</i>) es mayor a 100 Pa calculado a 1 km de distancia del cráter (Johnson, 2003).....	11
Tabla 2: Actividad eruptiva del volcán Tungurahua durante los días: 14, 20 y 24 de julio. Recuperado de Narváez (2014), Gaunt et al. (2019), Hidalgo et al. (2015). Se consideran explosiones vulcanianas a aquellas explosiones cuyo IRP es mayor a 100 Pa calculado a 1 km de distancia del cráter (Johnson, 2003).....	12
Tabla 3: Parámetros y fórmulas utilizadas en el método <i>Batch</i> para calcular la densidad numérica de volumen correspondiente a la población de microlitos de plagioclasas de una muestra. <i>plg</i> : Plagioclasas.....	21
Tabla 4: Parámetros utilizados para el cálculo de la velocidad de ascenso según el método de Toramaru et al. (2008). Las constantes “a” y “c” dependen del contenido de sílice y agua.....	23
Tabla 5: Valores medidos de Cl en el vidrio volcánico de las muestras de material juvenil recolectadas durante la fase de marzo 2013 del volcán Tungurahua.....	26
Tabla 6: Valores medidos de Cl en el vidrio volcánico de las muestras de material juvenil recolectadas durante la fase de julio 2013 del volcán Tungurahua.....	26
Tabla 7: Valores medidos de SiO ₂ en el vidrio volcánico del material juvenil recolectado durante la fase de marzo 2013 proveniente del volcán Tungurahua.....	28
Tabla 8: Valores medidos de SiO ₂ en el vidrio volcánico del material juvenil recolectado durante la fase de julio 2013 proveniente del volcán Tungurahua.....	28
Tabla 9: Código de muestra, tipo, duración del tiempo de sedimentación y fecha de recolección del material juvenil correspondientes a las imágenes analizadas en el presente estudio.....	31
Tabla 10: Código de cada imagen analizada y sus respectivos porcentajes de cristalinidad según los métodos manual y semiautomático. Los porcentajes fueron obtenidos utilizando los datos en 2D proporcionados por el software <i>ImageJ</i>	32
Tabla 11: Número de cristales, hábitos cristalinos, coeficiente de determinación y densidad numérica de volumen resultantes de los procesamientos manual y semiautomático (TWS).....	35
Tabla 12: Comparación entre los parámetros resultantes de los procesamientos semiautomáticos <i>CEmin</i> y TWS.....	37
Tabla 13: Parámetros obtenidos de los programas <i>CSDCorrections</i> y <i>CSDSlice</i> para 7 de las 51 imágenes analizadas en este estudio.....	39
Tabla 14: Rangos de variación del contenido de plagioclasas (Φ) en el material juvenil recolectado durante las fases de marzo y julio 2013 del volcán Tungurahua.....	42

Tabla 15: Valores medidos de Cl y valores calculados de H ₂ O en base al método de regresión lineal reportado en Myers et al. (2014), fase marzo 2013.....	43
Tabla 16: Valores medidos de Cl y valores calculados de H ₂ O en base al método de regresión lineal reportado en Myers et al. (2014), fase julio 2013.....	43
Tabla 17: Rangos de variación de las velocidades de ascenso calculadas para el material juvenil recolectado durante las fases marzo y julio 2013 del volcán Tungurahua.....	44
Tabla 18: Valores resultado de la diferencia entre los parámetros obtenidos a través de los métodos manual y semiautomático TWS.....	46

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo I. Manual de Procesamiento de Imágenes BSE mediante el método de Lormand et al. (2018).....	75
Anexo II. Parámetros utilizados para el cálculo de la velocidad de ascenso a través del método de Toramaru et al. (2008).....	99
Anexo III. Imágenes Clasificadas mediante el <i>plug-in</i> TWS.....	106

RESUMEN

Este trabajo presenta un análisis textural de microlitos de plagioclasas, componentes de la ceniza volcánica recolectada durante las fases eruptivas de marzo y julio 2013 del volcán Tungurahua. Para el análisis se utilizaron imágenes de microsonda electrónica, las cuales fueron procesadas mediante algunos programas computacionales de acceso libre (ej. Weka, CEMin). El tratamiento de estas imágenes permitió obtener varios parámetros, como: los hábitos cristalinos, la densidad numérica de volumen (N_v) y la abundancia de fase (Φ) de la población de microlitos. La densidad numérica de volumen en conjunto con datos geoquímicos de estudios anteriores fue utilizada para calcular la tasa de ascenso magmático. Durante las dos fases seleccionadas se presentaron diferentes dinanismos eruptivos (ej. erupciones vulcanianas, estrombolianas y fuentes piroclásticas) cuyo comportamiento está influenciado por procesos de cristalización, el contenido de volátiles y la velocidad de ascenso magmático.

Para la fase de marzo se observa una correlación inversa entre la velocidad y la abundancia de microlitos de plagioclasas. Otros estudios demuestran que la actividad se presentó en un sistema abierto para la emisión de gases volcánicos. Por lo tanto, el comportamiento observado en esta fase se interpreta como resultado del ascenso de un magma cuya velocidad está condicionada por la viscosidad que varía dependiendo del grado de cristalización inducida por desgasificación en el conducto.

Por otro lado, las muestras emitidas durante el evento vulcaniano del 14 de julio indicaron una correlación directa entre la velocidad y la abundancia de microlitos. Estudios previos sugieren que el evento se desarrolló en un sistema cerrado debido a la formación de un tapón. Este estudio propone que, a diferencia de los sistemas abiertos, en sistemas cerrados el principal factor que influye en la velocidad de ascenso es la flotabilidad del magma. Es decir que mientras el magma cristaliza por desgasificación, los gases al no poder salir del conducto empiezan a formar burbujas bajo el tapón, las cuales al expandirse disminuyen la densidad del magma (lo hacen más flotable) y provocan un aumento en su velocidad una vez abierto el sistema. Durante el resto de la fase de julio la actividad se desarrolló en un sistema abierto.

Este trabajo muestra que el análisis textural de cenizas, principalmente el estudio de microlitos de plagioclasas, provee indicios acerca de los procesos magmáticos que ocurren dentro del conducto, por lo tanto, este método representa una herramienta efectiva para realizar un monitoreo petrológico de volcanes activos.

ABSTRACT

This work presents a textural analysis of plagioclase microlites, components of volcanic ash samples, collected during the March and July 2013 eruptive phases at Tungurahua volcano. For this study, open-source softwares (e.g., Weka, Cemin) were used to obtain textural parameters from back-scattered electron images (BSE), such as: crystal habits, volume number density (N_v), and phase abundance (Φ) of microlites population. Volume number density and geochemical data obtained from previous studies were used to calculate magma ascent rates. Different eruptive dynamics influenced by crystallization, volatile contents, and magma ascent rate, were present in the March and July phases (e.g. vulcanian, strombolian, and pyroclastic fountains eruptions).

The March eruptive phase shows an inverse correlation between magma ascent rate and plagioclase microlite abundance. Other studies suggest that the activity occurred in an open-vent system for magma outgassing. Therefore, the behaviour observed in this phase is interpreted as the result of the rise of a magma whose ascent rate is conditioned by the variation of its viscosity, which depends on the degree of degassing-induced crystallization.

On the contrary, ash samples collected during the July 14th vulcanian event show a direct correlation between magma ascent rate and microlite abundance. Previous studies suggest that this event took place within a closed-vent system due to the formation of a dense plug prior to the eruption. This study proposes that in closed systems, the principal factor affecting the ascent rate is magma buoyancy, unlike open systems, where viscosity prevails. Thus, while a magma is experiencing degassing-induced crystallization in a closed conduit, outgassing is less effective, and gases tend to accumulate below the plug forming bubbles. After that, bubble coalescence and expansion tend to reduce magma density (making it more buoyant) and triggering a higher ascent rate once the gas overpressure finally breaks the plug. During the rest of the July phase, the eruptive activity returned to an open-vent system.

This work shows that textural analysis of volcanic ash samples can provide insights into magmatic processes occurring within the conduit. Therefore, this method represents an effective petrological monitoring tool for active volcanoes.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El monitoreo volcánico tiene como objetivo principal disminuir el riesgo volcánico mediante la transferencia de información sobre la actividad de un volcán a las poblaciones aledañas. Durante periodos de reposo la vigilancia volcánica se realiza principalmente mediante la adquisición de datos sísmicos, geodésicos y geoquímicos. El análisis de estas señales permite advertir el cambio hacia una erupción inminente.

Una vez ocurrida la erupción, el monitoreo volcánico continúa siendo importante, y otras herramientas pueden ser utilizadas. Por ejemplo, un monitoreo petrológico de los productos volcánicos se realiza durante una erupción en curso y permite obtener información sobre la profundidad de la cámara magmática, la velocidad de ascenso y composición del magma, entre otros parámetros (Re et al., 2021). Una técnica de monitoreo petrológico de bajo costo es el análisis textural de los productos volcánicos mediante el estudio de imágenes. La “distribución de tamaño de cristales” (CSD por sus siglas en inglés) utiliza imágenes de microscopio electrónico y sus resultados proveen indicios sobre procesos de almacenamiento, tasas de enfriamiento, nucleación y crecimiento (Re et al., 2021).

El presente trabajo se realiza como parte del proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniera Geóloga. Aquí se presenta el procedimiento para realizar un análisis textural de los depósitos de cenizas emitidos por el volcán Tungurahua durante los periodos eruptivos de marzo y julio 2013. Este trabajo complementa el estudio de morfología, granulometría y geoquímica publicado por Narváez (2014). Los resultados del análisis textural son correlacionados con los dinamos eruptivos descritos para dichos periodos, es decir, con los tipos de erupciones más frecuentes.

1.2. Desarrollo de este trabajo

Para poder estudiar a detalle la relación entre los dinamismos eruptivos y las texturas observadas en los productos de una erupción, este estudio se enfoca en el análisis de los pequeños cristales (<30 μm) que conforman la matriz del material volcánico. Éstos pequeños cristales son comúnmente denominados “microlitos” (Cashman, 1992; Zellmer, 2021) y guardan información sobre los procesos que han tomado lugar durante el ascenso del magma a lo largo del conducto volcánico (Lormand et al., 2020).

La forma cuantitativa de estudiar la textura de los microlitos es a través de su distribución de tamaño. Este método comenzó a aplicarse en 1971 con el estudio de Randolph y Larson en el campo de la ingeniería química y más tarde en la Geología con el estudio de Cashman y Marsh (1988).

Hasta los años 80 la identificación de cada especie cristalina y sus medidas de tamaños eran realizadas manualmente mediante inspección visual. Sin embargo, el desarrollo de nuevas tecnologías (ej. *machine learning* y softwares de análisis de imágenes) ha permitido agilizar el proceso obteniendo resultados de alta calidad. En ese contexto, el trabajo de titulación está enfocado en estudiar dos fases eruptivas del volcán Tungurahua correspondientes a marzo y julio 2013. Los productos volcánicos de esta erupción fueron estudiados previamente por Bernard et al. (2013) y Narváez (2014). Este estudio cuenta con imágenes de electrones retrodifusos obtenidas mediante una microsonda electrónica, en las cuales es posible aplicar el estudio textural de microlitos.

El presente trabajo pretende complementar el conocimiento acerca de los dinamismos eruptivos del volcán Tungurahua correlacionando los eventos observados con la distribución de tamaño de microlitos y proporcionando una estimación de las tasas de ascenso magmático para las fases eruptivas de marzo y julio 2013. Para ello, se realiza un análisis textural de microlitos semiautomatizado con ayuda de diversos softwares de acceso libre como son: *Fiji*, *CSDSlice* y *CSDCorrections*.

El presente capítulo expone los antecedentes, justificativos, objetivos y el alcance de este trabajo. El capítulo II señala el contexto geodinámico y características asociadas a la zona de estudio. Asimismo, se presenta un resumen de la actividad eruptiva histórica del volcán Tungurahua y se describen los dinamismos eruptivos de las fases de marzo y julio 2013. También en este capítulo se señala la importancia de la CSD en la comprensión de los dinamismos eruptivos.

En el capítulo III se presenta una descripción detallada de los softwares utilizados para el cálculo de las diferentes curvas de distribución de tamaño y los métodos aplicados para la estimación de las velocidades de ascenso magmático. Los resultados del trabajo son presentados en el capítulo IV. Además, aquí también se incluye una comparación entre los métodos de clasificación manual y semiautomáticos.

En el capítulo V se discute la metodología aplicada en este estudio y se señalan las limitaciones encontradas en el momento de su realización. También se presentan los aportes a la comprensión de la actividad eruptiva del volcán Tungurahua. Finalmente, el capítulo VI expone las conclusiones y recomendaciones alcanzadas durante este trabajo.

1.3. Justificativos

Es necesario realizar un análisis textural cuantitativo de los depósitos de ceniza del volcán Tungurahua por dos razones principales. En primer lugar, se considera un enfoque científico. Analizar el comportamiento de las distribuciones de tamaño en cada fase eruptiva permite establecer una correlación con el dinamismo eruptivo observado durante un episodio volcánico. A su vez, estos análisis mejoran el conocimiento que se tiene del volcán permitiendo identificar patrones o cambios en su comportamiento a largo plazo y posiblemente realizar pronósticos sobre la actividad eruptiva.

En segundo lugar, se considera la relevancia en el área de riesgo volcánico. El comprender en mayor detalle el comportamiento eruptivo del volcán Tungurahua permite estar mejor preparados en caso de un nuevo periodo de actividad eruptiva.

1.4. Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Establecer la relación entre la distribución de tamaño de los microlitos obtenida a partir de imágenes de microscopio electrónico y los dinamisismos eruptivos para las fases eruptivas de marzo y julio 2013.

1.4.2 Objetivos específicos

- Calcular el porcentaje de plagioclasas, piroxenos y vesículas en las imágenes de microscopio electrónico utilizando el método descrito por Lormand et al. (2018).
- Comparar los resultados obtenidos por el método de Lormand et al. (2018), *semi-automatic Trainable Weka Segmentation*, con resultados de procesamiento manual y semiautomático (i.e Zeng et al., 2018).
- Calcular la distribución de tamaño de cristales (CSD) de microlitos de plagioclasas para las muestras de ceniza de los periodos de actividad de marzo y julio 2013 a través de softwares especializados (*CSDSlice*, *CSDCorrections*).
- Estimar la tasa de ascenso magmático a través de los datos obtenidos en el análisis de CSD y las ecuaciones propuestas por Toramaru et al. (2008).
- Interpretar las curvas de distribución de tamaño relacionándolas con el dinamismo eruptivo observado en cada período.

1.5. Alcance

- Recopilación de información bibliográfica acerca del método de análisis textural de microlitos y softwares para el procesamiento de imágenes.
- Selección de imágenes de electrones retrodifusos (obtenidas mediante microsonda electrónica) correspondientes a las fases eruptivas seleccionadas, en donde sea posible aplicar el análisis textural.
- Pre, sin- y post-procesamiento de dichas imágenes.
- Descripción y comparación de las imágenes procesadas con otros softwares.
- Obtención de las curvas de distribución de tamaño de las muestras seleccionadas.
- Estimación de la tasa de ascenso magmático y su relación con el dinamismo eruptivo.
- Interpretación y discusión de resultados.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Contexto geológico y actividad reciente del volcán Tungurahua

2.1.1. Contexto geológico

La Cordillera de los Andes es una cadena montañosa producto de la subducción de la placa Nazca bajo la placa Sudamericana. Geomorfológicamente se encuentra dividida en 3 secciones: Andes del Norte, desde Venezuela hasta el Golfo de Guayaquil; Andes Centrales: desde el Golfo de Guayaquil hasta el Golfo de Peñas en el sur del Perú; y Andes del Sur, desde el Golfo de Peñas hasta la Patagonia (Fig. 1). El arco volcánico ecuatoriano se localiza en la sección norte.



Figura 1: División geomorfológica de la Cordillera de Los Andes. Se tienen 3 secciones: Andes del Norte, Andes Centrales y Andes del Sur. Modificado de Ramos, V.A. (2010).

El Ecuador está dividido en seis regiones morfotectónicas (Fig. 2). 1) El Antearco Costero, compuesto por un basamento oceánico de edad Cretácico (Luzieux et al.,

2006) y cubierto por depósitos más recientes de edades entre los períodos Paleógeno y Neógeno (Vallejo et al., 2019). 2) La Cordillera Occidental, que posee rocas intrusivas y extrusivas yuxtapuestas con depósitos sedimentarios de edad Cretácico Tardío a Mioceno (Vallejo et al., 2009; Vallejo et al., 2019). 3) El Valle Interandino, el cual comprende una serie de depósitos volcánicos de edades Mioceno Tardío - Holoceno (Fiorini y Tibaldi, 2012). 4) La Cordillera Real, compuesta por rocas metamórficas de edad Paleozoico, rocas graníticas y sedimentarias de edad Mesozoica (Litherland et al., 1994; Spikings et al., 2015). 5) La zona Subandina que forma parte del *wedge top* de la cuenca de antepaís y 6) la Cuenca Oriente, que conforma la cuenca de tipo antepaís desarrollada en respuesta al levantamiento de la Cordillera Real y la cual posee rocas de edades entre los períodos Cretácico Tardío y Cuaternario (Vallejo et al., 2019).

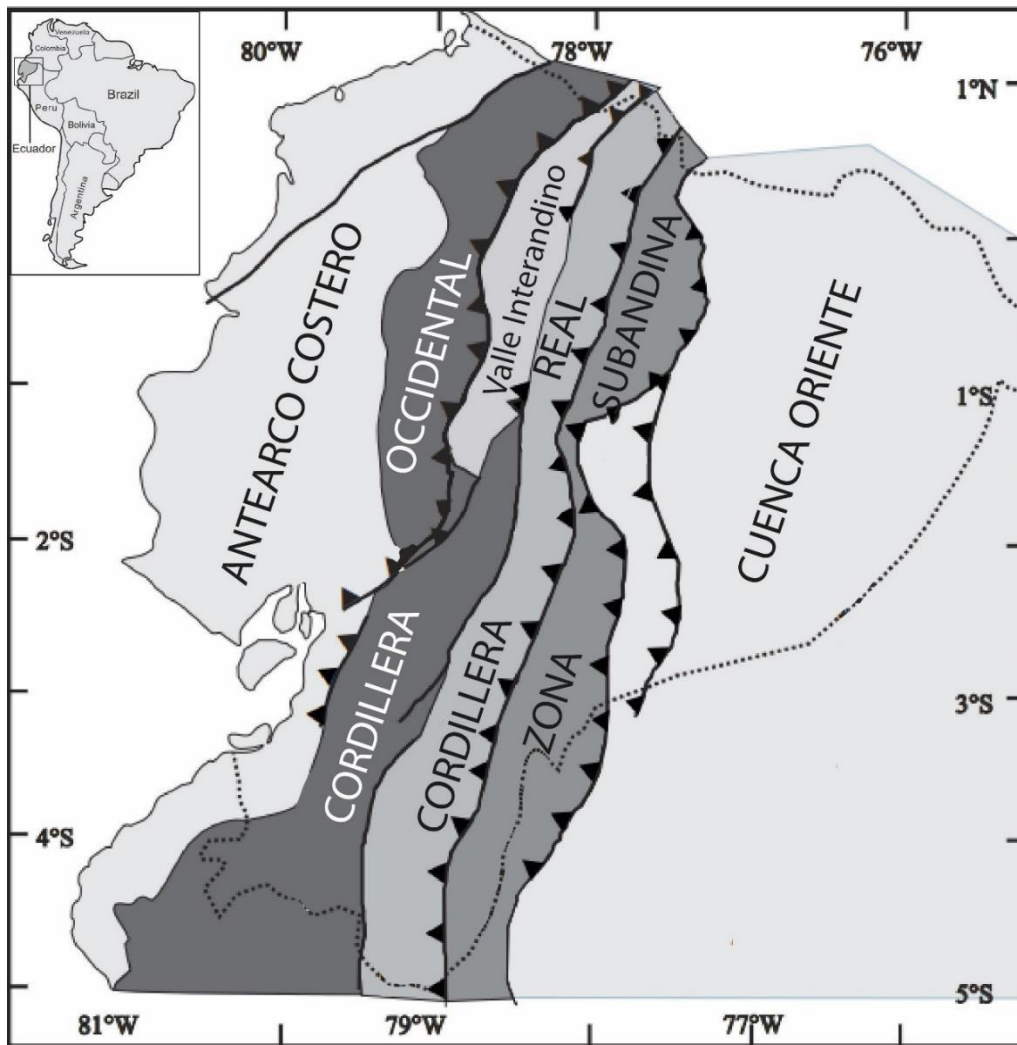


Figura 2: División morfotectónica del Ecuador. De oeste a este se tienen: 1) Antearco Costero, 2) Cordillera Occidental, 3) Valle Interandino, 4) Cordillera Real, 5) Zona Subandina y 6) Cuenca Oriente. Modificado de Bès de Berc et al. (2005).

En el Ecuador continental existen al menos 20 volcanes que han estado activos desde el Holoceno y 8 que han tenido erupciones históricas desde la conquista española en 1532 (Santamaría, 2017; IGEPN, 2022), entre ellos están: los volcanes Cotopaxi, Cayambe, Guagua Pichincha y Tungurahua. El volcán Tungurahua, localizado entre las provincias de Tungurahua y Chimborazo (Fig. 3), es un estratovolcán activo ubicado sobre la Cordillera Real, se localiza 120 kilómetros al sur de Quito y 33 km al sureste de Ambato (Hall et al., 1999). Varios estudios de campo y geocronológicos, además de relatos de naturalistas han evidenciado que este volcán ha experimentado al menos 5 periodos eruptivos desde la época histórica: 1641-1646, 1773-1781, 1886-1888, 1916-1918 y 1999-2016 (ej. Hall et al., 1999; Le Pennec et al., 2008).

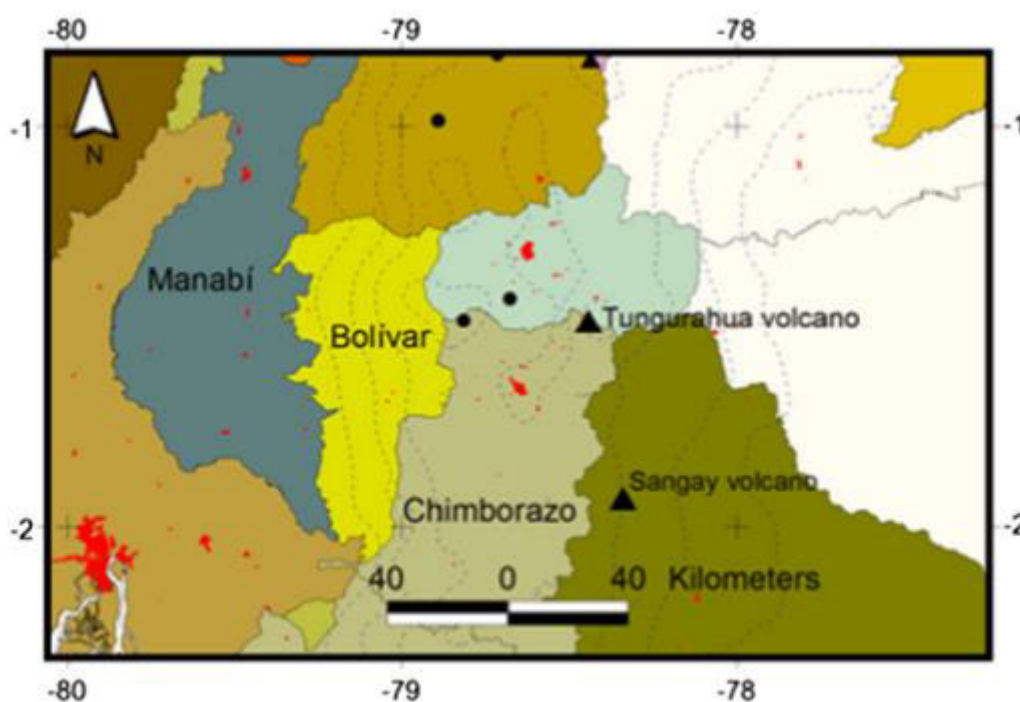


Figura 3: Ubicación geográfica del volcán Tungurahua entre las provincias de Tungurahua y Chimborazo. Obtenido de Parra et al. (2016).

La actividad del volcán Tungurahua se ha caracterizado por presentar diversos fenómenos volcánicos como emisiones de gas, ceniza, corrientes piroclásticas, lahares y flujos de lava. Esta actividad ha sido interpretada como erupciones de tipo vulcanianas, estrombolianas e incluso sub-plinianas (Wright et al., 2012, Gaunt et al., 2020, Samaniego et al., 2011; Andújar et al., 2017; Arellano et al., 2008; Battaglia et al., 2019; Hidalgo et al., 2015). El último periodo eruptivo inició en 1999 y continuó hasta 2016, registrando las erupciones más violentas durante las fases julio – agosto 2006, febrero 2008, mayo 2010, diciembre 2012, julio 2013, febrero 2014 y febrero 2016.

Generalmente, el volcán Tungurahua emite magmas de composición andesítica durante erupciones medianamente explosivas ($VEI \leq 3$). Sin embargo, se ha registrado la emisión de magmas dacíticos en eventos mucho más explosivos ($VEI \geq 4$) como, por ejemplo, durante la erupción de 1886 (Andújar et al., 2017; Samaniego et al., 2011).

Alrededor del volcán se asientan 17 poblaciones que pueden ser afectadas en caso de una erupción volcánica. Las poblaciones que podrían verse más perjudicadas son: Juive Grande, Cusúa, Choglontus, Palitahua en la parte occidental y la ciudad de Baños al norte del volcán (IGEPN, 2020).

La continua erupción del volcán Tungurahua en el último periodo eruptivo y el alto riesgo para las poblaciones cercanas, han sido motivos para que se realicen varios estudios petrológicos exhaustivos de sus productos volcánicos.

Entre los trabajos más representativos está el estudio de Samaniego et al. (2011) que estudió la erupción subpliniana de 2006 y sugirió un evento de recarga de un magma más caliente en el reservorio andesítico. Wright et al. (2012) estudió muestras de ceniza y determinó la tasa de aporte magmático para diferentes tipos de erupciones observadas en este volcán. Andújar et al. (2017) reprodujo experimentalmente los minerales observados en las rocas emitidas durante el evento eruptivo de 2006, lo cual le permitió determinar las condiciones de almacenamiento y diferenciación del magma (presión, profundidad, temperatura, contenido de volátiles), entre otros.

A pesar de la gran cantidad de estudios realizados en este volcán, existen ciertos parámetros que han sido poco estudiados como son: la distribución del tamaño de microlitos y la tasa de ascenso magmático. Estos parámetros son importantes, ya que contribuyen a ejecutar un monitoreo petrológico más detallado de un volcán y pueden ser relacionados con sus diferentes dinanismos eruptivos.

Los dinanismos correspondientes a las fases eruptivas de marzo y julio 2013 para el volcán Tungurahua fueron distinguidos en el estudio de Narvéez (2014) mediante un análisis morfo-granulométrico, geoquímico y modal de los productos volcánicos de caída.

Actualmente, gracias al desarrollo de nuevas tecnologías en el campo de análisis de imágenes, el análisis textural de microlitos utilizando imágenes BSE (*Backscattered Electron images*, imágenes de electrones retrodifusos) representa una opción relativamente fácil de realizar (Noguchi et al., 2008; Toramaru et al., 2008; Martel, L., 2012; Lormand et al., 2020) y constituye el objetivo principal de este trabajo.

2.1.2. Actividad reciente del volcán Tungurahua

La actividad del volcán Tungurahua ha sido subdividida en fases eruptivas que en su conjunto conforman un periodo eruptivo. Se denomina “fase eruptiva” al tiempo durante el cual es posible observar la salida de material sólido a través del conducto de un volcán, ya sea mediante una explosión o emisión de ceniza (Narváez, 2014).

A continuación, se presenta un resumen de la actividad eruptiva del volcán Tungurahua durante el último período eruptivo (1999-2016).

El último período eruptivo del volcán Tungurahua comenzó en octubre de 1999, luego de 75 años de reposo (Samaniego et al., 2011). Entre 1999 y 2005 la actividad consistía en fases recurrentes de corta duración y baja a moderada explosividad (Andújar et al., 2017) separadas por intervalos de quietud, comprendiendo el intervalo más largo entre febrero y diciembre de 2005 (Samaniego et al., 2011). Comúnmente, se presentaron episodios de actividad estromboliana con explosiones de diferente intensidad, desgasificación pasiva en forma de vapor y columnas de ceniza que alcanzaron hasta 7 km de altura (Andújar et al., 2017). Ninguna corriente piroclástica ni flujo de lava se reportó entre 1999 y 2005 (Hall et al., 2013).

Entre los días 14 y 15 de julio de 2006 se reportó una violenta erupción subpliniana (VEI = 3), la cual produjo por primera vez varios flujos piroclásticos y una columna de ceniza de aproximadamente 14 km de altura que se dirigió hacia el noroccidente del volcán (Fee et al., 2010). Más tarde, el 16 y 17 de agosto de 2006 se produjo una segunda erupción subpliniana (VEI = 3), la cual expulsó un volumen de tefra de $47 - 67 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Eychenne et al., 2012). Durante este evento se reportaron columnas de ceniza que alcanzaron hasta 17 km de altura y la generación de más de 30 flujos piroclásticos que descendieron hasta la base del volcán, provocando pérdidas humanas y múltiples daños materiales (Wright et al., 2012; Eychenne et al., 2012). Este evento ha sido clasificado como uno de los más catastróficos de este período eruptivo del volcán Tungurahua.

A partir de la erupción de agosto 2006 y hasta febrero 2008, la actividad del volcán Tungurahua se caracterizó por presentar erupciones estrombolianas y explosiones esporádicas descritas como vulcanianas (Mothes et al., 2015). El 6 de febrero de 2008 se produjo nuevamente el colapso de una columna de ceniza y la generación de flujos piroclásticos (Fee et al., 2010).

El 28 de mayo de 2010 se produjo una gran explosión vulcaniana en el volcán Tungurahua, la cual generó flujos piroclásticos de 1-3 km de largo que descendieron a través de los flancos N, NW, W y SW del volcán (Myers et al., 2014).

La siguiente fase eruptiva comenzó el 4 de diciembre de 2010. Durante este día se reportaron columnas de hasta 4 km de altura y el descenso de flujos piroclásticos, sobre todo a través de las quebradas Vazcún, en el lado norte, y Cusúa, Mandur, Juive en el lado noroccidental (IGEPN, 2010).

Para diciembre de 2012 se reportó un aumento en la sismicidad y un incremento en la emisión de gases. El 14 de diciembre se produjo una explosión moderada a grande acompañada de vibración en el suelo, corrientes de densidad piroclástica y la emisión de una columna de ceniza que alcanzó 7 km de altura. El evento fue asociado a la destrucción de una estructura densa (tapón) formado posiblemente a partir de agosto de ese año (IGEPN, 2012).

Otras erupciones vulcanianas con generación de flujos piroclásticos ocurrieron el 14 julio 2013, que se describirá en la siguiente sección por ser el objeto de estudio de este trabajo, 1 febrero 2014, 4 abril 2014 y 26 febrero 2016.

La erupción producida el 1 de febrero de 2014 tuvo un índice de explosividad volcánica de 3. Durante este día, se reportó un enjambre de eventos sísmicos seguido de 2 explosiones. Una tercera explosión generó múltiples corrientes de densidad piroclástica que descendieron por todos los flancos del volcán. La columna de ceniza alcanzó 8 km de altura y se dirigió hacia el sur y sureste, afectando las provincias de Chimborazo y Azuay (IGEPN, 2019).

Para el 4 de abril de 2014 se reportó un nuevo evento vulcaniano que produjo una columna de ceniza de hasta 5 km sobre el nivel del cráter, es decir 10 km de altitud (Crafford y Venzke, 2017). Además, se registraron 92 eventos sísmicos de largo período, 43 explosiones de poca a moderada intensidad y actividad estromboliana con la emisión de bloques que descendieron hasta 1000 m bajo el nivel del cráter (IGEPN, 2014).

Finalmente, el 26 de febrero de 2016 un enjambre de sismos volcanotectónicos y de largo período precedieron a un conjunto de explosiones cuyas columnas de ceniza alcanzaron hasta 8 km de altura. Se reportó el descenso de corrientes de densidad piroclástica a través de los flancos NW, W y la caída de proyectiles balísticos. Durante el mes de marzo la actividad eruptiva del volcán disminuyó en comparación con el mes anterior. Se reportaron emisiones de ceniza de hasta 3.5 km de altura y una tendencia descendente en la deformación (IGEPN, 2016).

2.2. Dinamismos eruptivos y estudios de caso en el volcán Tungurahua

2.2.1. Actividad eruptiva de la fase “marzo 2013”

El 1 de marzo del 2013, luego de transcurrir 49 días de reposo, se da inicio a una nueva fase eruptiva del volcán Tungurahua que duró 19 días. Durante esta fase, el modelo de migración / residencia del magma propuesto por Hidalgo et al. (2015) y Narváez (2014) sugiere una actividad en sistema abierto caracterizada por la emisión de columnas de ceniza, desgasificación, explosiones vulcanianas y bramidos. Generalmente, las columnas estuvieron dirigidas hacia el suroccidente del volcán, afectando a las poblaciones de Choglontus, El Manzano, entre otras.

Los días de mayor emisión de ceniza de esta fase, y en los que se basa el presente trabajo, fueron 01, 08, 13-14 y 16-17 de marzo. A continuación, la tabla 1 presenta la información característica reportada para cada día.

Fecha	Número de explosiones vulcanianas	Altura de la columna eruptiva (km)	Flujo observado de SO ₂ (t/10h)	Sistema
01/03/2013	2	0.4	304	Abierto
08/03/2013	2	2	561	Abierto
13-14/03/2013	24	2	319 – 114	Actividad vulcaniana Intermitente
16-17/03/2013	4	4	56 – 80	Fuente piroclástica

Tabla 1: Actividad eruptiva del volcán Tungurahua durante los días: 01, 08, 13-14, 16-17 de marzo. Recuperado de Narváez (2014), Hidalgo et al. (2015). Se consideran explosiones vulcanianas a aquellas explosiones cuyo IRP (*Infrasound Reduced Pressure*) es mayor a 100 Pa calculado a 1 km de distancia del cráter (Johnson, 2003).

2.2.2. Actividad eruptiva de la fase “julio 2013”

Según Narváez (2014), posterior a la fase de marzo, el ascenso, desgasificación, densificación y cristalización del magma provocó la formación de una roca densa (tapón)

en el conducto, la cual fue liberada violentamente durante la erupción vulcaniana del día 14 de julio. Durante la erupción, se generaron: una columna eruptiva de 9 km de altura, caída de ceniza al oeste del volcán, proyectiles balísticos y varios flujos piroclásticos que descendieron a través de las quebradas Juive Grande y Achupashal (Gaunt et al., 2020; Parra et al., 2016; Hall et al., 2015). Además, se observaron múltiples flujos secundarios en los flancos norte, noroeste, oeste y suroeste del volcán. Posterior a este evento, los días 20 y 24 de julio también constituyeron picos de actividad, aunque no mayor al día 14 (Tabla 2).

Fecha	Número de explosiones vulcanianas	Altura de la columna eruptiva (km)	Flujo observado de SO ₂ (t/10h)	Sistema
14/07/2013	1	8.8	976	Erupción Vulcaniana (ruptura de tapón)
20/07/2013	8	3	365	Actividad vulcaniana Intermitente
24/07/2013	0	1-2	429	Abierto

Tabla 2: Actividad eruptiva del volcán Tungurahua durante los días: 14, 20 y 24 de julio. Recuperado de Narváez (2014), Gaunt et al. (2019), Hidalgo et al. (2015). Se consideran explosiones vulcanianas a aquellas explosiones cuyo IRP es mayor a 100 Pa calculado a 1 km de distancia del cráter (Johnson, 2003).

2.3. Aporte de la CSD en la comprensión de los dinamismos eruptivos

La Distribución de Tamaño de Cristales (3D), o CSD (3D) por su nombre en inglés, es el porcentaje de volumen de cristales de una especie mineral por unidad de volumen dentro de una secuencia de intervalos de tamaños definidos (Rannou y Caroff, 2010).

A finales de la década de los 80's, es decir, cuando comenzó la aplicación de las CSD en el campo geológico, la forma de determinar la CSD (3D) de una especie mineral

era a partir de la construcción manual de una distribución en 2 dimensiones. Para ello, era necesario medir el eje mayor de cada uno de los cristales que integraban un área igual a 6 mm^2 hasta completar la sección delgada (3000-5000 cristales). Una vez realizadas las medidas y contabilizados los cristales, se obtenía una distribución en número por unidad de área que debía transformarse a una distribución en 3 dimensiones (Cashman y Marsh, 1988). Sin embargo, este método presentaba algunos problemas, incluyendo el laborioso trabajo manual necesario para obtener las medidas.

Uno de los inconvenientes del método anterior es la diversidad de técnicas que existen para medir los ejes mayor y menor de un cristal. Dependiendo de la figura que el analista escoja para englobarlo (elipse o paralelepípedo), se pueden obtener medidas diferentes según el criterio de la persona que realice el análisis (Fig. 4). Según Jerram et al., (2009) se debería utilizar la fórmula: eje mayor (largo) = $\text{área}^{0.5}$. Sin embargo, en este proyecto de titulación se utiliza el criterio del programa *ImageJ*, en donde se considera como largo a la mayor dimensión que resulte de intersecar el cristal de interés con una elipse. A partir de estas mediciones, el principal problema para obtener la CSD 3D radica en la conversión de los datos de 2 a 3 dimensiones. Dado que los cristales de una muestra de roca no son totalmente esféricos, la proyección de estos en un plano 2D no representa una medida real, sino que es una medida modificada por varios efectos.

Los efectos más comunes que influyen las medidas de los cristales observados en 2 dimensiones son: el efecto de sección de corte ("*cut-section effect*") y el efecto de probabilidad de intersección ("*intersection-probability effect*"). El primero, se refiere a la probabilidad casi nula de que un plano de intersección atraviese exactamente el centro de cada partícula en una muestra. Este efecto produce formas diferentes en la sección dependiendo la orientación espacial de la partícula respecto al plano o viceversa (Fig. 5). El segundo resalta que, para un plano de intersección determinado es menos probable atravesar los cristales más pequeños que los cristales más grandes de una muestra (Higgins, 2000). La estereología es la rama de la matemática que se encarga del estudio de estos efectos, los cuales han sido ampliamente analizados durante la última década. Actualmente, el programa más utilizado para el cálculo de CSD 3D es "*CSDCorrections*", desarrollado por Michael Higgins en el año 2000. Este programa será descrito más adelante, pero cabe recalcar que en él se consideran los aspectos mencionados anteriormente.

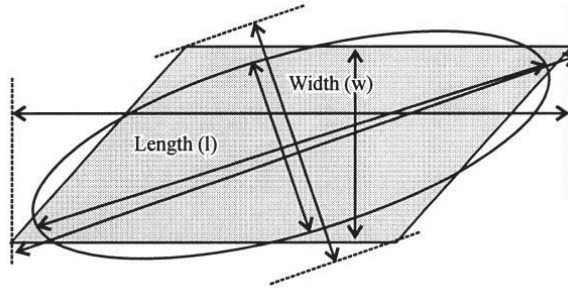


Figura 4: Dimensiones de Intersección. Tres posibles definiciones de largo y ancho. 1) Considerando cristales irregulares como paralelepípedos, medidas de largo y ancho son ortogonales entre sí. 2) Un enfoque diferente utilizando la misma figura utiliza el mínimo ancho de la intersección y el largo ortogonal. 3) Considerando una elipse, el largo y ancho son los ejes mayor y menor de dicha figura. Obtenido de Higgins, M D (2000).

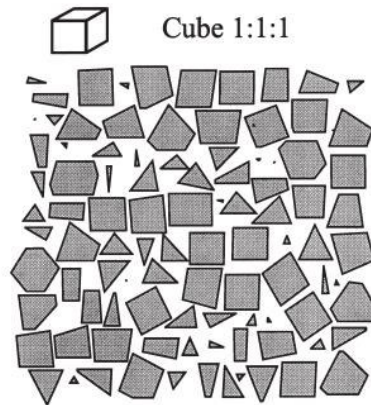


Figura 5: Posibles formas de aparición de un cristal cúbico en una sección delgada de acuerdo con su orientación respecto a un plano de intersección. Obtenido de Higgins, M D (2000).

La CSD (3D) de una muestra de roca volcánica permite conocer por qué se produce un determinado dinamismo eruptivo en cada evento volcánico, ya que guarda información sobre una serie de procesos petrológicos asociados a las tasas de nucleación y crecimiento que ocurren durante el ascenso desde la cámara magmática hasta la superficie. Por ejemplo, los cambios en la cristalización a lo largo del conducto provocados por las variaciones de temperatura y descompresión (Murch y Cole, 2019).

Adicionalmente, uno de los parámetros asociados a una CSD, conocido como Densidad Numérica de Volumen (Nv), puede ser utilizado para el cálculo de la tasa de ascenso magmático, la cual influye en el tipo de erupción observada en superficie. Por lo tanto, integrar la información asociada a procesos de nucleación y crecimiento con el cálculo de la velocidad de ascenso permite comprender con mayor facilidad los dinamos eruptivos que presenta un edificio volcánico.

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

El siguiente capítulo presenta la metodología aplicada durante la realización de este estudio. A continuación, se describirán los softwares empleados para el procesamiento de imágenes BSE, clasificación de minerales, obtención de hábitos cristalinos y distribución del tamaño de cristales. También se explicarán los dos procedimientos empleados para calcular la Densidad Numérica de Volumen (Nv) y el método seleccionado para estimar la velocidad de ascenso magmático. Además, se expondrá la técnica utilizada en la determinación del contenido de agua, necesario para el cálculo de velocidades. Finalmente, se presentará un resumen de todo el proceso aplicado y el detalle de las muestras analizadas en este trabajo.

3.1. Descripción de Softwares

3.1.1. ImageJ (Fiji)

El software libre *ImageJ (Fiji)* es un programa especializado en el análisis y tratamiento de imágenes. En el campo de geociencias es uno de los más utilizados, ya que, permite realizar mediciones que brindan información sobre las partículas capturadas dentro de una imagen. Para ello, es necesario ingresar la escala de referencia y posteriormente seleccionar los parámetros a medir. En total, se pueden obtener 18 parámetros, entre ellos: área, desviación estándar, centro de masa, coordenadas del centroide, ejes mayor-menor y ángulo.

Adicionalmente, *ImageJ* cuenta con varios complementos que permiten realizar otras acciones necesarias para el análisis de imágenes (ej. cálculo de gráficos y medidas estadísticas). Entre ellos, se encuentra también el *plug-in* “*Trainable Weka Segmentation*”, el cual fue utilizado para la extracción de los microlitos de plagioclasas.

Este software fue utilizado tanto para la clasificación de imágenes, como para el cálculo de las medidas mencionadas anteriormente.

3.1.2. *Plug-in “Trainable Weka Segmentation”*

El proyecto “*Trainable Weka Segmentation*” (TWS) fue desarrollado por Arganda-Carreras et al. (2017) y consiste en un *plug-in* que combina los algoritmos de *machine learning* con las herramientas de análisis de imágenes utilizadas en el software libre *ImageJ (Fiji)*. Así, este complemento permite realizar una clasificación por píxeles semiautomática a una imagen determinada de acuerdo con los datos y clases proporcionadas por el usuario.

En primera instancia el TWS fue desarrollado para clasificar células direccionado a quienes estudian biología, sin embargo, Lormand et al. (2018) demostró su aplicación en el campo de la geología, justamente como una herramienta importante para el análisis de la distribución de tamaño de microlitos en rocas volcánicas.

La clasificación de minerales por lo general comienza a partir de una imagen de microscopio electrónico. En primer lugar, se realizan los ajustes necesarios de fondo, brillo y contraste en un software auxiliar (ej. *Adobe Photoshop*) y luego se procesa la fotografía utilizando el *plug-in* TWS en *ImageJ (Fiji)*. En resumen, este procedimiento permite determinar el porcentaje de diferentes minerales en base a su color en la imagen de manera semiautomática (Fig. 6). Una vez procesada la imagen, es necesario realizar un procedimiento manual (i.e post-procesamiento) para corregir ciertos errores que el programa no resuelve como, por ejemplo: separar dos cristales entrecrecidos o que se encuentran muy juntos uno del otro y rellenar grietas o fracturas de cristales visibles en la imagen.

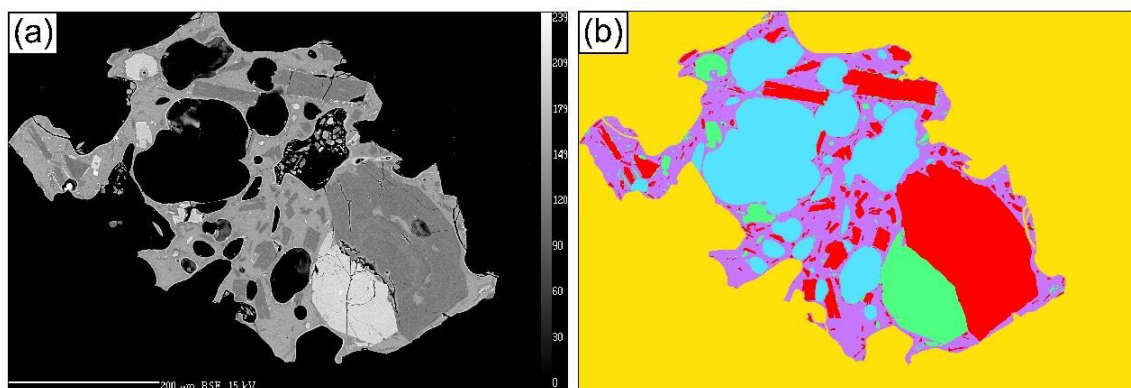


Figura 6: (a) Imagen BSE correspondiente a la muestra de ceniza recolectada el 01/03/2013 en la localidad de Choglontus, SW del Volcán Tungurahua (Narváez, 2014). (b) Imagen TWS clasificada y post-procesada mediante *Photoshop*. Los colores indican: rojo, plagioclasas; verde, piroxenos; celeste, vesículas; lila, matriz; amarillo: fondo.

3.1.3. *CSDSlice 5.0.*

El hábito de un determinado cristal posee 3 dimensiones con los siguientes ejes principales: largo, intermedio y corto, los cuales se han aproximado a diferentes figuras geométricas (Fig. 7). Conocer estos valores es un requerimiento indispensable para el cálculo de una CSD 3D, ya que se facilita la realización de correcciones estereológicas.

Hasta el día de hoy, se han realizado varios modelos numéricos que permiten determinar el hábito y el verdadero tamaño de un conjunto de cristales siempre y cuando se hayan registrado suficientes observaciones en 2D (Higgins, 1994).

La hoja de cálculo *CSDSlice 5.0.* fue elaborada por Morgan y Jerram en el año 2006 y permite determinar el hábito cristalino de una especie mineral a partir de sus mediciones de largo y ancho. El programa utiliza el método de mínimos cuadrados para comparar dichas medidas con una base de datos de 703 hábitos diferentes, y, como resultado se obtienen los 5 hábitos más adecuados (Fig. 8) (Morgan y Jerram, 2006).

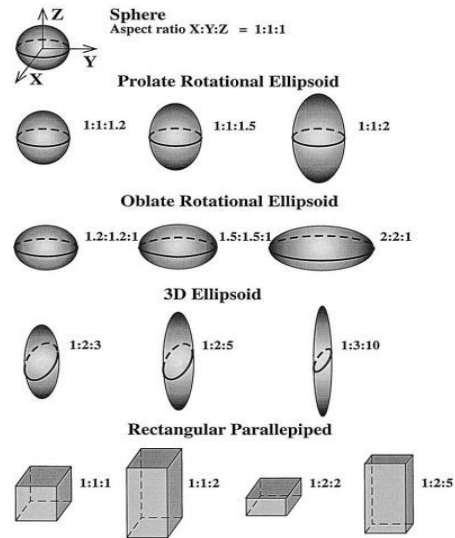


Figura 7: Figuras geométricas relacionadas con diferentes hábitos cristalinos. Cada número indica el valor de un eje principal. Obtenido de Sahagian y Proussevitch (1998).

Shape	x	y	z	score (R ²)
best	1.00	1.70	5.50	0.8125
2nd best	1.00	1.70	4.00	0.8084
3rd	1.00	1.70	4.50	0.8047
4th	1.00	1.60	8.00	0.8017
5th	1.00	1.60	5.50	0.8005

preliminary estimate: rectangular prism

Figura 8: Resultado obtenido en la hoja de cálculo *CSDSlice 5.0* para una muestra aleatoria. Los ejes principales están establecidos como: “x” (largo), “y” (intermedio), “z” (corto). El valor de R² corresponde al coeficiente de determinación para la estimación de los hábitos cristalinos.

3.1.4. *CSDCorrections*

Como se ha mencionado anteriormente, uno de los grandes desafíos que ha tenido la teoría CSD es la conversión de datos de 2 a 3 dimensiones debido a los efectos de sección de corte y probabilidad de intersección. No obstante, en el año 2000 Michael Higgins desarrolló un programa que permite determinar la CSD (3D) de una población a partir de sus medidas en 2D.

El software *CSDCorrections* requiere los siguientes datos para cada población: eje mayor (largo), eje menor (ancho), área, coordenadas del centroide, ángulo, método de medición y otros factores de forma como: ejes principales (largo-intermedio-corto), redondez, porcentaje de vesículas y fábrica, es decir, una estimación de la distribución espacial de los cristales en la matriz. Éstos últimos permitirán estimar la forma de las partículas y realizar las correcciones estereológicas necesarias (Higgins, 2000).

Una vez ingresados los datos en la interfaz, el programa arroja automáticamente varios resultados en 3 dimensiones, entre ellos: la CSD, el porcentaje de la fase mineral (Φ), su densidad numérica de volumen (N_v), tamaños mínimo, máximo y promedio, histograma, orientación y distribución espacial.

A continuación, las figuras 9 y 10 presentan un ejemplo de la interfaz de usuario del programa y sus resultados de tamaño.

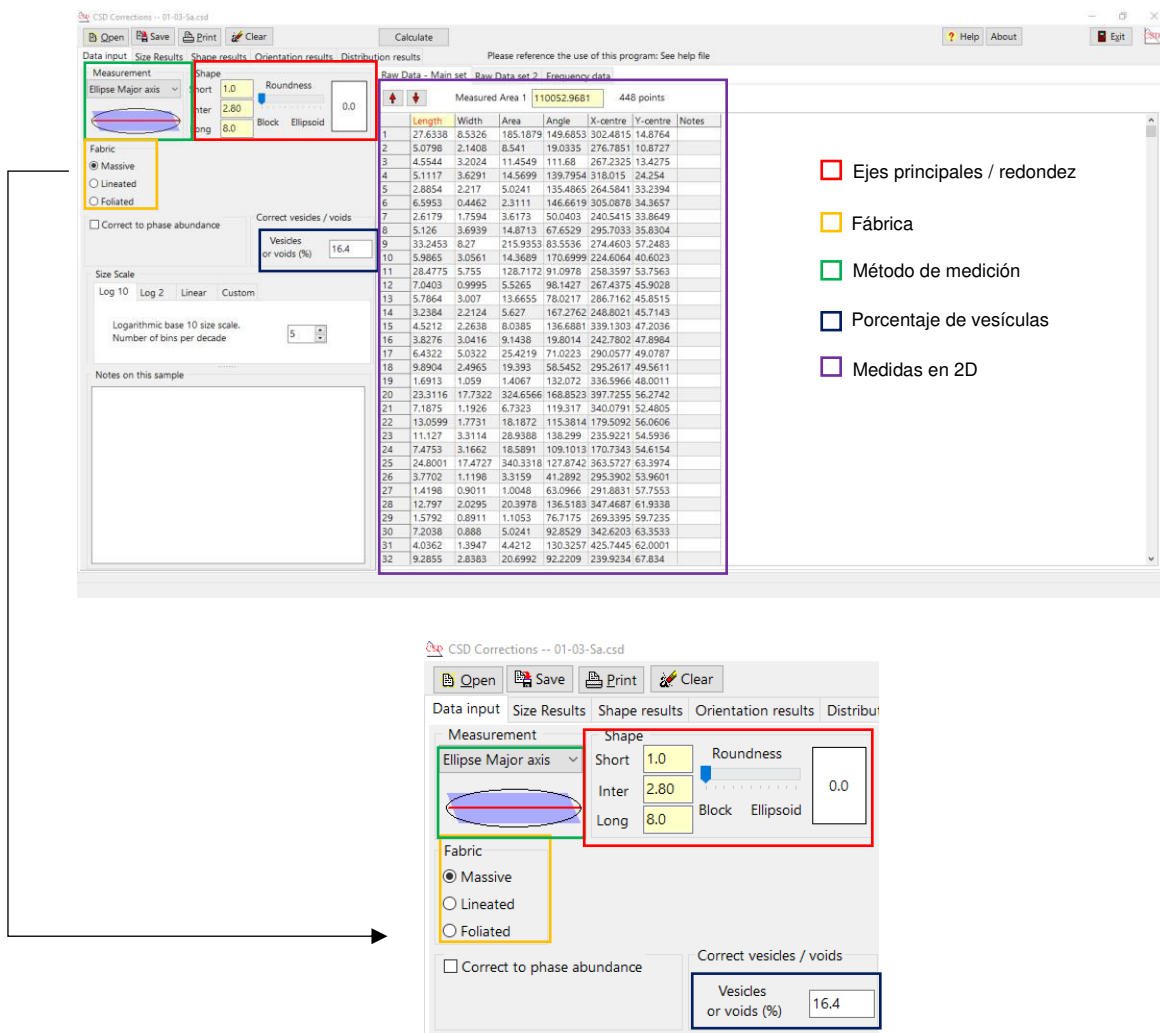


Figura 9: Interfaz de usuario del programa *CSDCorrections* (Higgins, 2000). Los cuadrados de colores indican los espacios donde el usuario debe ingresar los datos adquiridos durante el análisis en 2 dimensiones.

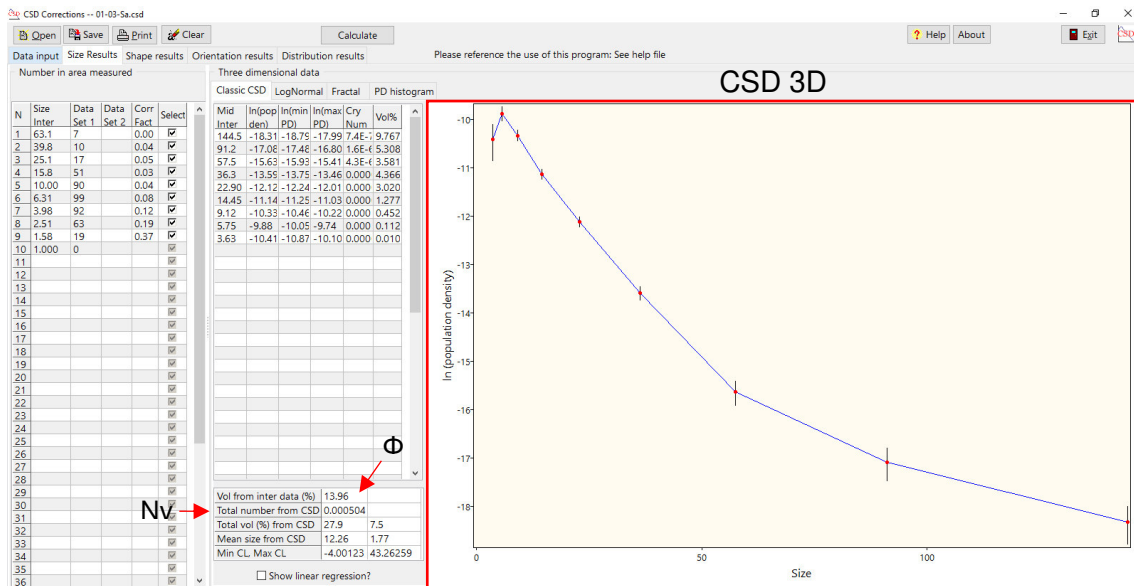


Figura 10: Resultados de tamaño del programa *CSDCorrections*. El recuadro rojo indica la CSD 3D. Φ : Porcentaje de fase mineral. Nv: Densidad numérica de volumen (número de cristales por unidad de volumen).

3.1.5. *CEmin*

CEmin es un programa que permite extraer los cristales de plagioclasas identificados en una imagen en escala de grises, típicamente obtenida a partir de una microsonda electrónica. El programa, ejecutado a través de *Matlab*, es capaz de reconocer 3 componentes de una roca volcánica: vesículas, fenocristales y la matriz (Zeng et al., 2018).

La metodología empleada por el software se basa en el operador morfológico “dilatación”, el cual asigna el mismo valor de salida para un píxel central y los de su vecindad, haciendo que los objetos sean fácilmente identificables (Jankowski, 2006).

El método consiste en medir los valores en escala de grises correspondientes a las poblaciones de vacíos y plagioclasas para proporcionar valores umbrales en la interfaz de usuario. Estos valores permitirán tanto eliminar los espacios vacíos como reconocer los cristales de plagioclasas (Fig. 11). Los valores promedios de escala de grises se pueden medir fácilmente utilizando la herramienta “*Grayscale/Areascale*” de la ventana auxiliar (Fig. 12).

El presente trabajo utilizó el software *CEmin* para comparar el resultado de clasificación de la muestra “14-03-Sc” con el método TWS.

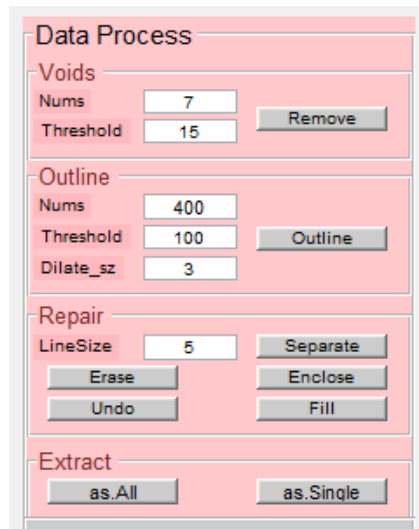


Figura 11: Panel de control del software *CEmin*. El panel está conformado por 4 subpaneles cuyos datos deben ser ingresados por el usuario mediante una estimación de tipo prueba y error. La figura muestra los valores ingresados para la muestra “14-03-Sc”.

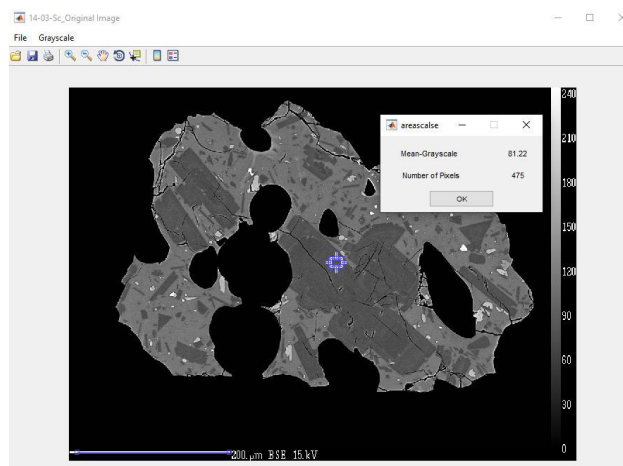


Figura 12: Ventana “vista” del software *CEmin*. En esta ventana el usuario puede seleccionar cualquier píxel de la imagen y obtener su valor dentro de la escala de grises.

3.2. Métodos utilizados para el cálculo de N_v y la tasa de ascenso magmático

3.2.1. Densidad numérica de volumen (N_v)

La densidad numérica de volumen (N_v) es un parámetro de medida que hace referencia al número de cristales por unidad de volumen en una determinada muestra. Su equivalente en 2 dimensiones es conocido como densidad numérica de área (N_a), es decir, el número de cristales por unidad de área (Higgins, 1994).

Existen 2 métodos para calcular la densidad numérica de volumen de una muestra de interés: el método *Batch* y el método *CSDCorrections*.

- **Método *Batch***

Este método ha sido utilizado principalmente en estudios de cristalización para determinar características de muestras naturales o experimentales a partir de mediciones en 2D (Lormand et al., 2020). Es una técnica sencilla que consiste en utilizar los datos proporcionados por el software de análisis de imágenes y aplicar las fórmulas descritas en la tabla 3 (Cashman, 1992; Blundy y Cashman, 2008; Murch y Cole 2019).

N°	Parámetro	Fórmula
1	Fracción de área de plagioclasas (Φ)	Área total de cristales de plg / (área total – área vesículas)
2	Densidad numérica de área (N_a)	Número de cristales de plg / (área total – área vesículas)
3	Tamaño característico (S_n)	$(\Phi / N_a)^{0.5}$
4	Densidad numérica de volumen (N_v)	N_a / S_n

Tabla 3: Parámetros y fórmulas utilizadas en el método *Batch* para calcular la densidad numérica de volumen correspondiente a la población de microlitos de plagioclasas de una muestra. *plg*: Plagioclasas.

Lamentablemente, el método *Batch* no considera el hábito cristalino de la población analizada. Por este motivo los valores de N_v suelen variar en comparación con el cálculo a través del método *CSDCorrections*.

- **Método *CSDCorrections***

Otra forma de obtener el valor de N_v es a partir del software *CSDCorrections*. Al igual que el método anterior, este programa considera las mediciones realizadas mediante el software de análisis de imágenes. La diferencia con el método *Batch* es que, dentro de los parámetros necesarios para el cálculo, el programa toma en cuenta el hábito cristalino de la población analizada (Fig. 13), el mismo que puede obtenerse de la hoja de cálculo *CSDSlice 5.0*.

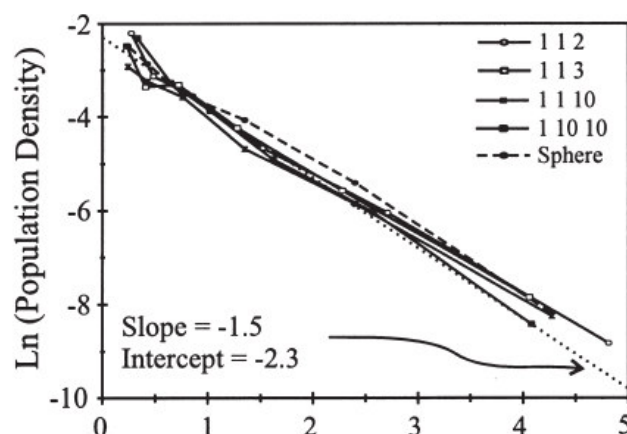


Figura 13: CSD correspondientes a una familia de sólidos que poseen diferentes hábitos cristalinos obtenidas mediante el programa *CSDCorrectios*.

Para este estudio, el parámetro N_v fue calculado mediante los métodos *Batch* y *CSDCorrections*. No obstante, considerando que ambos métodos son proporcionales, las siguientes secciones se enfocarán en los resultados obtenidos empleando los valores de N_v calculados en el programa *CSDCorrections*, ya que se aproximan más a los reales debido a que sí se considera el hábito cristalino de la población analizada.

3.2.2. Tasa de Ascenso Magmático

La tasa de ascenso magmático es la velocidad con la que asciende el magma a través del conducto durante una erupción. En general, se considera que este parámetro ejerce un fuerte control en el estilo eruptivo (efusivo/explosivo) y la dinámica de un volcán debido a su influencia en los fenómenos de desgasificación, vesiculación y fragmentación (Cassidy et al., 2018). Los factores que controlan la velocidad de ascenso dependen de las propiedades físicas y químicas del magma, entre ellos se encuentran: composición, contenido de volátiles, temperatura, cristalinidad, viscosidad, presión en el reservorio, geometría y permeabilidad de las paredes del conducto (Browne y Szramek, 2015).

Para hacer una estimación de la velocidad de ascenso magmático durante las fases de marzo y julio 2013 del volcán Tungurahua, este estudio utilizó el método “Medidor de velocidad de exsolución de agua de acuerdo con la densidad numérica de microlitos” (Toramaru et al., 2008), descrito a continuación.

El medidor de velocidad de exsolución de agua de acuerdo con la densidad numérica de microlitos, conocido en inglés como “*Microlite Number Density water exsolution rate meter*” (Toramaru et al., 2008), es un método basado en experimentos y

observaciones naturales relacionadas con la cristalización. Permite calcular la tasa de descompresión y velocidad de ascenso de un magma, siempre y cuando se conozcan ciertas características de una determinada fase mineral.

Esta metodología analiza características texturales de microlitos, ya que en el transcurso de su crecimiento registran información de procesos que ocurren a lo largo del conducto volcánico. Otro parámetro importante es el contenido de agua que tenga el magma, puesto que durante el ascenso influencia a la cristalización. Así, mientras menor sea este contenido, los minerales tales como plagioclasas tienden a cristalizar a mayores temperaturas, aumentando la temperatura del líquido del magma (Toramaru et al., 2008). Los microlitos se forman ya sea debido a este aumento de la temperatura del líquido provocado por la exsolución de agua durante la descompresión o debido a un súper enfriamiento por la continua disminución de la temperatura (Cashman y Blundy, 2000). Por lo tanto, una de las principales asunciones del método es la equivalencia entre cristalización inducida por enfriamiento y cristalización inducida por descompresión (Toramaru et al., 2008), ambas relacionadas con la pérdida de agua.

Como se mencionó anteriormente, es necesario conocer algunos parámetros químicos y texturales para aplicar este método. A continuación, la tabla 4 detalla cada uno de ellos y las fórmulas necesarias para el cálculo de la velocidad de ascenso.

Parámetro	Fórmula / Medición
Contenido de agua (C_w)	Medido o calculado (wt %)
Contenido de Sílice (C_{Si})	Medido (wt %)
ΔC_{Si}	$C_{Si} - 50$
Constante "c"	$11.2 \times 10^6 \times C_w$
Constante "b"	Depende de la fase mineral (plg = 40)
Constante "a"	$3 \times 10^{15 \pm 1 + 0.345 \Delta C_{Si} - 0.65 C_w}$
Densidad Numérica de Volumen (N_v)	Calculado (<i>Batch / CSD Corrections</i>)

Tabla 4: Parámetros utilizados para el cálculo de la velocidad de ascenso según el método de Toramaru et al. (2008). Las constantes "a" y "c" dependen del contenido de sílice y agua.

El contenido de agua y sílice corresponden a la concentración en el fundido a la profundidad de nucleación de microlitos y deben ser expresados en porcentaje en peso. Además, el parámetro "b" se considera constante para el caso de las poblaciones de plagioclasas. No obstante, en caso de trabajar con microlitos de otros minerales se requiere determinar "b" mediante experimentos de laboratorio utilizando muestras

naturales. Este procedimiento es importante de realizar ya que, en otros minerales, por ejemplo, en piroxenos, se ha observado que “b” depende de la composición del magma (Toramaru et al., 2008).

El valor de N_v , como se mencionó en la sección anterior, puede ser obtenido a través de los métodos *Batch* y *CSD Corrections*. Tomando en cuenta la proporcionalidad de estos factores, las siguientes secciones muestran los resultados de velocidad de ascenso calculados considerando el valor de N_v *CSD Corrections*. Los detalles referentes al cálculo de N_v y las velocidades asociadas al método *Batch* se muestran en el *Anexo II*.

Una vez obtenidos estos parámetros y dado que se conozca la densidad del magma en cuestión, ya sea mediante la recopilación de estudios anteriores, mediciones o de forma experimental, se procede a calcular la tasa de descompresión y la velocidad de ascenso de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

Tasa de descompresión:

$$\text{Ecuación 1: } \left| \frac{dP_w}{dz} \right| = \frac{c}{b} \left(\frac{N_v}{a} \right)^{\frac{2}{3}}$$

Velocidad de ascenso:

$$\text{Ecuación 2: } V_n = \frac{1}{\rho g} \left| \frac{dP_w}{dz} \right|$$

ρ : Densidad del magma vesiculado

g : gravedad ($9.8 \frac{m}{s^2}$)

Tomando en cuenta que las concentraciones de sílice y agua corresponden a la profundidad de nucleación de microlitos, en algunos casos se considera que la velocidad de ascenso calculada igualmente corresponde a esta profundidad. No obstante, dado que la cristalización de microlitos ocurre a lo largo del conducto durante el ascenso, más comúnmente se considera que la velocidad corresponde a un valor promediado a lo largo del conducto (Murch y Cole, 2019).

3.2.3. Método utilizado para el cálculo del contenido de agua

Como se describió en la sección anterior, conocer la concentración de agua en el fundido es muy importante para el cálculo de la velocidad de ascenso magmático. Los parámetros “c” y “a” de las ecuaciones anteriores dependen de este valor.

El contenido de agua fue calculado en base a una relación Cl – H₂O determinada para el volcán Tungurahua en muestras recolectadas durante las fases de julio – agosto 2006 y mayo 2010 (Myers et al., 2014). Se utilizó esta relación debido a que no existen valores de agua publicados para las fases de interés de este trabajo, pero sí existen valores de cloro medidos en el vidrio volcánico. La figura 14 muestra la relación inversa reportada en el estudio de Myers et al. (2014). En dicho estudio los valores fueron medidos a partir de inclusiones magmáticas en piroxenos y plagioclasas provenientes del volcán Tungurahua.

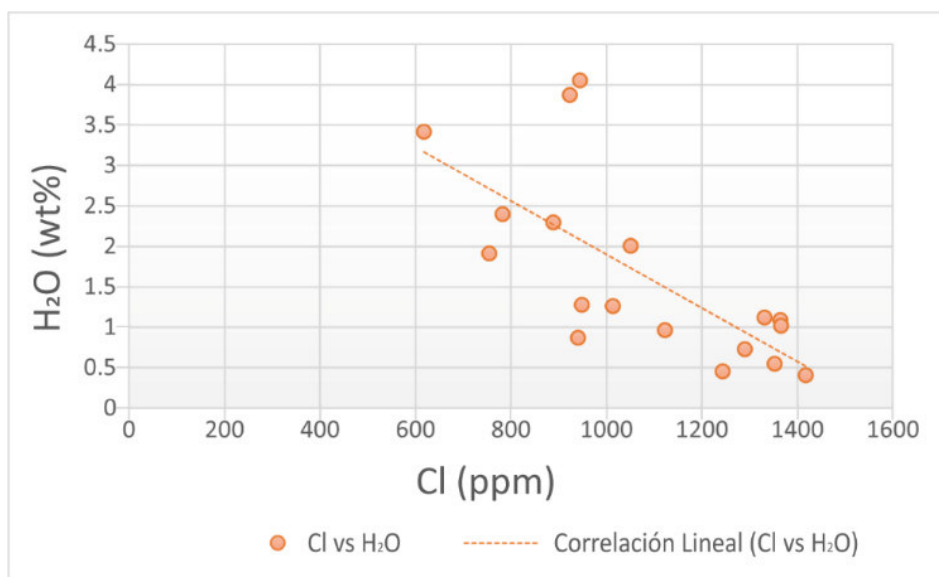


Figura 14: Relación Cl versus H₂O de inclusiones magmáticas contenidas en plagioclasas y piroxenos reportado en Myers et al. (2014).

Las tablas 5 y 6 indican los valores de Cl medidos en el vidrio volcánico de las muestras recolectadas durante las fases marzo y julio 2013. Cada día de interés presentó varios valores, sin embargo, en este trabajo se escogieron los valores mínimos de contenido de Cl que se asocian a valores máximos de H₂O, ya que representarían la composición en agua del magma previo a sufrir una extensa desgasificación.

	01/03/2013	08/03/2013		14/03/2013		17/03/2013	
DataSet/ Point	Cl (ppm)	DataSet/ Point	Cl (ppm)	DataSet/ Point	Cl (ppm)	DataSet/ Point	Cl (ppm)
1	609.4	1	547.8	1	982.6	1	687.8
2	529.2	2	490.3	2	814.6	2	675.4
3	791.8	3	725.4	3	680.8	3	540.8
4	542.8	4	498.0	4	391.6	4	674.8
5	611.4	5	713.0	5	648.2	5	680.6
6	777.4	6	787.2	6	852.0	6	889.8
7	546.8	7	868.2	7	651.8	7	226.6
8	413.4			8	774.6	8	300.0
						9	1006.2
						10	698.8
						11	721.0

Tabla 5: Valores medidos de Cl en el vidrio volcánico de las muestras de material juvenil recolectadas durante la fase de marzo 2013 del volcán Tungurahua.

	14/07/2013		20/07/2013		24/07/2013	
DataSet/ Point	Cl (ppm)	DataSet/ Point	Cl (ppm)	DataSet/ Point	Cl (ppm)	
1	492.6	1	955.0	1	653.4	
2	823.4	2	880.6	2	944.6	
3	673.3	3	1065.2	3	648.8	
4	721.6	4	629.0	4	757.4	
5	413.0	5	952.6	5	965.8	
6	509.6	6	763.0	6	624.8	
7	1008.4	7	583.2	7	889.4	
8	848.8	8	767.6	8	324.0	
9	835.0	9	815.8	9	847.4	
		10	666.8	10	633.0	
				11	723.2	
				12	833.0	

Tabla 6: Valores medidos de Cl en el vidrio volcánico de las muestras de material juvenil recolectadas durante la fase de julio 2013 del volcán Tungurahua.

3.3. Proceso metodológico

El presente estudio contó con 51 imágenes BSE correspondientes a diferentes muestras de las fases eruptivas marzo y julio 2013 del volcán Tungurahua. Las imágenes fueron procesadas mediante el método propuesto por Lormand et al. (2018) para obtener las CSD y sus valores de Nv. Los resultados fueron comparados con otros métodos de procesamiento manual y semiautomático (Zeng et al., 2018).

A continuación, se describen brevemente los pasos para obtener las CSD. Una descripción más detallada se muestra como *Anexo I*.

Utilizando el programa *Adobe Photoshop*, se corrigió el contraste y color de fondo de las imágenes, lo cual es importante para distinguir fondo y vesículas durante la clasificación. Posteriormente se realizó una clasificación en base al color (en escala de grises) de plagioclasas, piroxenos, matriz, vesículas y fondo. Esta clasificación se ejecutó de manera semiautomática con ayuda del *plug-in TWS*. Los datos obtenidos mediante la utilización de este programa presentan ciertos errores que deben ser corregidos manualmente. Así, cada imagen fue procesada nuevamente en *Adobe Photoshop* para separar cristales no divididos durante la clasificación y rellenar grietas. Estos problemas se dan durante el procesamiento semiautomático debido al bajo contraste entre los cristales y el vidrio volcánico. El procesamiento manual de estas imágenes, sin hacer uso del *plug-in Weka*, toma alrededor de 8h por imagen, en comparación con los 40 min. empleados siguiendo este método.

Una vez corregido el resultado de la clasificación, la imagen fue escalada para poder calcular el área de cada fase mineral en el software *ImageJ*. Otros parámetros que se midieron en *ImageJ* fueron: largo y ancho de cada uno de los cristales de plagioclasas, piroxenos y también de la población de vesículas. Las medidas relacionadas a la población de plagioclasas se utilizaron para el cálculo de sus hábitos cristalinos en la hoja de cálculo *CSDSlice 5.0*. Mientras que, los datos obtenidos de las demás poblaciones se consideraron para ingresar los siguientes parámetros al programa *CSDCorrections*: área total y porcentaje de vesículas.

Con dicho conjunto de datos, se calculó la CSD y su respectivo valor de N_v para la población de plagioclasas utilizando el software *CSDCorrections 1.6*. También se calculó un segundo valor de N_v de acuerdo con el método *Batch* utilizando las fórmulas descritas en la tabla 3 y una hoja de cálculo en Excel. Los resultados del programa se observan como los mostrados en las figuras 9 y 10.

Posteriormente, las imágenes clasificadas mediante el *plug-in TWS* y su correspondiente CSD fueron comparadas con los resultados de imágenes clasificadas de forma manual y a través del software *CEmin* para determinar las diferencias entre métodos.

Las velocidades de ascenso fueron calculadas mediante el método de Toramaru et al. (2008). Para determinar el contenido de sílice se consideró el análisis geoquímico presentado en el estudio de Narváez (2014), ya que corresponde a las mismas muestras analizadas en este trabajo. Se utilizó el contenido promedio que corresponde a la composición de sílice medida en el vidrio volcánico de muestras de material juvenil recolectadas durante los días de interés (Tabla 7, 8). Y para el cálculo del contenido de

agua se utilizó la relación inversa Cl – H₂O (Myers et al., 2014), descrita en la sección anterior, considerando los valores de Cl medidos en las muestras de las fases analizadas en este estudio.

Fecha	01/03/2013	Fecha	08/03/2013	Fecha	14/03/2013	Fecha	17/03/2013
DataSet/Point	SiO ₂	DataSet/Point	SiO ₂	DataSet/Point	SiO ₂	DataSet/Point	SiO ₂
1	64.8	1	66.1	1	65.5	1	65.9
2	66.3	2	66.8	2	66.5	2	65.9
3	65.7	3	66.9	3	66.1	3	64.2
4	64.3	4	66.9	4	67.6	4	68.6
5	65.3	5	66.7	5	66.1	5	65.8
6	64.6	6	66.1	6	65.9	6	62.8
7	64.2	7	65.7	7	64.8	7	66.0
8	63.5	8	64.3	8	67.0	8	64.1
9	63.8	9	67.4	9	65.7	9	64.6
10	65.4	10	67.5	10	66.6	10	65.6
Promedio	64.8	Promedio	66.5	Promedio	66.2	11	65.8
						12	64.8
						13	66.0
						Promedio	65.4

Tabla 7: Valores medidos de SiO₂ en el vidrio volcánico del material juvenil recolectado durante la fase de marzo 2013 proveniente del volcán Tungurahua.

Fecha	14/07/2013	Fecha	20/07/2013	Fecha	24/07/2013
DataSet/Point	SiO ₂	DataSet/Point	SiO ₂	DataSet/Point	SiO ₂
1	66.5	1	63.8	1	61.5
2	63.0	2	63.9	2	62.6
3	64.7	3	64.2	3	63.3
4	65.3	4	64.3	4	63.3
5	65.2	5	64.4	5	63.5
6	65.6	6	64.7	6	63.8
7	66.0	7	65.0	7	63.8
8	62.7	8	65.1	8	64.4
9	63.6	9	65.8	9	64.8
10	63.9	10	66.5	10	66.2
Promedio	64.7	11	64.6	11	68.1
		12	64.1	12	68.6
		13	63.4	13	64.2
		Promedio	64.6	14	63.9
				15	64.4
				Promedio	64.4

Tabla 8: Valores medidos de SiO₂ en el vidrio volcánico del material juvenil recolectado durante la fase de julio 2013 proveniente del volcán Tungurahua.

Finalmente, conocidos estos datos se calcularon las constantes a, b, c (ver sección 3.2.2 para más información sobre las constantes) y se obtuvieron 2 valores de velocidad para cada muestra, los cuales fueron interpretados de acuerdo con el dinamismo eruptivo descrito para estas fases en estudios anteriores.

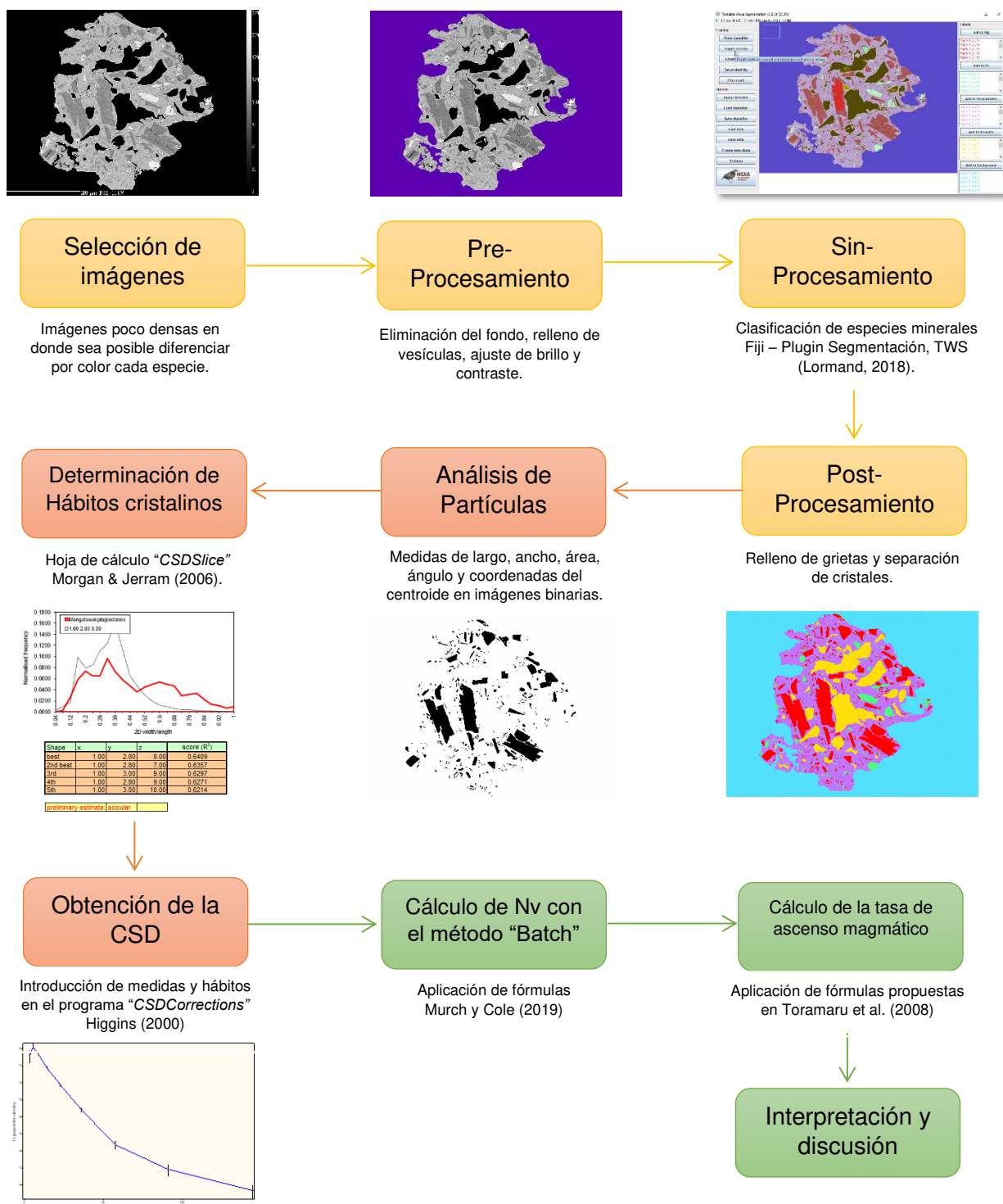


Figura 15: Resumen de la metodología. 1) Selección de imágenes BSE. 2) Pre-procesamiento en *Adobe Photoshop* que incluye cambio de color de fondo, ajustes de brillo y contraste. 3) Sin-procesamiento, clasificación utilizando el *plug-in* TWS. 4) Post-procesamiento, corrección de grietas y separación de cristales. 5) Análisis de partículas. 6) Determinación de hábitos cristalinos. 7) Cálculo de la CSD. 8) Cálculo de Nv con el método *Batch*. 9) Cálculo de la velocidad de ascenso.

Cabe recalcar que las imágenes BSE utilizadas en este trabajo corresponden al material juvenil macro y micro-vesiculado del estudio de Narváez (2014) (Figs.16 y 17).

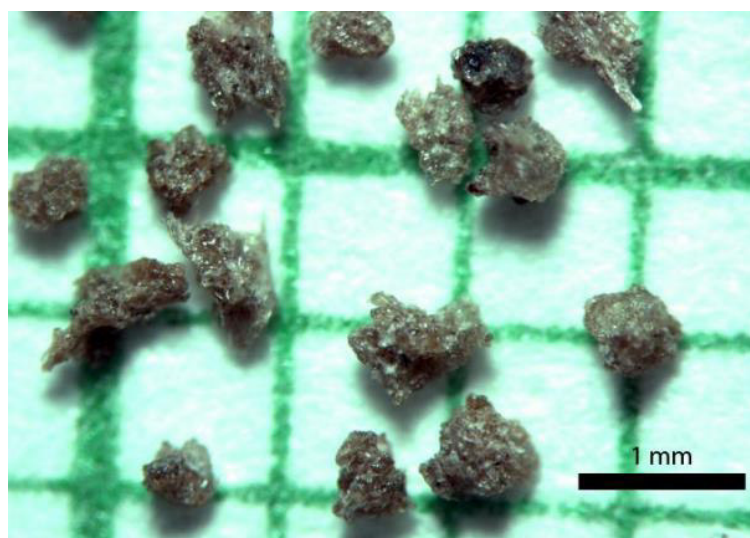


Figura 16: Material juvenil micro-vesiculado observado bajo lupa binocular. Clastos sub-translúcidos con vesiculación moderada a alta y en ocasiones aspecto fibroso. Obtenido de Narváez (2014).

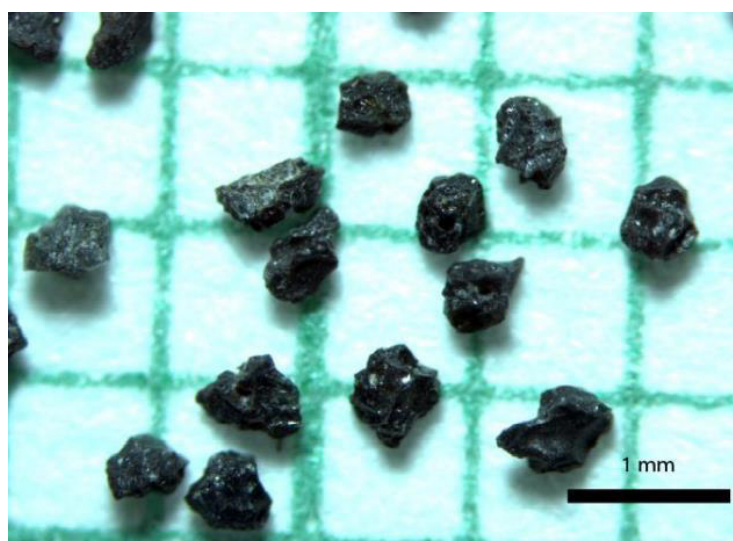


Figura 17: Material juvenil macro-vesiculado observado bajo lupa binocular. Vidrio negruzco, clastos con vesículas observables a simple vista, en algunos casos muy brillantes. Obtenido de Narváez (2014).

Las muestras descritas a continuación se reportan como “material juvenil vesiculado” para todos los días de interés, ya que no se observó diferencia alguna entre las imágenes BSE de los componentes macro y micro. La tabla 9 indica las características correspondientes a las 51 imágenes de macro-vesiculados y micro-

vesiculados analizadas. Los detalles de su recolección fueron obtenidos del estudio de Narváez (2014).

N°	Código	Tipo	Duración del tiempo de sedimentación	Fecha de Recolección
1	01-03-Sa	Material juvenil vesiculado	8 h	01/03/2013 19h25
2	01-03-Sb			
3	01-03-Sc			
4	mars13-1a			
5	mars13-1b			
6	mars13-1c			
7	mars13-1d			
8	08-03-S2		22 h	08/03/2013 16h45
9	08-03-s3			
10	08-03-s4			
11	08-03-sa1			
12	mars13-2a			
13	mars13-2c			
14	mars13-2d			
15	mars13-3a		25 h 25 min	14/03/2013 7h25
16	mars13-3b			
17	mars13-3c			
18	mars13-3d			
19	14-03-Sa			
20	14-03-Sb			
21	14-03-Sc			
22	17-03-Sa		24 h 45 min	17/03/2013 17h15
23	17-03-Sc			
24	17-03-Sd			
25	mars13-4a			
26	mars13-4b			
27	mars13-4c			
28	mars13-4d			
29	14-07-s1	Material juvenil vesiculado	7 h 35 min	14/07/2013 14h20
30	july13-1a			
31	july13-1b			
32	july13-1c			
33	july13-1d			
34	14-07-s2			
35	14-07-s3			
36	20-07-s1		24 h 50 min	20/07/2013 19h35
37	20-07-s2			
38	20-07-s3			
39	20-07-s4			
40	july13-2a			
41	july13-2b			
42	july13-2c			
43	july13-2d	35 h 45 min	24/07/2013 10h45	
44	24-07-s1			
45	24-07-s2			
46	24-07-s3			
47	24-07-s4			
48	july13-3a			
49	july13-3b			
50	july13-3c			
51	july13-3d			

Tabla 9: Código de muestra, tipo, duración del tiempo de sedimentación y fecha de recolección del material juvenil correspondientes a las imágenes analizadas en el presente estudio.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS

4.1. Comparación del método manual versus semiautomáticos

❖ Procesamiento Manual

Además del procesamiento semiautomático usando el *plug-in* TWS, los microlitos presentes en las imágenes fueron delineados uno a uno usando el programa *Adobe Illustrator*. Para poder analizar la diferencia entre utilizar un método manual y uno semiautomático (TWS), se compararon 5 imágenes con diferente cristalinidad (Tabla 10).

Código	Cristalinidad Método Manual (%)	Cristalinidad TWS (%)
mars13-3c	9.91	9.53
14-03-sc	13.12	11.39
17-03-sa	16.22	16.90
14-07-s1	20.19	21.88
08-03-s4	32.53	29.39

Tabla 10: Código de cada imagen analizada y sus respectivos porcentajes de cristalinidad según los métodos manual y semiautomático. Los porcentajes fueron obtenidos utilizando los datos en 2D proporcionados por el software *ImageJ*.

La clasificación semiautomática realizada con el *plug-in* TWS muestra resultados similares a la clasificación manual (Fig. 18). Igualmente, se pudo observar que ambas CSD marcan la misma tendencia y se obtienen resultados similares (Fig. 19).

La tabla 11 muestra variaciones entre 0 y 0.17 m/s entre las velocidades que resultan de utilizar el método semiautomático TWS y el método manual. También se presentan las diferencias en el número de cristales identificados, hábito cristalino, coeficiente de determinación (R^2) y densidad numérica de volumen (N_v). El número total de cristales, N_v y el coeficiente de determinación son mayores cuando se utiliza el método TWS con respecto al método manual. Las velocidades calculadas no difieren significativamente entre ambos métodos, salvo para la muestra 14-07-s1, debido a una mayor diferencia entre los valores de N_v .

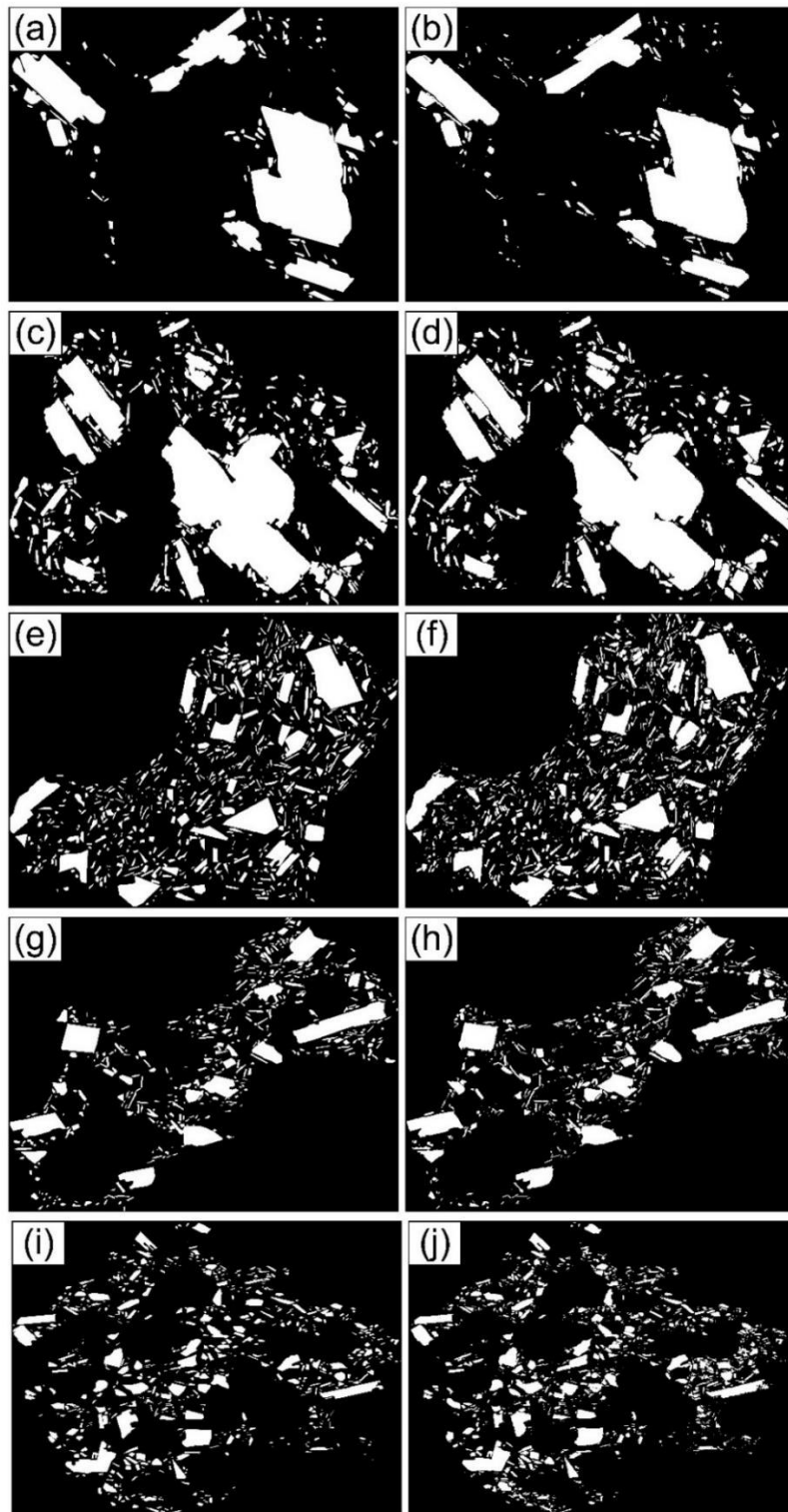
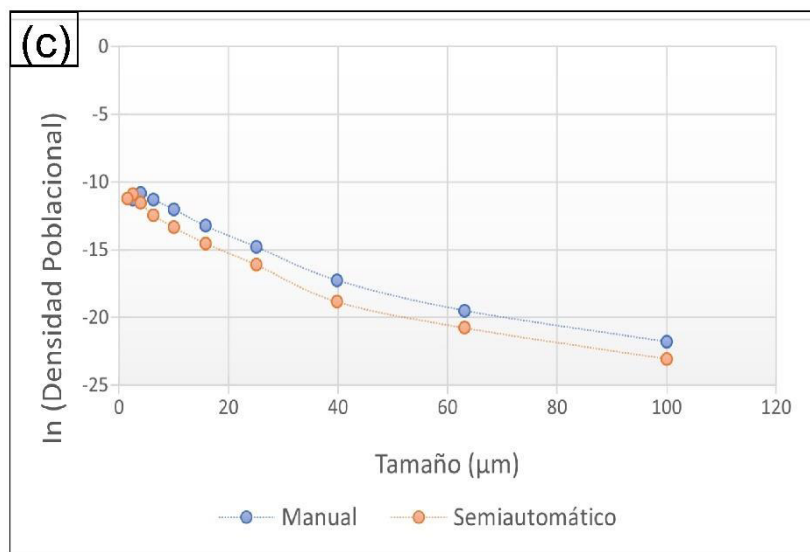
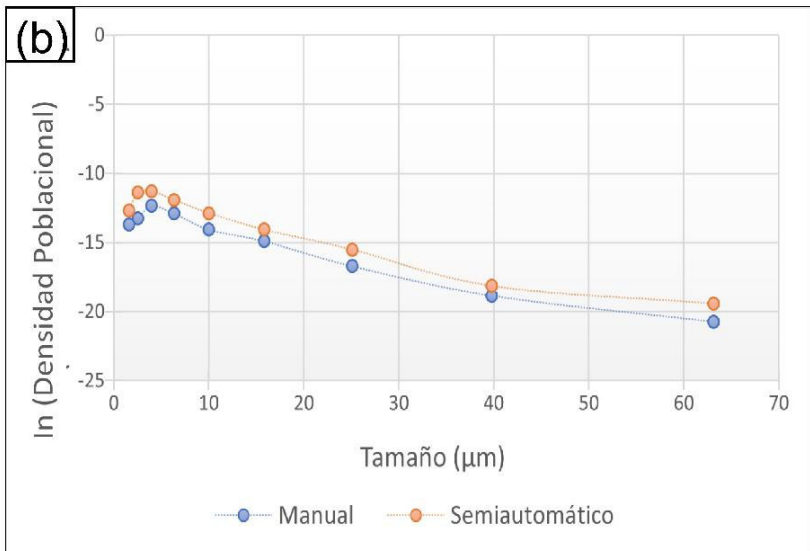
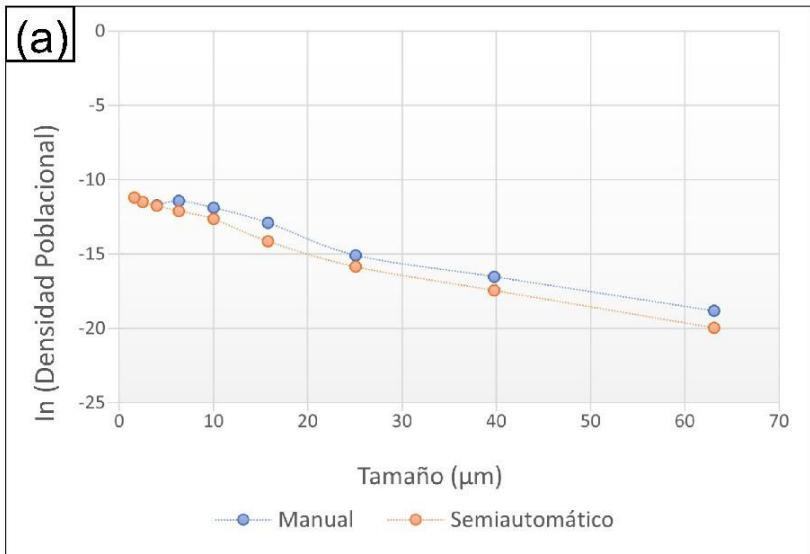


Figura 18: Resultados de la comparación, las imágenes de la izquierda tienen un procesamiento manual y las de la derecha semiautomático. (a) y (b): “mars13-3c”; (c) y (d): “14-03-Sc”; (e) y (f): “17-03-sa”; (g) y (h): “14-07-s1”; (i) y (j): “08-03-s4”.



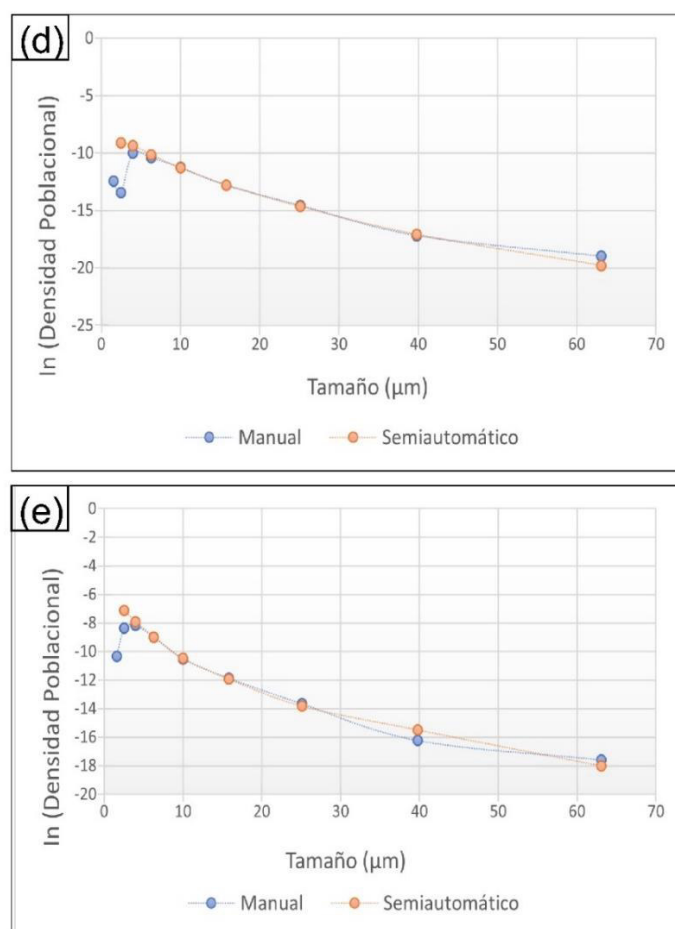


Figura 19: Comparación entre CSD obtenidas a partir de los métodos manual y semiautomático para las muestras seleccionadas. (a) “mars13-3c”, (b) “14-03-Sc”, (c) “17-03-sa”, (d) “14-07-s1”, (e) “08-03-s4”.

Muestra	mars13-3c		14-03-sc		17-03-sa		14-07-s1		08-03-s4	
Método	Manual	TWS	Manual	TWS	Manual	TWS	Manual	TWS	Manual	TWS
Número de cristales	93	140	328	350	710	913	433	645	641	847
Hábito cristalino	x=1, y=2, z=4	x=1, y=2, z=7	x=1, y=1.2, z=8	x=1, y=1.5, z=5.5	x=1, y=3, z=10	x=1, y=1.4, z=9	x=1, y=1.5, z=4	x=1, y=2.7, z=8	x=1, y=1.6, z=2.9	x=1, y=1.4, z=2.3
R ²	0.5079	0.5905	0.6868	0.7401	0.5755	0.7004	0.5899	0.6717	0.8421	0.8648
Forma estimada	acicular	acicular	acicular	acicular	acicular	acicular	acicular	acicular	acicular	prisma rectangular
Nv (1/μm ³)	0.000162	0.00021	0.000134	0.000228	0.000359	0.000374	0.000566	0.00117	0.00195	0.00284
Velocidad (m/s)	0.06	0.07	0.05	0.08	0.31	0.31	0.29	0.46	0.18	0.23

Tabla 11: Número de cristales, hábitos cristalinos, coeficiente de determinación y densidad numérica de volumen resultantes de los procesamientos manual y semiautomático (TWS).

❖ Software *CEmin*

La figura 20 muestra el resultado de la clasificación obtenida a partir del software *CEmin* comparado con la clasificación mediante el *plug-in* TWS. Adicionalmente, se calculó la CSD asociada a la clasificación *CEmin*.

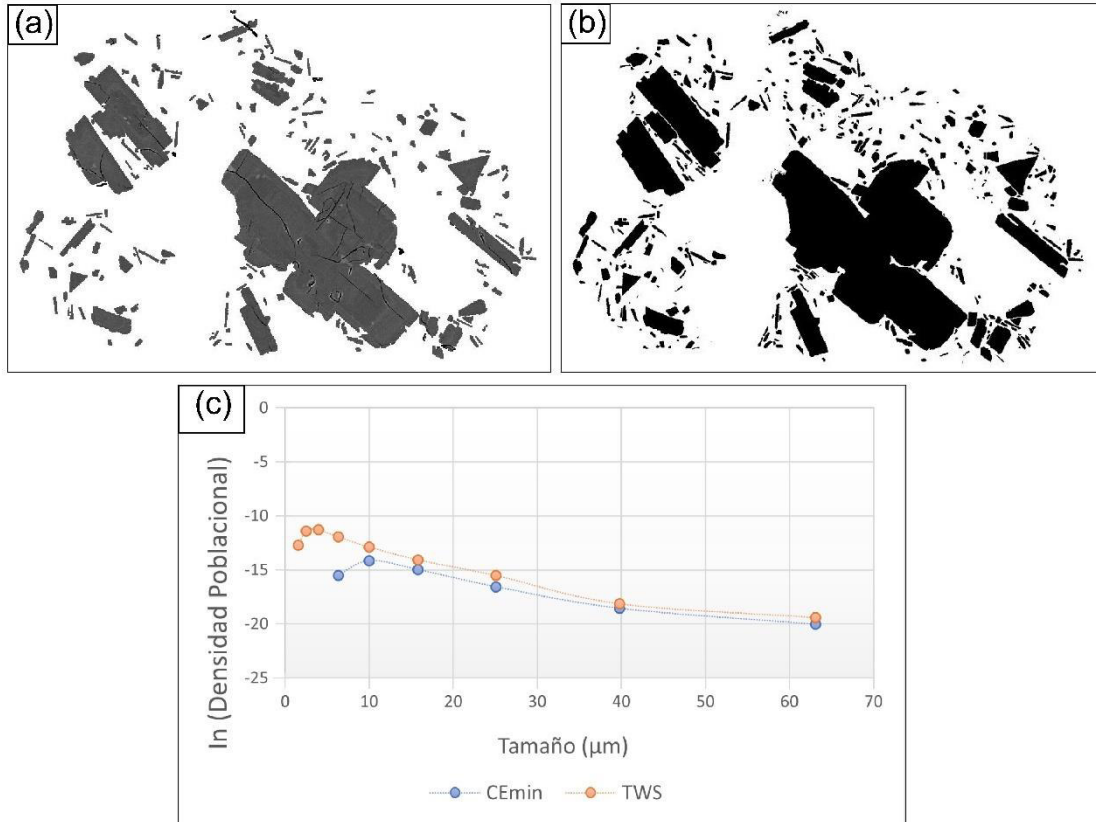


Figura 20: (a) Resultado de la extracción de plagioclasas utilizando el software *CEmin*. (b) Resultado de la clasificación mediante el *plug-in* TWS. (c) Comparación de las CSD resultantes de ambos métodos (CEmin y TWS). Muestra: “14-03-Sc”.

De acuerdo con las CSD calculadas mediante los diferentes métodos (Fig.20 c), es posible observar que el resultado de utilizar los datos de la clasificación *CEmin* se asemeja mucho a la curva TWS para los valores más altos. Sin embargo, existe una marcada diferencia en el rango de tamaño de microlitos $<30 \mu\text{m}$.

El presente estudio atribuye esta disimilitud al alto umbral de tamaño que el software *CEmin* puede detectar. Dado que es un programa diseñado para identificar fenocristales ($>30 \mu\text{m}$), cristales de tamaños menores son difícilmente detectables. Por este motivo existe también una gran diferencia entre el número total de cristales detectados e igualmente en el valor de N_v , lo que podría afectar el cálculo de las velocidades (Tabla 12).

Parámetro	CEmin	TWS
Número de cristales	149	350
Hábito cristalino	x=1, y=1.6, z=9	x=1, y=1.5, z=5.5
R ²	0.7693	0.7401
Forma estimada	acicular	acicular
Φ	11.44%	11.39%
Nv (1/ μm ³)	0.000032	0.000228

Tabla 12: Comparación entre los parámetros resultantes de los procesamientos semiautomáticos *CEmin* y TWS.

Lastimosamente, a pesar del alto coeficiente de determinación de la muestra procesada mediante el software *CEmin*, no es posible utilizar este método para un estudio enfocado en la población de microlitos, principalmente debido a su límite de detección.

Las siguientes secciones de resultados utilizan los datos obtenidos a partir de la clasificación de imágenes mediante el *plug-in* TWS, ya que se considera como el método más eficiente (menor tiempo de procesamiento) y aproximado a un procesamiento manual detallado.

4.2. Curvas de Distribución de Tamaño

A través del método descrito anteriormente, se obtuvieron 51 CSD. El análisis se realizó en la población de microlitos de plagioclasas en 51 imágenes BSE de productos de caída recolectados durante las fases eruptivas de marzo y julio 2013 (Fig.21). El tamaño mínimo de los cristales analizados fue 1 μm y se logró este objetivo ajustando un umbral de >1 μm² durante las mediciones en 2D. El hábito cristalino de las plagioclasas es importante para el cálculo, ya que debe ser ingresado como *input* en el programa *CSDCorrections* para obtener la CSD (ver sección 3.1.4). Las plagioclasas en la mayoría de las fotografías (84%) muestran un hábito acicular y sólo en 8 imágenes (“14-03-Sa”, “08-03-S2”, “08-03-S4”, “24-07-S3”, “july13-2a”, “mars13-3d”, “14-07-s2” y “14-07-s3”) se muestran como prismas rectangulares. Para este estudio, el coeficiente de determinación (R²) del hábito cristalino varía entre 0.39 y 0.865. Además, del total, 39 imágenes presentan valores mayores a 0.6 y sólo 12 tienen valores en el rango de 0.39 a 0.59, lo que indica una estimación precisa de los hábitos cristalinos.

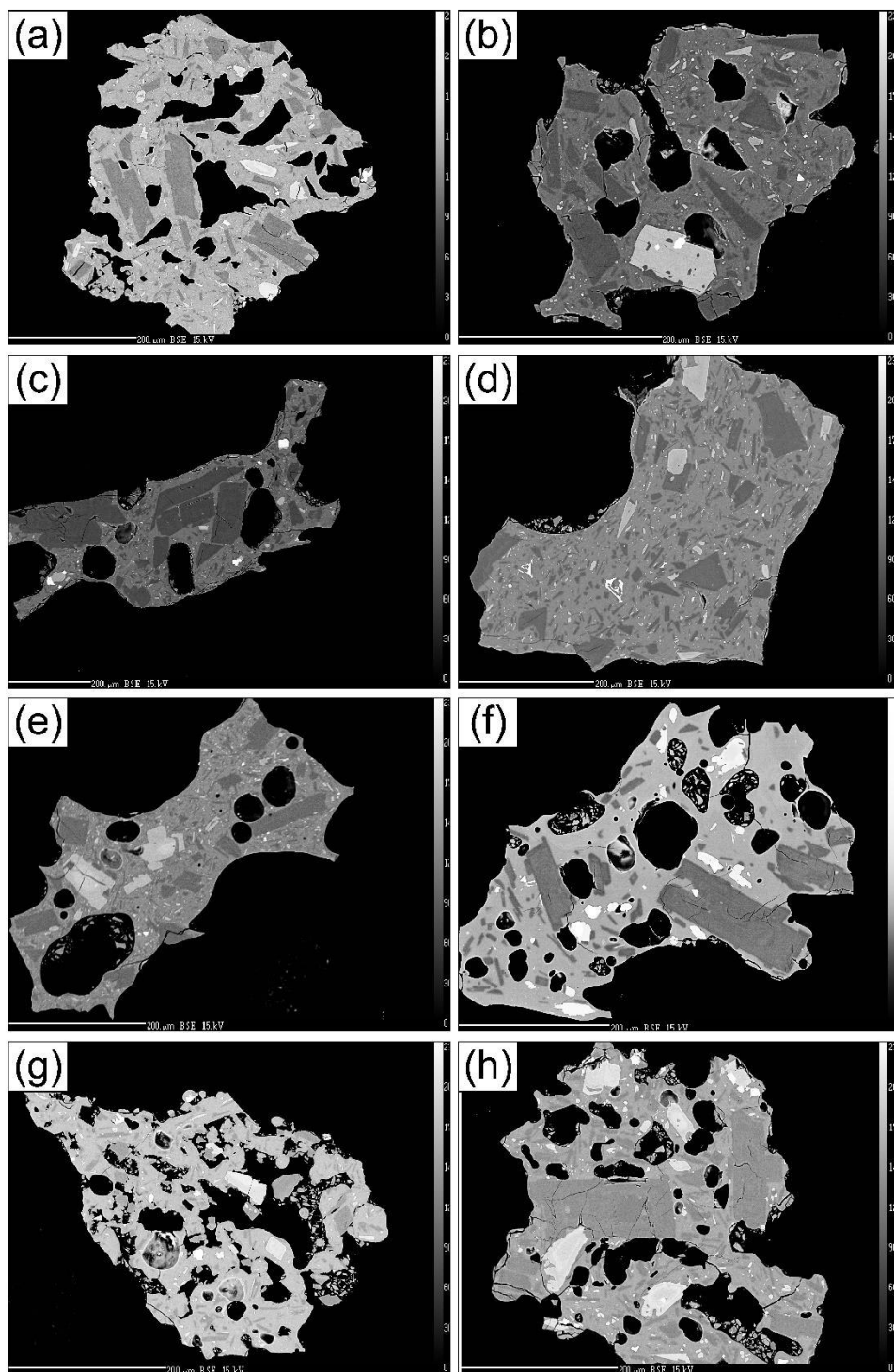


Figura 21: Ejemplo de imágenes BSE correspondientes a las muestras “01-03-Sa”, “08-03-S3”, “14-03-Sa”, “17-03-Sa”, “14-07-S1”, “july13-1a”, “20-07-S1”, “24-07-S3” analizadas en el presente estudio.

La tabla 13 presenta un ejemplo de los resultados obtenidos mediante el cálculo de cada distribución de tamaño en el programa *CSDCorrections*. Además, se indican los hábitos cristalinos y coeficiente de determinación (R^2) calculados a través del programa *CSDSlice*.

Muestra	Fecha	Contenido de Plagioclasa (Φ) %	Densidad de Volumen de Plagioclasa (N_v) ($1/\mu\text{m}^3$) $\times 10^{-6}$	Densidad de Volumen de Plagioclasa (N_v) ($1/\text{m}^3$) $\times 10^{14}$	Tamaño Promedio (largo)	Hábito Cristalino	R^2
01-03-Sc	01/03/2013	14.0%	589	5.89	10.0	acicular	0.87
08-03-S2	08/03/2013	10.4%	743	7.43	12.9	p. rectangular	0.75
mars13-3a	13/03/2013	7.3%	224	2.24	11.6	acicular	0.63
17-03-Sa	17/03/2013	16.9%	374	3.74	26.9	acicular	0.70
14-07-s2	14/07/2013	14.2%	2040	2.04	7.2	p. rectangular	0.82
july13-2d	20/07/2013	11.3%	201	2.01	29.4	acicular	0.79
july13-3b	24/07/2013	18.7%	536	5.36	16.3	acicular	0.78

Tabla 13: Parámetros obtenidos de los programas *CSDCorrections* y *CSDSlice* para 7 de las 51 imágenes analizadas en este estudio.

Todas las CSD presentan un aumento de la densidad poblacional con la disminución del tamaño de los cristales. La densidad poblacional aumenta en mayor proporción para tamaños menores de 20 μm , pero disminuye drásticamente para tamaños cercanos a cero en la mayoría de las muestras (Fig. 22). Sólo las CSD correspondientes a las imágenes “08-03-s4”, “mars13-2c”, “mars13-3a”, “mars 13-3c”, “14-03-sa”, “24-07-s2”, “july13-3a”, y “july13-3c” no presentan esta disminución para los tamaños más pequeños (Fig.23).

Adicionalmente, en la figura 22 se puede observar que el conjunto de CSD de cada fase no indica una diferencia significativa entre sí respecto a la forma o a su rango de variación. Dado que ambas fases tienen dinámismos diferentes, para determinar una relación es necesario analizar más a fondo los parámetros derivados de una CSD, en este caso, la densidad numérica de volumen de microlitos (N_v) y la velocidad de ascenso.

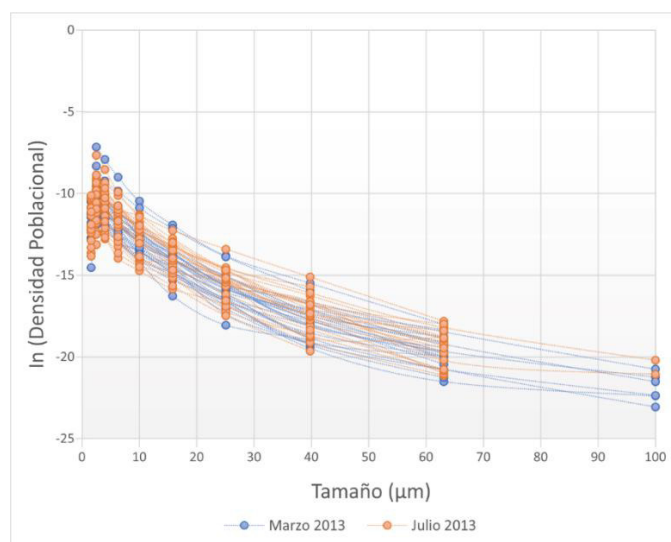


Figura 22: CSD correspondientes al material juvenil recolectado durante las fases eruptivas de marzo y julio 2013 del volcán Tungurahua. Las curvas muestran un aumento de la densidad poblacional con la disminución del tamaño de cristales. Sin embargo, algunas presentan un cambio de tendencia en los tamaños cercanos a 1 μm .

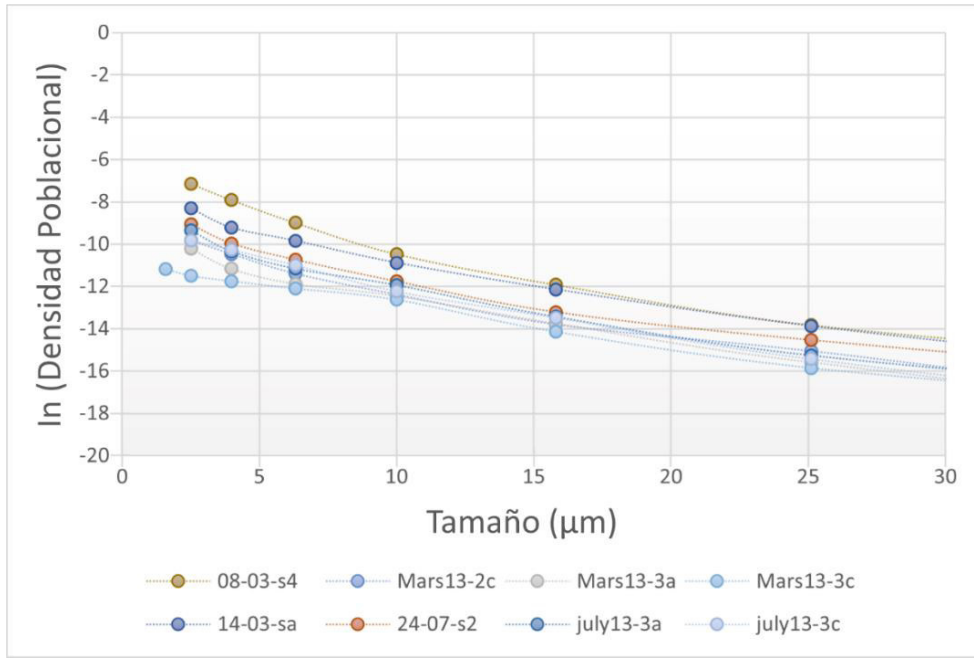


Figura 23: CSD que no presentan una disminución de la densidad poblacional para los tamaños cercanos a 1 µm.

Respecto a las muestras asociadas al evento vulcaniano del 14 de julio, las CSD permitieron identificar 2 grupos de muestras. El primero (A) presenta baja densidad poblacional y el segundo (B), al contrario, indica una alta densidad poblacional (Fig. 24).

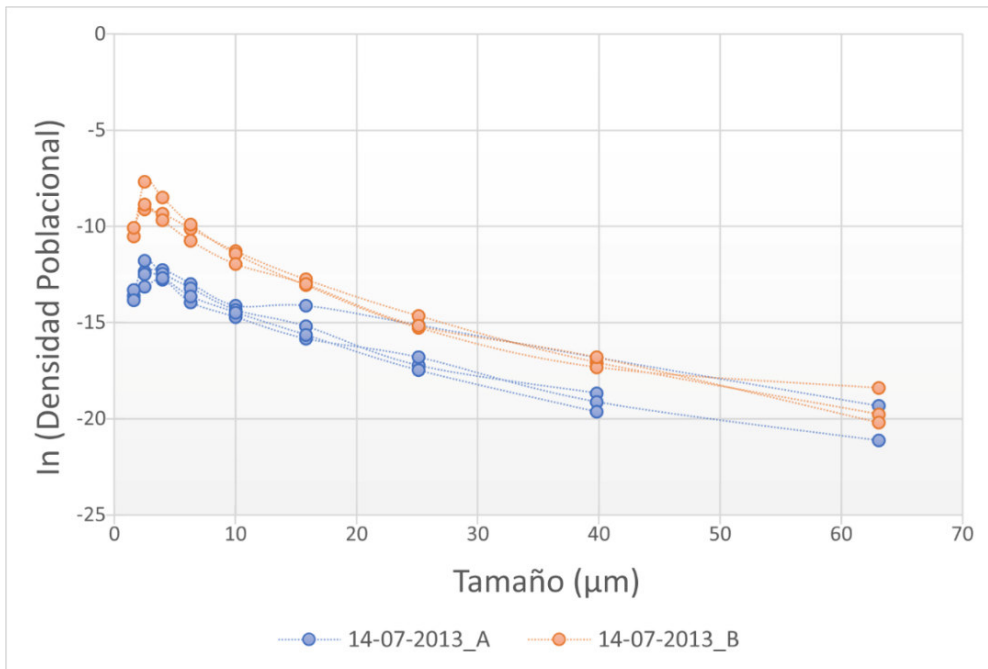


Figura 24: CSD asociadas al evento vulcaniano sucedido el 14 de julio del 2013 en el volcán Tungurahua. El grupo A (azul) muestra baja densidad poblacional, mientras que el grupo B (naranja) muestra una alta densidad poblacional.

4.3. Nucleación y Cristalinidad

El parámetro Nv se define como el número de cristales por unidad de volumen en una muestra. Dado que el número total de cristales está determinado por el proceso de nucleación (Nanev, 2020; Toramaru, 1991), este estudio asocia Nv a la densidad de nucleación en una unidad de volumen de un espécimen.

La figura 25 indica la variación de Nv respecto a los días de recolección de ceniza durante las fases de interés. Tanto los valores más altos como los más bajos se observan en las muestras recolectadas el día 14 de julio. Estos valores se asocian directamente con los grupos distinguidos en la sección anterior, es decir altos valores correspondientes al grupo B y bajos valores asociados con el grupo A.

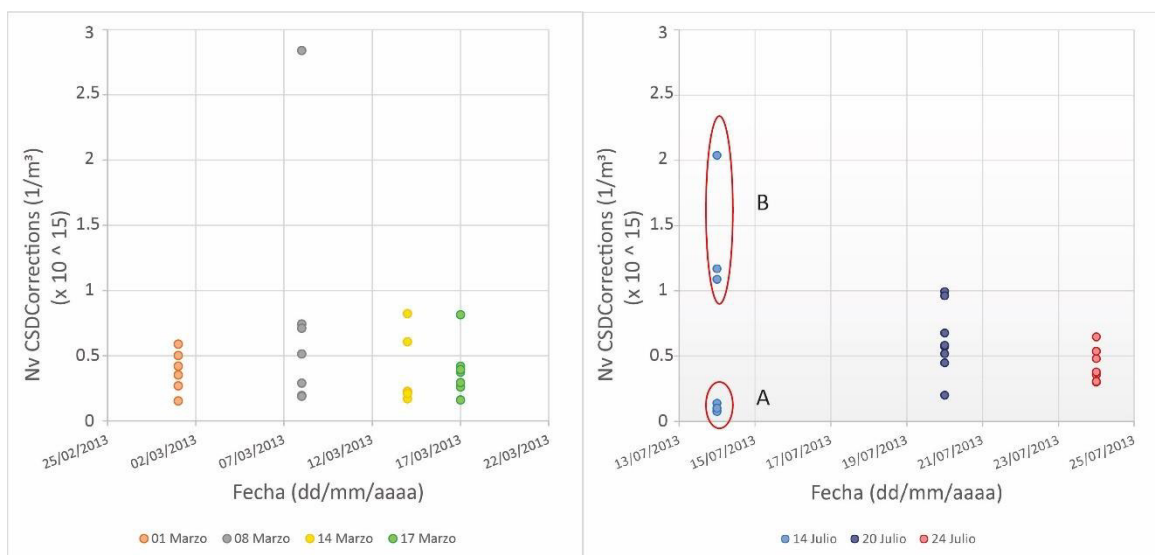


Figura 25: Variación de la densidad numérica de microlitos (Nv) en el material juvenil recolectado durante las fases de marzo y julio 2013 del volcán Tungurahua. El día 14 de julio presenta 2 grupos de muestras: A) con bajos valores de Nv, y B) con altos valores de Nv.

A diferencia de la cantidad de núcleos que tiene una muestra, la abundancia de una fase se refiere al porcentaje del volumen total que ocupa una especie mineral. Son términos diferentes, ya que en el segundo se considera el tamaño y volumen de los cristales, y en el primero solo se considera el número total de cristales. Comúnmente, la abundancia de fase se conoce como cristalinidad (Φ). La figura 26 muestra la variación de este parámetro en las muestras estudiadas.

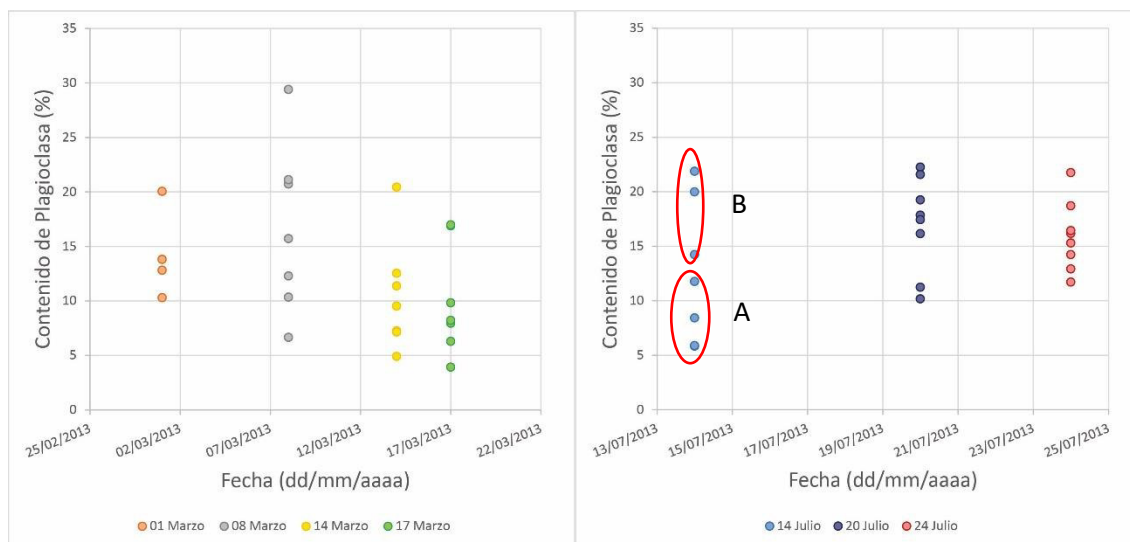


Figura 26: Variación del contenido de plagioclasas (Φ) en el material juvenil recolectado durante las fases de marzo y julio 2013 del volcán Tungurahua.

Día	Rango de Φ (%)
01-mar	10.3 – 20.1
08-mar	6.7 – 29.4
14-mar	4.9 – 20.5
17-mar	3.9 – 17
14 jul A	5.8 – 11.8
14 jul B	14.2 – 21.9
20-jul	10.2 – 22.3
24-jul	11.7 – 21.8

Tabla 14: Rangos de variación del contenido de plagioclasas (Φ) en el material juvenil recolectado durante las fases de marzo y julio 2013 del volcán Tungurahua.

4.4. Contenidos de agua

Utilizando la regresión lineal reportada por Myers et al. (2014), se calculó la concentración de H_2O para los valores de Cl medidos en el vidrio volcánico de las muestras recolectadas durante las fases de interés. Se seleccionaron los valores mínimos de contenido de Cl, ya que están asociados a valores máximos de H_2O , los cuales representan la concentración en el magma previo a la desgasificación.

Las tablas 15 y 16 muestran los valores resultantes y los valores máximos escogidos para posteriormente calcular la velocidad de ascenso magmático de los días analizados en cada fase.

Fecha	01/03/2013		Fecha	08/03/2013		Fecha	14/03/2013		Fecha	17/03/2013	
DataSet/ Point	Cl (ppm)	H ₂ O (wt%)	DataSet/ Point	Cl (ppm)	H ₂ O (wt%)	DataSet/ Point	Cl (ppm)	H ₂ O (wt%)	DataSet/ Point	Cl (ppm)	H ₂ O (wt%)
1	609.4	3.2	1	547.8	3.4	1	982.6	2.0	1	687.8	2.9
2	529.2	3.5	2	490.3	3.6	2	814.6	2.5	2	675.4	3.0
3	791.8	2.6	3	725.4	2.8	3	680.8	3.0	3	540.8	3.4
4	542.8	3.4	4	498.0	3.6	4	391.6	3.9	4	674.8	3.0
5	611.4	3.2	5	713.0	2.9	5	648.2	3.1	5	680.6	3.0
6	777.4	2.6	6	787.2	2.6	6	852.0	2.4	6	889.8	2.3
7	546.8	3.4	7	868.2	2.3	7	651.8	3.1	7	226.6	4.5
8	413.4	3.8	Máximo valor de H ₂ O		3.6	8	774.6	2.7	8	300.0	4.2
Máximo valor de H ₂ O		3.8				Máximo valor de H ₂ O		3.9	9	1006.2	1.9
									10	698.8	2.9
									11	721.0	2.8
									Máximo valor de H ₂ O		4.5

Tabla 15: Valores medidos de Cl y valores calculados de H₂O en base al método de regresión lineal reportado en Myers et al. (2014), fase marzo 2013.

Fecha	14/07/2013		Fecha	20/07/2013		Fecha	24/07/2013	
DataSet/ Point	Cl (ppm)	H ₂ O (wt%)	DataSet/ Point	Cl (ppm)	H ₂ O (wt%)	DataSet/ Point	Cl (ppm)	H ₂ O (wt%)
1	492.6	3.6	1	955.0	2.1	1	653.4	3.1
2	823.4	2.5	2	880.6	2.3	2	944.6	2.1
3	673.3	3.0	3	1065.2	1.7	3	648.8	3.1
4	721.6	2.8	4	629.0	3.1	4	757.4	2.7
5	413.0	3.8	5	952.6	2.1	5	965.8	2.0
6	509.6	3.5	6	763.0	2.7	6	624.8	3.1
7	1008.4	1.9	7	583.2	3.3	7	889.4	2.3
8	848.8	2.4	8	767.6	2.7	8	324.0	4.1
9	835.0	2.5	9	815.8	2.5	9	847.4	2.4
Máximo valor de H ₂ O		3.8	10	666.8	3.0	10	633.0	3.1
			Máximo valor de H ₂ O		3.3	11	723.2	2.8
						12	833.0	2.5
						Máximo valor de H ₂ O		4.1

Tabla 16: Valores medidos de Cl y valores calculados de H₂O en base al método de regresión lineal reportado en Myers et al. (2014), fase julio 2013.

4.5. Velocidades de Ascenso

Las velocidades de ascenso fueron calculadas de acuerdo con la ecuación 2 (sección 3.2.2.) para cada día de recolección del material juvenil durante las fases indicadas. En total, se tienen 7 días, 4 correspondientes a la fase de marzo 2013 y 3 a julio 2013.

En general, para la fase de marzo, las velocidades varían en un rango de 0.04 a 0.53 m/s y para julio de 0.07 a 0.67 m/s (Tabla 17). Los días de mayor velocidad de ascenso son 17 de marzo y 14 de julio, y los días de menor son 8, 14 de marzo y 20 de julio (Fig. 27).

Día	Rango de velocidades (m/s)
01-mar	0.11 - 0.27
08-mar	0.04 - 0.23
14-mar	0.04 - 0.18
17-mar	0.18 - 0.53
14 jul A	0.07 - 0.11
14 jul B	0.44 - 0.67
20-jul	0.07 - 0.21
24-jul	0.30 - 0.51

Tabla 17: Rangos de variación de las velocidades de ascenso calculadas para el material juvenil recolectado durante las fases marzo y julio 2013 del volcán Tungurahua.

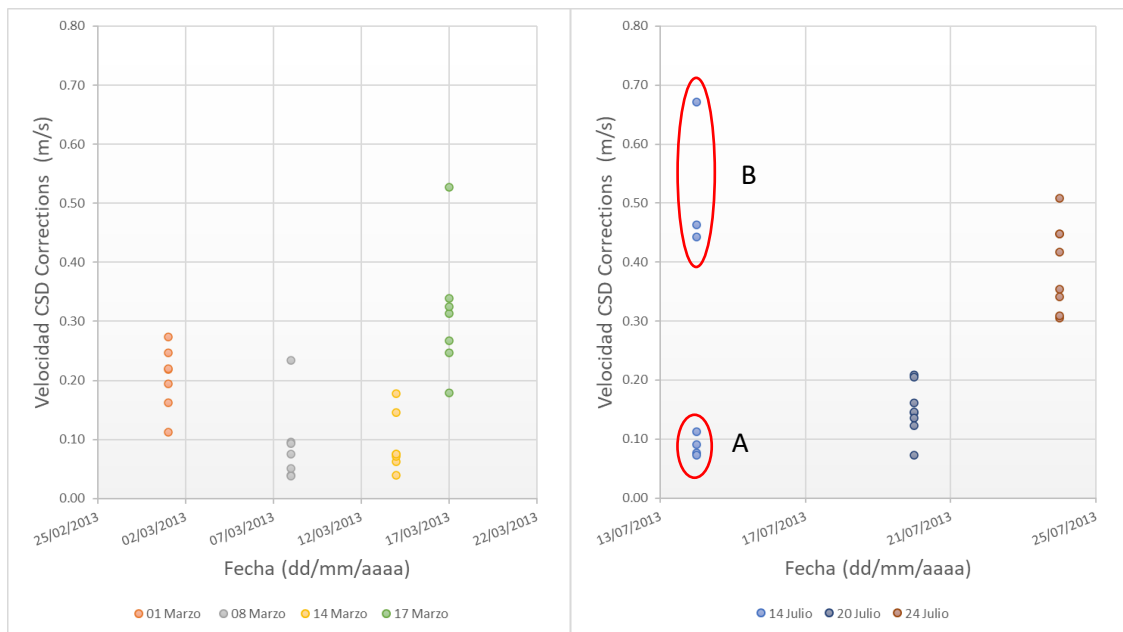


Fig. 27: Variación de las velocidades de ascenso en el material juvenil recolectado durante las fases marzo y julio 2013 del Volcán Tungurahua. El día 14 de julio presenta 2 grupos de muestras: A) que posee bajos valores de velocidad y B) que presenta altos valores.

4.6. Tasa de Descompresión

La tasa de descompresión fue calculada en base a la fórmula propuesta por Toramaru et al. (2008).

$$\left| \frac{dPw}{dz} \right| = \frac{c}{b} \left(\frac{Nv}{a} \right)^{\frac{2}{3}}$$

Para el cálculo de las constantes se utilizaron los contenidos de agua y sílice medidos en el vidrio volcánico presente en la matriz de las muestras estudiadas (ver secciones 3.2.3 y 3.3). La figura 28 muestra la tendencia similar que presenta este factor con las velocidades descritas en la sección anterior.

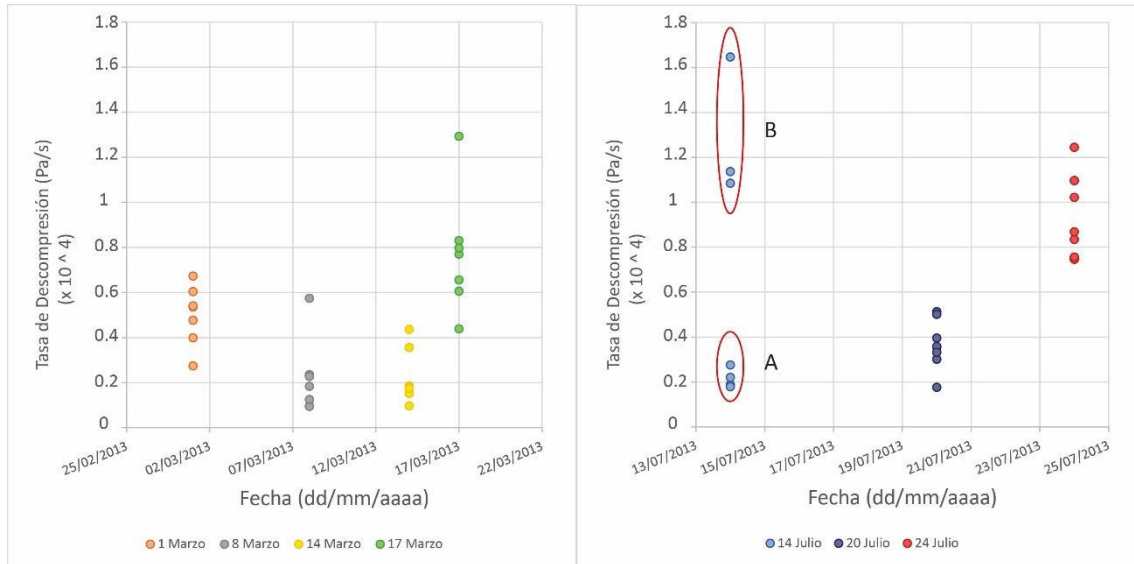


Figura 28: Tasas de descompresión calculadas en el material juvenil recolectado durante las fases eruptivas marzo y julio 2013 del volcán Tungurahua. El gráfico indica la misma tendencia que las velocidades de ascenso. El día 14 de julio presenta 2 grupos de muestras: A) con bajas tasas de descompresión, y B) con altas tasas de descompresión.

CAPÍTULO V

5. DISCUSIÓN

La siguiente sección pretende discutir la metodología y resultados obtenidos en el presente estudio. Este capítulo se encuentra dividido en dos partes. En la primera, se argumenta la metodología descrita en los capítulos anteriores y se presentan las limitaciones identificadas durante la realización de este trabajo. Y, en la segunda parte se presentan los aportes a la comprensión de los dinamismos eruptivos observados en las fases de marzo y julio 2013 del volcán Tungurahua.

5.1. Discusión metodológica

5.1.1. Método manual vs semiautomático

Para evaluar la precisión entre los métodos manual y semiautomático, a continuación, la tabla 18 presenta una comparación entre la diferencia de los resultados obtenidos para los parámetros: coeficiente de determinación (R^2) de hábitos cristalinos, cristalinidad (Φ) y densidad numérica de volumen (N_v) reportados en la sección 4.1. Los bajos valores de la diferencia (muy cercanos a 0) entre cada parámetro determinan una alta precisión entre los resultados obtenidos a través de ambos métodos.

	Parámetro	mars13-3c	14-03-sc	17-03-sa	14-07-s1	08-03-s4
Diferencia entre resultados TWS y manual	R^2 (adimensional)	0.0826	0.0533	0.1249	0.0818	0.0227
	Φ (%)	0.38	1.73	0.68	1.69	3.14
	N_v ($1/\mu\text{m}^3$)	0.000048	0.000094	0.000015	0.000604	0.00089

Tabla 18: Valores resultado de la diferencia entre los parámetros obtenidos a través de los métodos manual y semiautomático TWS.

No obstante, como se mencionó en la sección 4.1, existen pequeñas variaciones entre los métodos manual y semiautomático. Según el estudio de Lormand et al. (2018), estas diferencias podrían deberse a: 1) el número de píxeles de entrenamiento dados

por el usuario al programa TWS durante la clasificación, 2) el umbral de tamaño limitado por cada método, y, 3) la resolución de la imagen.

Dado que el número de píxeles de entrenamiento utilizados durante la clasificación semiautomática en el presente trabajo fue >15 , siendo lo recomendable utilizar más de 10 (Lormand et al., 2018). Entonces, este estudio atribuye las diferencias entre los métodos manual y semiautomático principalmente al umbral de tamaño condicionado por cada método. Esto hace referencia al tamaño de cristal más pequeño que cada método puede identificar. En el caso del método manual este límite depende de la persona que realice la clasificación y su apreciación visual. Y, en cambio en el método semiautomático dependería del tamaño mínimo de píxel que puede detectar el *plug-in* TWS, el cual está en función de la resolución de cada imagen.

Otro factor que comúnmente contribuye a acentuar la desigualdad entre ambos métodos es el post-procesamiento de cada imagen. Es decir, la separación manual de cristales y relleno de grietas que realiza el usuario posterior a la clasificación semiautomática. El presente estudio realizó un post-procesamiento detallado, sin embargo, siempre es posible encontrar pequeños errores sistemáticos durante un procesamiento manual, los cuales eventualmente provocarían una ligera variación en los resultados.

5.1.2. Método Batch vs CSDCorrections

Como se mencionó en la metodología, existe una proporcionalidad directa entre los valores de densidad numérica de volumen (N_v) calculados mediante los métodos *Batch* y *CSDCorrections*. La figura 29 representa esta correlación con un coeficiente de determinación de 0.7295. El gráfico muestra que los valores obtenidos con el método *Batch* son mayores. En este método el valor de N_v se obtiene mediante la división entre la densidad numérica de área (N_a) y el tamaño característico del cristal (S_n). Dado que no se considera el hábito cristalino, estos parámetros no son los reales, son proyecciones en un plano de 2 dimensiones. Por lo tanto, la densidad numérica de área aparenta un mayor valor cuando no se considera el hábito cristalino, y esto a su vez provoca un aumento de N_v .

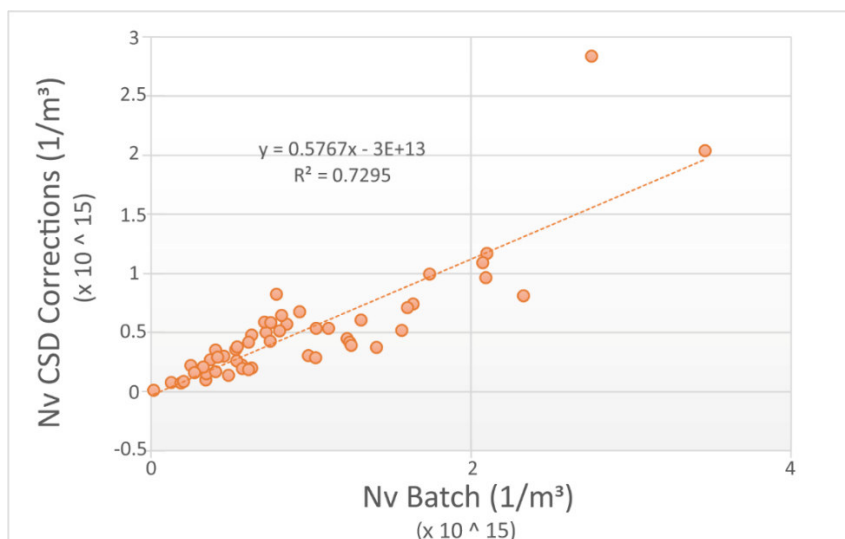


Figura 29: Relación directamente proporcional entre los valores de Nv (densidad numérica de microlitos) obtenidos mediante los métodos *Batch* y *CSDCorrections*. La línea entrecortada representa la relación directa de ambas variables.

5.1.3. Cálculo del contenido de agua

Uno de los objetivos de este trabajo consistía en estimar las velocidades de ascenso del magma para las fases de interés. Para ello, se utilizó el método descrito por Toramaru et al., (2008), en el cual se necesita conocer la concentración de agua en el fundido a la profundidad de nucleación de microlitos.

El presente estudio conocía la composición geoquímica en el vidrio volcánico de cada muestra. Entonces, se plantearon dos opciones indirectas para determinar un contenido de agua aproximado. La primera, aplicar el método de "diferencia de volátiles" (Hughes et al., 2018), que consiste en obtener el contenido de agua a través de la sustracción entre el 100% y la suma de los contenidos de los elementos mayores. Y la segunda, utilizar la regresión lineal calculada para las fases de julio, agosto 2006 y mayo 2010 para el volcán Tungurahua basado en el estudio de Myers et al., (2014).

Para conocer la influencia en las velocidades de acuerdo con el método escogido durante la determinación del contenido de agua, se calcularon las velocidades que resultarían al emplear el método de diferencia de volátiles. Los resultados muestran la misma tendencia que las velocidades calculadas con el método de regresión lineal, difiriendo entre sí únicamente en el orden de magnitud (Fig.30). Entonces, dada la similitud de velocidades, se procedió con el análisis de los resultados obtenidos a partir del método de regresión lineal.

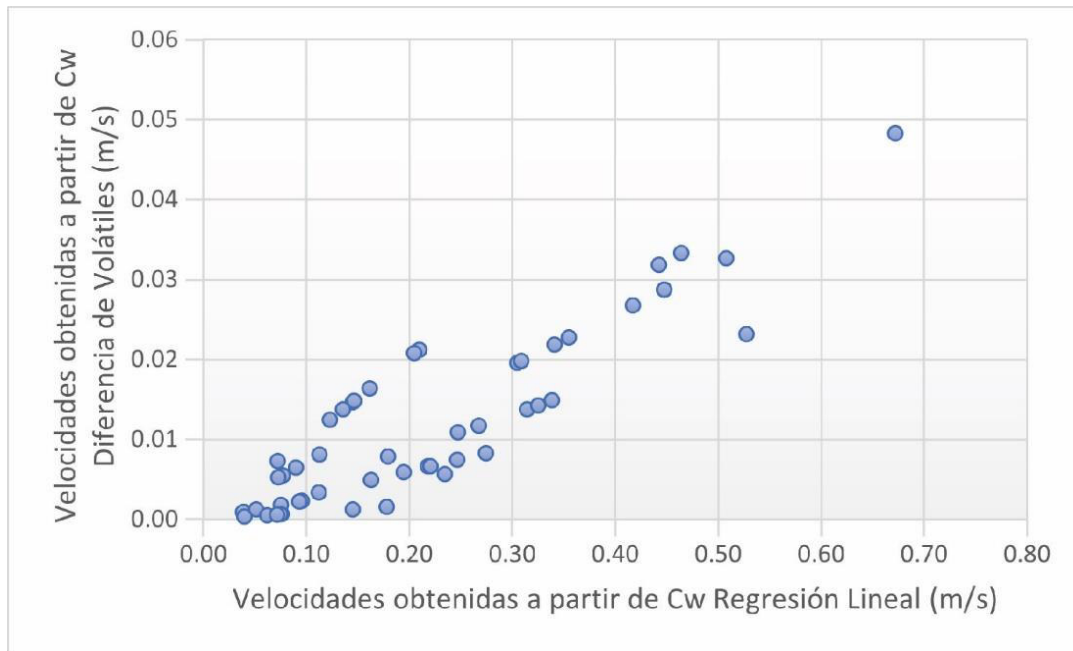


Figura 30: Variación del orden de magnitud en las velocidades calculadas dependiendo del método utilizado para el cálculo del contenido de agua (Cw).

5.1.4. Fuentes de error

El cálculo de la tasa de ascenso magmático requiere conocer tanto el contenido de sílice como el contenido de agua en el magma a la profundidad de nucleación de microlitos. Estos parámetros son difíciles de medir en productos volcánicos que han sufrido altas tasas de desgasificación y cristalización que modifican el contenido de agua y de sílice. Cada día de interés presentó varios valores de sílice y cloro, el cual fue utilizado para calcular el contenido de agua teórico correspondiente (ver tablas 5, 6, 7,8).

El contenido de agua y sílice a la profundidad de interés se obtiene generalmente a partir del análisis en inclusiones magmáticas dentro de una población de cristales (Hervig et al., 1989; Cashman y Blundy, 2000; Humphreys et al., 2008; Myers et al., 2014; Myers et a., 2018). No obstante, la instrumentación requerida para realizar dichos análisis es muy costosa, motivo por el cual en este trabajo se utilizaron métodos alternativos. Los métodos descritos anteriormente para la obtención del contenido de agua y sílice son métodos indirectos, ya que no fueron medidos directamente en inclusiones. Además, la regresión lineal calculada para la correlación entre los valores de Cl y H₂O medidos en el estudio de Myers et al. (2014) refleja un bajo coeficiente de determinación de 0.4969 (c.f. Fig. 14). Otros estudios han recalcado que pequeñas diferencias en el cálculo de los contenidos de agua y sílice podrían generar errores muy grandes (hasta un 500%) en la tasa de descompresión (Murch y Cole, 2019), y por ende en la velocidad.

El estudio de Cassidy et al. (2018) acerca de los factores que controlan el cambio en el estilo eruptivo de los volcanes (efusivo – explosivo), presenta una recopilación de las tasas de ascenso magmático para diferentes volcanes alrededor del mundo (Fig. 31).

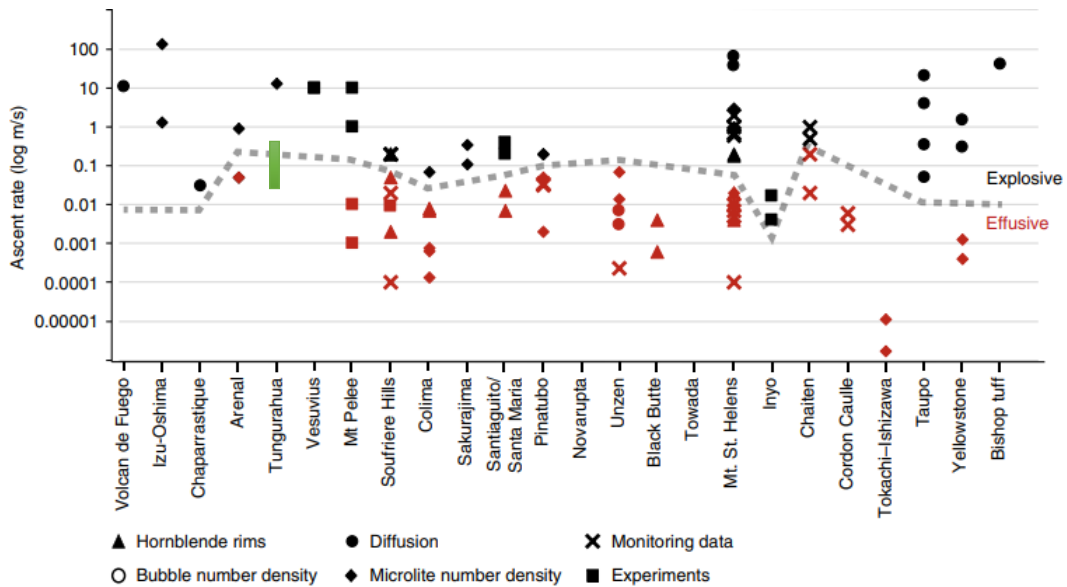


Figura 31: Velocidades de ascenso para diferentes volcanes alrededor del mundo. El rectángulo verde representa el rango de velocidades obtenidas en el presente trabajo. Modificado de Cassidy et al. (2018).

Los valores calculados para el volcán Tungurahua corresponden al estudio de Wright et al. (2012) para las erupciones producidas entre 1999 y 2006. Los resultados del presente estudio son un orden de magnitud menor a dichas velocidades. Esta diferencia podría atribuirse a dos factores. El primero, la diferencia en los dinamos eruptivos analizados en cada estudio y/o al posible porcentaje de error en el cálculo del contenido de agua para las fases marzo y julio 2013.

Al no contar con valores reales de contenidos de agua para las muestras del presente trabajo, no es posible cuantificar un porcentaje de error. Sin embargo, se considera que las tendencias que muestran los resultados se ajustan adecuadamente a los dinamos eruptivos descritos en cada fase independientemente de su valor absoluto.

5.2. Aportes a la comprensión de la actividad del Tungurahua

5.2.1. Hábitos cristalinos e Interpretación de CSD

Como se mencionó en la sección 3.1.4. el hábito cristalino de una especie mineral es una propiedad importante para el cálculo de la CSD 3D. Para determinarlo se han desarrollado múltiples modelos numéricos que utilizan los datos adquiridos a través de imágenes BSE (2D), entre ellos el modelo *CSDSlice 5.0*. utilizado en este estudio. La mayoría de las modelaciones numéricas consideran que una predicción es más confiable si el coeficiente de determinación se acerca más a la unidad. Dentro de este estudio, se determinó un coeficiente de determinación mayor a 0.6 en el 84% de imágenes analizadas. Esto indica una mayor confianza en los resultados del hábito cristalino. Únicamente la muestra “july13-2c” obtuvo un R^2 bajo ($R^2 = 0.39$). Según Morgan y Jerram (2006), los valores de R^2 para formas aciculares suelen ser ≥ 0.4 , lo que ubica a esta muestra por debajo del valor sugerido.

El número mínimo de cristales necesario para determinar el hábito de una población cristalina es 75 para formas tabulares y 250 para formas aciculares (Morgan y Jerram, 2006). Según los resultados de la clasificación, se identificaron 194 microlitos de plagioclasas en la imagen “july13-2c”. Por lo tanto, en este caso el valor de R^2 se atribuye al bajo contenido de cristales identificados en la imagen. Para las imágenes analizadas, excepto para la july13-2c, se observa una mayor confianza (>0.6) en el cálculo del hábito cristalino de las muestras analizadas.

Las muestras analizadas en este estudio pertenecen a fragmentos juveniles recolectados durante las fases eruptivas de marzo y julio 2013 del volcán Tungurahua. Durante el estudio se calcularon las CSD asociadas a cada muestra, ya que, su forma brinda indicios sobre los cambios en el proceso de cristalización mientras asciende el magma (Murch y Cole, 2019) y, por ende, es posible realizar interpretaciones de las condiciones de ascenso del magma. El aumento de la densidad poblacional con la disminución del tamaño de cristales es la tendencia observada en todas las muestras, y sugiere un proceso de nucleación y crecimiento gradual de los cristales debido al cambio de presión y temperatura durante el ascenso del magma (Murch y Cole, 2019). En general, las CSD indican que los cristales de tamaños más pequeños se habrían formado más tardíamente durante el enfriamiento del magma y proveen indicios sobre las condiciones de ascenso en la parte somera del conducto volcánico, ya que en esta zona la nucleación de microlitos es promovida por el inicio de la desgasificación (Toramaru et al., 2008). Mientras que, los cristales de tamaños más grandes guardan información sobre el ascenso del magma desde zonas más profundas.

Según varios autores, la disminución repentina de la densidad poblacional para cristales de tamaños cercanos a 1 μm , es decir el cambio de pendiente en la CSD puede ser provocado por: a) baja resolución de la imagen BSE, b) efecto de probabilidad de intersección (ver sección 2.3) y c) la ausencia de cristalización tardía debido al rápido enfriamiento (Murch y Cole, 2019; Brugger y Hammer, 2010; Lormand et al., 2018). Para este caso se han escogido dos causas principales.

En primer lugar, el efecto de probabilidad de intersección, el cual en resumen sugiere que, para un plano de intersección determinado, es menos probable atravesar los cristales más pequeños que los cristales más grandes de una muestra. La mayor parte de muestras analizadas poseen microlitos con un promedio de tamaños de 19.04 μm y una desviación estándar de 6.64 μm entre sí. Por lo tanto, es poco probable detectar cristales de tamaños muy pequeños, cumpliendo el efecto de probabilidad de intersección. Este fenómeno se evidencia en el cambio de tendencia que presentan la mayor parte de CSD analizadas. Por el contrario, las muestras cuyas CSD no presentan esta curvatura, tienen un promedio de tamaños de 11.68 μm y una desviación estándar de 4.41 μm entre sí, es decir que, al presentar tamaños menores, hay una alta probabilidad de intersecar un mayor número de cristales pequeños. Por este motivo dichas muestras no presentan una disminución en la densidad poblacional para tamaños cercanos a 1 μm .

En segundo lugar, el cambio de tendencia de la curva CSD podría indicar la ausencia de cristalización tardía debido a un enfriamiento rápido. Se sugiere que las muestras correspondientes a los días 17 de marzo y 14 de julio podrían estar asociadas a este fenómeno, ya que, su dinamismo eruptivo tipo fuente piroclástica y tipo vulcaniano, acompañado de las altas velocidades calculadas en este trabajo sugieren un rápido enfriamiento provocado por el ascenso rápido del magma.

5.2.2. Características de la fase de marzo 2013

De acuerdo con el modelo de migración/residencia del magma emitido por el volcán Tungurahua (Hidalgo et al., 2015; Narváez, 2014), la fase de marzo inicia el día 01 de marzo con una actividad eruptiva en sistema abierto. Los parámetros que apuntan hacia un sistema abierto son: la alta desgasificación que se identifica en el flujo diario de SO_2 hasta el día 07 de marzo (Fig. 32), el bajo número de explosiones vulcanianas, la emisión continua de ceniza y el contenido de partículas oxidadas asociadas a la erosión y limpieza del conducto (Narváez, 2014).

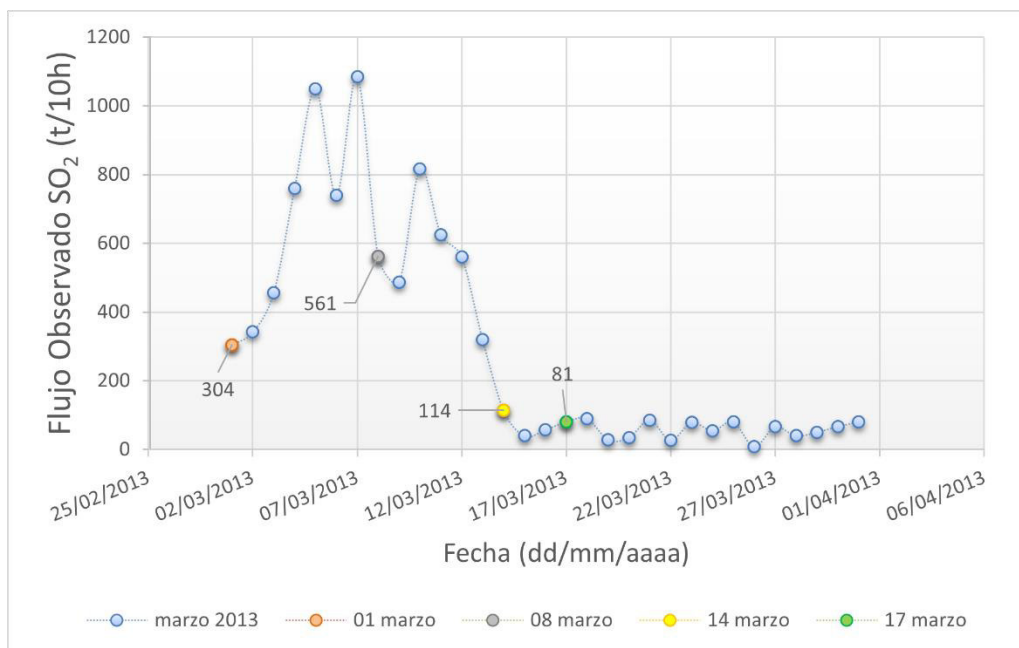


Figura 32: Flujo observado de SO₂ medido durante la fase eruptiva marzo 2013 del volcán Tungurahua, se muestran con otros colores los valores registrados para los días: 01, 08, 13, 14 y 17 de marzo, que son el objeto de este estudio. Obtenido de Hidalgo et al. (2015).

Durante el primer día de la fase, se obtuvieron velocidades de entre 0.11 - 0.27 m/s. Estos valores fueron catalogados como velocidades intermedias, comparadas con el día 17 de marzo. En conjunto con el contenido de sílice promedio medido en el vidrio volcánico para este día (64.78 wt%), se sugiere que las velocidades calculadas representan el ascenso de un magma de moderada cristalinidad a través del conducto.

Es conocido que un incremento en la desgasificación de especies volátiles, como H₂O y SO₂ (Hammer y Rutherford, 2002; Shea y Hammer, 2013; Matsumoto y Geshu, 2021; Moussallam et al., 2019) durante el ascenso de un magma, favorece la cristalización de la matriz formando microlitos. El estudio de Chevrel et al. (2015) que presenta mediciones de viscosidad en muestras del volcán Tungurahua, propone que la carga cristalina influencia directamente en la viscosidad del magma ascendente. Así, un incremento de cristalinidad debido a procesos de desgasificación se ve reflejado en un alto contenido de sílice y por ende produce un aumento en la viscosidad, lo que disminuye la velocidad de ascenso del magma (Cassidy et al., 2018).

Para la muestra recolectada el 8 de marzo se observa un alto porcentaje de cristalinidad, entre 6.7 – 29.4 %, mayor contenido de sílice (Fig. 33) y mayor flujo de SO₂. Las velocidades de ascenso para este día son menores, entre 0.04 – 0.23 m/s (Fig. 34). Valores similares en velocidad, cristalinidad y densidad numérica de volumen (Nv) al 8 de marzo se observan el 13 y 14. No obstante, en el día 14 de marzo se registra un

menor flujo de SO_2 que sugiere la emisión de un magma menos permeable, en donde la acumulación de volátiles provoca un aumento en la explosividad, lo que se refleja en el mayor número de explosiones vulcanianas reportado esos días (Narváez, 2014).

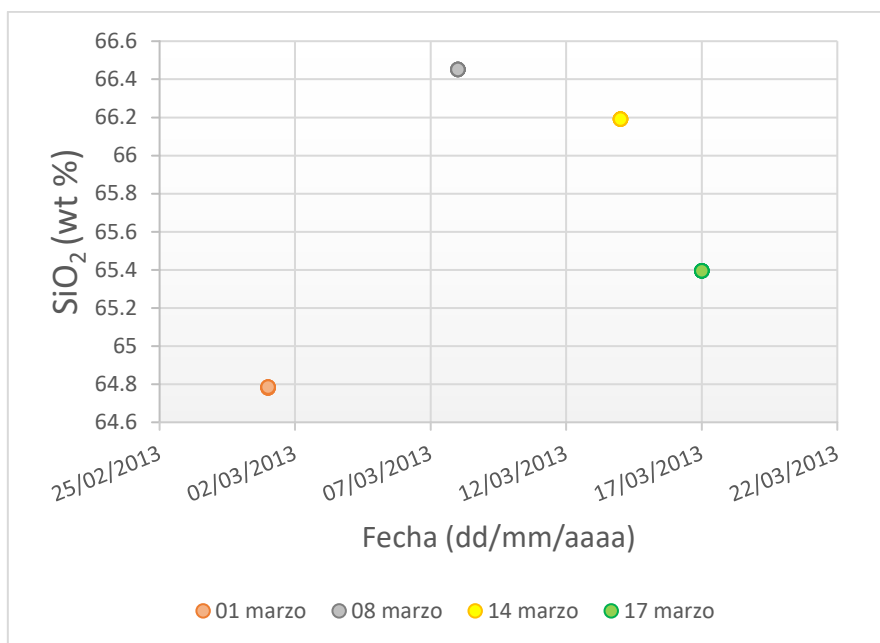


Figura 33: Contenido de sílice medido en el vidrio volcánico correspondiente al material juvenil recolectado durante la fase eruptiva marzo 2013 del volcán Tungurahua.

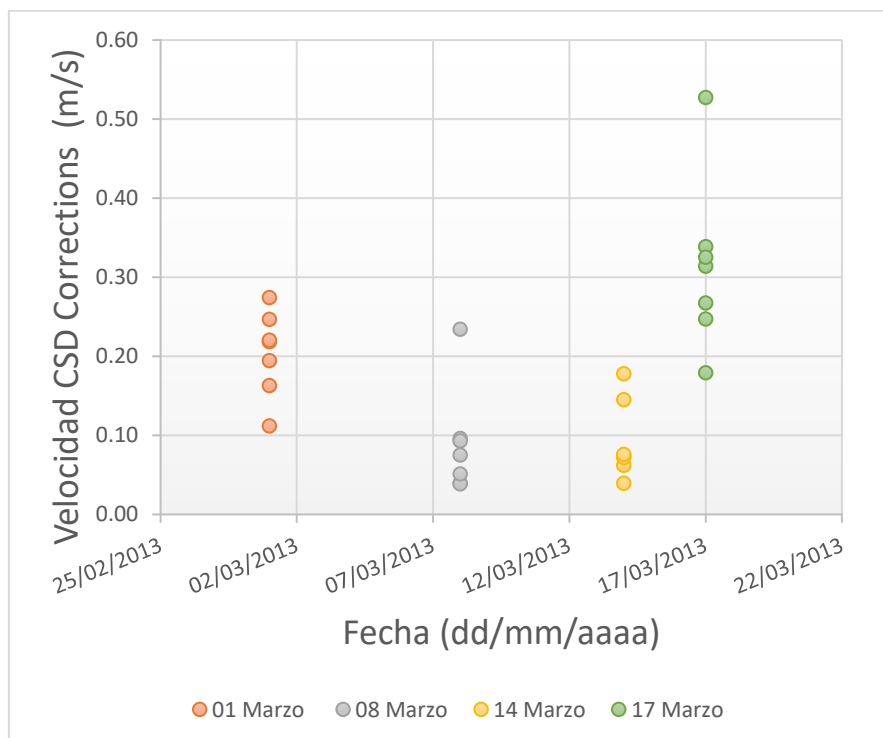


Figura 34: Velocidades calculadas en el material juvenil recolectado durante la fase de marzo 2013 del volcán Tungurahua. Las bajas velocidades están relacionadas a un aumento en la viscosidad del magma en respuesta al alto porcentaje de cristalinidad e incremento de SiO_2 .

La dependencia entre cristalinidad y velocidad de ascenso magmático también se presenta en el estudio de Wright et al. (2012), el cual analiza partículas producidas en erupciones desde 1999 al 2006 del volcán Tungurahua. En dicho trabajo se concluye que la cristalización de microlitos durante el ascenso se produce dentro de un rango de velocidades, como se observa también en los resultados del presente trabajo, en respuesta a la continua exsolución de volátiles (Wright et al., 2012).

Por el contrario, las muestras recolectadas el día 17 de marzo registran las velocidades más altas de la fase, reflejando la alta actividad observada el día 16 de marzo. En este caso, los bajos valores de cristalinidad entre 3.9 – 17 % y de flujo observado de SO₂ indican una menor facilidad para exsolver volátiles. Esta menor facilidad está evidenciada también por el alto contenido de agua (4.5 wt% comparado a 3.6 y 3.9 wt% registrados días anteriores) calculado para dichas muestras (Fig. 35). Según Degruyter et al. (2012), cuando un gas no puede exsolverse del magma ascendente, éste provee la suficiente energía potencial para fragmentar el magma y producir una erupción explosiva. En este caso, la exsolución limitada y posiblemente una baja viscosidad del magma relacionado a un bajo porcentaje de cristalinidad provocaría el aumento en la velocidad de ascenso del magma y el evento explosivo tipo fuentes piroclásticas (Narváez, 2014) referentes al día 16 de marzo.

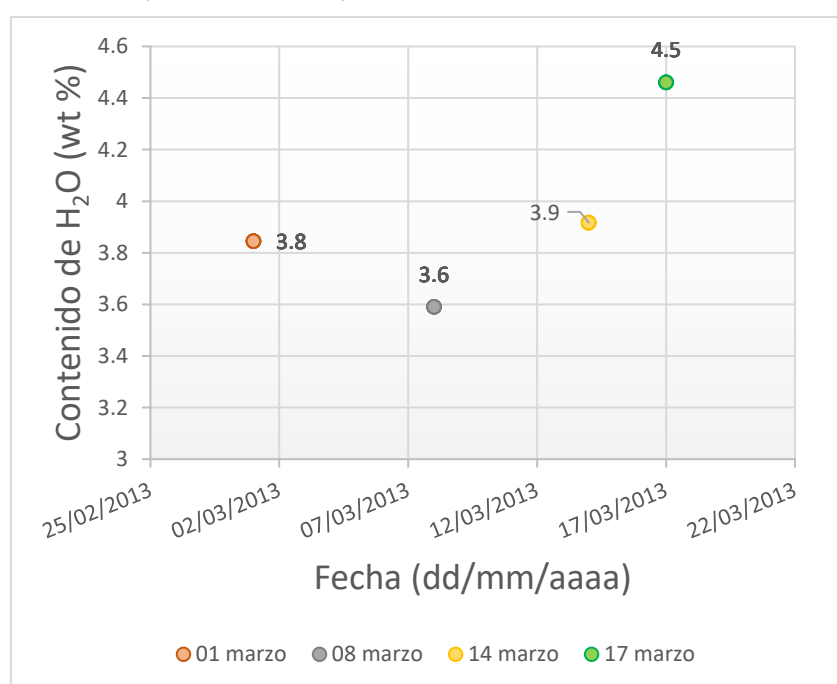


Figura 35: Contenidos de H₂O calculados mediante el método de regresión lineal para el material juvenil recolectado durante la fase eruptiva marzo 2013 del volcán Tungurahua. El gráfico muestra bajos valores de H₂O, típicos de muestras de ceniza. Sin embargo, un contenido mayor se observa para el día 17 de marzo.

5.2.3. Características de la fase de julio 2013

La fase de julio comenzó luego de dos meses de reposo con la erupción vulcaniana registrada el día 14. Este evento altamente explosivo fue el resultado del ascenso de un magma rico en gases, los cuales aumentaron la presión bajo un magma poco permeable (tapón) localizado en el conducto provocando su destrucción y salida violenta del magma ascendente (Narváez, 2014). La explosión generó una de las más grandes señales de infrasonido registradas >5000 Pa y > 2500 t/día de SO_2 (Gaunt et al., 2020).

Las CSD, los valores de densidad numérica de volumen (Nv) y las velocidades calculadas para el día 14 marcan la presencia de 2 grupos de muestras (A y B) que han sido extensamente descritas en las secciones 4.2, 4.3 y 4.5.

El primer grupo (14 julio A), presenta bajas velocidades, entre 0.07 - 0.11 m/s (Fig. 36) y bajos valores de Nv (Fig. 37). Por el contrario, el grupo B del 14 de julio presenta altas velocidades, entre 0.44 - 0.67 m/s y muy altos valores de Nv. Altos valores de Nv del grupo B están asociados a altos porcentajes de cristalización (Fig.26), que también son fácilmente perceptibles observando las imágenes BSE (Fig. 38).

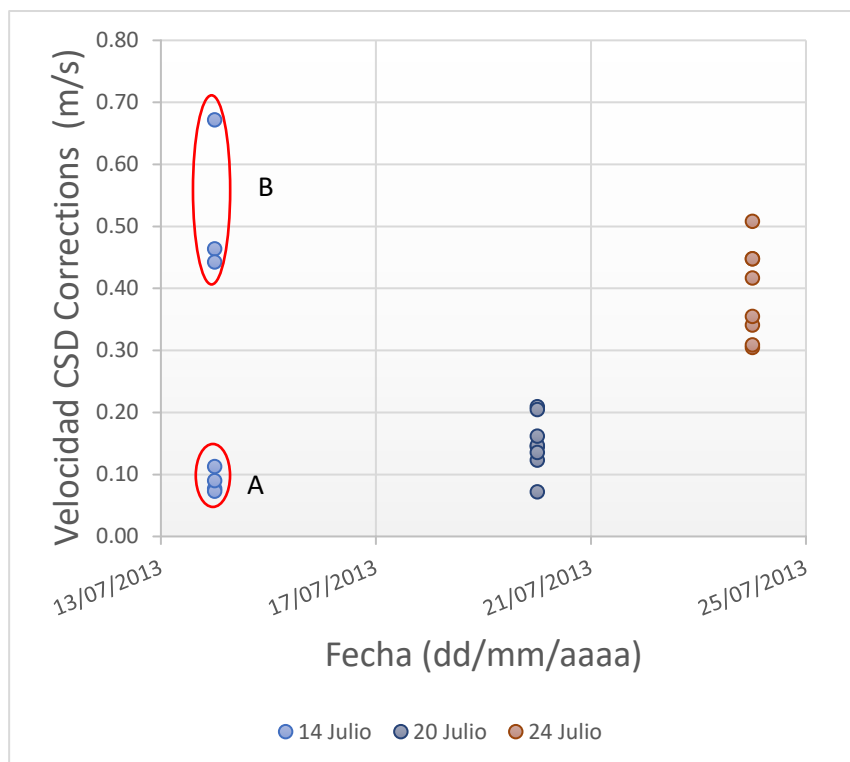


Figura 36: Velocidades de ascenso calculadas en el material juvenil recolectado durante la fase eruptiva julio 2013 del volcán Tungurahua. El 14 de julio indica 2 grupos de muestras, el grupo A, que posee bajas velocidades; y el grupo B, que posee altas velocidades.

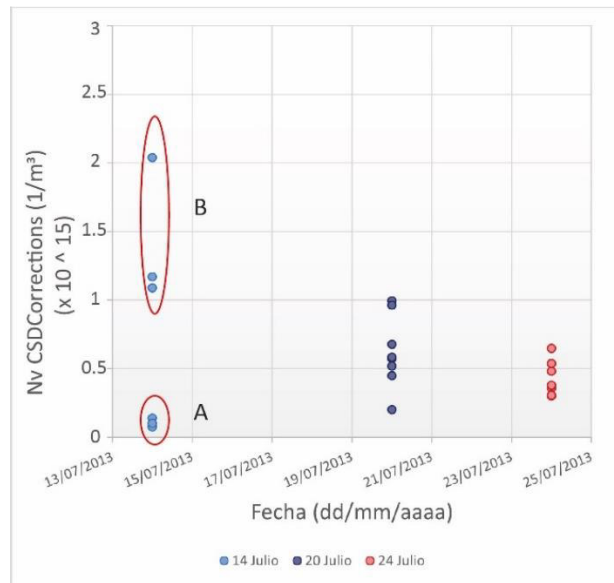


Figura 37: Densidad numérica de volumen de microlitos (Nv) determinada en el material juvenil recolectado durante la fase eruptiva julio 2013 del volcán Tungurahua. El 14 de julio indica 2 grupos de muestras, el grupo A, que posee bajas valores de Nv; y el grupo B, que posee altos valores de Nv.

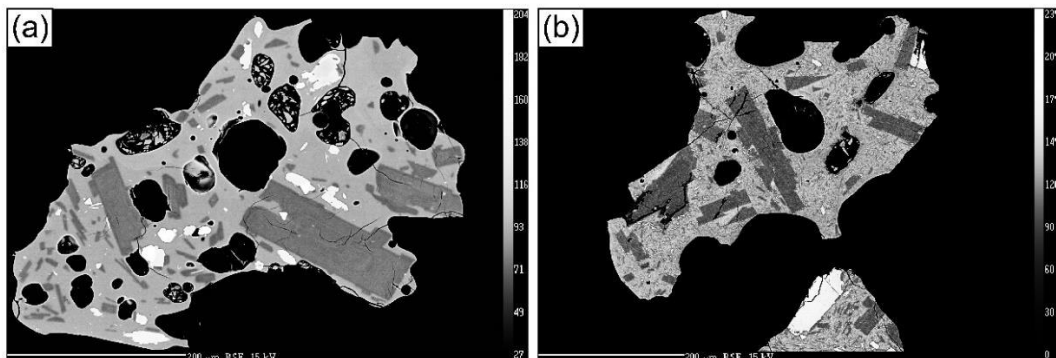


Figura 38: (a) Muestra “july13-1a” correspondiente al grupo A para el evento eruptivo del 14 de julio del 2013 en el volcán Tungurahua. (b) Muestra “14-07-s2” correspondiente al grupo B recolectada durante el mismo evento.

Posterior a la fase de marzo, el mecanismo de desgasificación pasó de un sistema abierto a cerrado debido a la formación del tapón. Durante el ascenso, la exsolución de volátiles (H_2O y SO_2) bajo el tapón produjo la formación de burbujas, las cuales fueron creciendo y expandiéndose. Este fenómeno provocó una sobrepresión de volátiles aumentando la flotabilidad del magma y consecuentemente incrementando su velocidad, como se observa en las muestras pertenecientes al grupo “14 julio B”. Otros estudios han sugerido este mecanismo para varios volcanes alrededor del mundo (Volcán Cerro Negro, Roggensack et al., 1997, Cassidy et al., 2018; depósitos eruptivos de varios volcanes, entre ellos Monte Santa Helena, Rust y Cashman, 2011).

El alto contenido de microlitos por unidad de volumen (N_v) calculado para el grupo “14 julio B” estaría relacionado a un proceso de enfriamiento rápido. Altas tasas de enfriamiento producen un aumento en la tasa de nucleación, generando muchos cristales de tamaño fino (Winter, 2014). En este caso, este fenómeno podría sugerir un nivel de fragmentación más somero para las muestras del grupo B (Fig. 39).

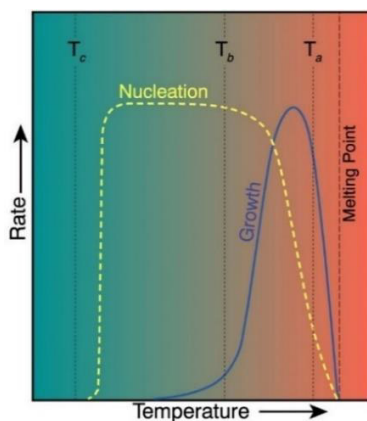


Figura 39: Tasas de nucleación y crecimiento idealizadas en función de la temperatura. Bajas tasas de enfriamiento resultan en rápido crecimiento y bajas nucleación (T_a). Al contrario, altas tasas de enfriamiento permiten un crecimiento lento y rápida nucleación produciendo muchos cristales finos (T_b). Tasas muy altas de enfriamiento producen vidrio (T_c). Obtenido de Winter (2014).

A diferencia de las muestras de marzo, la alta cristalinidad evidenciada en el grupo “14 julio B” no constituye un factor que disminuya la velocidad, ya que, en un sistema cerrado, la velocidad de ascenso estaría condicionada por el contenido de burbujas atrapadas en el magma bajo el tapón.

Posterior a la destrucción del tapón, la primera explosión abrió el sistema y generó una onda de choque con una amplitud de 5327 Pa (Gaunt et al., 2020). En base a esta evidencia, se sugiere que la energía liberada se propagó hacia abajo como una onda de descompresión descrita muy comúnmente para este tipo de erupciones (Cassidy et al., 2018), la cual causó la fragmentación de un magma más profundo y liberó los fragmentos de ese nivel. Eventos similares se han descrito para la erupción de 1980 del Monte Santa Helena (Cassidy et al., 2018) y para la erupción vulcaniana el 26 de septiembre de 1997 en el volcán Soufriere Hills (Jones et al., 2016). Entonces, las muestras provenientes de un magma profundo, tales como el grupo “14 julio A”, registrarían las bajas velocidades y la baja densidad de microlitos características de un magma proveniente de una zona más profunda en el conducto volcánico (Gaunt et al., 2020).

Respecto a la actividad observada el 20 de julio, Narváez (2014) propone que se asocia a la emisión de un magma previamente desgasificado y más viscoso que genera

un exceso de presión en el conducto y aumenta la explosividad de un evento. La figura 40 muestra una disminución en el flujo de SO₂ observado entre los días 14 y 19 de julio. Además, los altos valores de cristalinidad, entre 10.2 – 22.3 %, calculados para este día (Fig. 41) pueden haber contribuido al aumento de la viscosidad del magma. Este aumento de la viscosidad produjo una disminución de la velocidad de ascenso, proceso similar descrito para las muestras recolectadas los días 13-14 de marzo. No obstante, se sugiere un menor potencial explosivo para este día, posiblemente debido a una mayor tasa de desgasificación como lo demuestran los valores medidos en el flujo observado de SO₂. Durante el día 20 de julio se midió una tasa de desgasificación de 365 t/10h, valor superior a las 114 t/10h registradas para el día 14 de marzo. La disminución en el potencial explosivo de los días con actividad vulcaniana intermitente entre ambas fases, es decir, entre los días 13-14 de marzo y 20 de julio, se observa en el número de explosiones registradas cada día. En total, se registraron 24 explosiones vulcanianas entre los días 13 - 14 de marzo y solamente 8 durante el día 20 de julio.

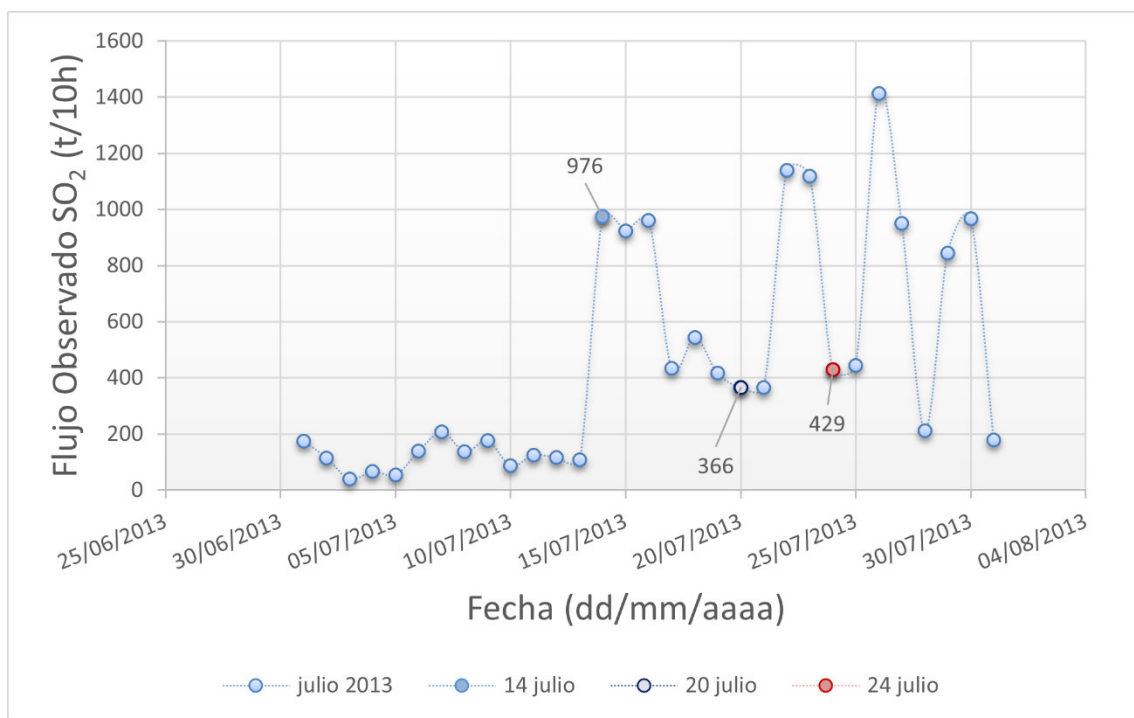


Figura 40: Flujo observado de SO₂ medido durante la fase eruptiva julio 2013 del volcán Tungurahua. Obtenido de Hidalgo et al. (2015).

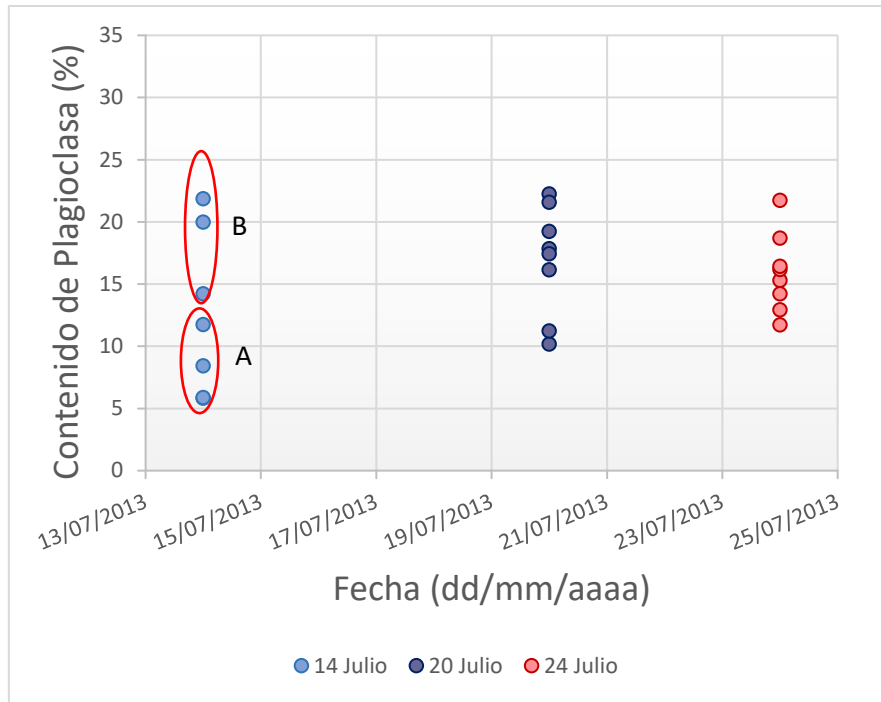


Figura 41: Cristalinidad de plagioclasas determinada en las muestras del material juvenil recolectado durante la fase eruptiva julio 2013 del volcán Tungurahua.

Los resultados asociados con la actividad del día 24 de julio indican el mecanismo contrario. En este caso, se sugiere que el moderado contenido de microlitos por unidad de volumen, es decir, N_v (Fig. 42) podría haber provocado un descenso en la viscosidad del magma, lo que a su vez aumentó la velocidad de ascenso a 0.30 – 0.51 m/s y, redujo el potencial de desgasificación (Cassidy et al., 2018). El alto contenido de agua en la matriz de las muestras (4.1 wt%, tabla 14), evidencia dicha reducción (Fig. 43).

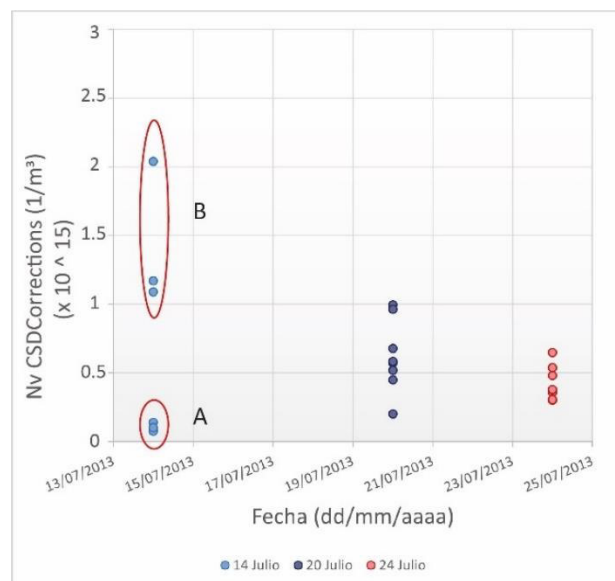


Figura 42: Densidad numérica de microlitos (N_v) calculadas en el material juvenil recolectado durante la fase eruptiva de julio 2013 del volcán Tungurahua.

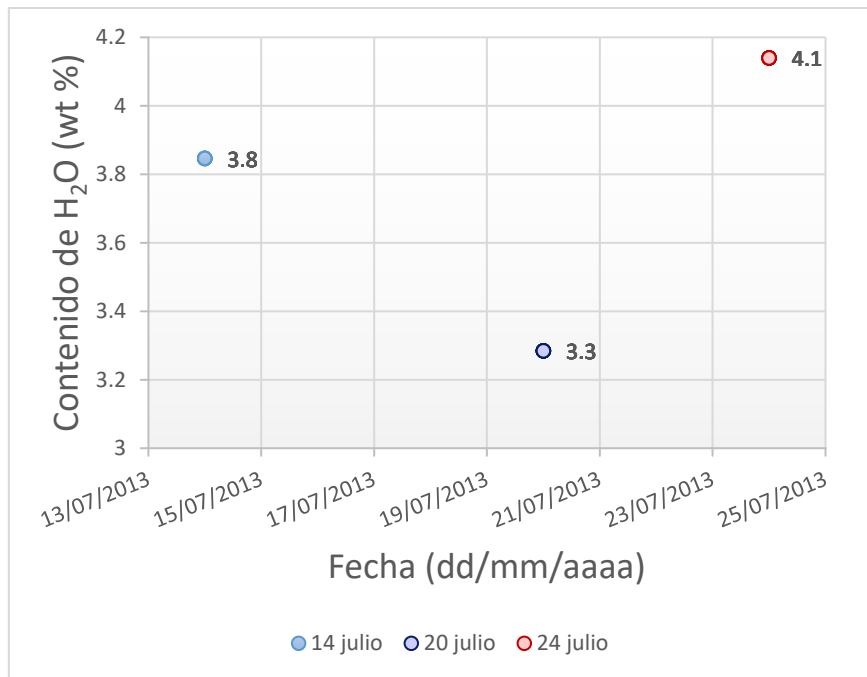


Figura 43: Contenidos de agua calculados en el material juvenil recolectado durante la fase eruptiva de julio 2013 del volcán Tungurahua.

Cabe recalcar, que a pesar de que los resultados del día 24 indican un número de microlitos moderado, los valores de cristalinidad (Φ) son altos (Fig. 41), lo que representaría una muestra con pocos cristales, pero de mayor tamaño. Según Narváez (2014), la actividad observada el día 24 de julio se vincula con el ascenso de un magma profundo, menos viscoso y a mayor temperatura. Por lo tanto, en base a los resultados de cristalinidad y N_v , se sugiere que las muestras recolectadas este día provienen de zonas profundas donde domina la tasa de crecimiento sobre la de nucleación.

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

- El *plug-in* TWS (Lormand et al., 2018) es un método rápido y fácil de utilizar para clasificar una imagen BSE en las poblaciones de plagioclasas, piroxenos y vesículas. La rapidez aumenta 12 veces más en comparación con un proceso manual.
- Los resultados de las CSD obtenidas a partir del método de clasificación semiautomático TWS coinciden con los resultados obtenidos a través del método manual para cristales mayores a 10 μm . Las diferencias entre ambos se observan en los microlitos $<10 \mu\text{m}$ y se atribuyen principalmente al umbral de detección de cada método. El umbral del método TWS depende de la resolución de cada imagen y el umbral del método manual depende tanto de la resolución como del detalle en el cual trabaja el usuario.
- Al comparar el método TWS con otros programas computacionales como *CEmin* se considera que el primero es el más preciso y fácilmente aplicable si se pretende utilizar esta herramienta como un método de monitoreo petrológico. El software *CEmin* no identifica los minerales de manera precisa y es utilizado para clasificar microlitos de mayor tamaño ($>30 \mu\text{m}$).
- Los softwares *CSDSlice 5.0* y *CSDCorrections 1.6* son utilizados para obtener el hábito cristalino y la densidad numérica de volumen luego de procesar las imágenes con el *plug-in* TWS.
- Los 2 métodos utilizados para el cálculo de N_v (*Batch* y *CSDCorrections*) dieron resultados proporcionales. No obstante, se concluye que es más adecuado utilizar los valores de N_v obtenidos mediante el programa *CSDCorrections*, ya que consideran el hábito cristalino de la población analizada. No considerar el hábito cristalino de una especie mineral podría ocasionar errores entre 27–105 % en el cálculo de N_v .
- Las velocidades obtenidas para los días 01, 08 y 13 de marzo de 2013 varían entre 0.11-0.27 m/s, 0.04-0.23 m/s y 0.04-0.18 m/s respectivamente. Y se explican de acuerdo con las variaciones en el porcentaje de cristalinidad que influyen en la viscosidad del magma ascendente. Así, altos valores de

cristalinidad provocarían un aumento en la viscosidad del magma, lo que disminuye la velocidad de ascenso. Y, al contrario, bajos valores de cristalinidad tienden a disminuir la viscosidad del magma aumentando las velocidades de ascenso.

- Las velocidades más altas para la fase de marzo fueron obtenidas en el cálculo para los días 16-17 de marzo. Durante estas fechas se destaca un carácter explosivo y, en conjunto con otros datos (ej. SO_2), los resultados indican una limitación en la exsolución de los volátiles a través del conducto.
- Para el evento vulcaniano del 14 de julio 2013 la distribución de tamaño de microlitos, velocidades de ascenso y valores de Nv indicaron la presencia de 2 grupos de muestras. Por una parte, las muestras correspondientes al grupo “14 julio A” se asocian a una configuración profunda. Y, por otra, las muestras del grupo “14 julio B”, se relacionan con la zona somera del conducto.
- La actividad vulcaniana intermitente observada el día 20 de julio presenta bajas velocidades, entre 0.07-0.21 m/s, que se explican de acuerdo con el mismo mecanismo propuesto para la actividad similar observada los días 13 y 14 de marzo. No obstante, la actividad del día 20 de julio presentó un menor potencial explosivo, posiblemente debido a una mayor tasa de desgasificación previa.
- Independientemente de la fase, el conjunto de CSD de marzo y julio mostró una forma exponencial y un rango similar de variación. No obstante, es posible obtener una relación con los dinamismos eruptivos considerando sus parámetros asociados, es decir, los valores de Nv (diferentes según cada CSD) y la tendencia de las velocidades calculadas.

6.2. Recomendaciones

- En estudios posteriores que repliquen el método de Lormand et al. (2018), es necesario considerar suficientes píxeles de entrenamiento que posean diferentes formas (polígonos, líneas...) durante la clasificación semiautomática. Esto permitirá mejorar la calidad de la clasificación.
- Es importante realizar un post-procesamiento minucioso para cada imagen, con el fin de obtener resultados más precisos durante el cálculo de hábitos cristalinos y CSD.
- Se recomienda verificar que se haya ingresado correctamente la equivalencia de la escala durante el cálculo de datos en 2D, ya que cualquier error distorsionaría tanto las CSD como los valores de Nv resultantes, y por ende también las velocidades.

- En estudios posteriores es recomendable medir directamente el contenido de agua y sílice en inclusiones magmáticas con el fin de determinar de una manera más exacta la velocidad de ascenso y disminuir el porcentaje de error.
- Finalmente, también se sugiere utilizar el software *CEmin* desarrollado por Zeng et al., (2018) para estudios posteriores que requieran el análisis de la población de fenocristales de una muestra.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- **Andújar, J., Martel, C., Pichavant, M., Samaniego, P., Scaillet, B., Indira, M.** (2017). *Structure of the Plumbing System at Tungurahua Volcano, Ecuador: Insights from Phase Equilibrium Experiments on July–August 2006 Eruption Products*. *Journal of Petrology*, 2017, Vol. 0, No. 0, 1–30 doi: 10.1093/petrology/egx054.
- **Arellano, S., Hall, M., Samaniego, P., Le Pennec, J., Ruiz, A., Molina, I., Yepes, H.** (2008). *Degassing patterns of Tungurahua volcano (Ecuador) during the 1999–2006 eruptive period, inferred from remote spectroscopic measurements of SO₂ emissions*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 176. Pgs: 151-162. doi:10.1016/j.jvolgeores.2008.07.007.
- **Arganda-Carreras, I., Kaynig, V., Ruede, C., Eliceiri, K., Sschindelin, J., Cardona, A., Seung, H.** (2017). *Trainable Weka Segmentation: a machine learning tool for microscopy pixel classification*. *Bioinformatics*, 33(15), 2017, 2424–2426 doi: 10.1093/bioinformatics/btx180.
- **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. doi:10.1016/j.epsl.2019.01.042.
- **Bernard, B., Bustillos, J., Bridget, W., Hidalgo, S.** (2013). *Influence of the wind direction variability on the quantification of tephra fallouts: December 2012 and March 2013 Tungurahua eruptions*. *Avances en Ciencias e Ingenierías* (5), A14-21. doi: 10.18272/aci.v5i1.112.
- **Bès de Berc, S., Soula, J. C., Baby, P., Souris, M., Christophoul, F., & Rosero, J.** (2005). *Geomorphic evidence of active deformation and uplift in a modern continental wedge-top–foredeep transition: Example of the eastern Ecuadorian Andes*. *Tectonophysics*, 399(1-4), 351–380. doi:10.1016/j.tecto.2004.12.030.
- **Biggs, J., Mothes, P., Ruiz, M., Amelung, F., Dixon, T. H., Baker, S., & Hong, S.-H.** (2010). *Stratovolcano growth by co-eruptive intrusion: The 2008 eruption of Tungurahua Ecuador*. *Geophysical Research Letters*, 37(21), n/a–n/a. doi:10.1029/2010gl044942.
- **Browne, B., Szramek, L.** (2015). *Rates of Magma Ascent and Storage*. *The Encyclopedia of Volcanoes*. doi:10.1016/B978-0-12-385938-9.00009-2.

- **Blundy, J., & Cashman, K.** (2008). *Petrologic Reconstruction of Magmatic System Variables and Processes*. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 69(1), 179–239. doi:10.2138/rmg.2008.69.6.
- **Brugger, C. R., & Hammer, J. E.** (2010). *Crystallization Kinetics in Continuous Decompression Experiments: Implications for Interpreting Natural Magma Ascent Processes*. *Journal of Petrology*, 51(9), 1941–1965. doi:10.1093/petrology/egq044.
- **Cashman, K., Marsh, B.** (1988). *Crystal size distribution (CSD) in rocks and the kinetics and dynamics of crystallization II: Makaopuhi lava lake*. *Contrib Mineral Petrol* (1988) 99:292-305. doi: 10.1007/BF00375363.
- **Cashman, K.** (1992). *Groundmass crystallization of Mount St. Helens dacite, 1980-1986: a tool for interpreting shallow magmatic processes*. *Contrib Mineral Petrol* (1992) 109:431-449. doi: 10.1007/BF00306547.
- **Cashman, K., & Blundy, J.** (2000). *Degassing and crystallization of ascending andesite and dacite*. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 358(1770), 1487–1513. doi:10.1098/rsta.2000.0600.
- **Cassidy, M., Cole, P., Hicks, K., Vvarley, N., Peters, N., Lerner, A.** (2015). *Rapid and slow: Varying magma ascent rates as a mechanism for Vulcanian explosions*. *Earth and Planetary Science Letters* 420. Pgs: 73-84. doi: 10.1016/j.epsl.2015.03.025.
- **Cassidy, M., Manga, M., Cashman, K., Bachmann, O.** (2018). *Controls on explosive-effusive volcanic eruption styles*. *Nature Communications*. doi: 10.1038/s41467-018-05293-3.
- **Chevrel, M. O., Cimarelli, C., deBiasi, L., Hanson, J. B., Lavallée, Y., Arzilli, F., & Dingwell, D. B.** (2015). *Viscosity measurements of crystallizing andesite from Tungurahua volcano (Ecuador)*. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 16(3), 870–889. doi:10.1002/2014gc005661.
- **Crafford, A.E., y Venzke, E.** (2017). *Global Volcanism Program, Report on Tungurahua (Ecuador) Bulletin of the Global Volcanism Network*, 42:5. *Smithsonian Institution*. doi: 10.5479/si.GVP.BGVN201705-352080.
- **Degruyter, W., Bachmann, O., Burgisser, A., & Manga, M.** (2012). *The effects of outgassing on the transition between effusive and explosive silicic eruptions*. *Earth and Planetary Science Letters*, 349-350, 161–170. doi:10.1016/j.epsl.2012.06.056.

- **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. doi:10.1007/s00445-011-0517-5.
- **Fee, D., Garces, M., & Steffke, A.** (2010). *Infrasound from Tungurahua Volcano 2006–2008: Strombolian to Plinian eruptive activity*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 193(1-2), 67–81. doi:10.1016/j.jvolgeores.2010.03.
- **Fiorini, E., & Tibaldi, A.** (2012). *Quaternary tectonics in the central Interandean Valley, Ecuador: Fault-propagation folds, transfer faults and the Cotopaxi Volcano*. *Global and Planetary Change*, 90-91, 87–103. doi:10.1016/j.gloplacha.2011.06.0.
- **Gaunt, E., Burgisser, A., Mothes, P., Brownin, J., Meredith, P., Criollo, E., Bermerd, B.** (2020). *Triggering of the powerful 14 July 2013 Vulcanian explosion at Tungurahua Volcano, Ecuador*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 392. 106762. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2019.106762.
- **Hall, M., Robin, C., Beate, B., Mothes, P., Monzier, M.** (1999). *Tungurahua Volcano, Ecuador: structure, eruptive history and hazards*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 91. Pgs: 1–21. doi: 10.1016/S0377-0273(99)00047-5.
- **Hall, M. Steele, A., Mothes, P., Ruiz, M.** (2013). *Pyroclastic density currents (PDC) of the 16–17 August 2006 eruptions of Tungurahua volcano, Ecuador: Geophysical registry and characteristics*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 265. Pgs: 78-93. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2013.08.011.
- **Hall, M. L., Steele, A. L., Bernard, B., Mothes, P. A., Vallejo, S. X., Douillet, G. A., Ruiz, M. C.** (2015). *Sequential plug formation, disintegration by Vulcanian explosions, and the generation of granular Pyroclastic Density Currents at Tungurahua volcano (2013–2014), Ecuador*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 306, 90–103. doi:10.1016/j.jvolgeores.2015.09.009.
- **Hammer, J. E., & Rutherford, M. J.** (2002). *An experimental study of the kinetics of decompression-induced crystallization in silicic melt*. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B1), ECV 8–1–ECV 8–24. doi:10.1029/2001jb000281.
- **Hervig, R. L., Dunbar, N., Westrich, H. R., & Kyle, P. R.** (1989). *Pre-eruptive water content of rhyolitic magmas as determined by ion microprobe analyses of melt inclusions in phenocrysts*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 36(4), 293–302. doi:10.1016/0377-0273(89)90075-9.

- **Higgins, M.** (1994). Numerical modeling of crystal shapes in thin sections: Estimation of crystal habit and true size. *American Mineralogist*, Volume 79. Pgs: 113-119, 1994. doi: 0003-004x/94 /0r024r l 3\$02.00.
- **Higgins, M.** (2000). *Measurement of crystal size distributions*. *American Mineralogist*, Volume 85, pages 1105–1116. doi: 0003-004X/00/0009–1105\$05.00.
- **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. doi:10.1016/j.jvolgeores.2015.03.
- **Hughes, E. C., Buse, B., Kearns, S. L., Blundy, J. D., Kilgour, G., & Mader, H. M.** (2018). *Low analytical totals in EPMA of hydrous silicate glass due to sub-surface charging: Obtaining accurate volatiles by difference*. *Chemical Geology*. doi:10.1016/j.chemgeo.2018.11.015.
- **Humphreys, M. C. S., Menand, T., Blundy, J. D., & Klimm, K.** (2008). *Magma ascent rates in explosive eruptions: Constraints from H₂O diffusion in melt inclusions*. *Earth and Planetary Science Letters*, 270(1-2), 25–40. doi:10.1016/j.epsl.2008.02.041.
- **IGEPN.** (2010). *Boletín especial del volcán Tungurahua No.23*. Recuperado de: <http://www.igepn.edu.ec/tungurahua-informes/tung-especiales/tung-e-2010/8890-informe-especial-tungurahua-no-23/file>.
- **IGEPN.** (2012). *Incremento de actividad del volcán Tungurahua*. Recuperado de: <https://www.igepn.edu.ec/servicios/noticias/730-incremento-de-actividad-del-volc%C3%A1n-tungurahua>.
- **IGEPN.** (2014). *Informe del estado del volcán Tungurahua No.103*. Recuperado de: <https://igepn.edu.ec/tungurahua-informes/tung-diarios/tung-d-2014/8647-informe-diario-tungurahua-13042014/file>.
- **IGEPN.** (2016). *Erupción de febrero – marzo 2016 del volcán Tungurahua*. Recuperado de: <https://www.igepn.edu.ec/servicios/noticias/1463-erupcion-de-febrero-marzo-2016-del-volcan-tungurahua>.
- **IGEPN.** (2019). *Erupción del 1 de febrero de 2014: La tercera erupción más importante del volcán Tungurahua con un Índice de Explosividad Volcánica 3 (VEI=3)*. Recuperado de: <https://www.igepn.edu.ec/servicios/noticias/1706-erupcion-del-1-de-febrero-de-2014-la-tercera-erupcion-mas-importante-del-volcan-tungurahua-con-un-indice-de-explosividad-volcanica-3-vei-3>.

- **IGEPN.** (2020). *Volcán Tungurahua*. Recuperado de: <https://www.igepn.edu.ec/mapas/peligro-volcanico/mapa-volcan-tungurahua>.
- **IGEPN.** (2022). Preguntas Frecuentes: *¿Cuántos volcanes activos hay en Ecuador?*. Recuperado de: <https://www.igepn.edu.ec/preguntas-frecuentes?tmpl=component&faqid=12>.
- **Jankowski, M.** (2006). *Erosion, dilation and related operators*. Department of Electrical Engineering. University of Southern Maine. Portland, Maine, USA. Recuperado de: https://internationalmathematicsymposium.org/IMS2006/IMS2006_CD/articles/Jankowski.pdf.
- **Johnson, J.** (2003). *Generation and propagation of infrasonic airwaves from volcanic explosions*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 121, 1-14. doi: 10.1016/s0377-0273(02)00408-0.
- **Jones, T. J., McNamara, K., Eychenne, J., Rust, A. C., Cashman, K. V., Scheu, B., & Edwards, R.** (2016). *Primary and secondary fragmentation of crystal-bearing intermediate magma*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 327, 70–83. doi:10.1016/j.jvolgeores.2016.06.022.
- **Le Pennec, J.-L., Jaya, D., Samaniego, P., Ramón, P., Moreno Yáñez, S., Egred, J., & van der Plicht, J.** (2008). *The AD 1300–1700 eruptive periods at Tungurahua volcano, Ecuador, revealed by historical narratives, stratigraphy and radiocarbon dating*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 176(1), 70–81. doi:10.1016/j.jvolgeores.2008.05.
- **Le Pennec, J., Ruiz, A., Eissen, J., Hall, M., Fornari, M.** (2011). *Identifying potentially active volcanoes in the Andes: Radiometric evidence for late Pleistocene-early Holocene eruptions at Volcán Imbabura, Ecuador*. Journal of Volcanology and Geothermal Research 206. Pgs. 121-135. doi:10.1016/j.jvolgeores.2011.06.002.
- **Litherland, M., Aspden, J., Jemielita, R.A.** (1994). *The metamorphic belts of Ecuador*. Vol. 11. British Geological Survey, Overseas Memoir. 147 pp.
- **Lormand, C., Zellmer, G., Németh, K., Kilgour, G., Mead, S., Palmer, A., Sakamoto, N., Yurimoto, H., Moebis, A.** (2018). *Weka Trainable Segmentation Plugin in ImageJ: A Semi-Automatic Tool Applied to Crystal Size Distributions of Microlites in Volcanic Rocks*. Microscopy and Microanalysis. 24, 667–675 doi:10.1017/S1431927618015428.
- **Lormand, C., Zellmer, G., Kilgour, G., Németh, K., Palmer, A., Sakamoto, N., Yurimoto, H., Kuritani, T., Iizuka, Y., Moebis, A.** (2020). *Slow ascent of*

- unusually hot intermediate magmas triggering Strombolian to sub-Plinian eruptions.* Oxford University Press. doi: 10.1093/petrology/egaa077/5873531.
- **Luzieux, L. D. A., Heller, F., Spikings, R., Vallejo, C. F., & Winkler, W.** (2006). *Origin and Cretaceous tectonic history of the coastal Ecuadorian forearc between 1°N and 3°S: Paleomagnetic, radiometric and fossil evidence.* *Earth and Planetary Science Letters*, 249(3-4), 400–414. doi:10.1016/j.epsl.2006.07.008.
 - **Martel, C.** (2012). *Eruption Dynamics Inferred from Microlite Crystallization Experiments: Application to Plinian and Dome-forming Eruptions of Mt. Pelee (Martinique, Lesser Antilles).* *Journal of Geology*. Vol: 33. Number: 4. Pgs: 699-725. doi:10.1093/petrology/egr076.
 - **Matsumoto, K., Geshi, N.** (2021). *Shallow crystallization of eruptive magma inferred from volcanic ash microtextures: a case study of the 2018 eruption of Shinmoedake volcano, Japan.* Springer. *Bulletin of Volcanology*. doi: 10.1007/s00445-021-01451-6.
 - **Morgan, D., Jerram, D.** (2006). *On estimating crystal shape for crystal size distribution analysis.* *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 154 (2006) 1–7. doi:10.1016/j.jvolgeores.2005.09.016.
 - **Mothes, P. A., Yepes, H. A., Hall, M. L., Ramón, P. A., Steele, A. L., & Ruiz, M. C.** (2015). *The scientific–community interface over the fifteen-year eruptive episode of Tungurahua Volcano, Ecuador.* *Journal of Applied Volcanology*, 4(1). doi:10.1186/s13617-015-0025-y.
 - **Moussallam, Y., Rose-Koga, E., T. Koga, K., Mmédard, E., Bani, P., Devidal, J., Tari, D.** (2019). *Fast ascent rate during the 2017–2018 Plinian eruption of Ambae (Aoba) volcano: a petrological investigation.* Springer. doi: 10.1007/s00410-019-1625-z.
 - **Murch, A., Cole, P.** (2019). *Using microlites to gain insights into ascent conditions of differing styles of volcanism at Soufrière Hills Volcano.* *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 384. Pgs: 221-231. doi:10.1016/j.jvolgeores.2019.07.022.
 - **Myers, M. L., Geist, D. J., Rowe, M. C., Harpp, K. S., Wallace, P. J., & Dufek, J.** (2014). *Replenishment of volatile-rich mafic magma into a degassed chamber drives mixing and eruption of Tungurahua volcano.* *Bulletin of Volcanology*, 76(11). doi:10.1007/s00445-014-0872-0.
 - **Myers, M. L., Wallace, P. J., Wilson, C. J. N., Watkins, J. M., & Liu, Y.** (2018). *Ascent rates of rhyolitic magma at the onset of three caldera-forming eruptions.* *American Mineralogist*, 103(6), 952–965. doi:10.2138/am-2018-6225.

- **Nanev, C. N.** (2020). *Relationship between number and sizes of crystals growing in batch crystallization: nuclei number density, nucleation kinetics and crystal polydispersity.* Journal of Crystal Growth, 125786. doi: 10.1016/j.jcrysgro.2020.12578.
- **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 morfogranulométrico, geoquímico y modal de los productos de caída.* Proyecto previo a la obtención del título de ingeniero geólogo. EPN.
- **Noguchi, S., Toramaru, A., Nakada, S.** (2008). *Relation between microlite textures and discharge rate during the 1991–1995 eruptions at Unzen, Japan.* Journal of Volcanology and Geothermal Research 175. Pgs: 141-155. doi:10.1016/j.jvolgeores.2008.03.025.
- **Parra, R., Bernard, B., Narváez, D., Le Pennec, J.-L., Hasselle, N., & Folch, A.** (2016). *Eruption Source Parameters for forecasting ash dispersion and deposition from vulcanian eruptions at Tungurahua volcano: Insights from field data from the July 2013 eruption.* Journal of Volcanology and Geothermal Research, 309, 1–13. doi:10.1016/j.jvolgeores.2015.11.001.
- **Ramos, V. A.** (2010). *The tectonic regime along the Andes: Present-day and Mesozoic regimes.* Geological Journal, 45(1), 2–25. doi:10.1002/gj.1193.
- **Rannou, E., & Caroff, M.** (2010). *Crystal Size Distribution in Magmatic Rocks: Proposition of a Synthetic Theoretical Model.* Journal of Petrology, 51(5), 1087–1098. doi:10.1093/petrology/egq012.
- **Re, G. Corsaro, R. D’Oriano, C. Pompilio, M.** (2021). *Petrological monitoring of active volcanoes: A review of existing procedures to achieve best practices and operative protocols during eruptions.* Journal of Volcanology and Geothermal Research 419. 107365. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2021.107365.
- **Roggensack, K., Hervig, R., McKnight, S., Williams, S.** (1997). *Explosive Basaltic Volcanism from Cerro Negro Volcano: Influence of Volatiles on Eruptive Style.* Science, 277(5332), 1639–1642. doi:10.1126/science.277.5332.1639.
- **Rust, A. C., & Cashman, K. V.** (2011). *Permeability controls on expansion and size distributions of pyroclasts.* Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 116(B11), n/a–n/a. doi:10.1029/2011jb008494.
- **Santamaría, S.** (2017). *Catálogo de eventos volcánicos ocurridos en el Ecuador continental desde el Plioceno y análisis de la frecuencia eruptiva.* Trabajo de titulación de ingeniero geólogo. Escuela Politécnica Nacional, Quito – Ecuador. 166.

- **Sahagian, D. L., & Proussevitch, A. A.** (1998). *3D particle size distributions from 2D observations: stereology for natural applications*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 84(3-4), 173–196. doi:10.1016/s0377-0273(98)00043-2.
- **Samaniego, P., Le Pennec, J., 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. Pgs: 69-84. doi:10.1016/j.jvolgeores.2010.10.010.
- **Shea, T., Hammer, J.** (2013). *Kinetics of cooling- and decompression-induced crystallization in hydrous mafic-intermediate magmas*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 160. Pgs: 127-145. doi:10.1016/j.jvolgeores.2013.04.018.
- **Spikings, R., Cochrane, R., Villagomez, D., Van der Lelij, R., Vallejo, C., Winkler, W., & Beate, B.** (2015). *The geological history of northwestern South America: from Pangaea to the early collision of the Caribbean Large Igneous Province (290–75Ma)*. *Gondwana Research*, 27(1), 95–139. doi:10.1016/j.gr.2014.06.004.
- **Toramaru, A.** (1991). *Model of nucleation and growth of crystals in cooling magmas*. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 108(1-2), 106–117. doi:10.1007/bf00307330.
- **Toramaru, A., Noguchi, S., Oyoshihara, S., Tsune, A.** (2008). *MND (microlite number density) water exsolution rate meter*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 175. Pgs: 156-167. doi:10.1016/j.jvolgeores.2008.03.035.
- **Vallejo, C., Spikings, R., Luzieux, L., Heller, F., Bussy, F.** (2009). *Mode and Timing of terrane accretion in the forearc of the Andes in Ecuador*. *The Geological Society of America. Memoir* 204. doi: 10.1130/2009.1204(09).
- **Vallejo, C., Spikings, R. A., Horton, B. K., Luzieux, L., Romero, C., Winkler, W., & Thomsen, T. B.** (2019). *Late cretaceous to miocene stratigraphy and provenance of the coastal forearc and Western Cordillera of Ecuador: Evidence for accretion of a single oceanic plateau fragment*. *Andean Tectonics*, 209–236. doi:10.1016/b978-0-12-816009-1.00010-1.
- **Winter, J.** (2014). *Principles of Igneous and Metamorphic Petrology*. Pearson New International Edition. Second Edition. England.
- **Wright, H., Cashman, K., Mothes, P., Hall, M., Ruiz, A., Le Pennec, J.** (2012). *Estimating rates of decompression from textures of erupted ash particles*

produced by 1999 –2006 eruptions of Tungurahua volcano, Ecuador.
Recuperado de: geology.gsapubs.org. doi:10.1130/g32948.1.

- **Zellmer, G.** (2021). *Gaining acuity on crystal terminology in volcanic rocks.* International Association of Volcanology & Chemistry of the Earth's Interior. Bulletin of Volcanology. 83:78. doi: 10.1007/s00445-021-01505-9.
- **Zeng, L., Cheng, L., Costa, F., Herrin, J.** (2018). *CEmin: A MATLAB-Based Software for Computational Phenocryst Extraction and Statistical Petrology.* AGU100. Advancing Earth and Space Science. doi:10.1002/2017gc007346.

ABREVIATURAS Y SIGLAS UTILIZADAS

BSE	Back-scattered Electrons: Electrones retrodifusos
CSD	Crystal Size Distribution: Curvas de Distribución de Tamaño
TWS	Trainable Weka Segmentation
VEI	Volcanic Explosivity Index: Índice de Explosividad Volcánica
IGEPN	Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional
IRP	Infrasound Reduced Pressure

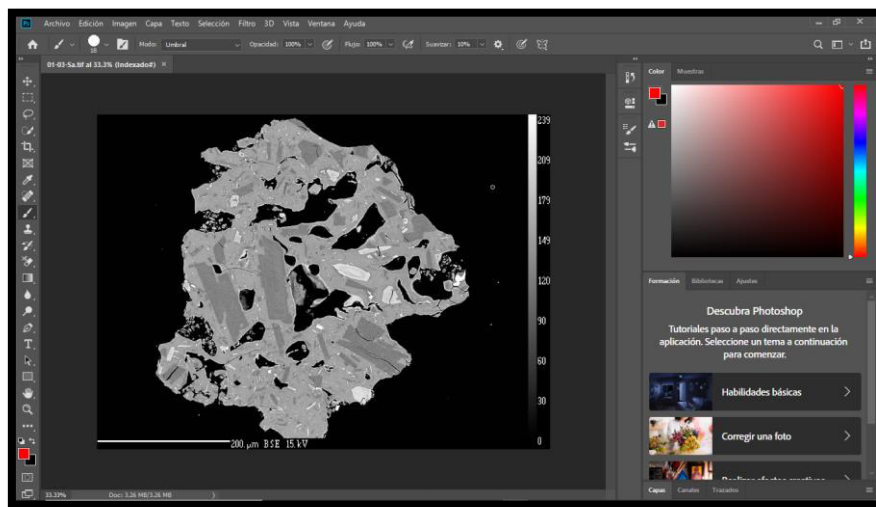
ANEXOS

ANEXO I

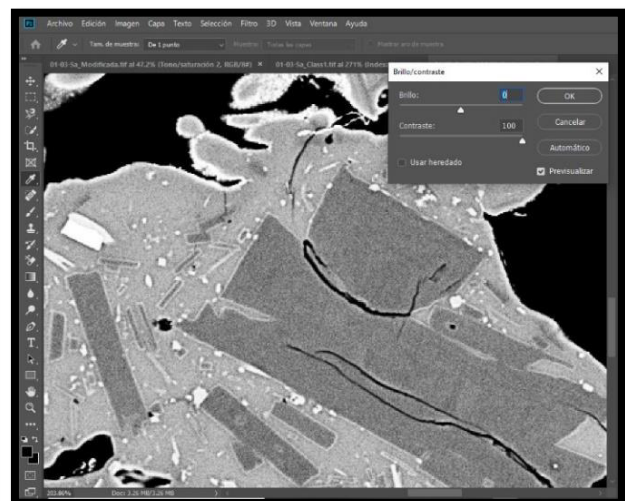
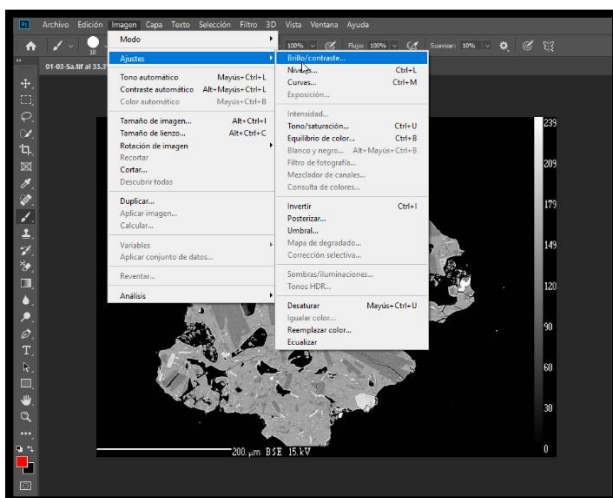
Manual de Procesamiento de Imágenes BSE mediante el método de Lormand et al. (2018)

PRE-PROCESAMIENTO

1. Seleccionar la imagen de microscopio electrónico y abrirla en el programa *Adobe Photoshop*.



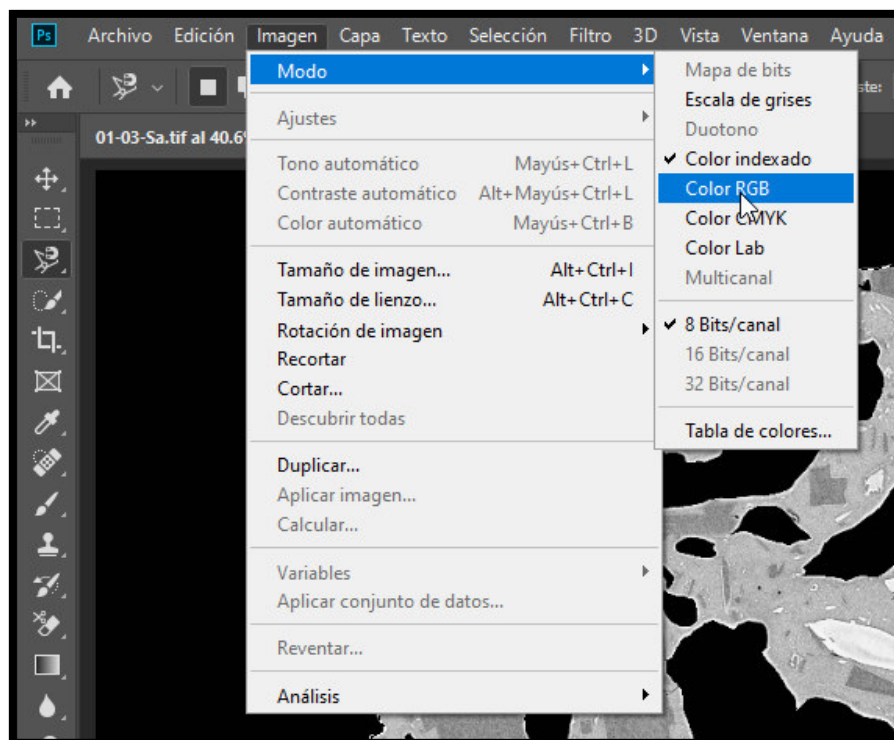
2. Realizar los ajustes de brillo y contraste necesarios para distinguir de mejor manera los minerales. Utilizar los comandos: Imagen/Ajustes/Brillo/contraste...



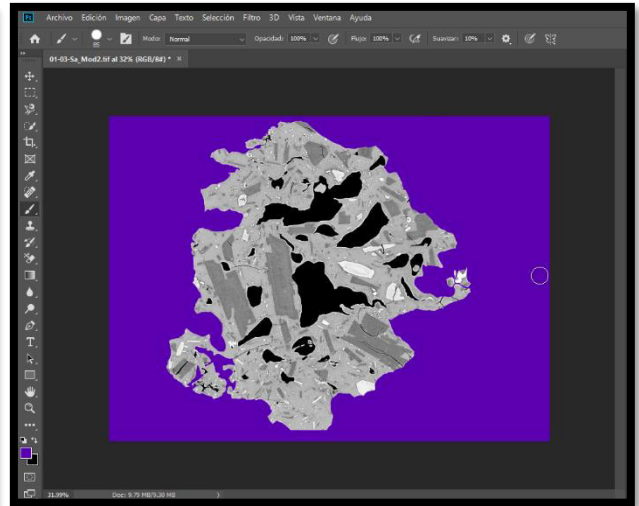
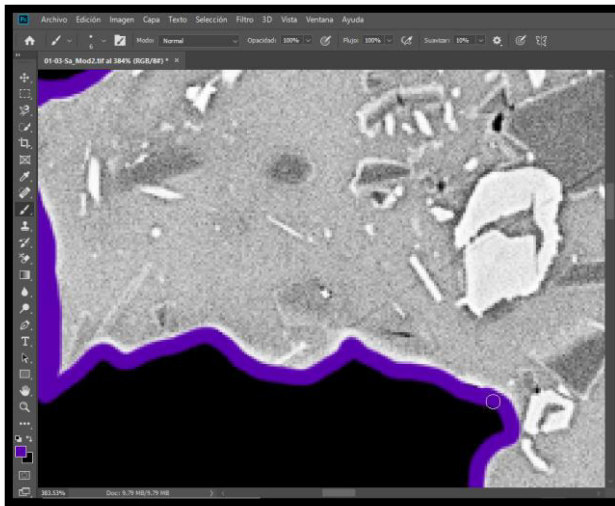
- De ser necesario, eliminar el relleno de las vesículas para evitar errores durante el procesamiento. Utilizar la herramienta "Pincel" con el color de las vesículas (negro).



- Una vez eliminado el relleno de todas las vesículas, convertir la imagen a color RGB. Utilizar el comando: Imagen/Modo/Color RGB.



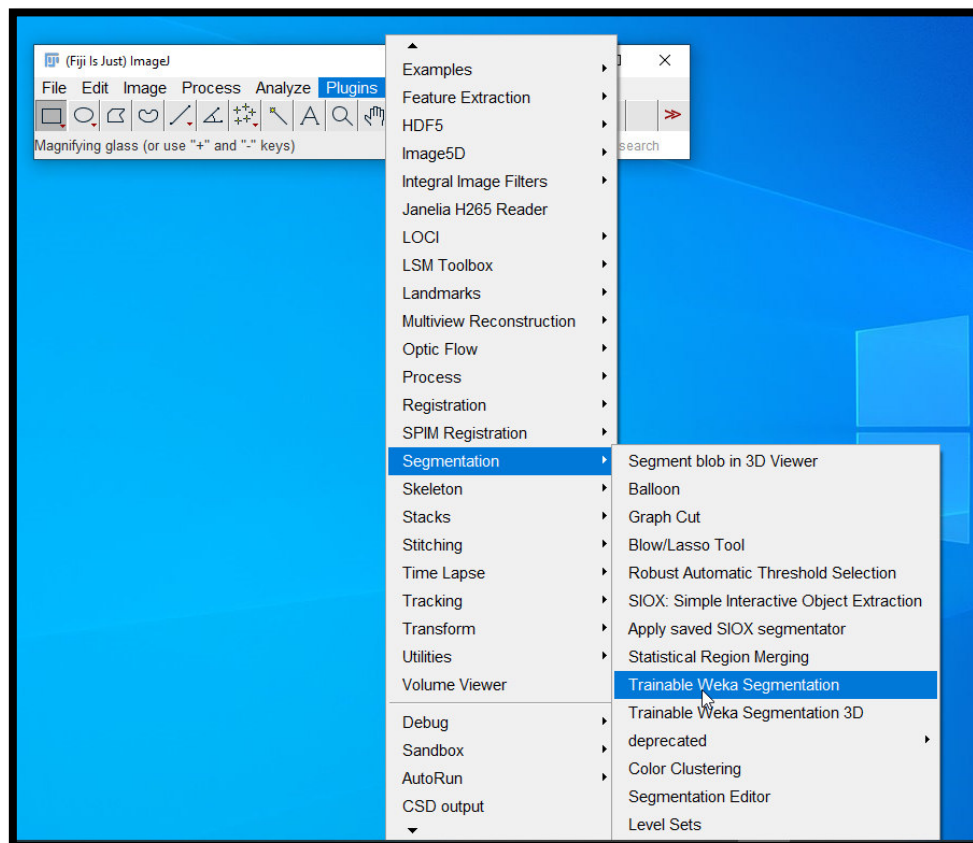
- Cambiar el color de fondo de la imagen para poder distinguir las vesículas durante el procesamiento. Escoger nuevamente la herramienta "Pincel" y delinear el contorno y fondo de la muestra.

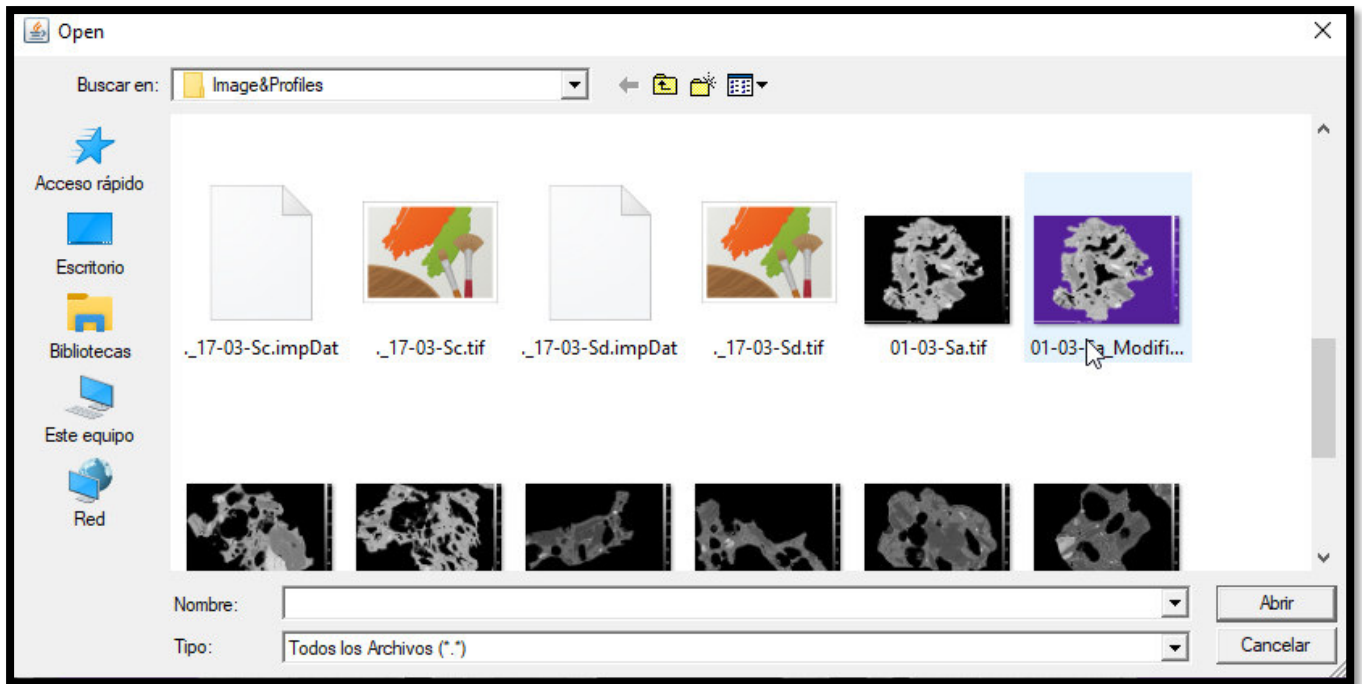


6. Guardar los cambios como una nueva imagen. Utilizar el comando: Archivo/Guardar como...

PROCESAMIENTO

1. En la versión *Fiji* del programa *ImageJ* abrir el *plug-in* “*Trainable WEKA Segmentation*” y escoger la imagen preprocesada. Utilizar el comando: Plugins/Segmentation/Trainable WEKA Segmentation.

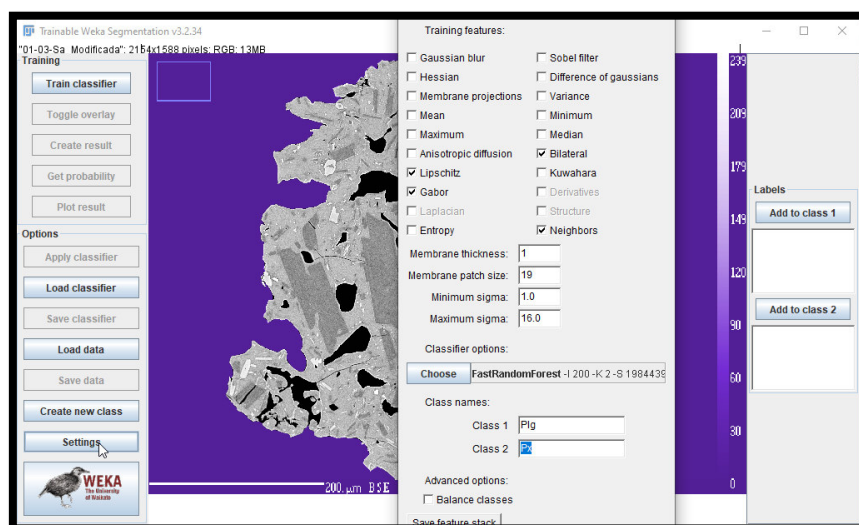




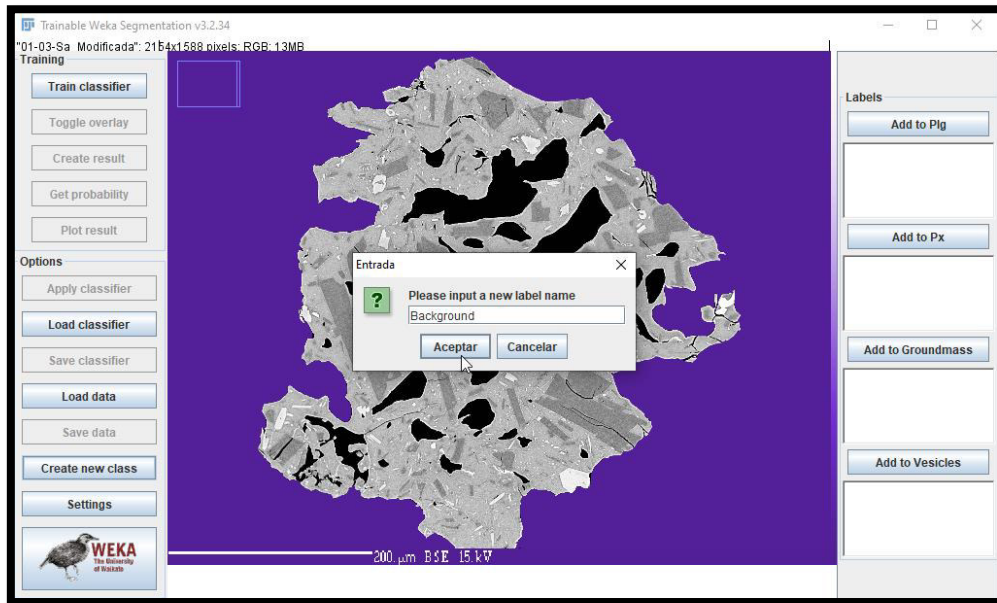
2. Dar click en la opción “*settings*” para configurar los métodos de entrenamiento que utilizará el software. En este caso se escogieron:

- a. **Lipschitz:** Filtro utilizado para la reducción del ruido y ligera homogeneización del fondo.
- b. **Gabor:** Filtro utilizado para la detección de bordes.
- c. **Bilateral / Neighbors:** Filtro utilizado para la reducción del ruido. Promedia el valor de los píxeles alrededor de un pixel central, siempre y cuando se encuentren cerca en la escala de grises.

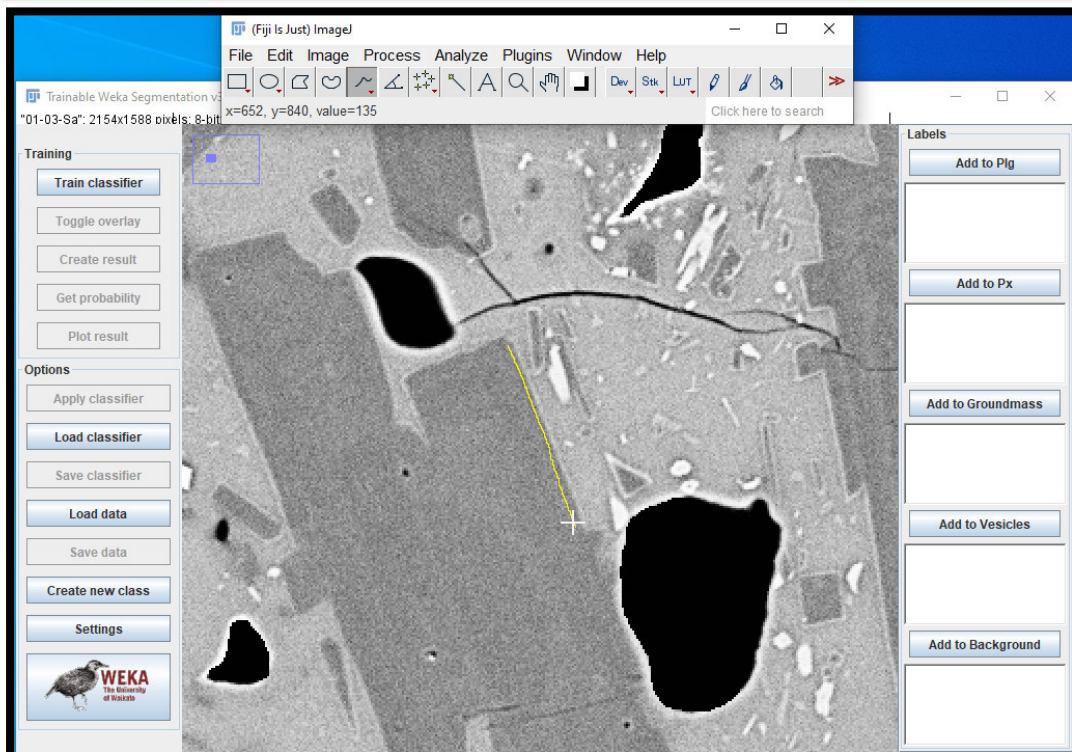
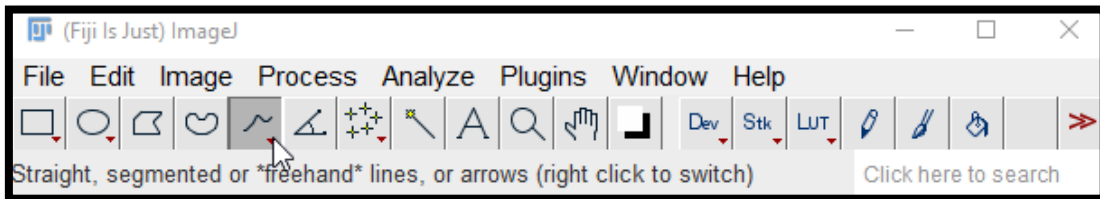
A continuación, añadir los nombres de las dos primeras clases para el entrenamiento y dar click en “ok”.



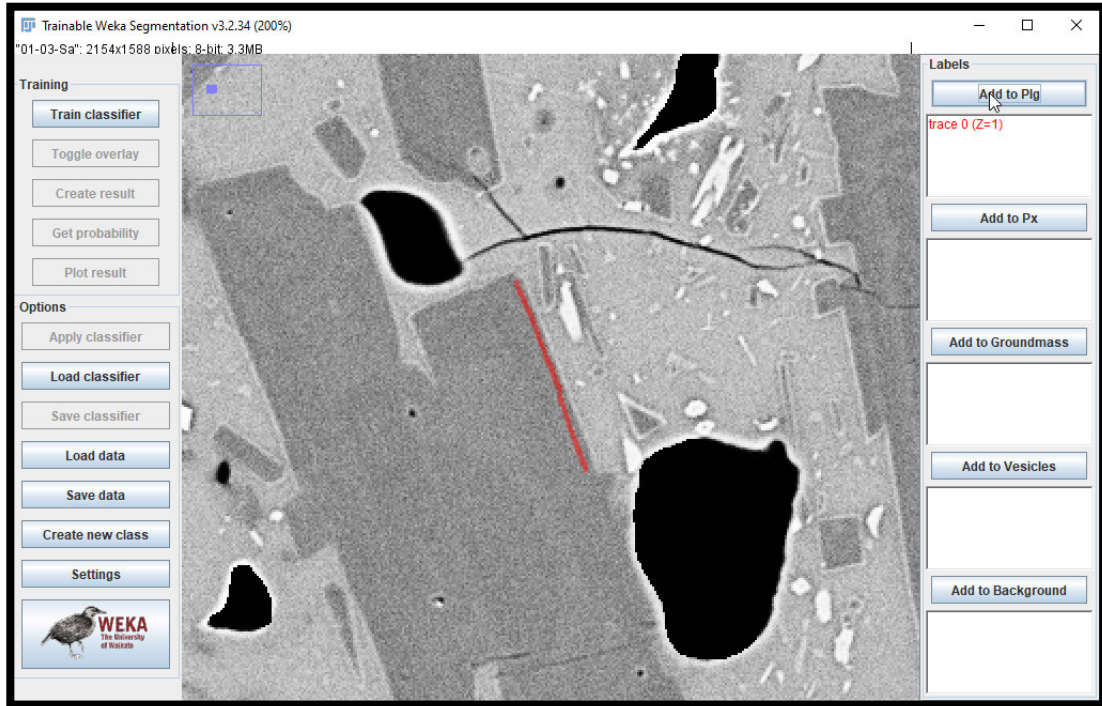
3. Escoger la opción “create new class” para añadir las clases de: *Groundmass*, *Vesicles* y *Background*.



4. En el panel principal de *Fiji* escoger la herramienta “freehand lines” para realizar trazos sobre una especie mineral.



5. Dar click sobre el nombre de la especie mineral a la que pertenece. A continuación, la línea se teñirá de un color (P. ejm: rojo-Plg).



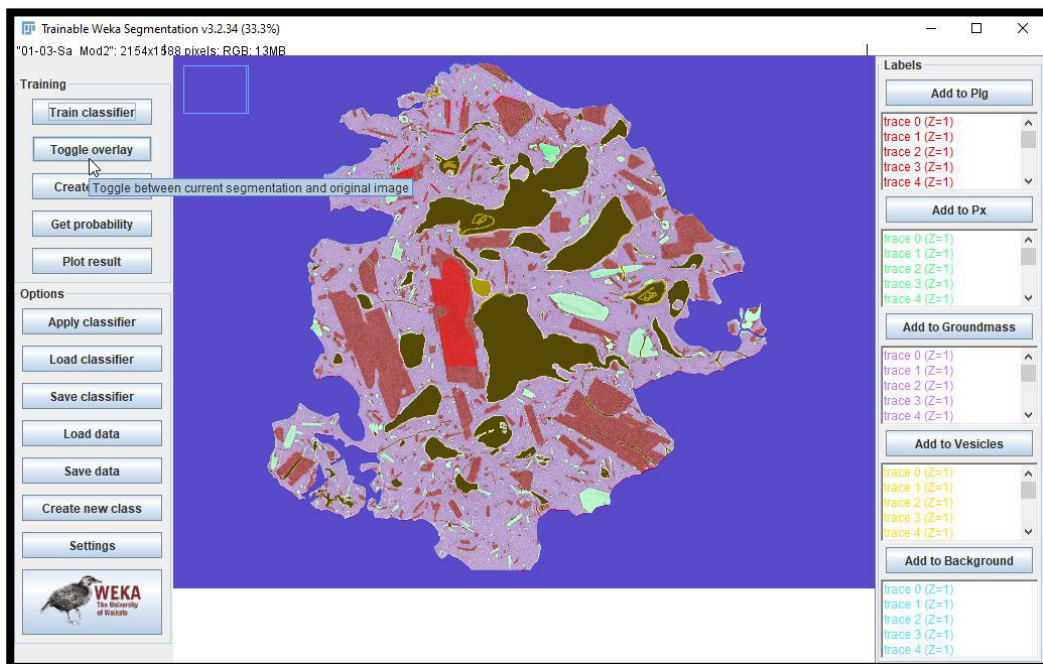
6. Realizar el mismo proceso para las otras especies minerales procurando delinear precisamente los bordes. Utilizar las otras herramientas de relleno como por ejemplo "freehand selections" para rellenar áreas. Prover de al menos 10 trazos y/o áreas a cada especie.



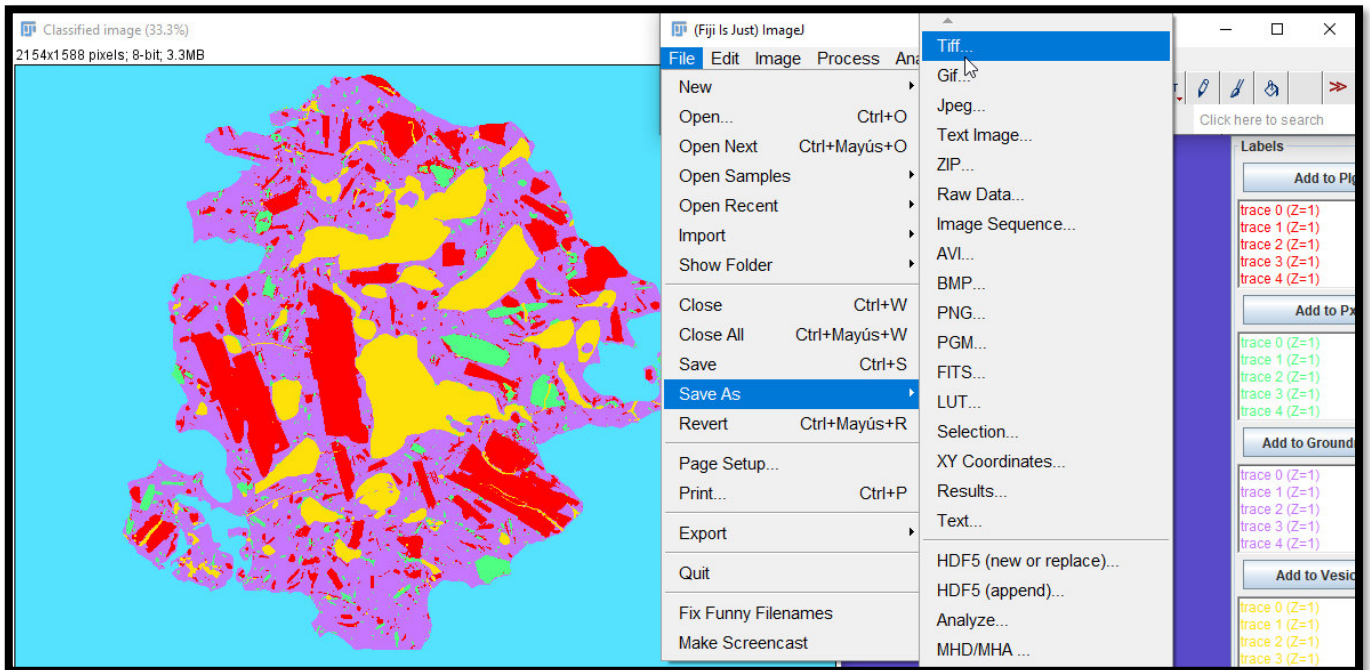
7. Seleccionar la opción “Train classifier” y esperar unos segundos.



8. Verificar la clasificación dando click en la opción “toggle overlay” para que se pueda comparar con la imagen original y si es necesario corregir las imperfecciones añadiendo más trazos a cada especie.

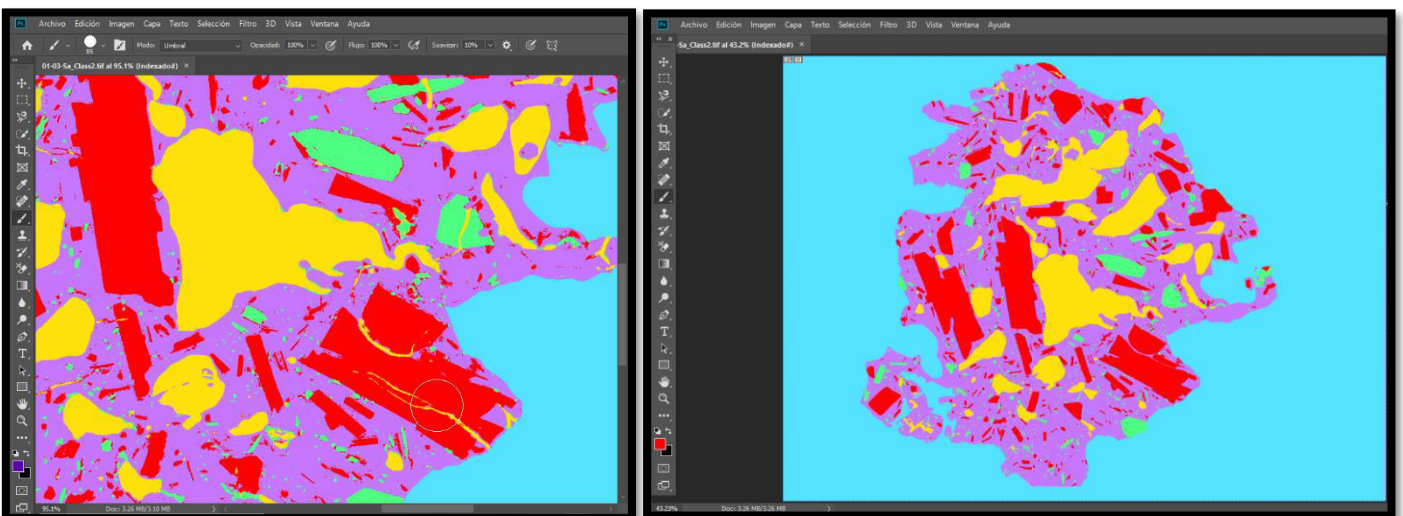


9. Seleccionar la opción “*Create result*” para visualizar la imagen clasificada y guardarla como un archivo en formato .tiff. Utilizar el comando: File/Save as/TIF...

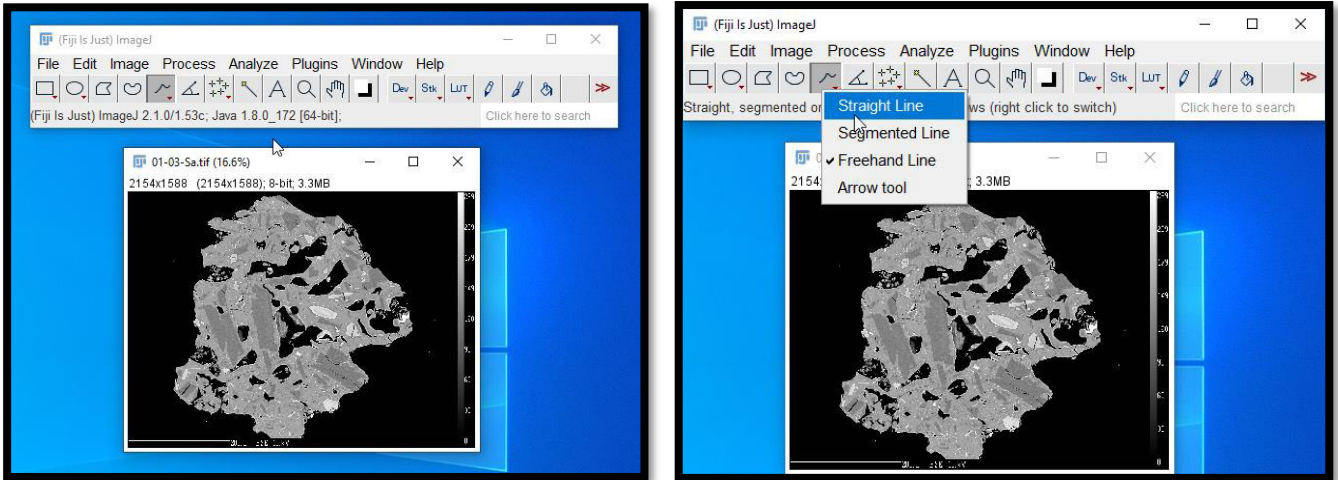


POST-PROCESAMIENTO

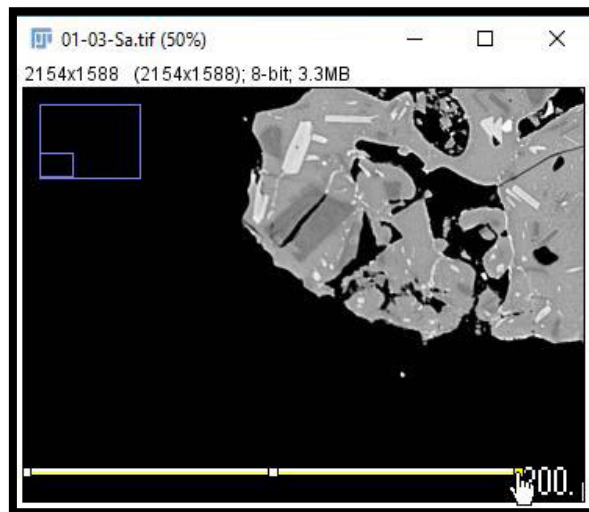
1. Utilizar el programa *Adobe Photoshop* y la herramienta “Pincel” para separar los cristales y rellenar aquellos que estén fracturados.



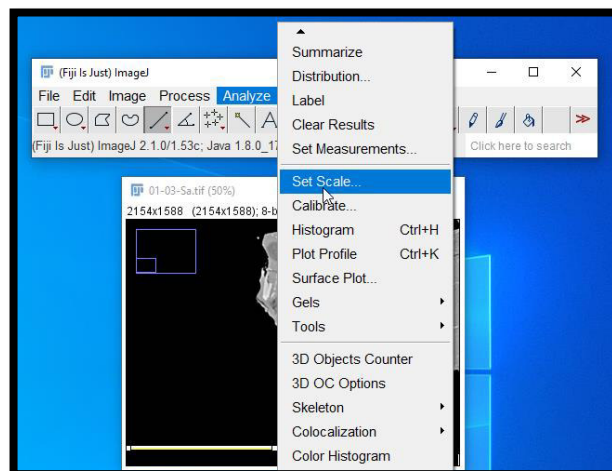
2. Escalar la imagen original en *Fiji*. Primero utilizar el comando *File/Open* para abrir la imagen original. Escoger la herramienta "*Straight Line*" haciendo clic derecho sobre la herramienta de líneas.



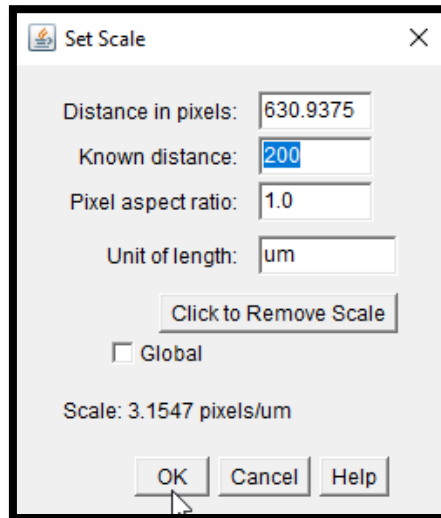
3. Mantener presionada la tecla shift mientras se traza una línea sobre la escala de la imagen.



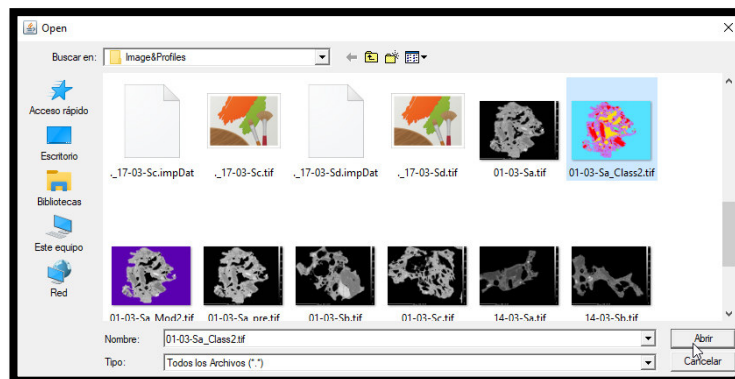
4. Utilizar el comando *Analyze/Set Scale* para añadir la escala a la imagen.



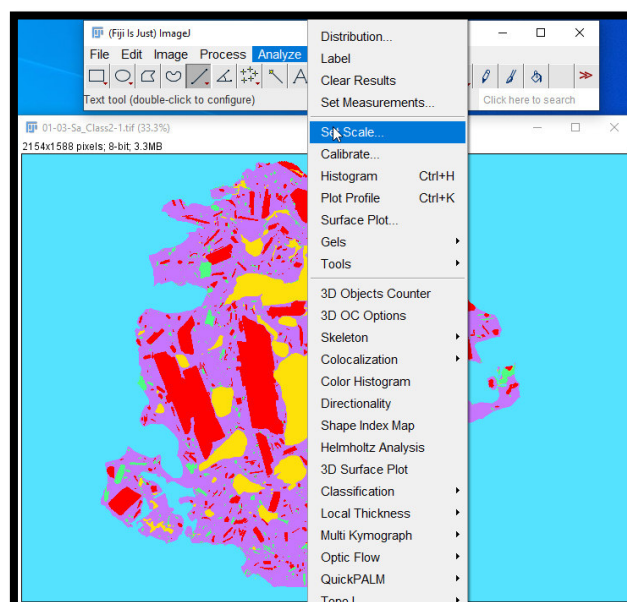
5. Escribir la distancia conocida (200) y la unidad de medida (um). Copiar (Ctrl+C) el número de la distancia en pixeles en el portapapeles y aceptar.



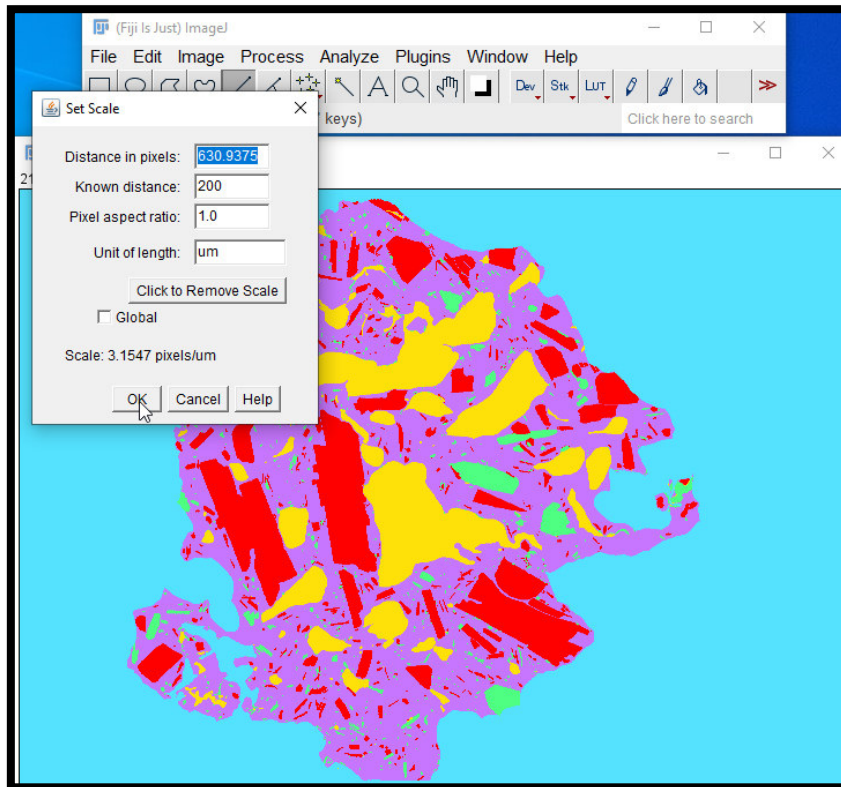
6. Guardar los cambios en la imagen original (Ctrl+S) y abrir la imagen clasificada con el comando *File/Open*.



7. Escribir la escala de la imagen con el comando *Analyze/Set Scale*.

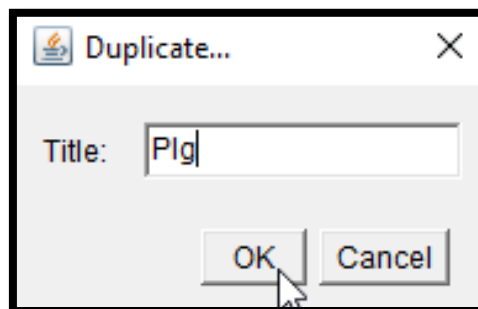


8. Pegar (Ctrl+v) la información del portapapeles en la distancia en píxeles, escribir la distancia conocida, la unidad y aceptar.

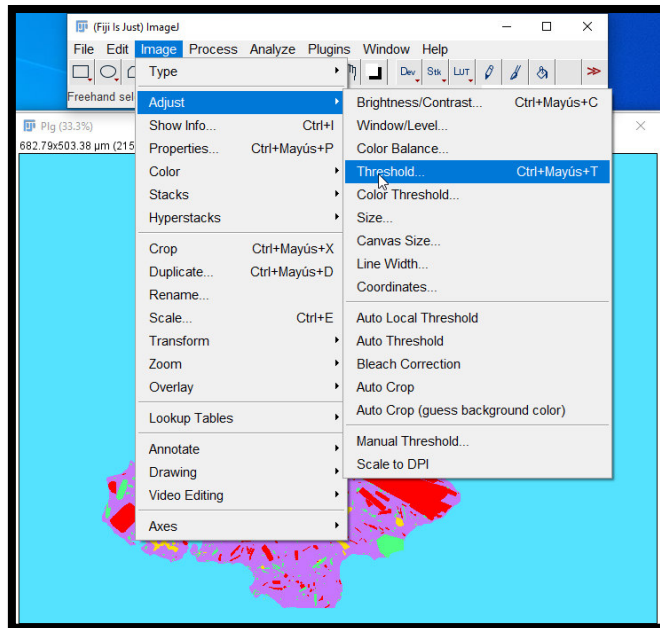


ANÁLISIS

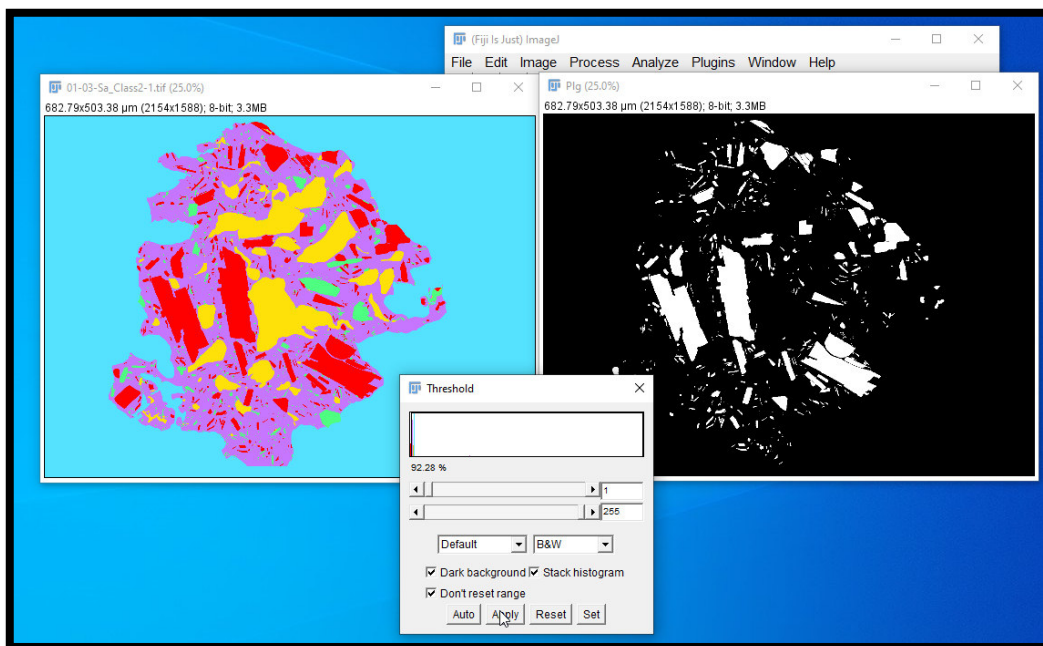
1. Una vez insertada la escala es necesario duplicar la imagen. Utilizar el comando Shift+d. A continuación, aparecerá un cuadro de texto para insertar el nombre del duplicado.



2. Para seleccionar las Plagioclasas será necesario ajustar el umbral de la imagen. Utilizar el comando *Image/Adjust/Threshold*.

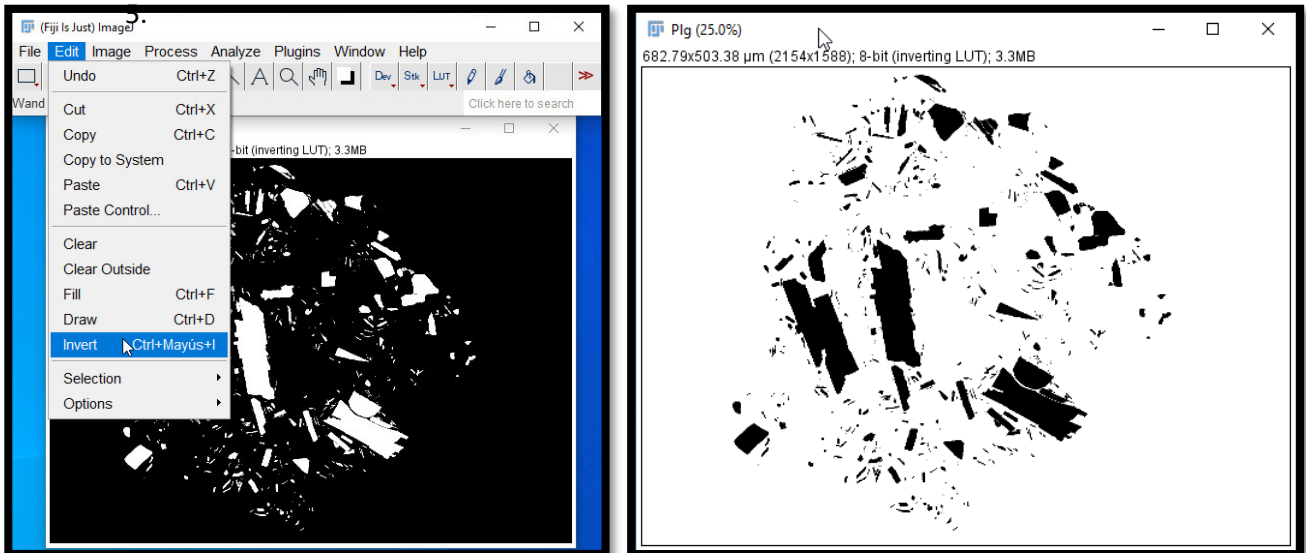


3. Ajustar los niveles de modo que se mantenga sólo la especie de Plagioclasas, ya sea en color blanco o negro. Esto depende del color que se le haya asignado durante la clasificación. Dar click en aplicar.

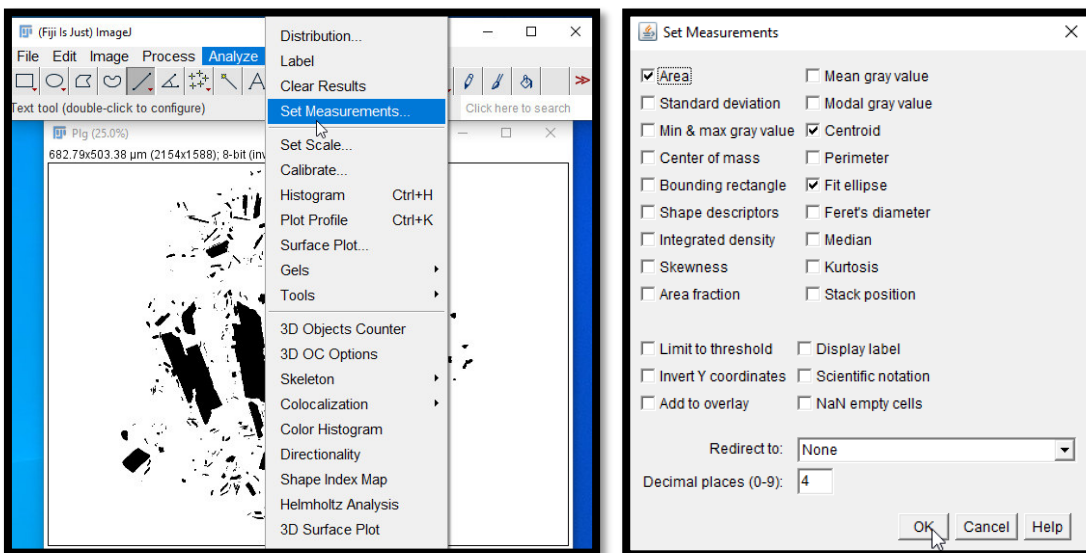


4. Si el color de la especie seleccionada es blanco, entonces utilizar el siguiente comando para invertir los colores. *Edit/Invert*.

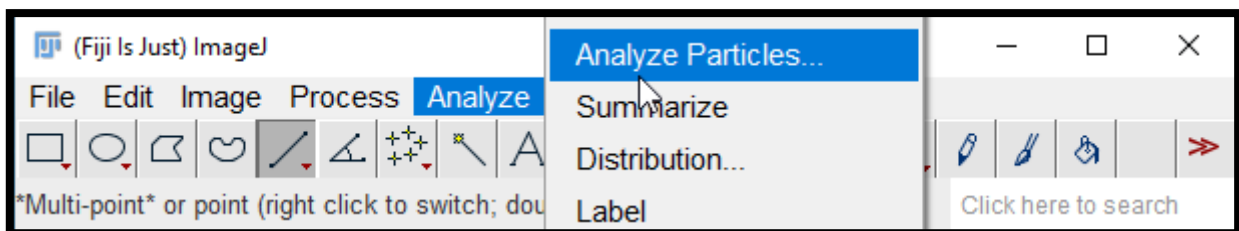
Nota: Si durante la configuración del umbral la especie seleccionada se tiñe de color negro, no realizar el paso anterior.

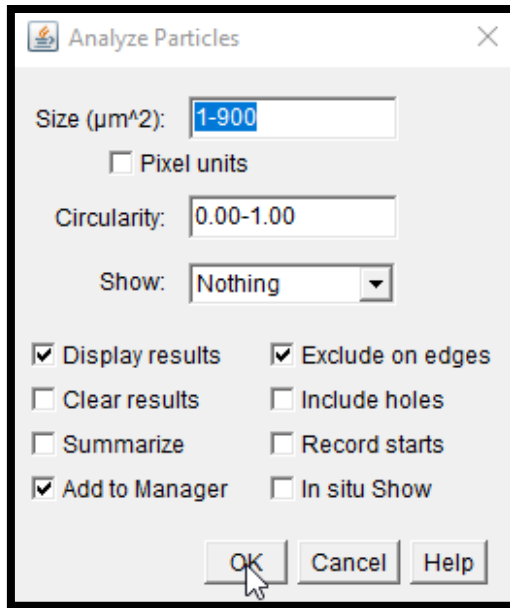


6. Para escoger las medidas que realizará el software utilizar el comando *Analyze/Set Measurements*. Escoger los parámetros: “Area”, “Centroid”, y “Fit Ellipse”.

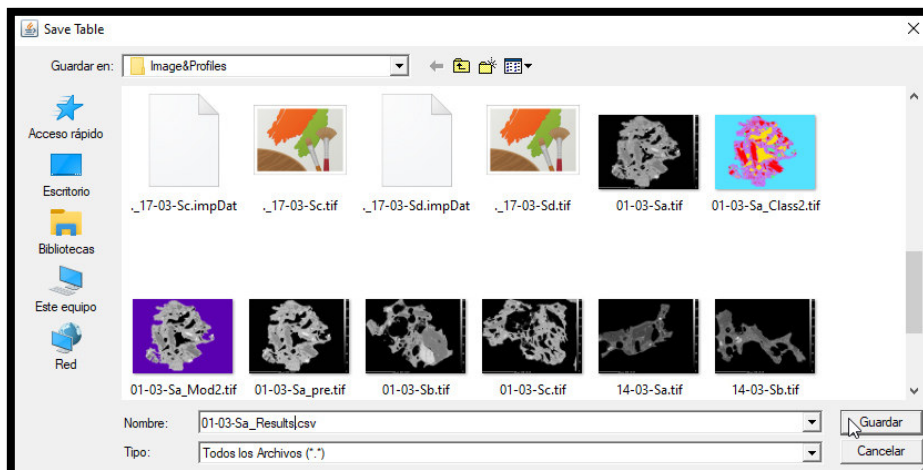
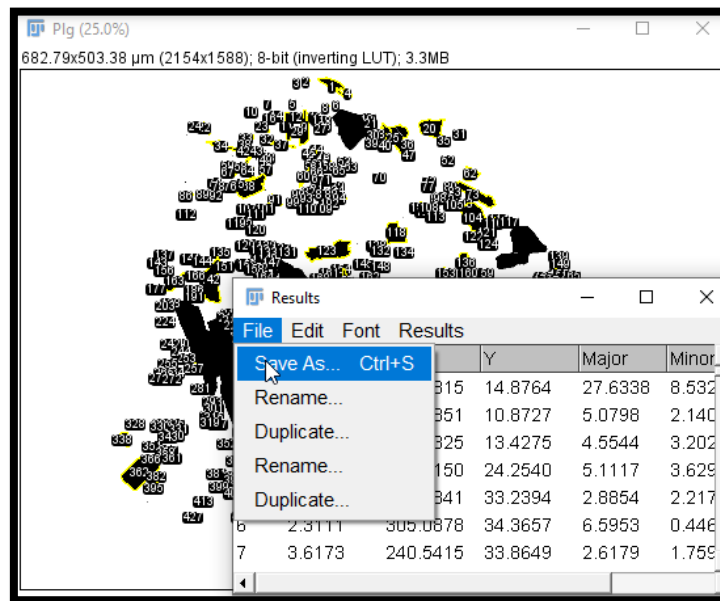


7. Para analizar las partículas utilizar el comando *Analyze/ Analyze Particles*. En la sección “Size” escribir: 1-900 μm^2 (dependiendo de la muestra) para considerar únicamente el tamaño de microlitos.

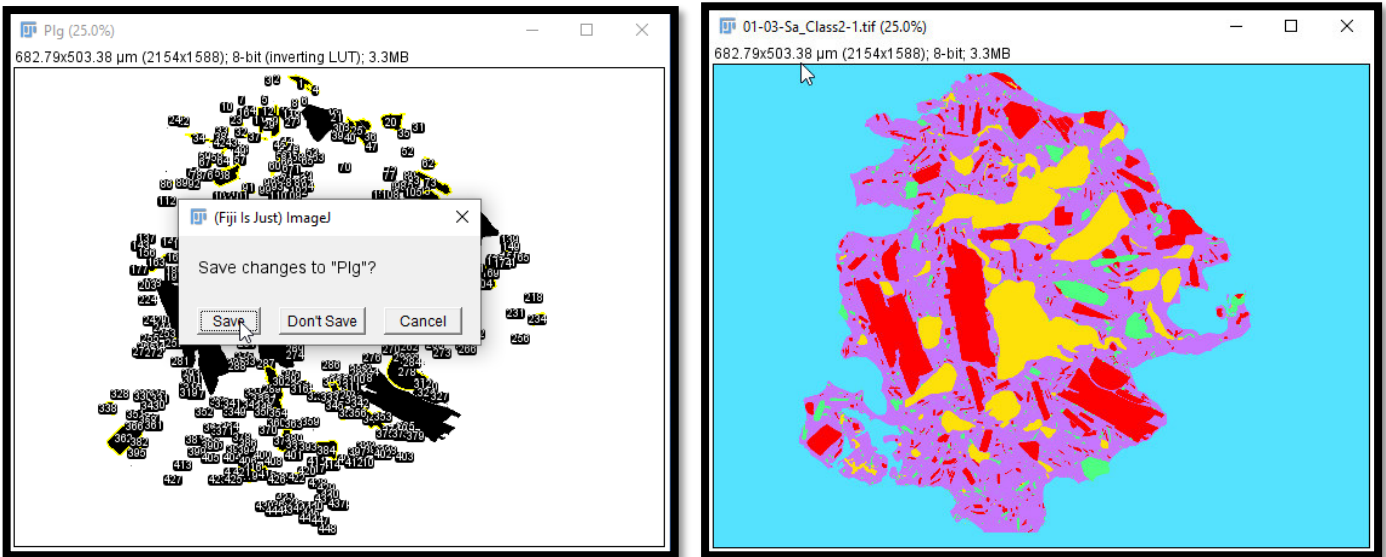




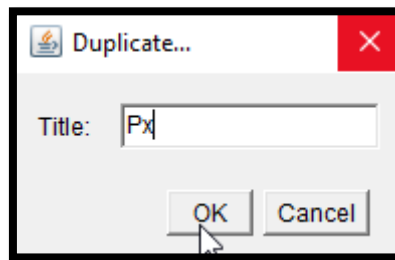
8. A continuación, aparecerá una tabla con los resultados de la medición, guardar el archivo utilizando el comando *File/Save As*.



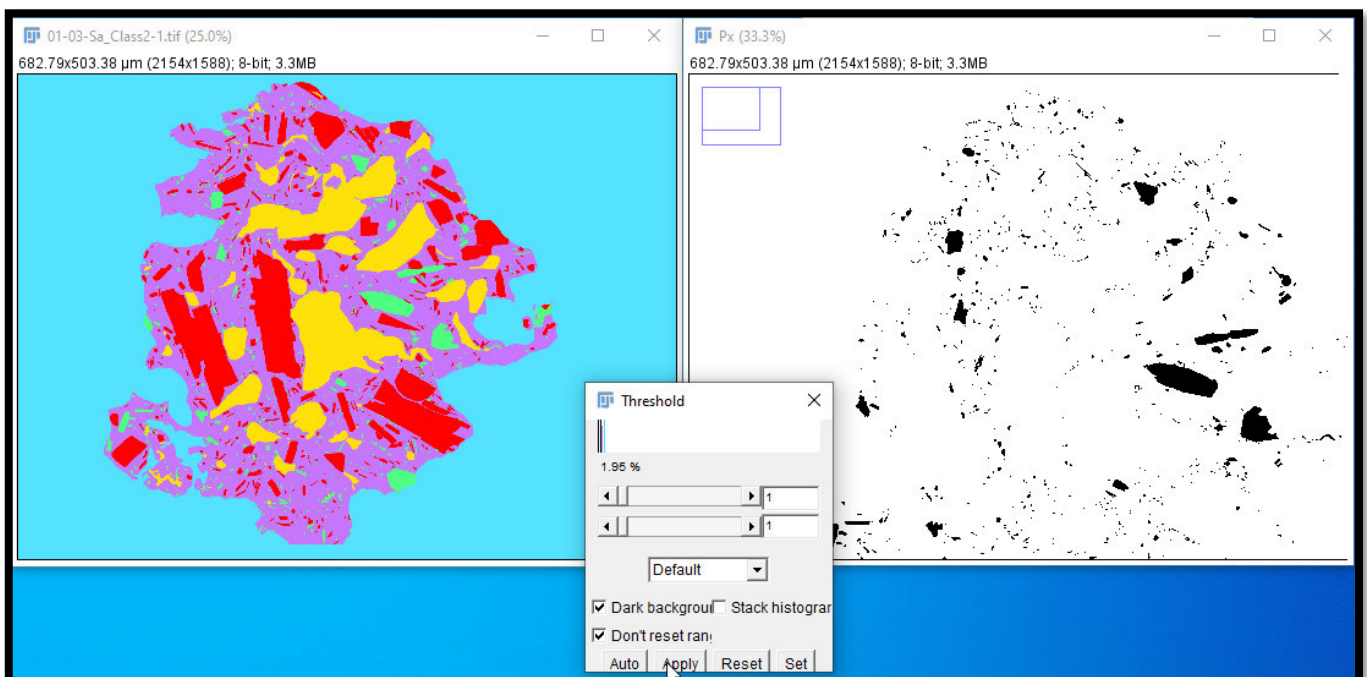
9. Guardar los cambios y cerrar **todos** los cuadros de diálogo conservando solo la imagen clasificada y escalada original.

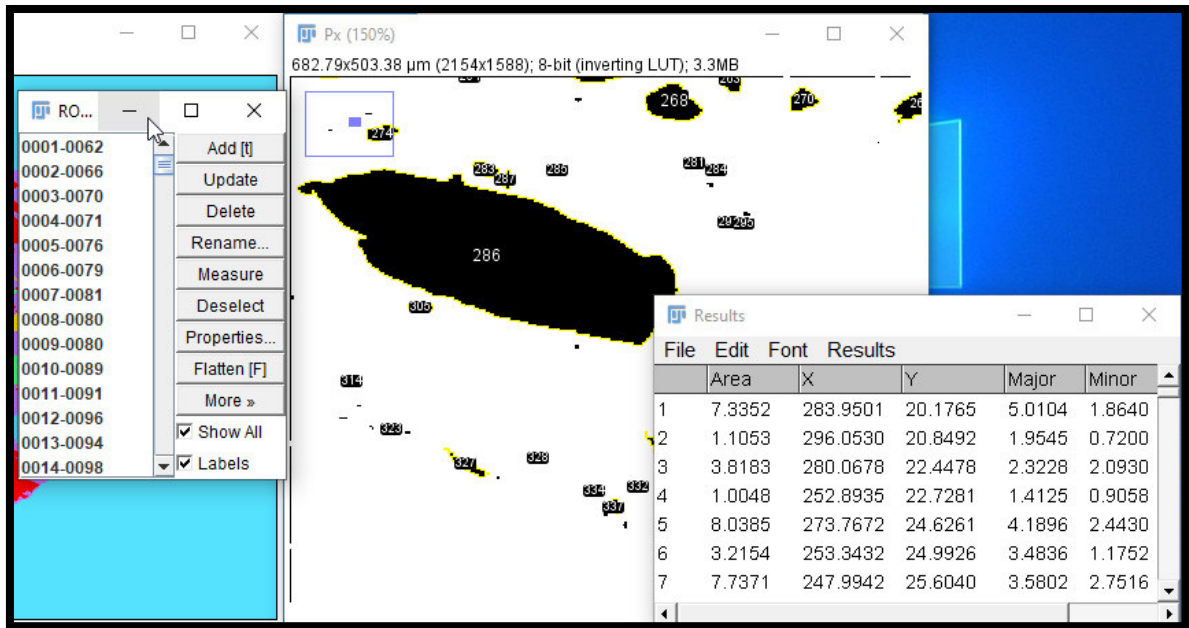


10. Volver a duplicar la imagen y repetir el mismo proceso para las otras especies minerales (Px) y las vesículas.

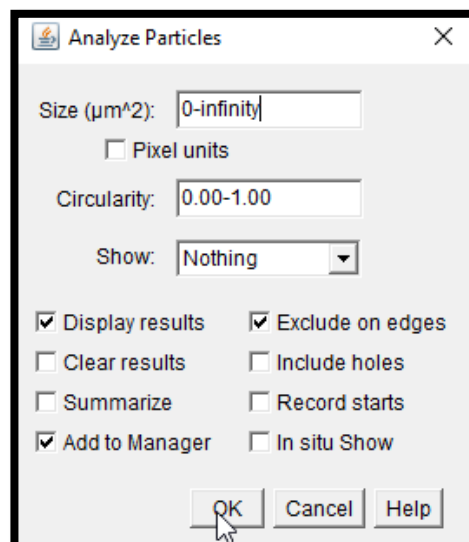
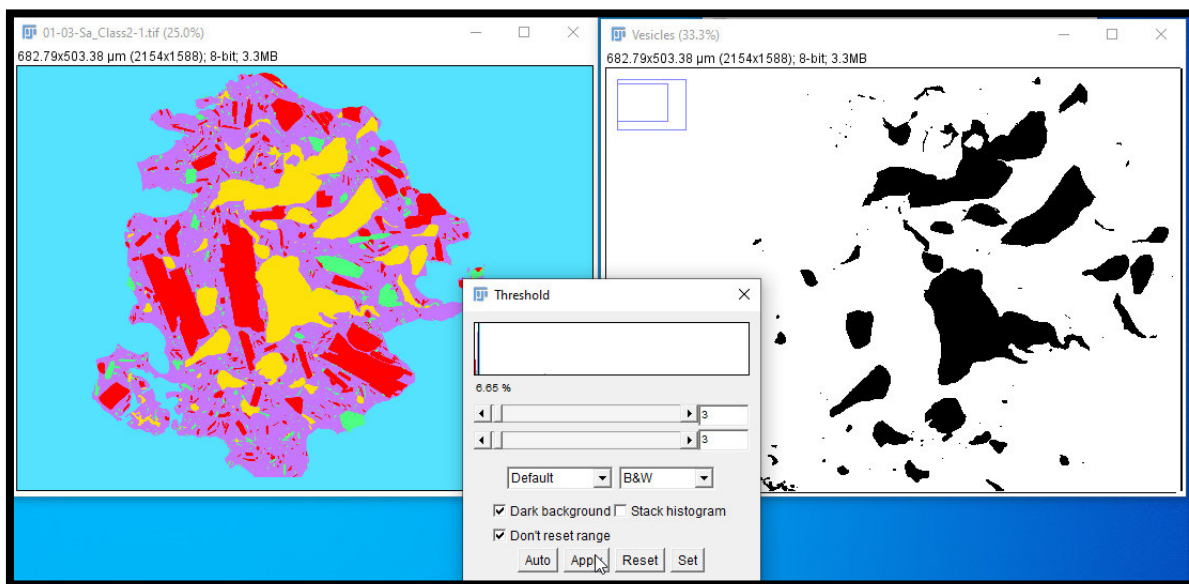


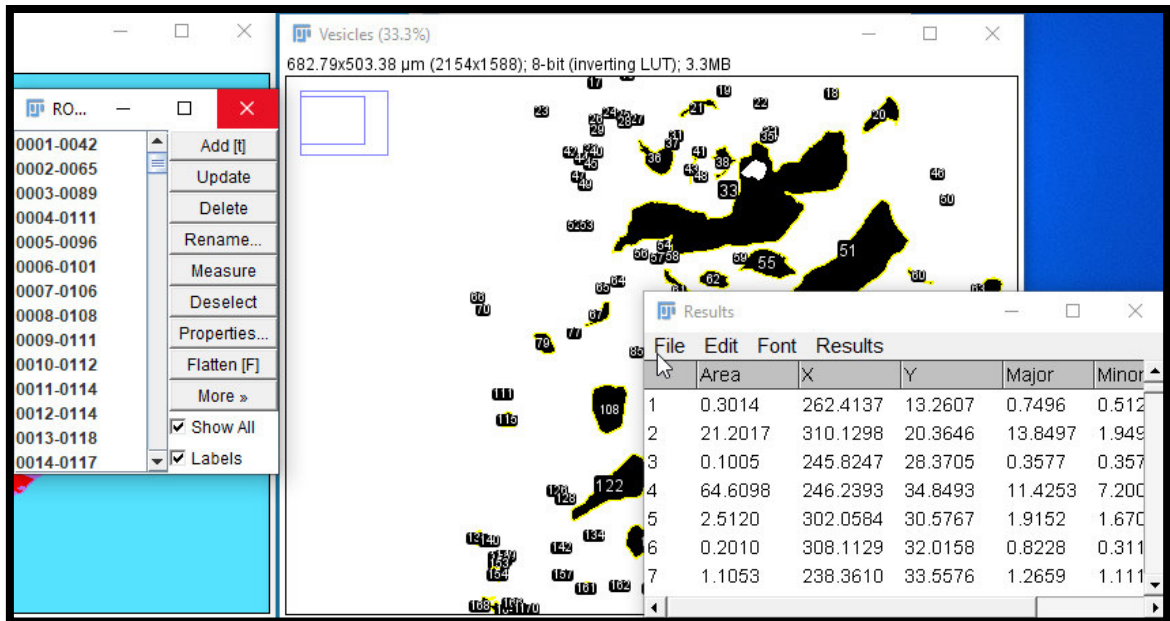
PROCESO ESPECIE PIROXENOS



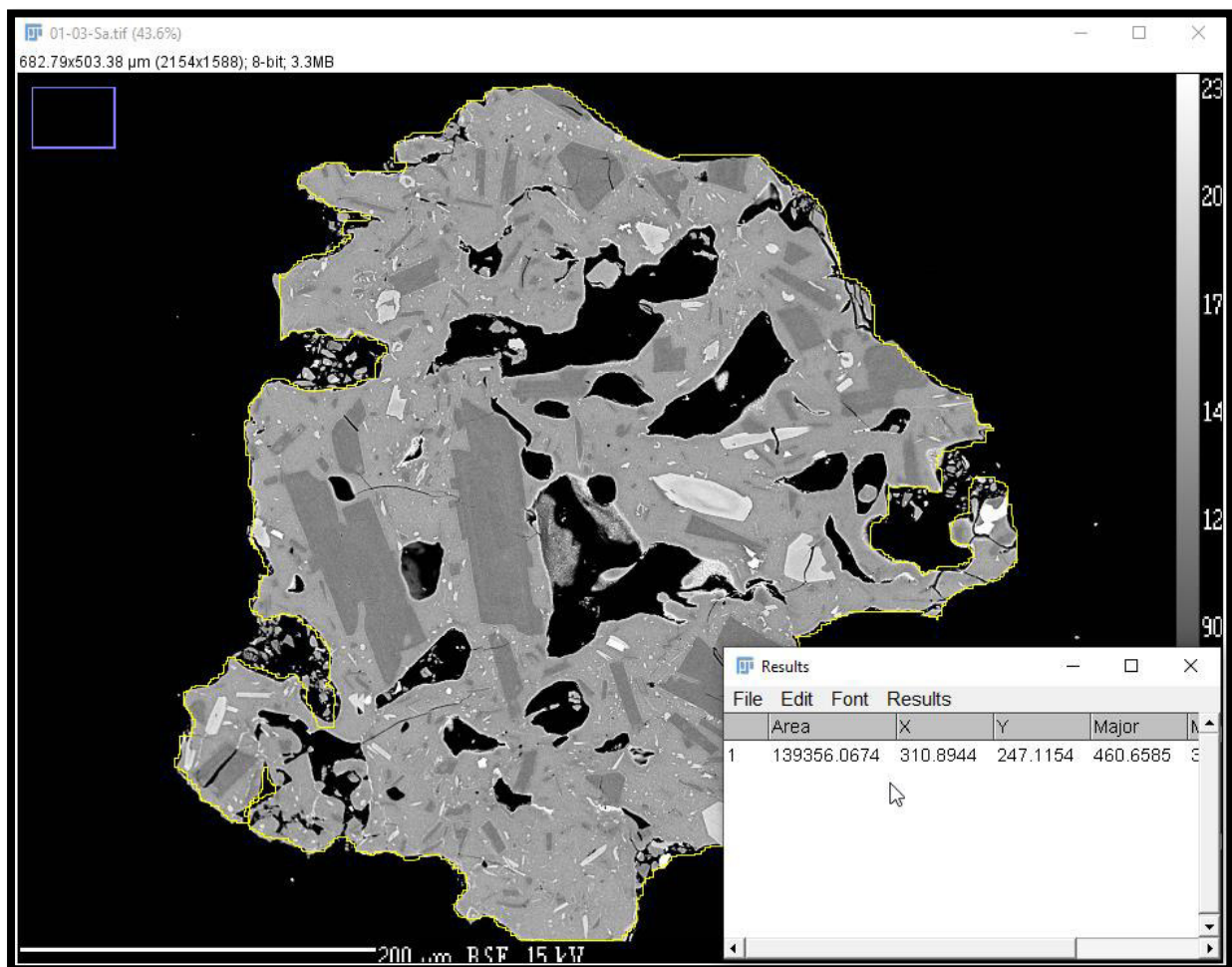


PROCESO ESPECIE VESÍCULAS





11. Para medir el área total de la muestra será necesario utilizar la imagen escalada original y utilizar la herramienta “freehand selections”. A continuación, delinear el contorno de la muestra. Una vez delimitado presionar la tecla “m” para que se realice la medición del área y guardar el archivo.



TRATAMIENTO DE DATOS

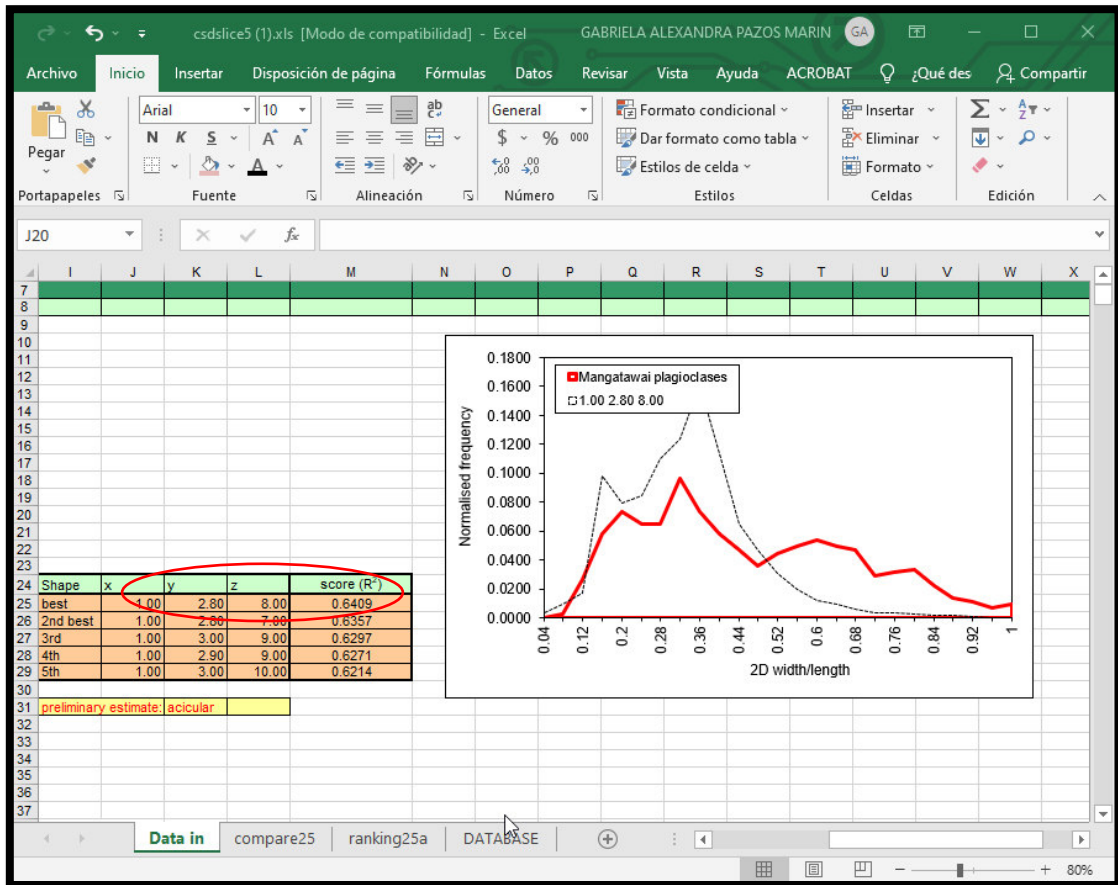
1. Abrir el archivo de resultados Plagioclasa (.csv) en el programa Excel.

	Area	X	Y	Major	Minor	Angle
1						
2	1	185.1879	302.4815	14.8764	27.6338	8.5326
3	2	8.541	276.7851	10.8727	5.0798	2.1408
4	3	11.4549	267.2325	13.4275	4.5544	3.2024
5	4	14.5699	318.015	24.254	5.1117	3.6291
6	5	5.0241	264.5841	33.2394	2.8854	2.217
7	6	2.3111	305.0878	34.3657	6.5953	0.4462
8	7	3.6173	240.5415	33.8649	2.6179	1.7594
9	8	14.8713	295.7033	35.8304	5.126	3.6939
10	9	215.9353	274.4603	57.2483	33.2453	8.27
11	10	14.3689	224.6064	40.6023	5.9865	3.0561
12	11	128.7172	258.3597	53.7563	28.4775	5.755
13	12	5.5265	267.4375	45.9028	7.0403	0.9995
14	13	13.6655	286.7162	45.8515	5.7864	3.007
15	14	5.627	248.8021	45.7143	3.2384	2.2124
16	15	8.0385	339.1303	47.2036	4.5212	2.2638
17	16	9.1438	242.7802	47.8984	3.8276	3.0416

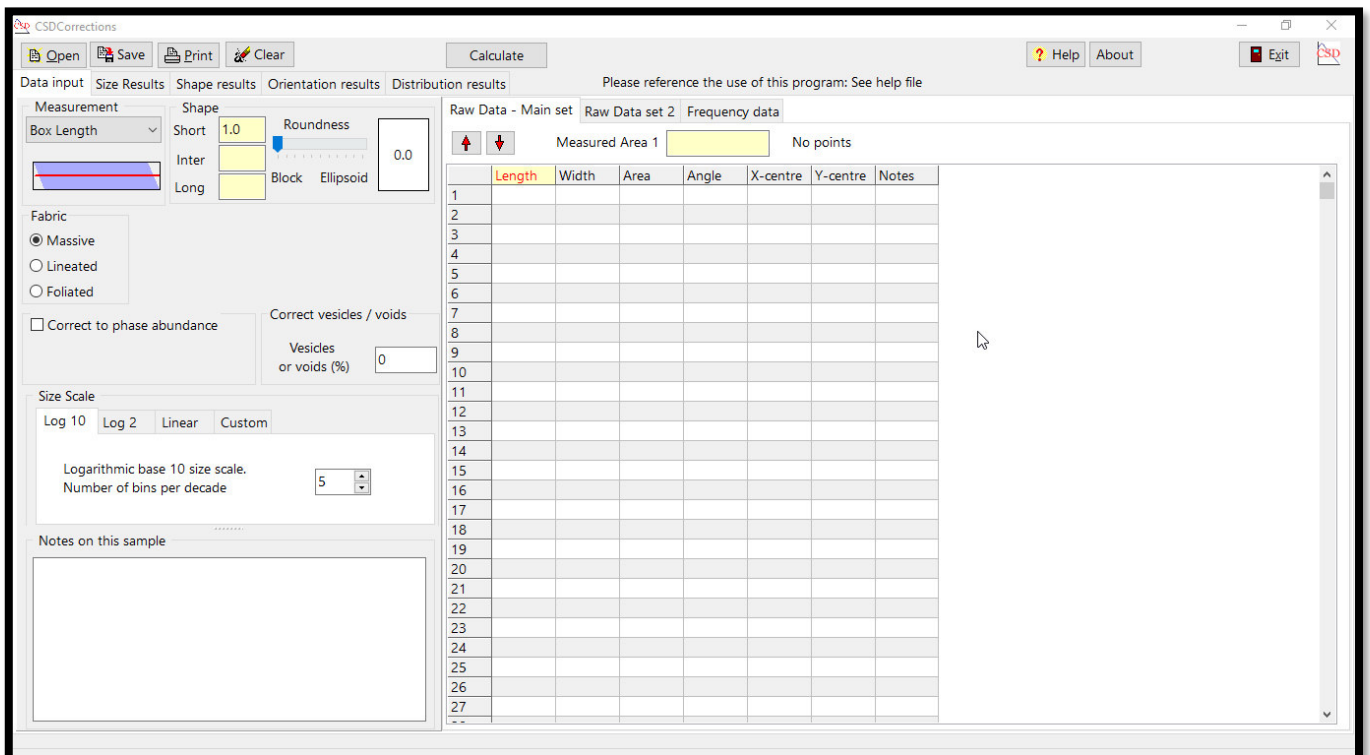
2. Copiar las columnas “Major” y “Minor” en las columnas “Major Axis” y “Minor Axis” respectivamente en la hoja de cálculo **CSDSlice 5.0**.

	Major axis	Minor axis	Ratio	Binning into 25	frequency	normalised
8						
9	27.6338	8.5326	0.308774	1	4	0.0089286
10	5.0798	2.1408	0.421434	0.96	3	0.0066964
11	4.5544	3.2024	0.703144	0.92	5	0.0111607
12	5.1117	3.6291	0.70996	0.88	6	0.0133929
13	2.8854	2.217	0.768351	0.84	10	0.0223214
14	6.5953	0.4462	0.067654	0.8	15	0.0334821
15	2.6179	1.7594	0.672065	0.76	14	0.03125
16	5.126	3.6939	0.72062	0.72	13	0.0290179
17	33.2453	8.27	0.248757	0.68	21	0.046875
18	5.9865	3.0561	0.510499	0.64	22	0.0491071
19	28.4775	5.755	0.202089	0.6	24	0.0535714
20	7.0403	0.9995		0.56	22	0.0491071
21	5.7864	3.007		0.52	20	0.0446429
22	3.2384	2.2124	0.683177	0.48	16	0.0357143
23	4.5212	2.2638	0.500708	0.44	21	0.046875
24	3.8276	3.0416	0.794649	0.4	26	0.0580357
25	6.4322	5.0322	0.782345	0.36	33	0.0736607

3. Anotar los valores de “x”, “y”, “z” correspondientes a los hábitos cristalinos de la especie mineral.

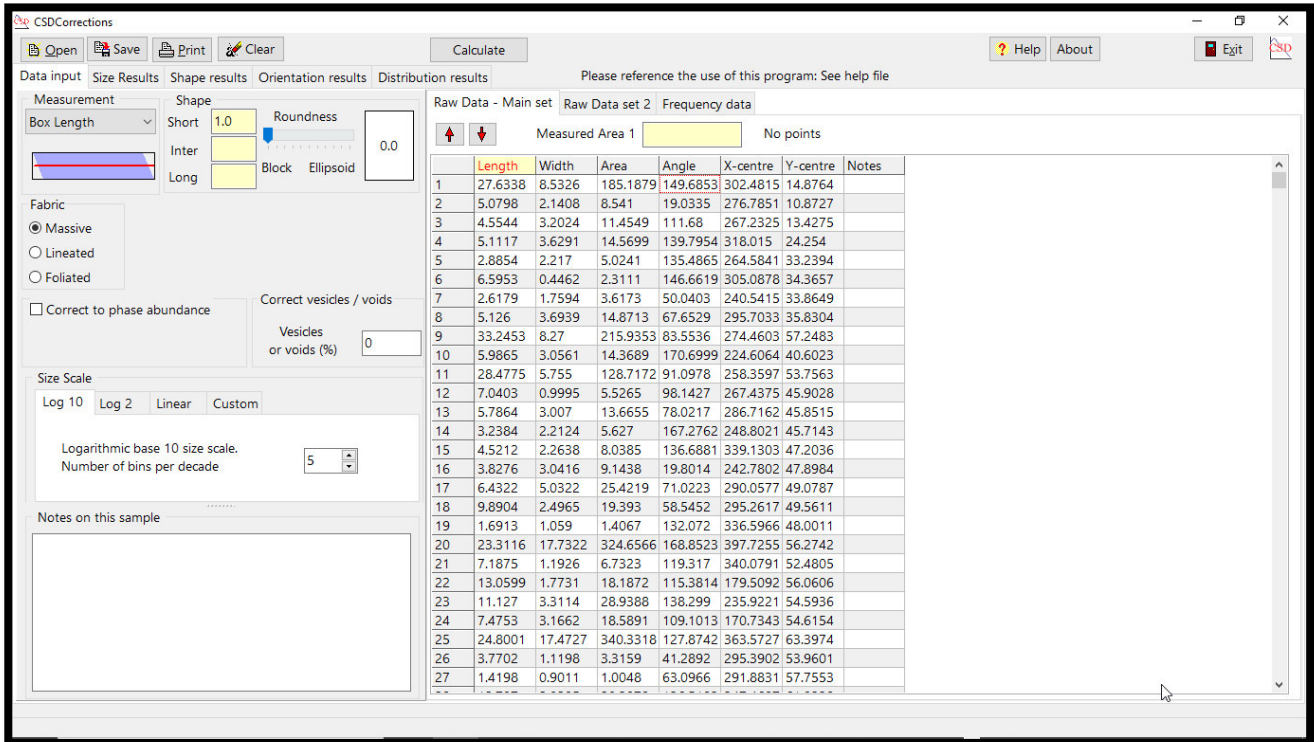


4. Abrir el programa **CSDCorrections**.



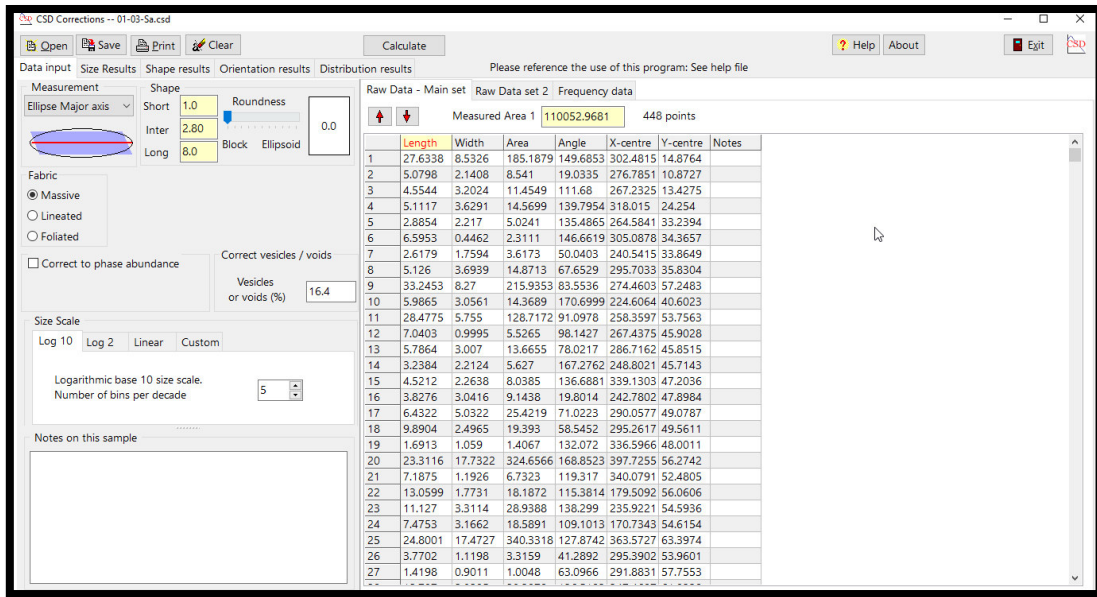
- Copiar los datos de la hoja de resultados de Plagioclasa en la interfaz de **CSDCorrections**.

Nota: “Length” y “Width” corresponden a las columnas de eje mayor y menor respectivamente.

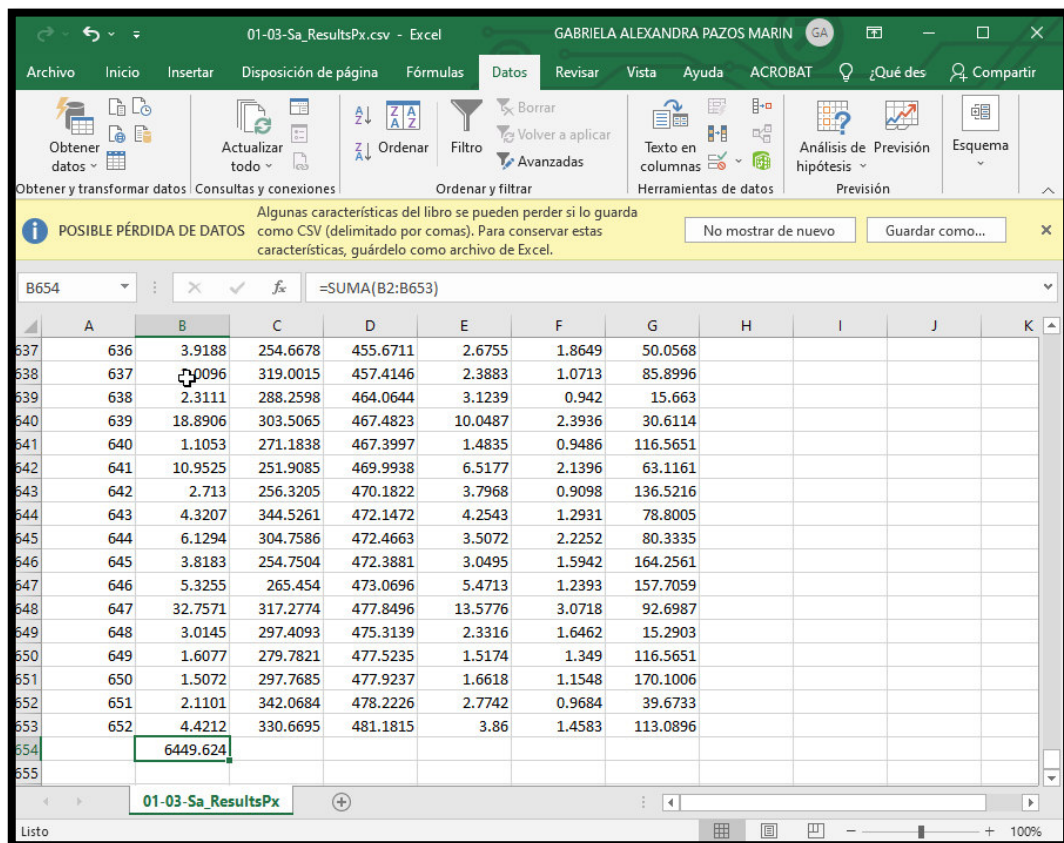


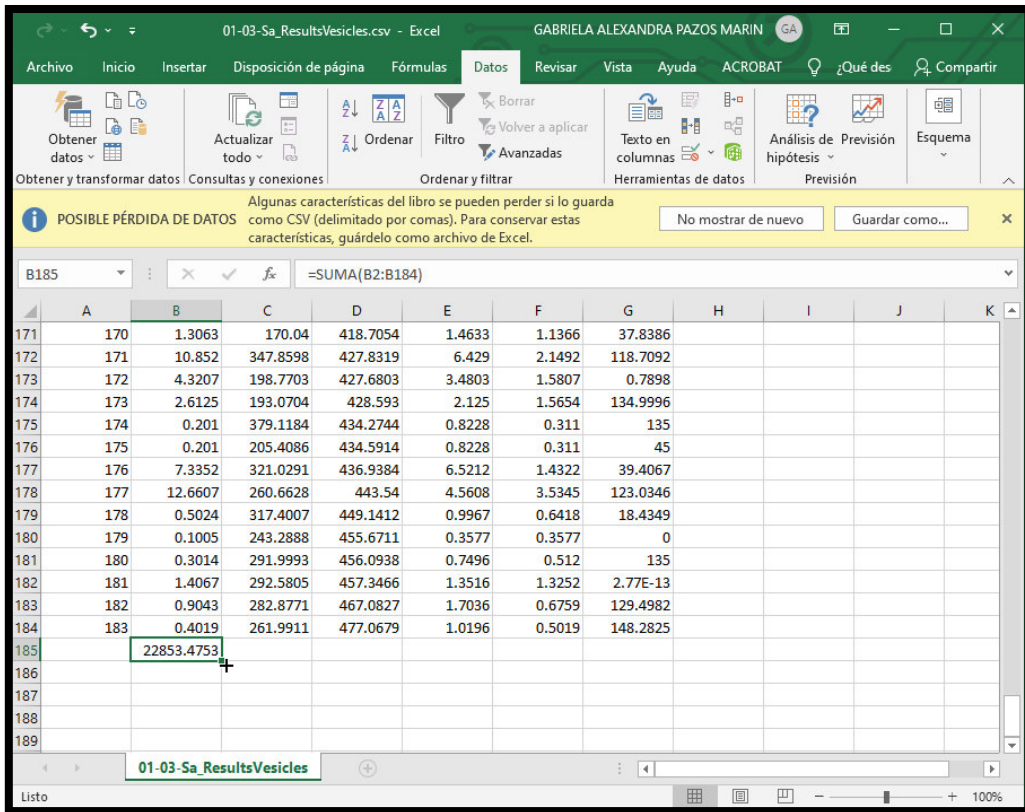
- Insertar los hábitos cristalinos de la hoja de cálculo **CSDSlice** en la sección de “Shape”.

Nota: “x”, “y”, “z”, corresponden a “Short”, “Inter”, “Long” respectivamente. Ajustar los valores de redondez y fábrica dependiendo de la especie mineral y muestra. En este caso, ubicar en un rango de “Block” para las plagioclasas debido a su forma (hasta 0.2 para este estudio) y fábrica masiva, ya que no se observa ninguna dirección preferencial. En la sección de “Measurement”, escoger “ellipse Major Axis”, ya que se fue criterio utilizado para medir los cristales en *ImageJ*.

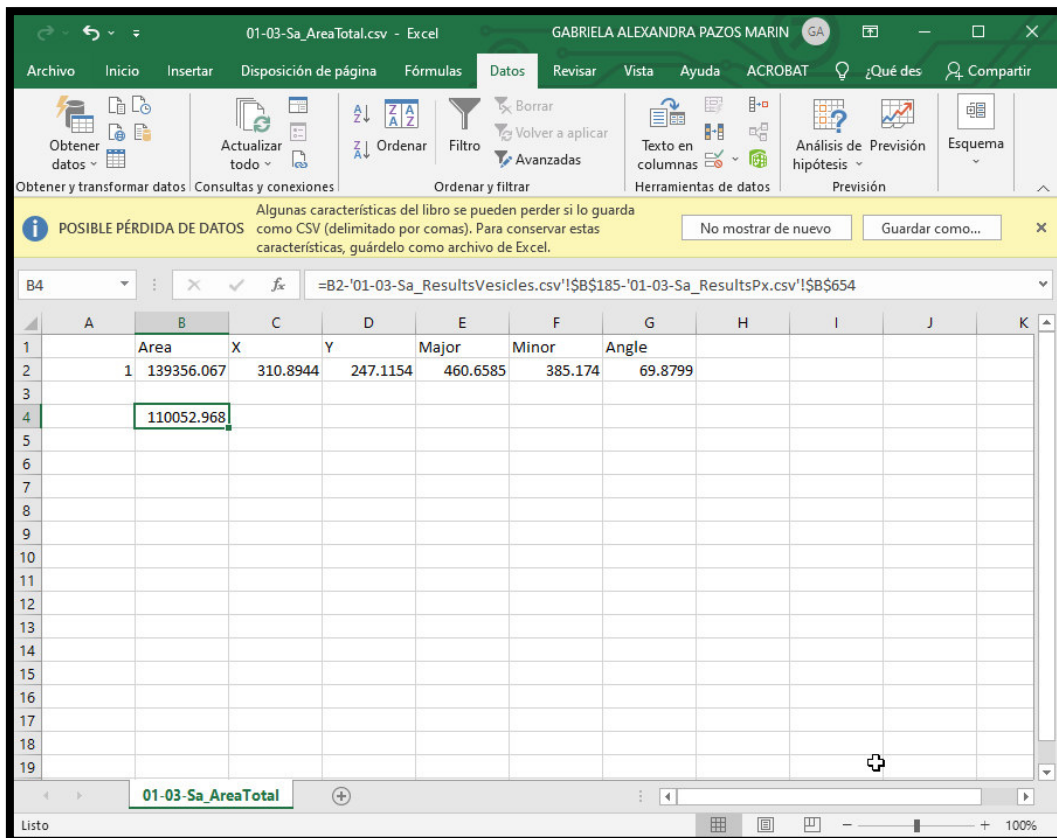


7. Al abrir las hojas de cálculo de resultados para Piroxenos y Vesículas y obtener la suma total de la columna de área.

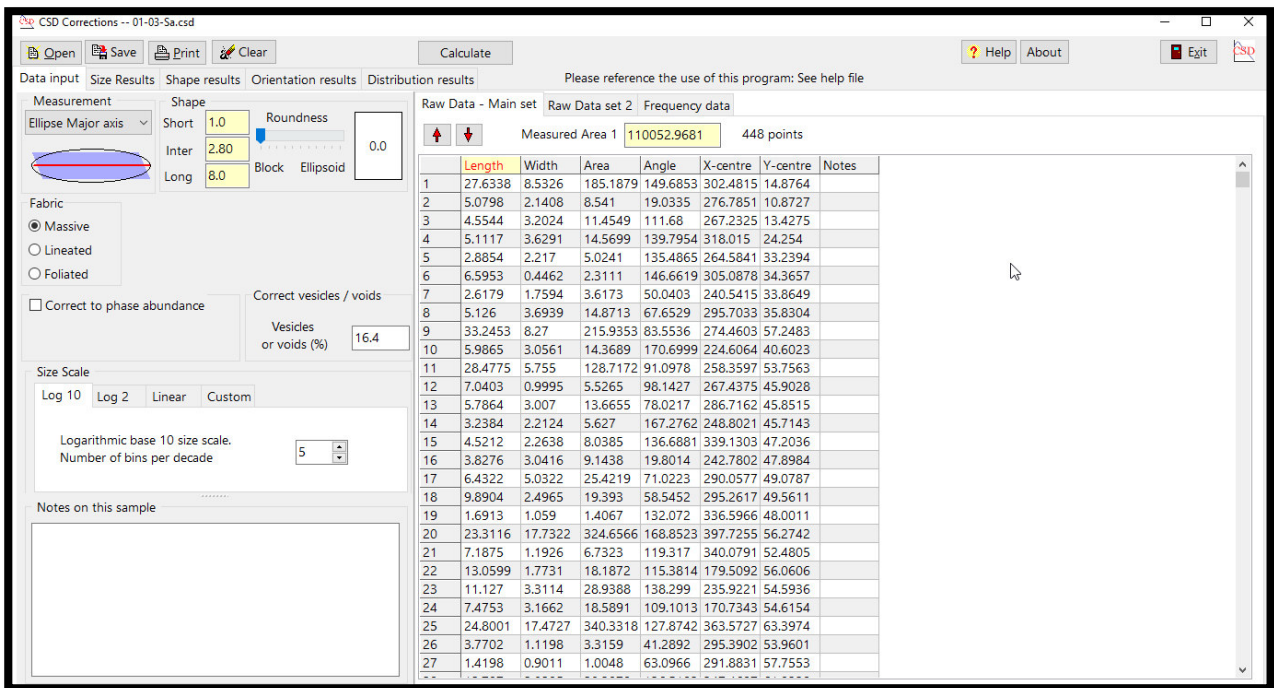




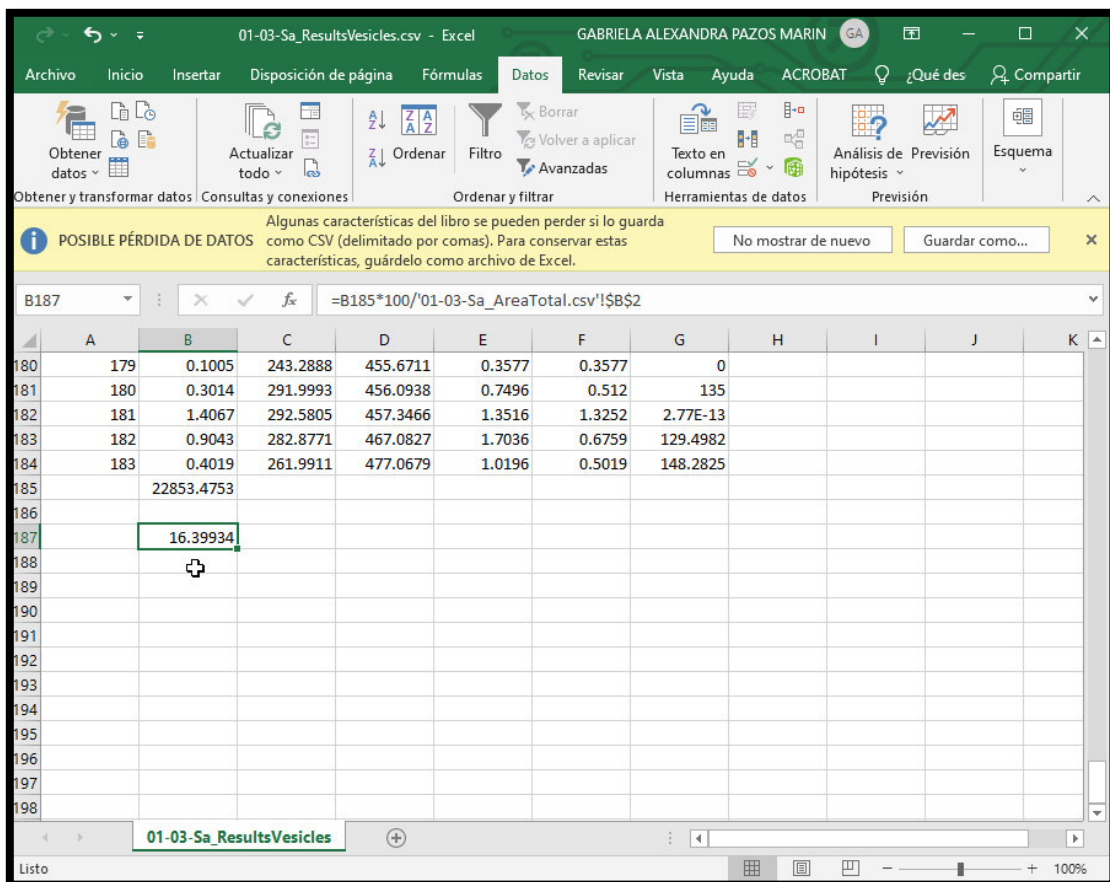
8. Abrir el archivo que contiene el área total de la muestra (.csv). Y en una celda aparte restar de ese valor el área de las vesículas y de las especies minerales que no se están analizando (Px).



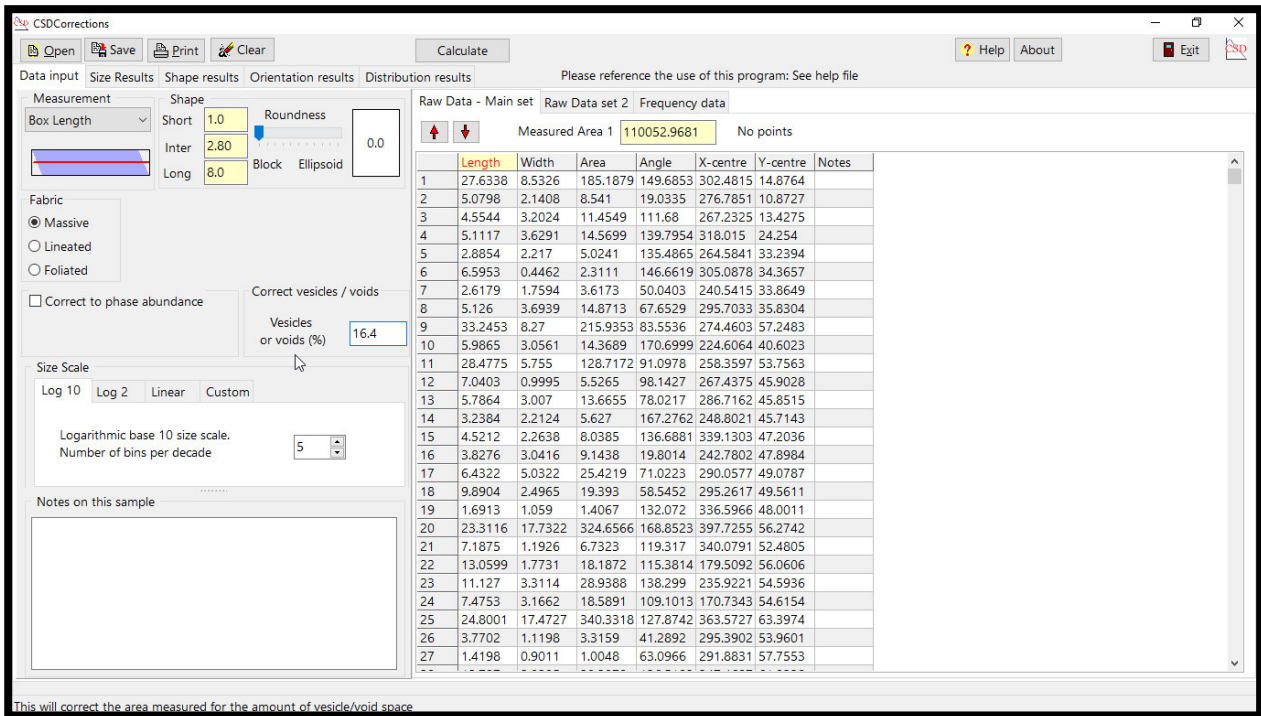
9. Introducir ese resultado en la sección "Measured Area 1" del programa **CSDCorrections**.



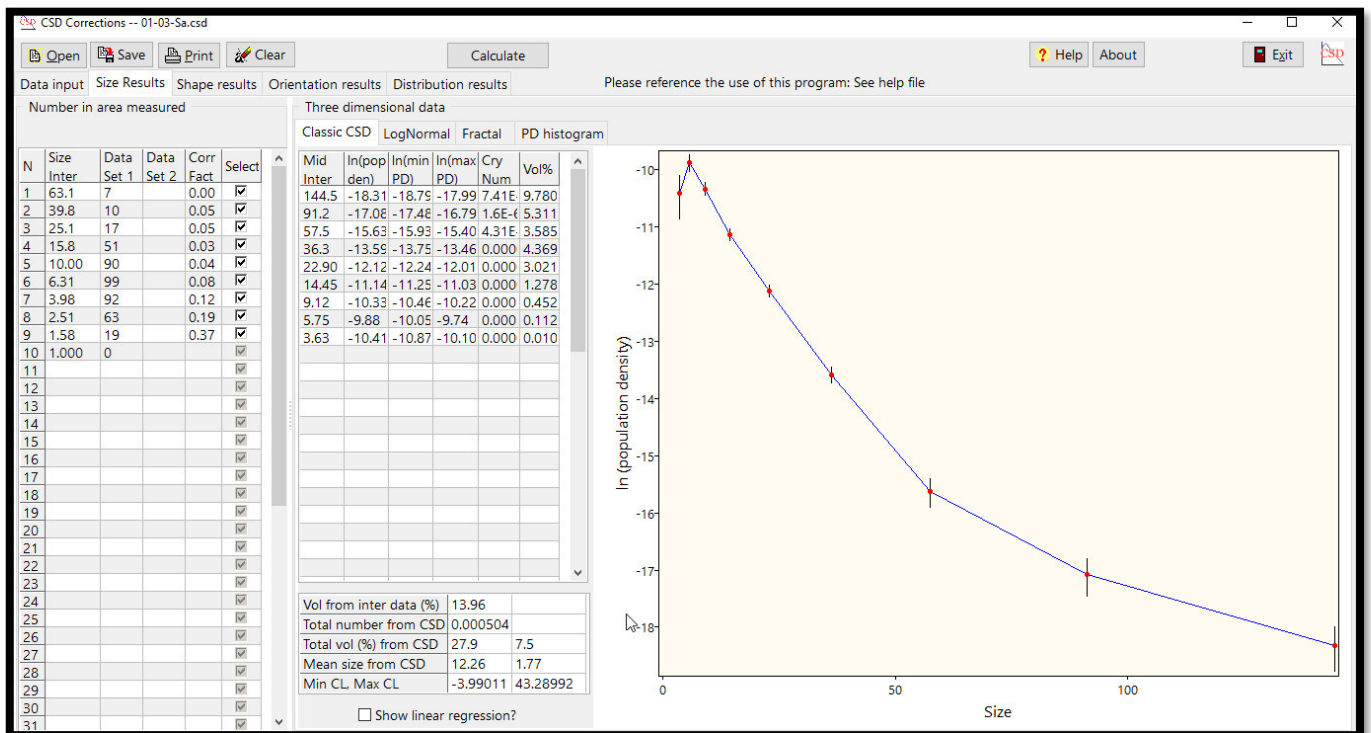
10. Obtener el porcentaje de vesículas a través de una regla de tres utilizando los archivos de Área Total y Vesículas.



11. Registrar ese valor en la sección "Correct Vesicles" del programa **CSDCorrections**.



12. Dar click en botón "Calculate" y se observará la curva de distribución granulométrica CSD-3D.



ANEXO II

Parámetros utilizados para el cálculo de la velocidad de ascenso a través del método de Toramaru et al. (2008).

Método CSDCorrections

- **Parámetros texturales**

N°	Código	Fecha	Fracción de área de Plagioclasa (Φ) %	Densidad Numérica de Volumen (Nv) (1/um ³)	Densidad Numérica de Volumen (Nv) (1/m ³)	Forma Estimada	Ejes Principales	R ²	dPw/dZ (Gradiente de Presión)	Velocidad (m/s)
1	01-03-Sa	01/03/2013	13.96%	0.000502	5.02E+14	acicular	1;2.8;8	0.641	6043.767	0.2464
2	01-03-Sb	01/03/2013	13.49%	0.000269	2.69E+14	acicular	1;1.7;6	0.547	3987.249	0.1626
3	01-03-Sc	01/03/2013	14.02%	0.000589	5.89E+14	acicular	1;1.4;3.8	0.865	6723.293	0.2741
4	mars13-1a	01/03/2013	20.06%	0.000420	4.2E+14	acicular	1;1.5;7	0.462	5350.875	0.2182
5	mars13-1b	01/03/2013	13.82%	0.000353	3.53E+14	acicular	1;2.3;7	0.602	4765.499	0.1943
6	mars13-1c	01/03/2013	10.30%	0.000154	1.54E+14	acicular	1;1.25;6	0.565	2741.190	0.1118
7	mars13-1d	01/03/2013	12.82%	0.000426	4.26E+14	acicular	1;2.7;8	0.631	5401.715	0.2203
8	08-03-S2	08/03/2013	10.35%	0.000743	7.43E+14	P. rectangular	1;1.7;6	0.745	2348.645	0.0958
9	08-03-s3	08/03/2013	20.73%	0.000710	7.1E+14	acicular	1;1.4;6	0.731	2278.577	0.0929
10	08-03-s4	08/03/2013	29.39%	0.002840	2.84E+15	P. rectangular	1;1.4;2.3	0.865	5741.655	0.2341
11	08-03-sa1	08/03/2013	6.66%	0.000196	1.96E+14	acicular	1;1.9;10	0.685	966.041	0.0394
12	mars13-2a	08/03/2013	15.72%	0.000189	1.89E+14	acicular	1;1.25;8	0.783	942.901	0.0384
13	mars13-2c	08/03/2013	21.13%	0.000514	5.14E+14	acicular	1;1.6;5.5	0.776	1837.104	0.0749
14	mars13-2d	08/03/2013	12.30%	0.000290	2.9E+14	acicular	1;1.3;8	0.677	1254.364	0.0511

15	mars13-3a	13/03/2013	7.27%	0.000224	2.24E+14	acicular	1;1.9;4.5	0.631	1830.557	0.0746
16	mars13-3b	13/03/2013	7.16%	0.000170	1.7E+14	acicular	1;1.25;5	0.812	1523.061	0.0621
17	mars13-3c	13/03/2013	9.53%	0.000210	2.1E+14	acicular	1;2;7	0.591	1753.466	0.0715
18	mars13-3d	13/03/2013	4.92%	0.000086	8.6E+13	P. rectangular	1;1.7;6	0.644	966.979	0.0394
19	14-03-Sa	14/03/2013	12.54%	0.000823	8.23E+14	P. rectangular	1;2;2.7	0.608	4358.757	0.1777
20	14-03-Sb	14/03/2013	20.45%	0.000607	6.07E+14	acicular	1;1.4;6	0.676	3558.130	0.1451
21	14-03-Sc	14/03/2013	11.39%	0.000228	2.28E+14	acicular	1;1.5;5.5	0.740	1852.334	0.0755
22	17-03-Sa	17/03/2013	16.90%	0.000374	3.74E+14	acicular	1;1.4;9	0.700	7700.114	0.3140
23	17-03-Sc	17/03/2013	16.98%	0.000814	8.14E+14	acicular	1;1.4;9	0.615	12932.000	0.5273
24	17-03-Sd	17/03/2013	9.84%	0.000261	2.61E+14	acicular	1;1.5;5	0.659	6058.193	0.2470
25	mars13-4a	17/03/2013	7.97%	0.000419	4.19E+14	acicular	1;1.6;9	0.555	8306.004	0.3387
26	mars13-4b	17/03/2013	3.93%	0.000161	1.61E+14	acicular	1;1.5;5	0.696	4390.022	0.1790
27	mars13-4c	17/03/2013	8.22%	0.000394	3.94E+14	acicular	1;1.4;10	0.682	7972.238	0.3251
28	mars13-4d	17/03/2013	6.30%	0.000294	2.94E+14	acicular	1;1.4;4.5	0.688	6558.648	0.2674
29	14-07-s1	14/07/2013	21.88%	0.001170	1.17E+15	acicular	1;2.7;8	0.672	11376.130	0.4639
30	july13-1a	14/07/2013	11.77%	0.000079	7.9E+13	acicular	1;1.5;4.5	0.705	1886.349	0.0769
31	july13-1b	14/07/2013	5.84%	0.000140	1.4E+14	acicular	1;1.4;9	0.447	2762.418	0.1126
32	july13-1c	14/07/2013	8.43%	0.000073	7.3E+13	acicular	1;1.6;10	0.520	1789.586	0.0730
33	july13-1d	14/07/2013	5.89%	0.000100	1E+14	acicular	1;1.15;8	0.684	2207.347	0.0900
34	14-07-s2	14/07/2013	14.23%	0.002040	2.04E+15	P. rectangular	1;1.7;3.8	0.822	16480.008	0.6720
35	14-07-s3	14/07/2013	19.99%	0.001090	1.09E+15	P. rectangular	1;1.7;5.5	0.813	10851.463	0.4425
36	20-07-s1	20/07/2013	17.85%	0.000449	4.49E+14	acicular	1;1.5;9	0.678	3018.255	0.1231
37	20-07-s2	20/07/2013	22.26%	0.000996	9.96E+14	acicular	1;2.3;9	0.691	5133.710	0.2093
38	20-07-s3	20/07/2013	16.16%	0.000963	9.63E+14	acicular	1;1.7;7	0.732	5019.679	0.2047

39	20-07-s4	20/07/2013	21.59%	0.000573	5.73E+14	acicular	1;2.7;9	0.617	3551.089	0.1448
40	july13-2a	20/07/2013	10.19%	0.000583	5.83E+14	P. rectangular	1;1.7;3.8	0.820	3592.285	0.1465
41	july13-2b	20/07/2013	17.44%	0.000518	5.18E+14	acicular	1;1.6;8	0.792	3320.052	0.1354
42	july13-2c	20/07/2013	19.26%	0.000676	6.76E+14	acicular	1;2.7;8	0.393	3964.815	0.1617
43	july13-2d	20/07/2013	11.25%	0.000201	2.01E+14	acicular	1;1.5;10	0.793	1766.265	0.0720
44	24-07-s1	24/07/2013	15.31%	0.000356	3.56E+14	acicular	1;1.7;6	0.591	8354.622	0.3407
45	24-07-s2	24/07/2013	16.18%	0.000648	6.48E+14	acicular	1;2.1;5	0.582	12454.992	0.5078
46	24-07-s3	24/07/2013	21.75%	0.000301	3.01E+14	P. rectangular	1;3.6;7	0.818	7470.296	0.3046
47	24-07-s4	24/07/2013	14.23%	0.000307	3.07E+14	acicular	1;1.5;10	0.553	7569.242	0.3086
48	july13-3a	24/07/2013	12.93%	0.000482	4.82E+14	acicular	1;2.9;7	0.632	10224.878	0.4169
49	july13-3b	24/07/2013	18.71%	0.000536	5.36E+14	acicular	1;1.7;5.5	0.781	10974.969	0.4475
50	july13-3c	24/07/2013	11.72%	0.000536	5.36E+14	acicular	1;1.9;6	0.785	10974.969	0.4475
51	july13-3d	24/07/2013	16.45%	0.000378	3.78E+14	acicular	1;2;7	0.598	8695.368	0.3546

Método Batch

- **Parámetros Texturales**

N°	Código	Fecha	Fracción de área de Plagioclasa (Φ) %	Densidad Numérica de Área (Na) 2D	Tamaño Característico Plg (Sn)	Densidad Numérica de Volumen (Nv) (1/um ³)	Nv (1/m ³)	dPw/dZ (Gradiente de Presión)	Vn (m/s) (Batch Nv)
1	01-03-Sa	01/03/2013	11.03%	0.003845	5.35	0.000718	7.1814E+14	7673.250	0.313
2	01-03-Sb	01/03/2013	9.43%	0.002346	6.34	0.000370	3.7E+14	4931.453	0.201
3	01-03-Sc	01/03/2013	10.77%	0.003789	5.33	0.000711	7.1063E+14	7619.658	0.311
4	mars13-1a	01/03/2013	10.24%	0.003361	5.52	0.000609	6.09E+14	6854.945	0.280

5	mars13-1b	01/03/2013	9.97%	0.002533	6.27	0.000404	4.0381E+14	5212.476	0.213
6	mars13-1c	01/03/2013	7.45%	0.002070	6.00	0.000345	3.4494E+14	4692.653	0.191
7	mars13-1d	01/03/2013	10.33%	0.003860	5.17	0.000746	7.4624E+14	7849.523	0.320
8	08-03-S2	08/03/2013	8.63%	0.006140	3.75	0.001638	1.638E+15	3978.365	0.162
9	08-03-s3	08/03/2013	17.83%	0.007707	4.81	0.001602	1.6025E+15	3920.618	0.160
10	08-03-s4	08/03/2013	20.55%	0.011594	4.21	0.002754	2.7536E+15	5624.665	0.229
11	08-03-sa1	08/03/2013	6.13%	0.002709	4.76	0.000570	5.696E+14	1967.311	0.080
12	mars13-2a	08/03/2013	14.13%	0.003744	6.14	0.000609	6.0942E+14	2057.952	0.084
13	mars13-2c	08/03/2013	16.65%	0.004748	5.92	0.000802	8.0167E+14	2470.719	0.101
14	mars13-2d	08/03/2013	11.64%	0.004974	4.84	0.001028	1.0282E+15	2916.666	0.119
15	mars13-3a	13/03/2013	5.22%	0.001473	5.96	0.000247	2.4726E+14	1955.158	0.080
16	mars13-3b	13/03/2013	6.54%	0.002195	5.46	0.000402	4.0206E+14	2703.635	0.110
17	mars13-3c	13/03/2013	6.15%	0.001873	5.73	0.000327	3.2681E+14	2354.766	0.096
18	mars13-3d	13/03/2013	4.16%	0.001193	5.90	0.000202	2.0214E+14	1709.417	0.070
19	14-03-Sa	14/03/2013	10.13%	0.003956	5.06	0.000782	7.8203E+14	4212.876	0.172
20	14-03-Sb	14/03/2013	17.07%	0.006642	5.07	0.001310	1.3103E+15	5943.151	0.242
21	14-03-Sc	14/03/2013	10.56%	0.003238	5.71	0.000567	5.671E+14	3400.445	0.139
22	17-03-Sa	17/03/2013	16.03%	0.006826	4.85	0.001409	1.4087E+15	18640.732	0.760
23	17-03-Sc	17/03/2013	11.60%	0.008568	3.68	0.002328	2.3282E+15	26057.608	1.062
24	17-03-Sd	17/03/2013	9.00%	0.002958	5.52	0.000536	5.3619E+14	9790.276	0.399
25	mars13-4a	17/03/2013	5.67%	0.004440	3.57	0.001242	1.242E+15	17139.872	0.699
26	mars13-4b	17/03/2013	3.40%	0.001361	5.00	0.000272	2.7241E+14	6233.517	0.254
27	mars13-4c	17/03/2013	6.23%	0.004600	3.68	0.001250	1.2504E+15	17216.442	0.702
28	mars13-4d	17/03/2013	4.57%	0.001988	4.79	0.000415	4.1461E+14	8247.880	0.336
29	14-07-s1	14/07/2013	16.23%	0.008941	4.26	0.002099	2.0986E+15	16794.369	0.685
30	july13-1a	14/07/2013	8.82%	0.001110	8.91	0.000125	1.2457E+14	2555.522	0.104
31	july13-1b	14/07/2013	4.31%	0.002156	4.47	0.000482	4.8229E+14	6301.040	0.257

32	july13-1c	14/07/2013	6.36%	0.001299	7.00	0.000186	1.8567E+14	3334.543	0.136
33	july13-1d	14/07/2013	4.25%	0.001709	4.99	0.000343	3.4268E+14	5017.211	0.205
34	14-07-s2	14/07/2013	12.66%	0.011488	3.32	0.003460	3.4604E+15	23439.900	0.956
35	14-07-s3	14/07/2013	17.09%	0.009022	4.35	0.002073	2.0732E+15	16658.391	0.679
36	20-07-s1	20/07/2013	11.83%	0.005624	4.59	0.001226	1.2264E+15	5897.636	0.240
37	20-07-s2	20/07/2013	13.57%	0.007439	4.27	0.001742	1.7416E+15	7451.191	0.304
38	20-07-s3	20/07/2013	12.77%	0.008238	3.94	0.002093	2.0929E+15	8422.096	0.343
39	20-07-s4	20/07/2013	14.79%	0.004735	5.59	0.000847	8.471E+14	4608.392	0.188
40	july13-2a	20/07/2013	8.82%	0.003670	4.90	0.000749	7.486E+14	4243.848	0.173
41	july13-2b	20/07/2013	16.54%	0.007407	4.72	0.001568	1.5677E+15	6946.414	0.283
42	july13-2c	20/07/2013	13.23%	0.004844	5.23	0.000927	9.2704E+14	4893.936	0.200
43	july13-2d	20/07/2013	8.83%	0.003270	5.20	0.000629	6.2897E+14	3778.724	0.154
44	24-07-s1	24/07/2013	10.73%	0.003109	5.88	0.000529	5.2906E+14	10880.092	0.444
45	24-07-s2	24/07/2013	12.97%	0.004415	5.42	0.000815	8.1451E+14	14506.288	0.591
46	24-07-s3	24/07/2013	15.85%	0.003199	7.04	0.000454	4.5444E+14	9831.373	0.401
47	24-07-s4	24/07/2013	11.67%	0.004834	4.91	0.000984	9.8392E+14	16453.815	0.671
48	july13-3a	24/07/2013	11.32%	0.003555	5.64	0.000630	6.2999E+14	12223.077	0.498
49	july13-3b	24/07/2013	15.08%	0.005430	5.27	0.001030	1.0305E+15	16968.728	0.692
50	july13-3c	24/07/2013	10.04%	0.004982	4.49	0.001110	1.1099E+15	17830.206	0.727
51	july13-3d	24/07/2013	13.89%	0.003431	6.36	0.000539	5.3932E+14	11020.248	0.449

Cálculo de Constantes

N°	Código	Fecha	c	b	a	Densidad (kg/m ³) - Andújar et al. (2017)	Gravedad (m/s ²)
1	01-03-Sa	01/03/2013	43066016	40	1.1936E+18	2500	9.81

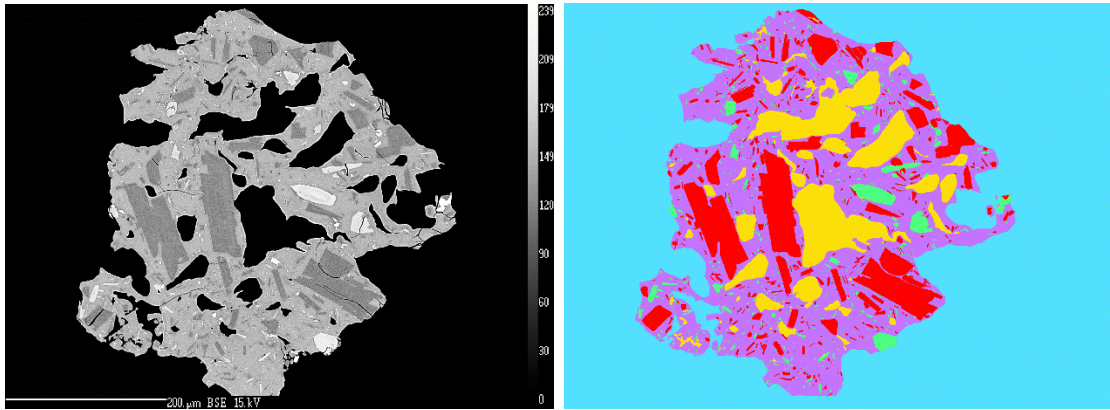
2	01-03-Sb	01/03/2013	43066016	40	1.1936E+18	2500	9.81
3	01-03-Sc	01/03/2013	43066016	40	1.1936E+18	2500	9.81
4	mars13-1a	01/03/2013	43066016	40	1.1987E+18	2500	9.81
5	mars13-1b	01/03/2013	43066016	40	1.1987E+18	2500	9.81
6	mars13-1c	01/03/2013	43066016	40	1.1987E+18	2500	9.81
7	mars13-1d	01/03/2013	43066016	40	1.1987E+18	2500	9.81
8	08-03-S2	08/03/2013	40225640	40	6.583E+18	2500	9.81
9	08-03-s3	08/03/2013	40225640	40	6.583E+18	2500	9.81
10	08-03-s4	08/03/2013	40225640	40	6.583E+18	2500	9.81
11	08-03-sa1	08/03/2013	40225640	40	6.583E+18	2500	9.81
12	mars13-2a	08/03/2013	40225640	40	6.583E+18	2500	9.81
13	mars13-2c	08/03/2013	40225640	40	6.583E+18	2500	9.81
14	mars13-2d	08/03/2013	40225640	40	6.583E+18	2500	9.81
15	mars13-3a	13/03/2013	43871744	40	3.2852E+18	2500	9.81
16	mars13-3b	13/03/2013	43871744	40	3.2852E+18	2500	9.81
17	mars13-3c	13/03/2013	43871744	40	3.2852E+18	2500	9.81
18	mars13-3d	13/03/2013	43871744	40	3.2852E+18	2500	9.81
19	14-03-Sa	14/03/2013	43871744	40	3.2851E+18	2500	9.81
20	14-03-Sb	14/03/2013	43871744	40	3.2851E+18	2500	9.81
21	14-03-Sc	14/03/2013	43871744	40	3.2851E+18	2500	9.81
22	17-03-Sa	17/03/2013	49970144	40	7.7286E+17	2500	9.81
23	17-03-Sc	17/03/2013	49970144	40	7.7286E+17	2500	9.81
24	17-03-Sd	17/03/2013	49970144	40	7.7286E+17	2500	9.81
25	mars13-4a	17/03/2013	49970144	40	7.7286E+17	2500	9.81
26	mars13-4b	17/03/2013	49970144	40	7.7286E+17	2500	9.81
27	mars13-4c	17/03/2013	49970144	40	7.7286E+17	2500	9.81
28	mars13-4d	17/03/2013	49970144	40	7.7286E+17	2500	9.81

29	14-07-s1	14/07/2013	43080800	40	1.0778E+18	2500	9.81
30	july13-1a	14/07/2013	43080800	40	1.0778E+18	2500	9.81
31	july13-1b	14/07/2013	43080800	40	1.0778E+18	2500	9.81
32	july13-1c	14/07/2013	43080800	40	1.0778E+18	2500	9.81
33	july13-1d	14/07/2013	43080800	40	1.0778E+18	2500	9.81
34	14-07-s2	14/07/2013	43080800	40	1.0778E+18	2500	9.81
35	14-07-s3	14/07/2013	43080800	40	1.0778E+18	2500	9.81
36	20-07-s1	20/07/2013	36790208	40	2.3885E+18	2500	9.81
37	20-07-s2	20/07/2013	36790208	40	2.3885E+18	2500	9.81
38	20-07-s3	20/07/2013	36790208	40	2.3885E+18	2500	9.81
39	20-07-s4	20/07/2013	36790208	40	2.3885E+18	2500	9.81
40	july13-2a	20/07/2013	36790208	40	2.3885E+18	2500	9.81
41	july13-2b	20/07/2013	36790208	40	2.3885E+18	2500	9.81
42	july13-2c	20/07/2013	36790208	40	2.3885E+18	2500	9.81
43	july13-2d	20/07/2013	36790208	40	2.3885E+18	2500	9.81
44	24-07-s1	24/07/2013	46370240	40	5.8187E+17	2500	9.81
45	24-07-s2	24/07/2013	46370240	40	5.8187E+17	2500	9.81
46	24-07-s3	24/07/2013	46370240	40	5.8187E+17	2500	9.81
47	24-07-s4	24/07/2013	46370240	40	5.8187E+17	2500	9.81
48	july13-3a	24/07/2013	46370240	40	5.8187E+17	2500	9.81
49	july13-3b	24/07/2013	46370240	40	5.8187E+17	2500	9.81
50	july13-3c	24/07/2013	46370240	40	5.8187E+17	2500	9.81
51	july13-3d	24/07/2013	46370240	40	5.8187E+17	2500	9.81

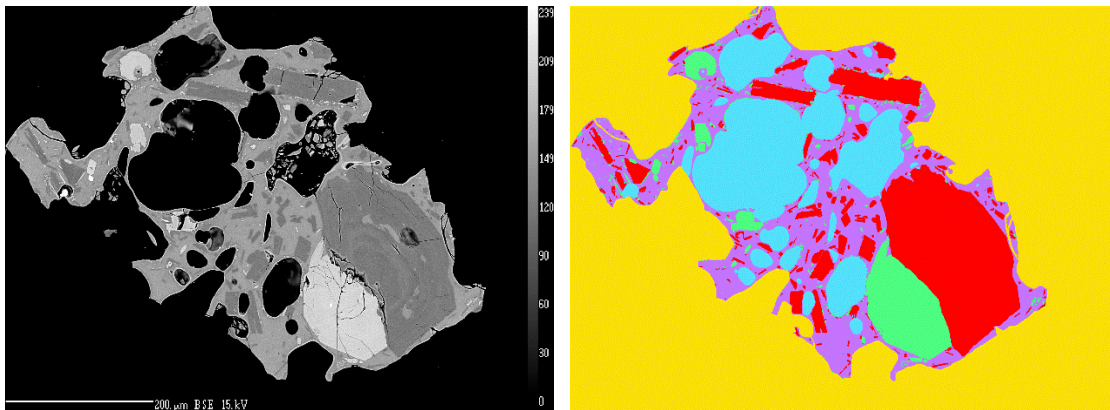
ANEXO III

Imágenes Clasificadas mediante el *plug-in* TWS

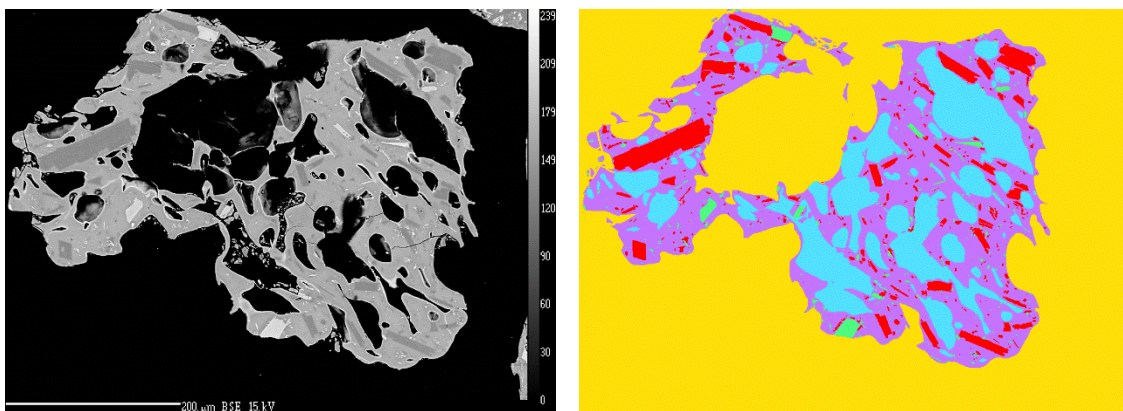
01-03-Sa



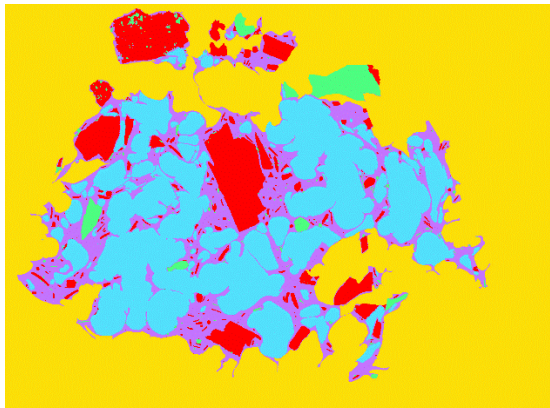
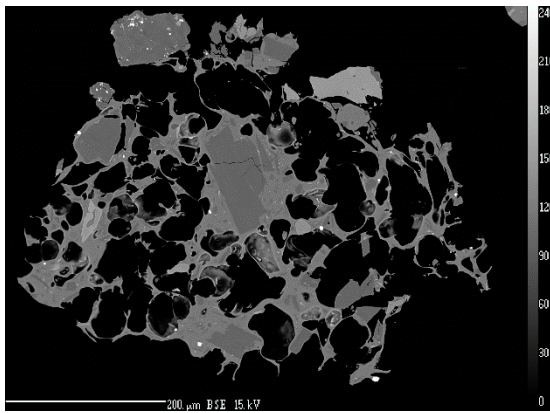
01-03-Sb



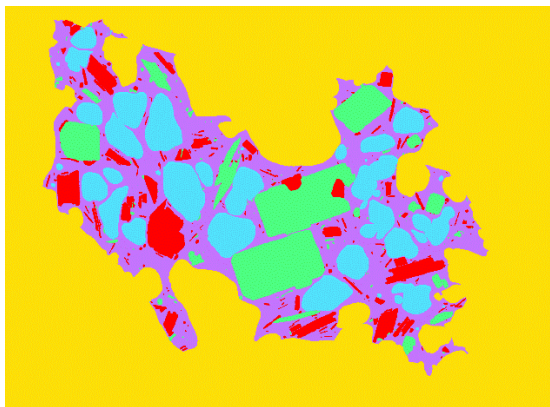
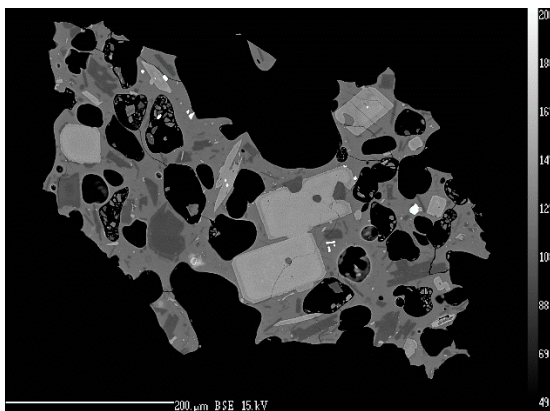
01-03-Sc



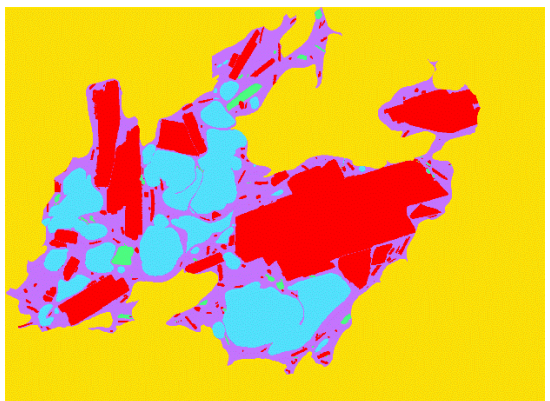
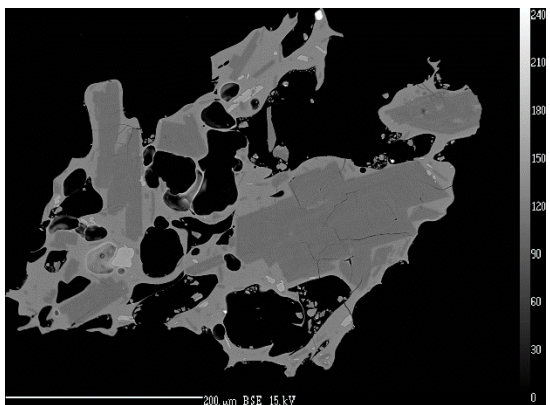
Mars13-1a



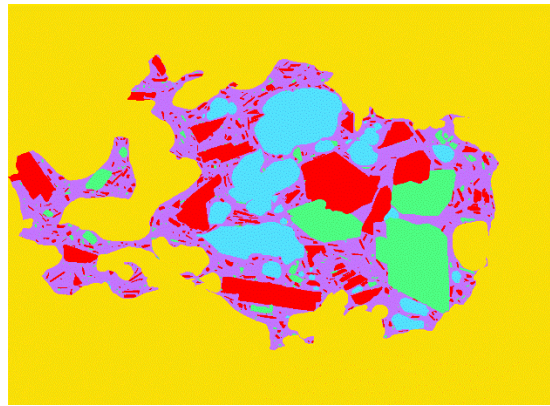
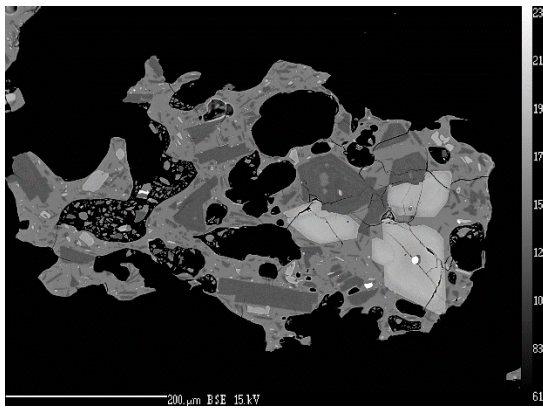
Mars13-1b



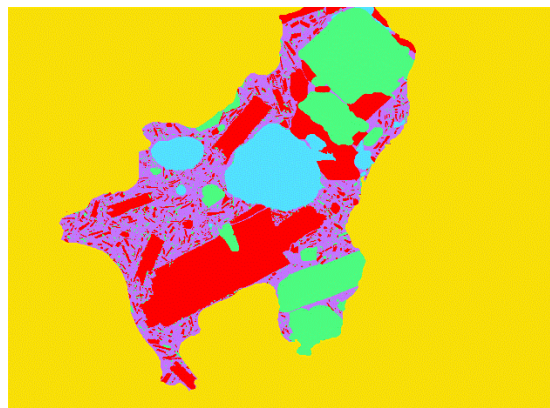
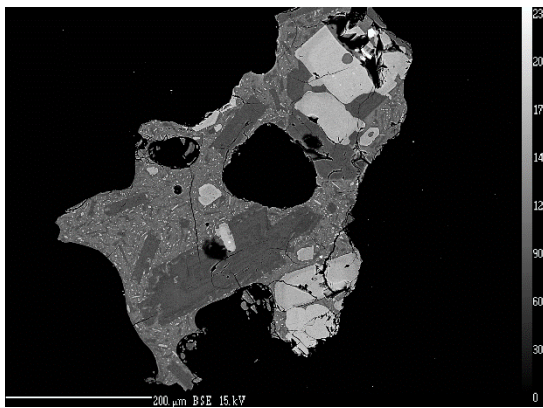
Mars13-1c



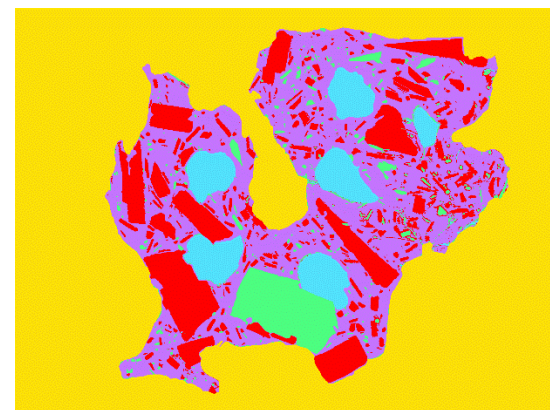
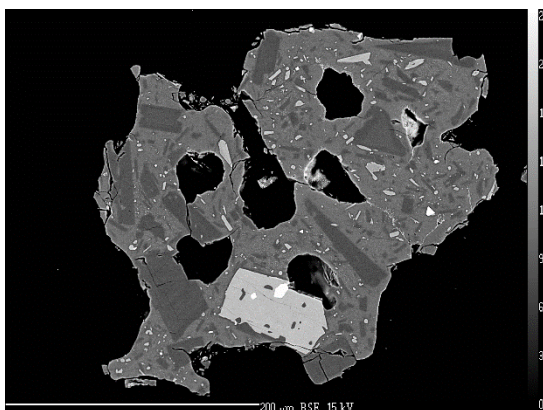
Mars13-1d



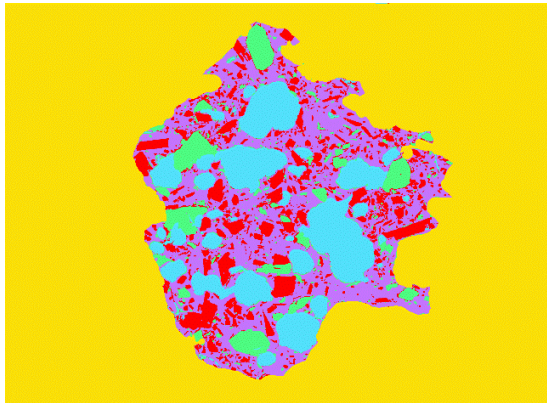
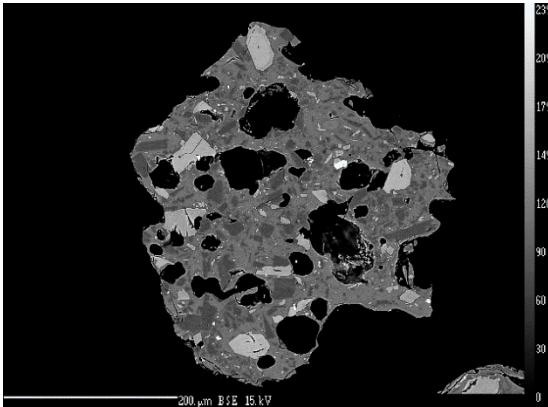
08-03-s2



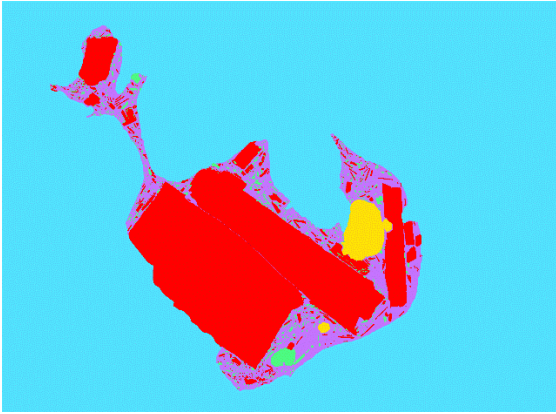
08-03-s3



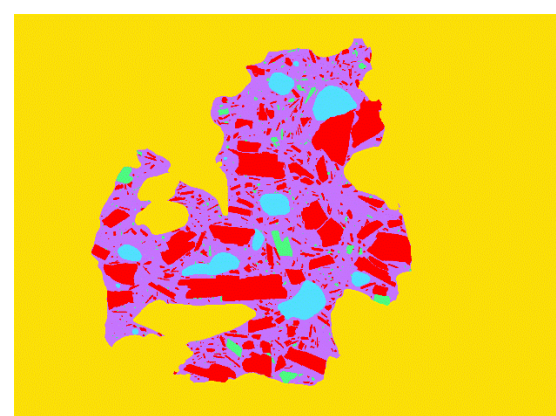
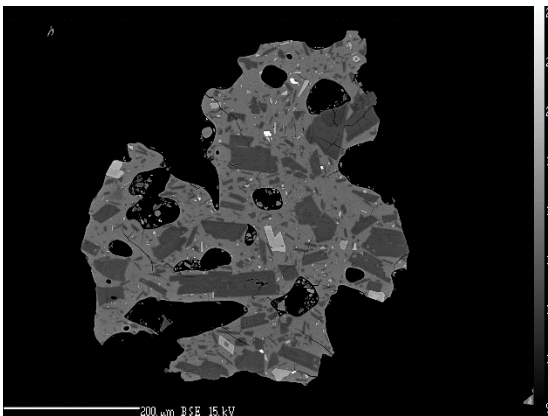
08-03-s4



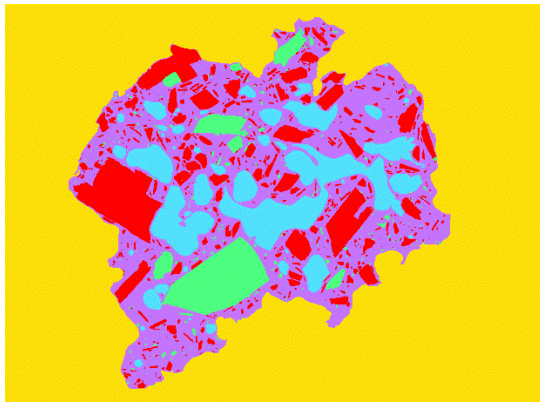
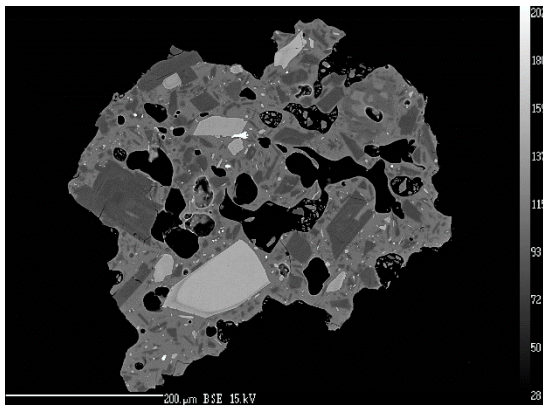
08-03-sa1



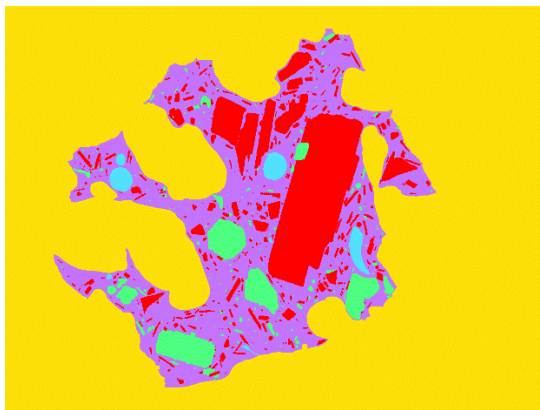
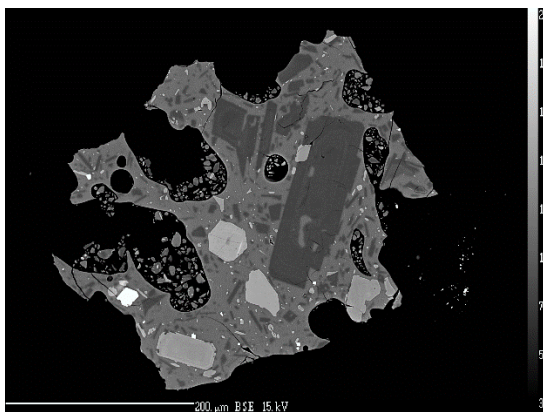
Mars13-2a



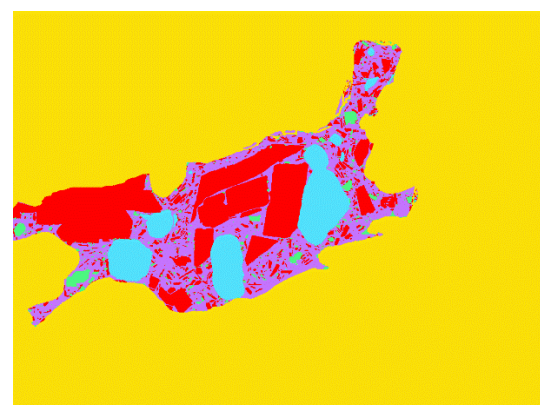
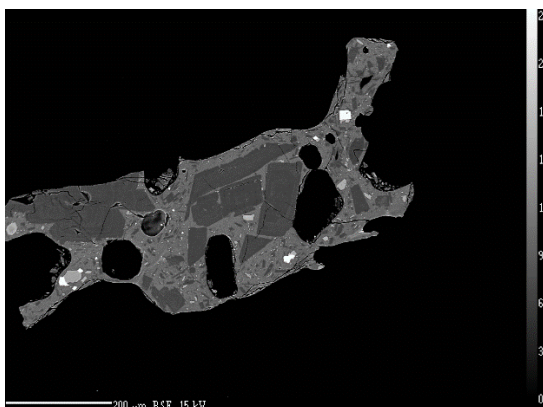
Mars13-2c



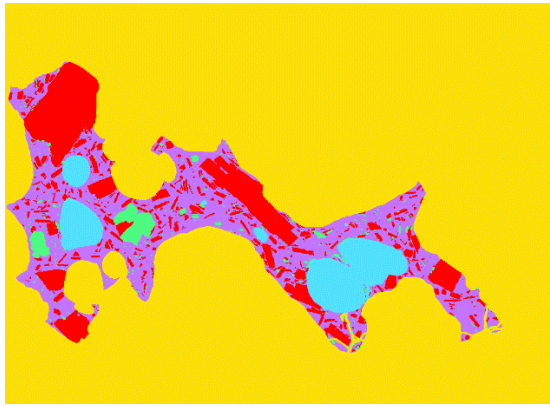
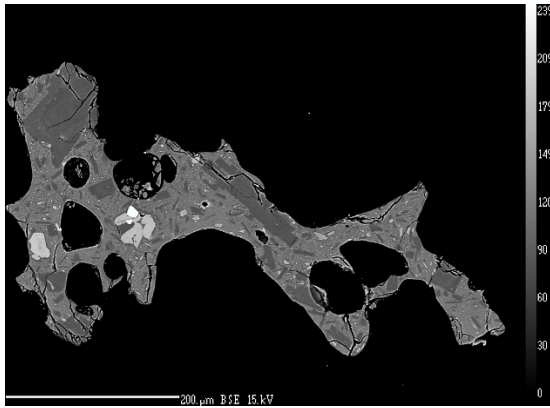
Mars13-2d



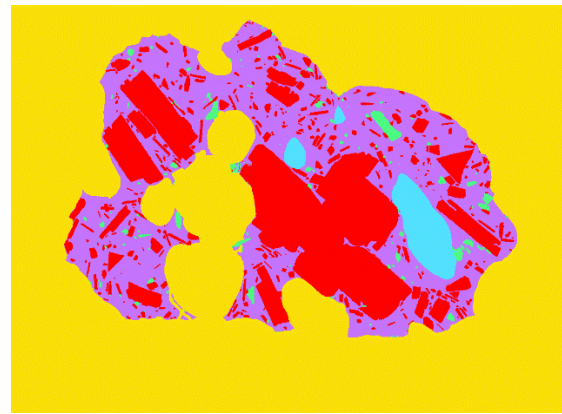
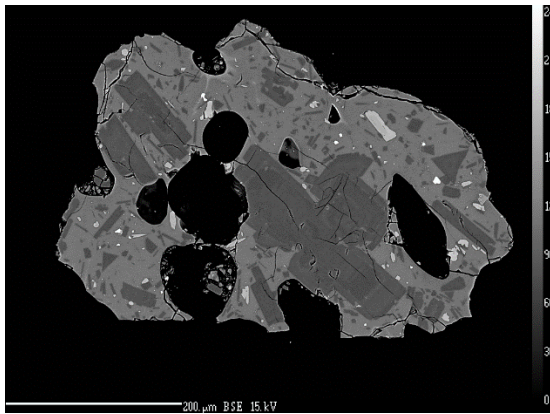
14-03-sa



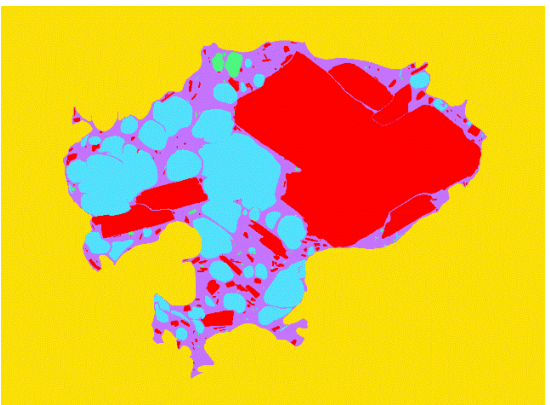
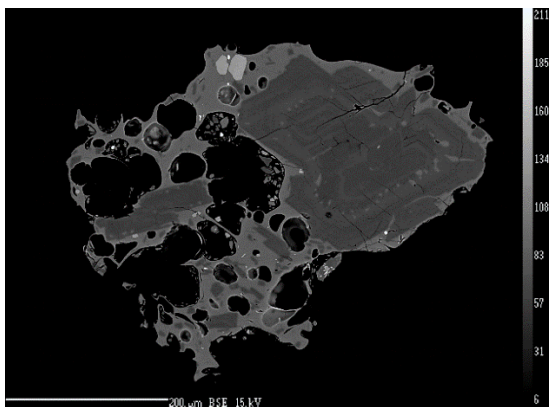
14-03-sb



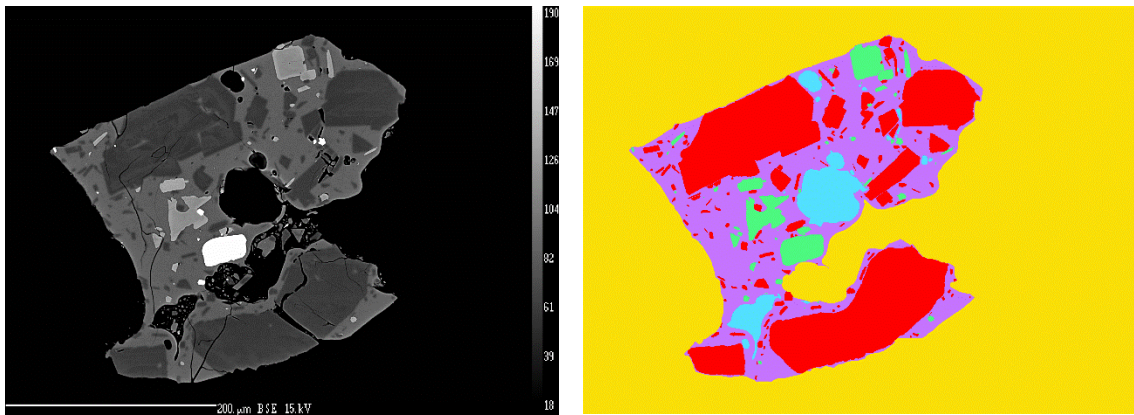
14-03-sc



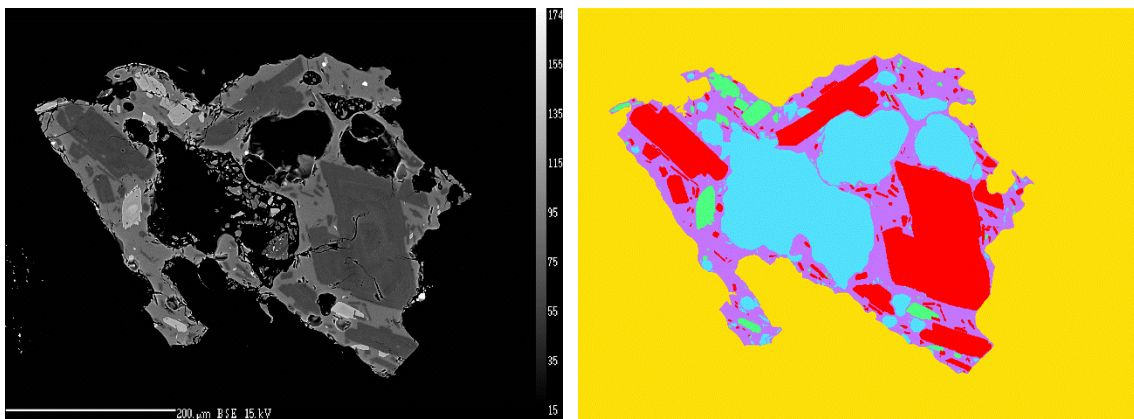
Mars13-1a



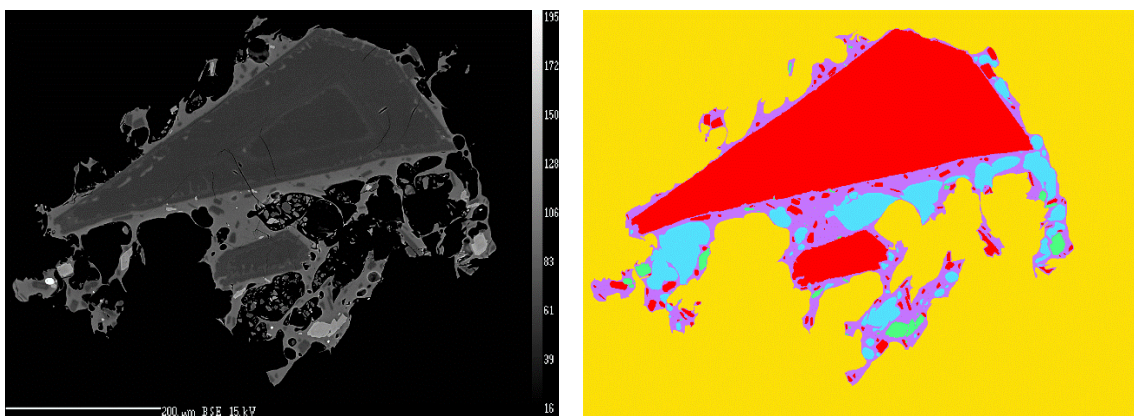
Mars13-3b



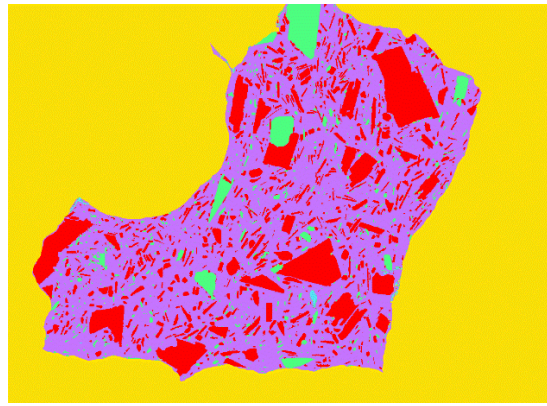
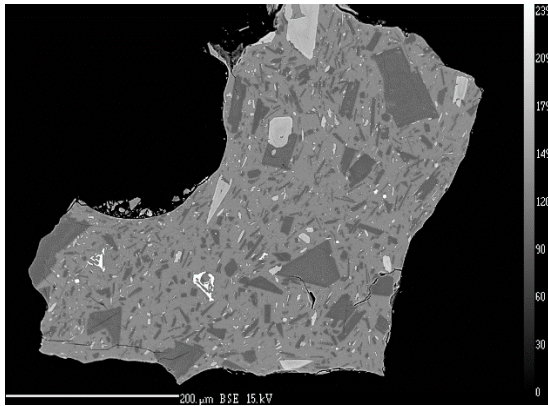
Mars13-3c



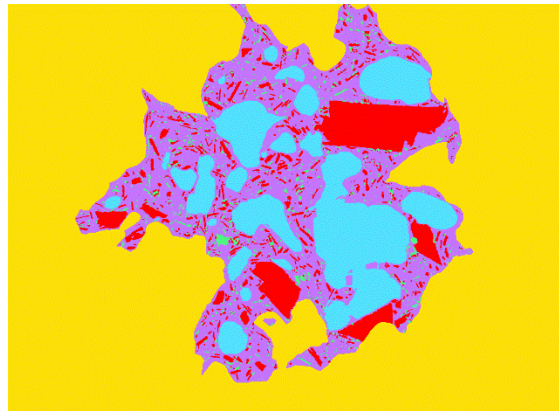
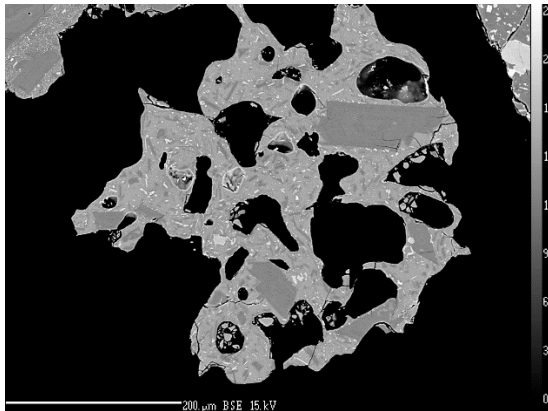
Mars13-3d



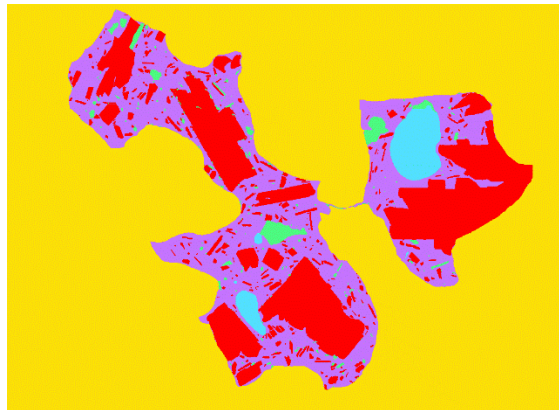
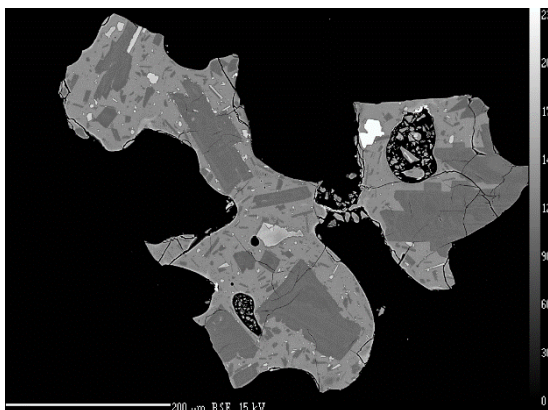
17-03-sa



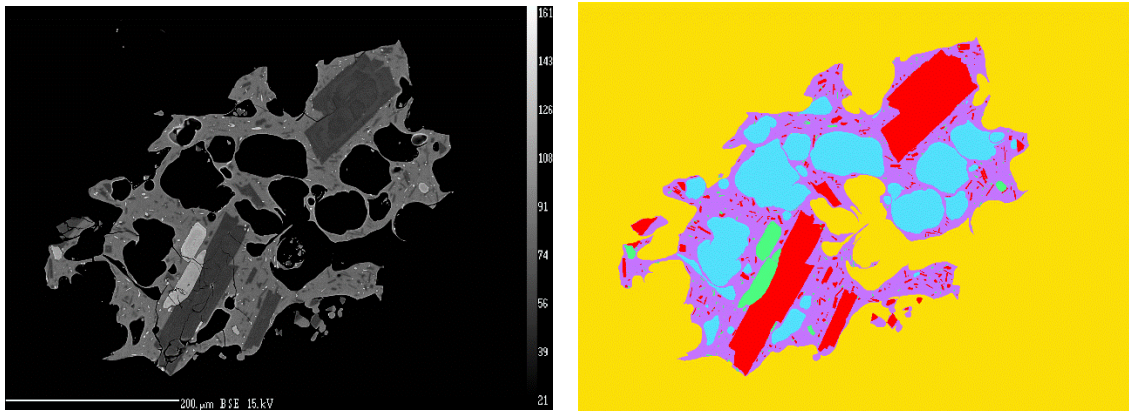
17-03-sc



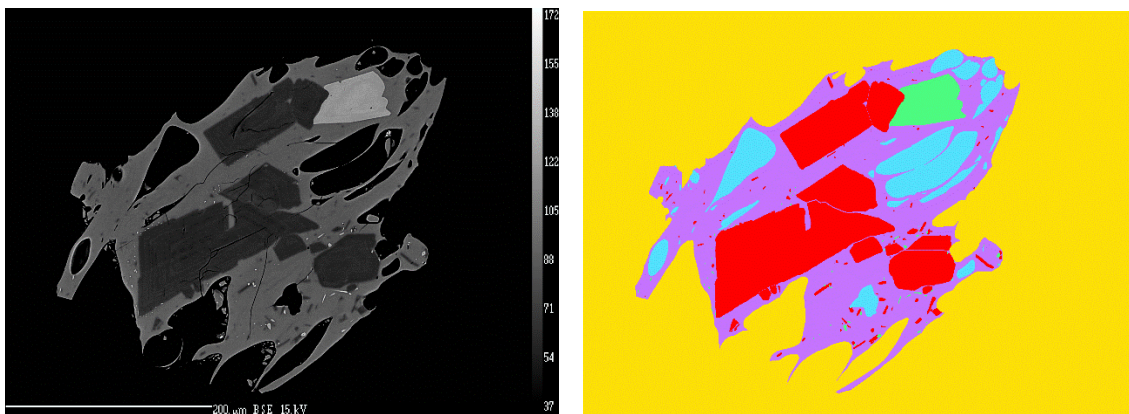
17-03-sd



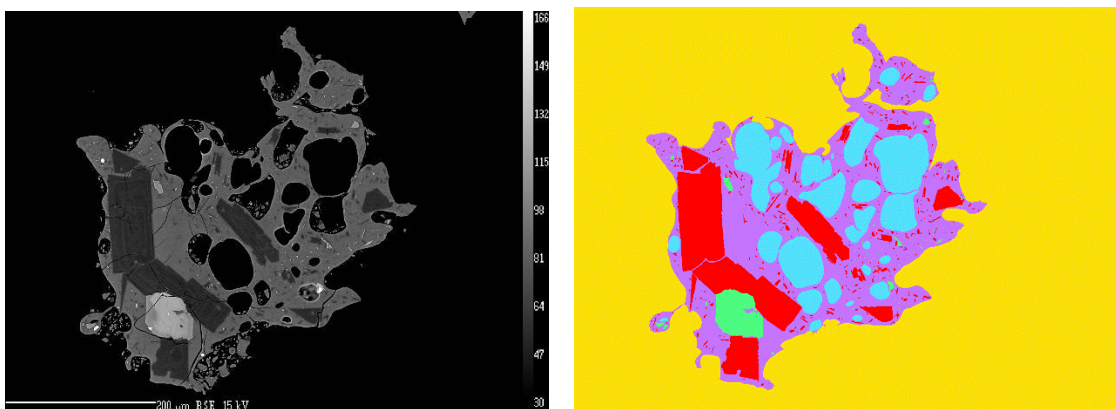
Mars13-4a



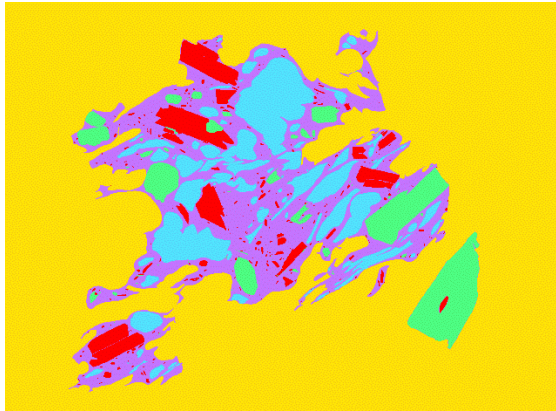
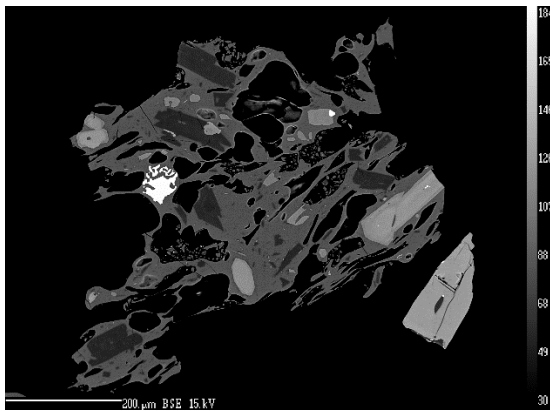
Mars13-4b



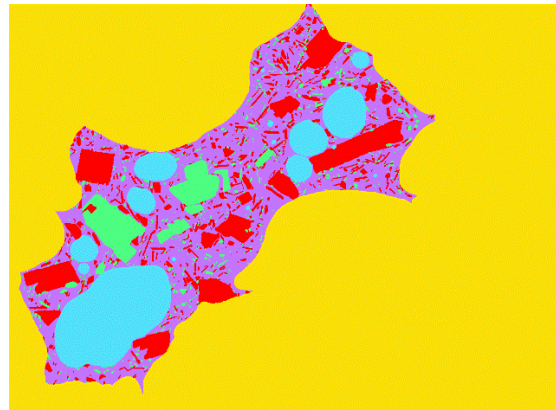
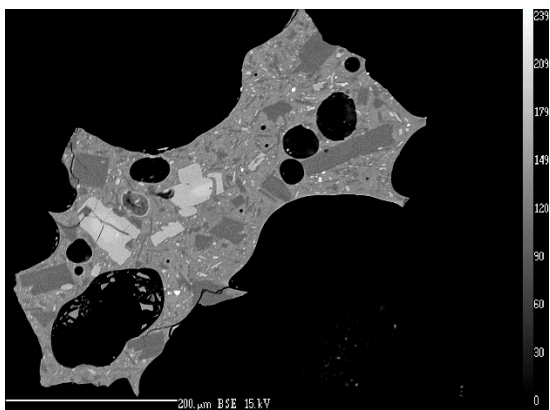
Mars13-4c



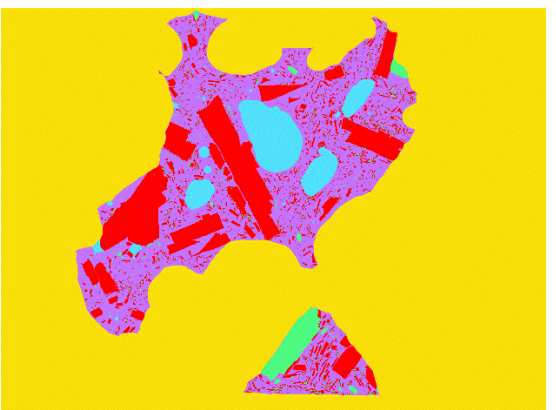
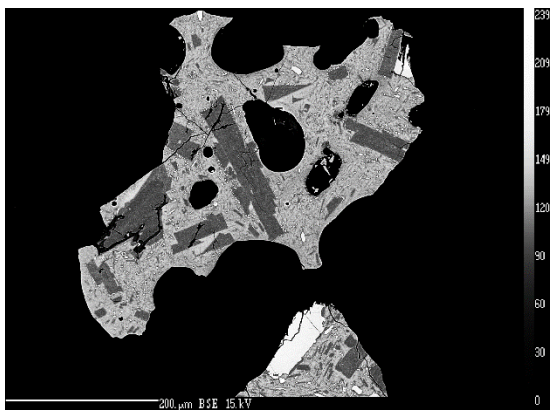
Mars13-4d



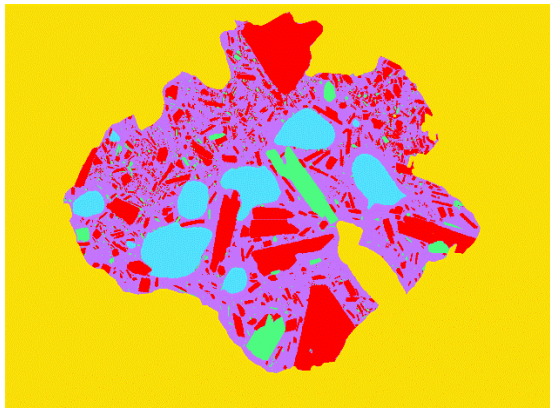
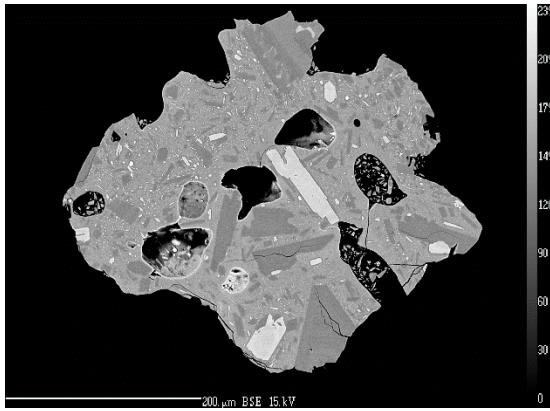
14-07-s1



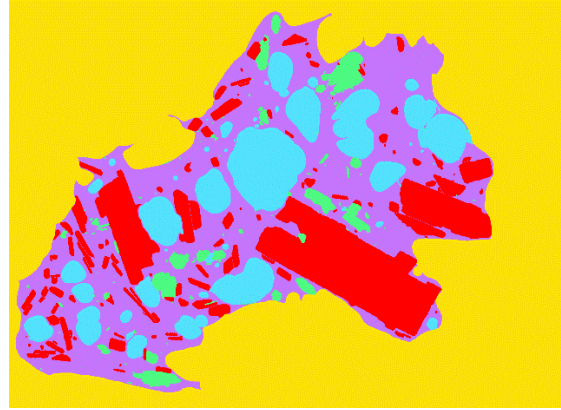
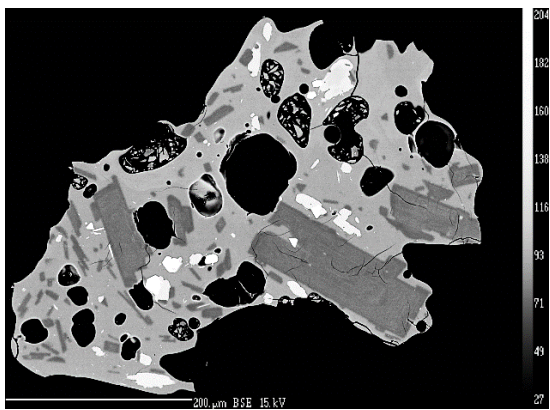
14-07-s2



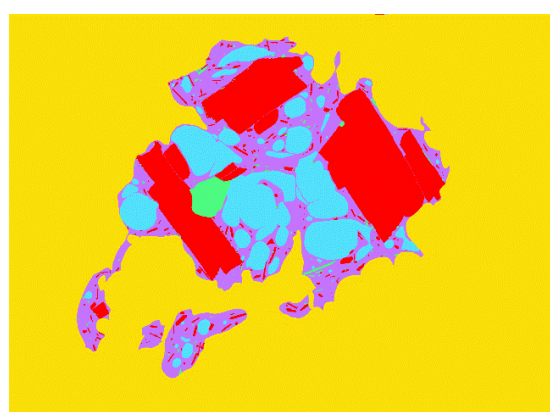
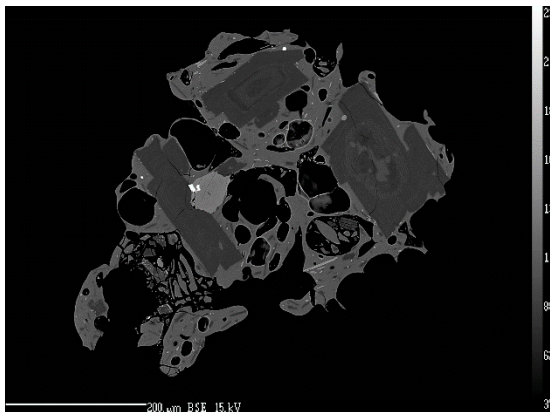
14-07-s3



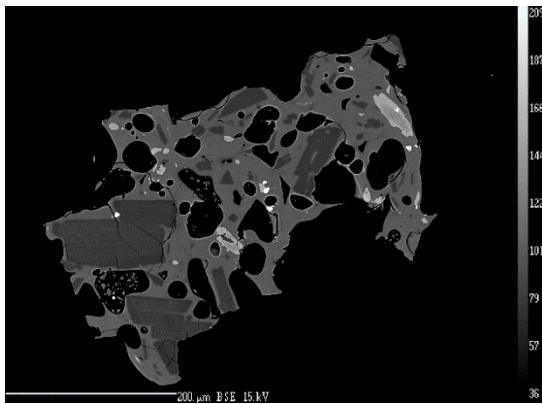
July13-1a



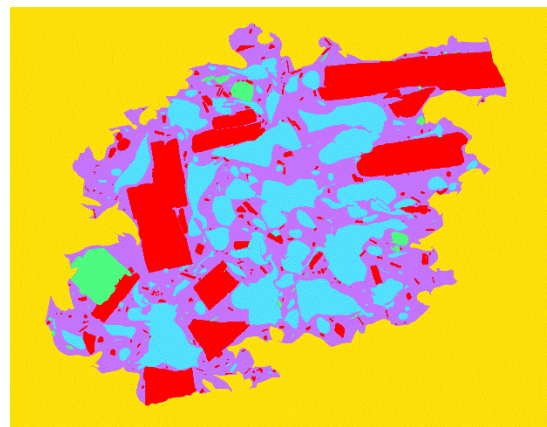
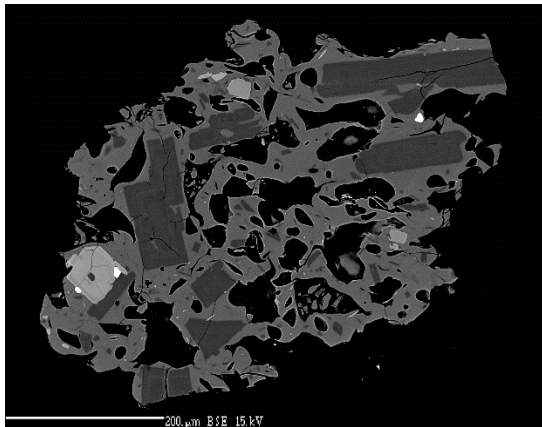
July13-1b



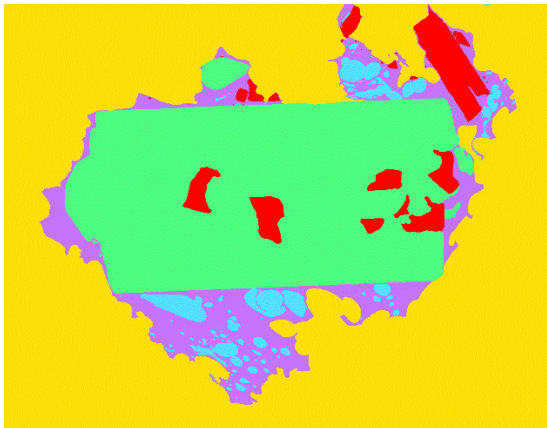
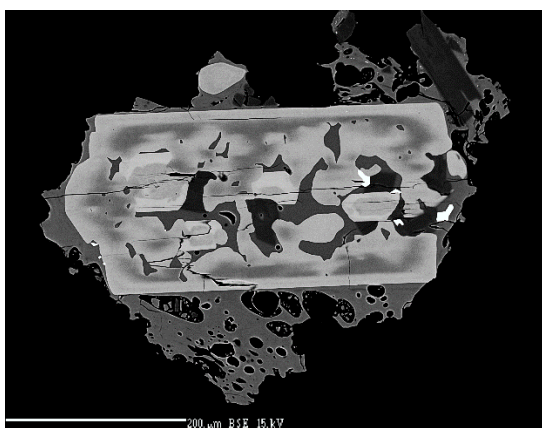
July13-1c



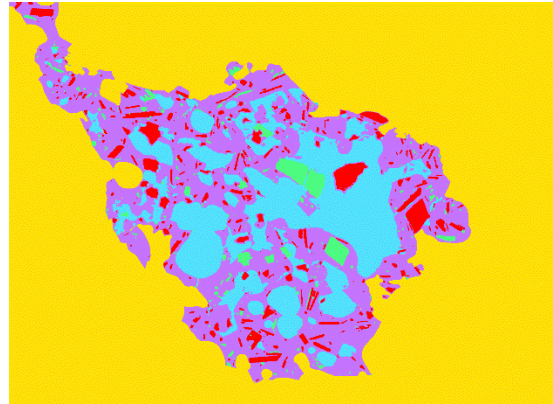
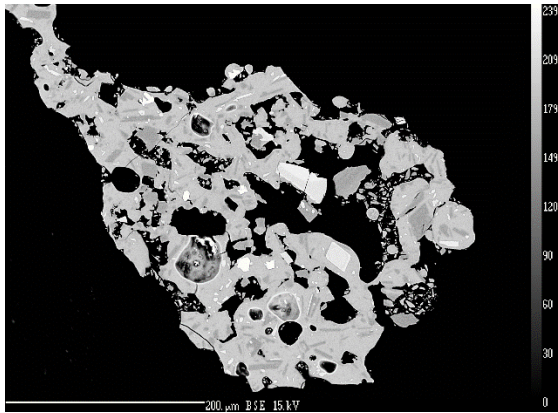
July13-1d



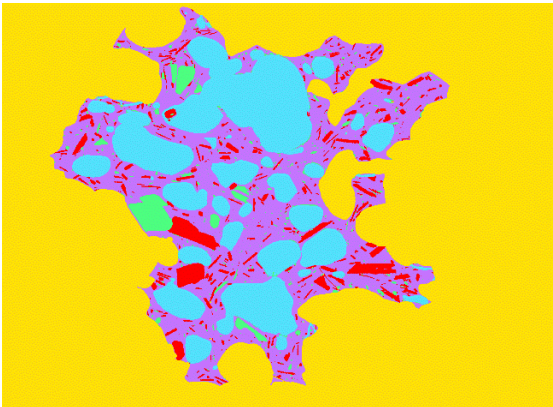
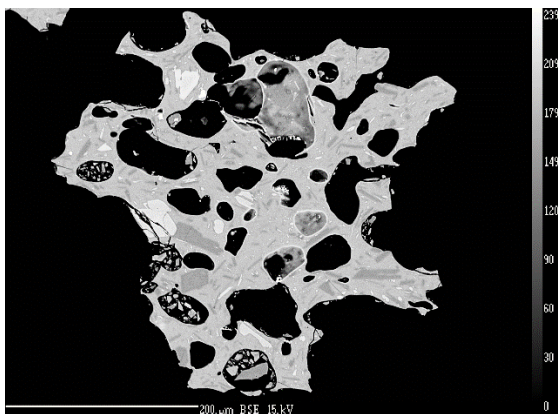
July13-1e



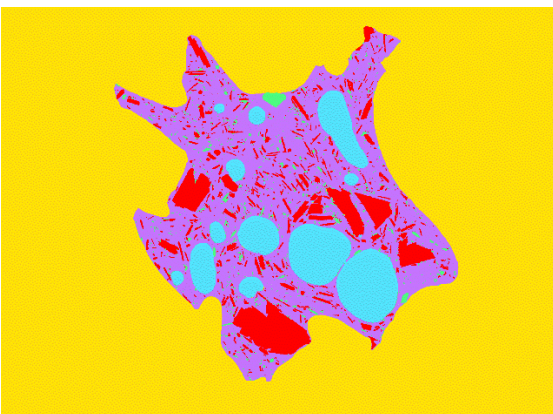
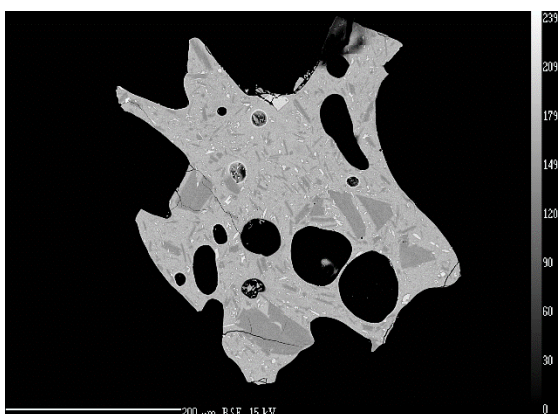
20-07-s1



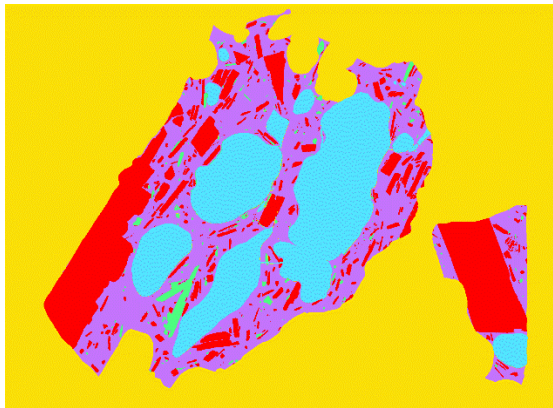
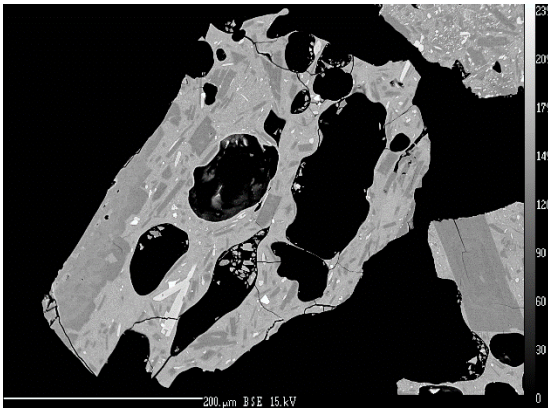
20-07-s2



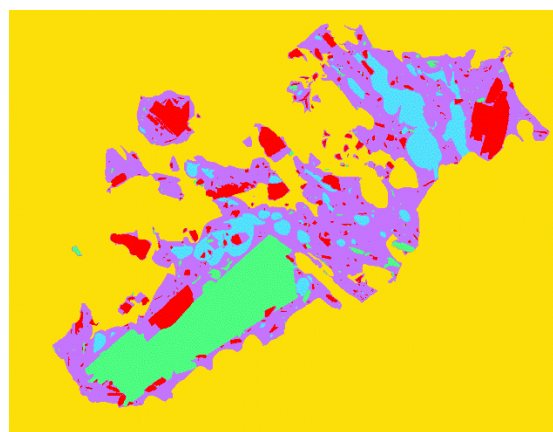
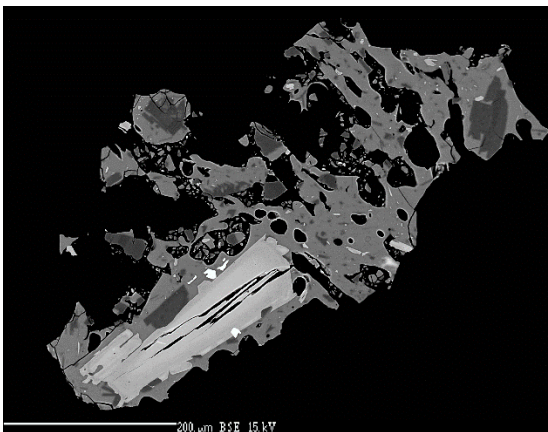
20-07-s3



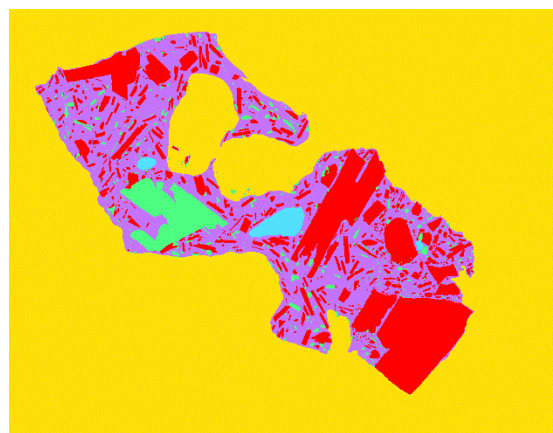
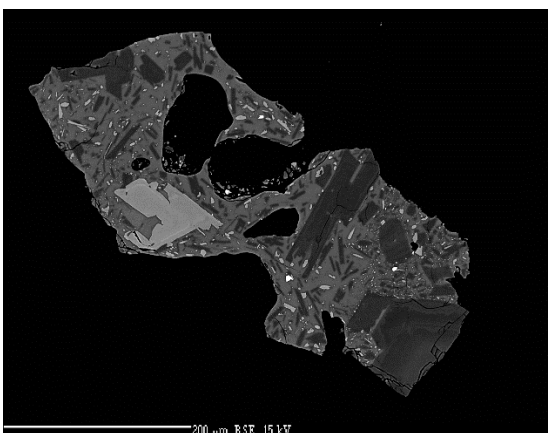
20-07-s4



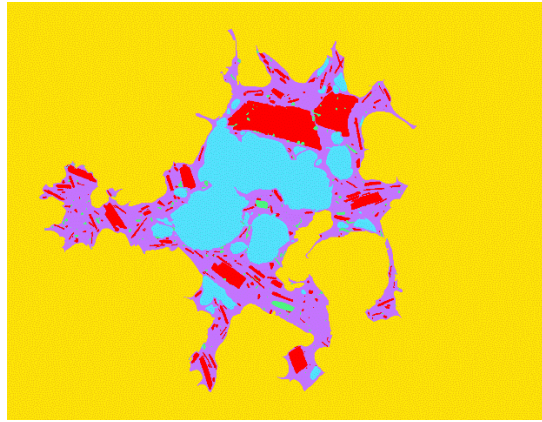
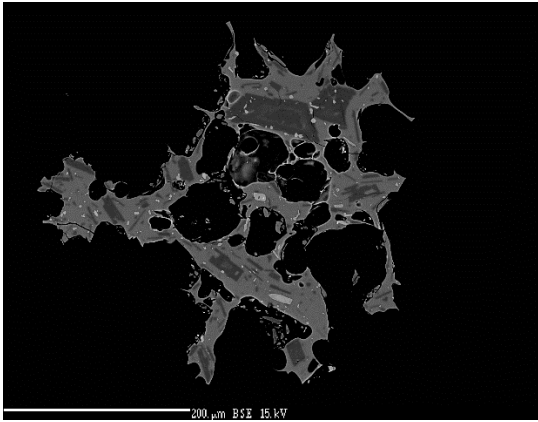
July13-2a



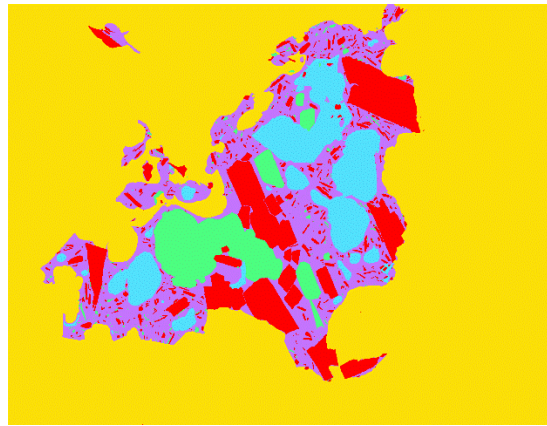
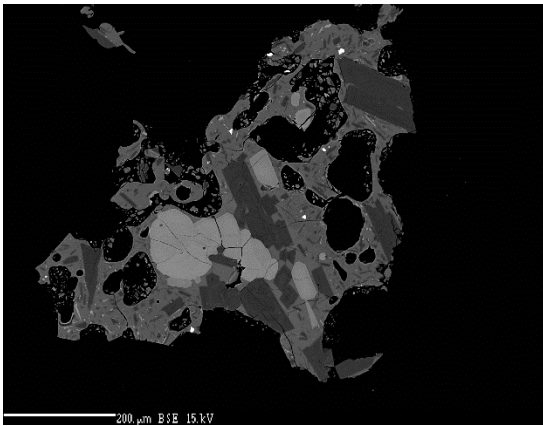
July13-2b



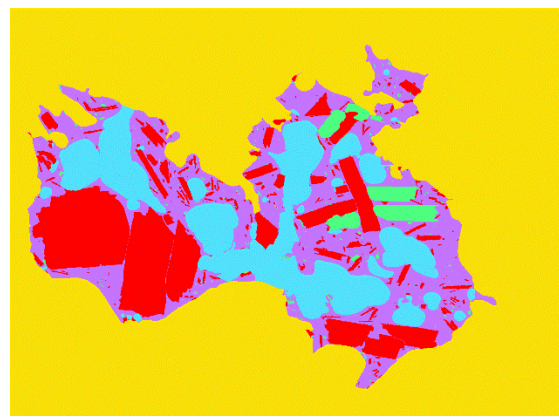
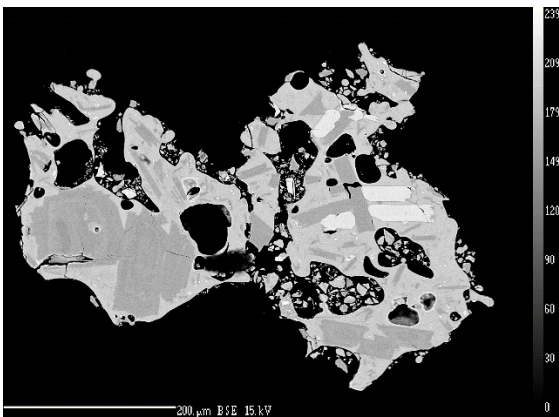
July13-2c



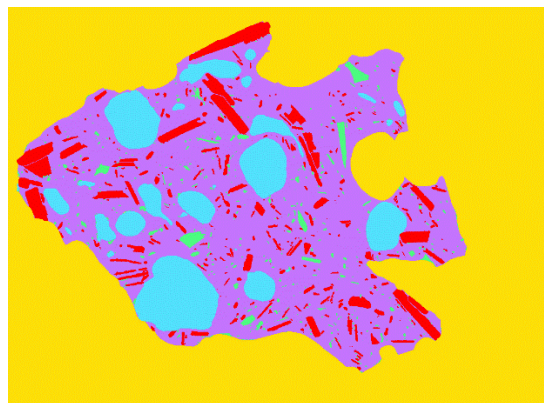
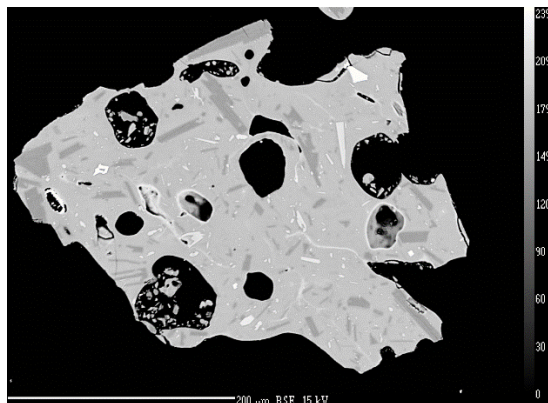
July13-2d



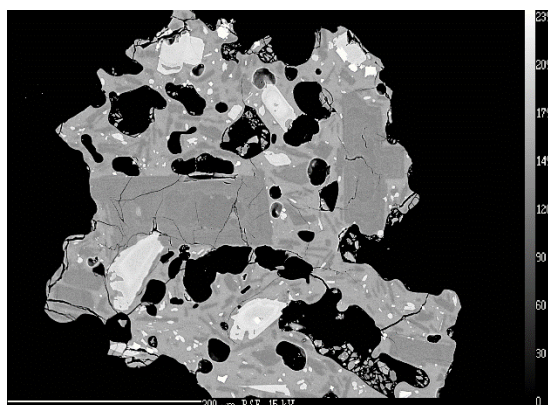
24-07-s1



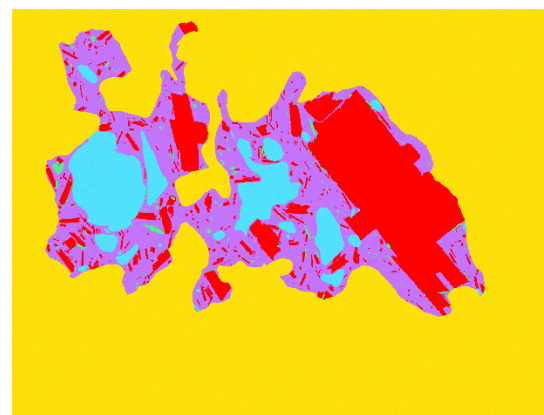
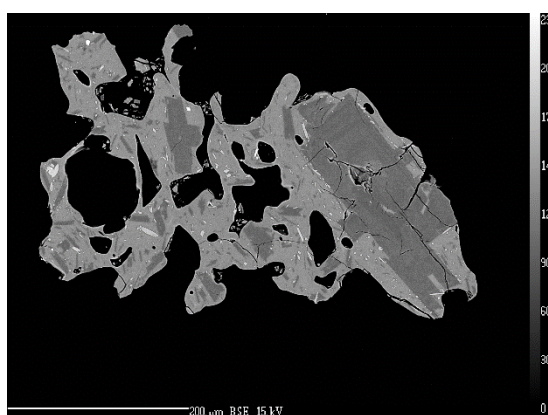
24-07-s2



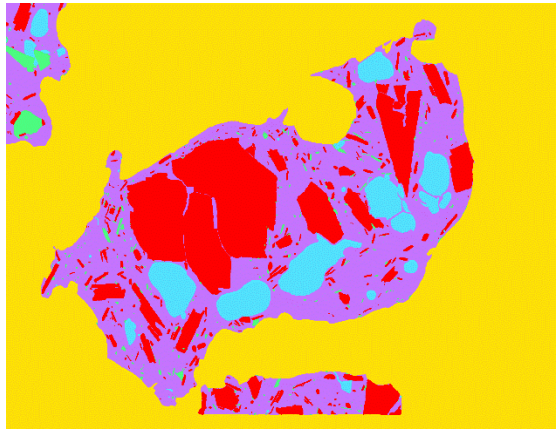
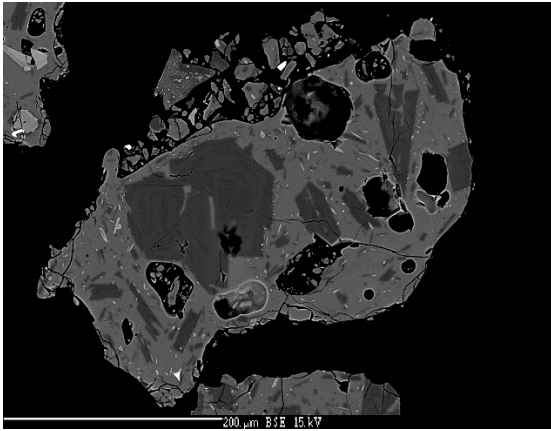
24-07-s3



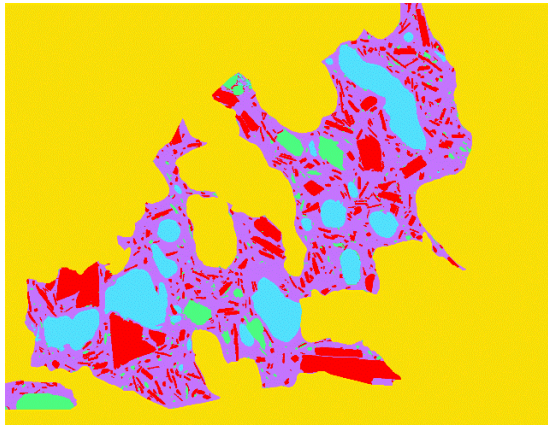
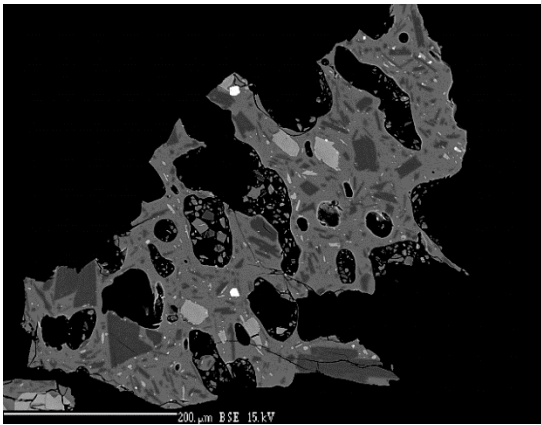
24-07-s4



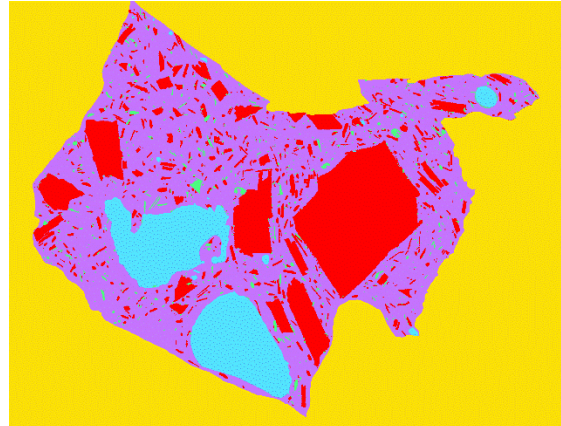
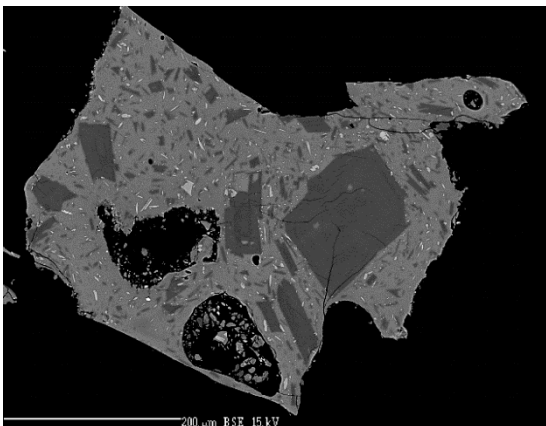
July13-3a



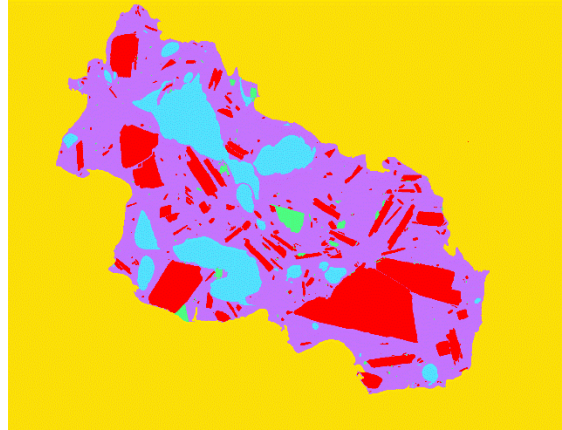
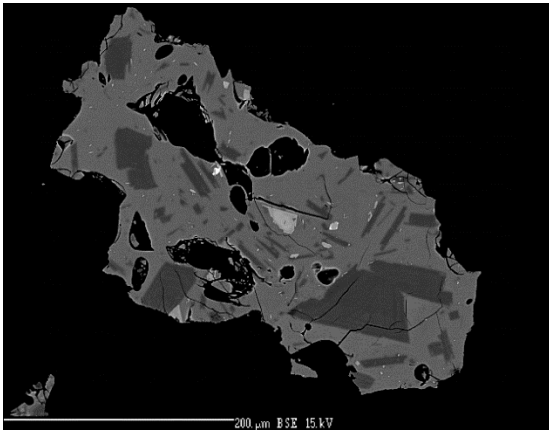
July13-3b



July13-3c



July13-3d





ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
CAMPUS POLITÉCNICO "J. RUBEN ORELLANA R."

FACULTAD DE INGENIERÍA EN GEOLOGÍA Y PETRÓLEOS

ORDEN DE EMPASTADO

De acuerdo con lo estipulado en el artículo 27 del Instructivo para la Implementación de la Unidad de Titulación en las Carreras y Programas Vigentes de la Escuela Politécnica Nacional, aprobado por el Consejo Politécnico el 29 de abril de 2015, se autoriza la impresión y encuadernación final del Trabajo de Titulación presentado por el(la) señor(ita):

PAZOS MARIN GABRIELA ALEXANDRA

Fecha de autorización: Quito DM., 19 de mayo de 2022



Firmado electrónicamente por:
**JOHNNY ROBINSON
ZAMBRANO CARRANZA**

Dr. Johnny Zambrano C.
DECANO