

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLOGÍA Y PETRÓLEOS

**ESTUDIO GRANULOMÉTRICO Y COMPONENTES JUVENILES DE
LOS DEPÓSITOS DE LAHARES PRIMARIOS EN EL FLANCO N
DEL VOLCÁN COTOPAXI**

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

KELLY DANIELA YANCHALIQVIN ENRÍQUEZ

kelly.enriquez@epn.edu.ec

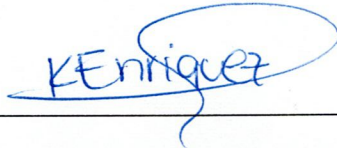
DIRECTOR: PhD. SANTIAGO DANIEL ANDRADE VARELA

dandrade@igepn.edu.ec

DMQ, febrero 2022

CERTIFICACIONES

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



KELLY DANIELA YANCHALIQUN ENRÍQUEZ

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por KELLY DANIELA YANCHALIQUN ENRÍQUEZ, bajo mi supervisión.



PhD. SANTIAGO DANIEL ANDRADE VARELA

DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

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

KELLY DANIELA YANCHALIKUIN ENRÍQUEZ

PhD. SANTIAGO DANIEL ANDRADE VARELA

DEDICATORIA

A mi gran amor, mi hijo, Ian Gael has sido el motivo para no darme por vencida y el impulso que si comienzo algo debo terminarlo.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por ayudarme en todo este proceso y darme las fuerzas de seguir cada uno de mis escalones que voy dando, porque no es una carrera de rapidez sino de llegar más lejos, por cuidarme y bendecirme todos mis pasos.

A mi hijo por su sonrisa cada día al despertarse y su amor incondicional, por ese humor, por cada vez que me llamas mamá y por esperarme cada día en la ventana esperando a que llegue.

A mi Mamá que su lucha, perseverancia y consejos. Por la manera de ver la vida y la manera que ha sacado adelante tres mujeres inteligentes y de grandes corazones. Por ser el ejemplo de mujer, madre e hija que yo quiero llegar a ser y sobre todo para ayudarme a cumplir este sueño y acolitarme a ser mamá también. Por cuidar a Gael y poder cada día salir tranquila sabiendo que mi bebé está en buenas manos.

A mis hermanas Salomé y Sofia por ser mis primeras amigas, mis cómplices y mis jueces, por ser mis compañeras de vida que siempre seremos un triángulo, sin alguna no estamos completas. Por darme los mejores momentos y ser las mejores tías consentidoras.

A mi tutor de proyecto, el Dr. Daniel Andrade, por la paciencia y la confianza brindada, para el desarrollo el presente estudio.

A mis grandes amigas Mayi y Gigi, por su amistad incondicional y su apoyo en cada momento, por ser las personas que cada momento yo trataba de hundirme, ellas con su forma de ser me hacían salir a flote. Por ser tan diferentes que no esperan acoplarse en un lugar.

A mi Jannis por ser tan amable y comprensible, siendo ese equipo de trabajo para animarnos mutuamente que lo vamos a lograr y por su risa que se la reconoce a 10km.

Al equipo del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional por su amabilidad, por compartir sus conocimientos, en especial la Anahí por brindarme su opinión y siempre que necesitaba consultarle algo, ella con una sonrisa me ayudaba.

A los docentes de la Facultad de Geología de la Escuela Politécnica Nacional, por sus enseñanzas su paciencia y por enseñarnos el amor a la geología y son una inspiración para la vida profesional. Especialmente a la Dra. Ana Cabero por ser mi tutora académica toda mi carrera y además por seguir mi carrera desde el primer semestre, además por los consejos que me dio. A la Ing. Alexandra Orozco por ser ese excelente ser humano y

profesional, gracias me hizo confiar en mí. También al Dr. Pedro Reyes por brindar sus conocimientos, por sus consejos y por estar siempre ayudando a sus estudiantes.

A mi mejor amiga Kony por ser la alcahueta perfecta, y por enseñarnos lo hermoso que es tener una amistad duradera, gracias por secar mis lágrimas cuando ya no podía más, también gracias por darme a mi Polita y mi príncipe azul.

A la Ing. Gaby del IIGE, por sus enseñanzas, por su apoyo, por creer en mí hasta más de lo que yo mismo creí.

A Carlos y Stalin que en tan poco tiempo me ayudan, me apoyan, por dejarme ser tal como soy sin asustarse. Especialmente por ser acólite a todos los planes que se me ocurrían hacer.

A todos los que dejaron una semilla de bondad, alegría y empatía para que a todo se le vea el lado positivo.

Con amor

Kelly

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	VI
RESUMEN	VIII
ABSTRACT.....	IX
CAPITULO I.....	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivo general.....	1
1.2. Objetivos específicos	1
1.3. Alcance	2
CAPITULO II.....	3
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Volcán Cotopaxi.....	3
2.2. Lahares.....	4
2.3. Depósitos del Lahar de 1877.....	7
2.4. Granulometría	9
CAPITULO III.....	11
3. METODOLOGÍA	11
3.1. Análisis Granulométrico	11
Procedimiento para el tamizado manual	12
Procedimiento para análisis de datos en SFT	14
3.2. Análisis de componentes	17
Limpieza de las muestras	17
Análisis de componentes	18
CAPITULO IV.....	23
4. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	23
4.1. Resultados.....	23
Granulometría.....	23
Análisis de componentes	29
4.2. Conclusiones	34
4.3. Recomendaciones	35
CAPITULO V.....	36
5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36

ANEXOS	37
ANEXO I: TABLA DE UBICACIONES EN COORDENADAS UTM	37
ANEXO II: TABLA DE DATOS GRANULOMETRICOS	38

RESUMEN

El Cotopaxi se caracteriza por ser uno de los volcanes más peligrosos del Ecuador debido a su historia eruptiva, el cuál en la actualidad se encuentra en una nueva fase eruptiva con la emisión de ceniza y gases. Se conoce que su último gran evento eruptivo fue el 26 de junio de 1877 que, como resultado presentó lluvia de cenizas, flujos piroclásticos y lahares, cuyos depósitos se encuentra en el drenaje del flanco N del volcán. El presente trabajo de estudio se centra en la caracterización de estos depósitos de lahares primarios. La metodología empleada se fundamenta en el estudio granulométrico y análisis de componentes juveniles. Análisis granulométricos muestra que el depósito se clasifica como un flujo de escombros no cohesivos, lo que implica un muy mal sorteo en sus sedimentos. En el análisis de componentes juveniles los porcentajes observados fueron de 23 a 48% en una fracción de 500-1000um. Los fragmentos juveniles fueron definidos a partir de una muestra de flujo piroclástico correspondiente a la misma erupción. También, se observa una tendencia creciente de componentes juveniles que va en dirección N a NE del flanco del volcán dentro de los depósitos del lahar. Con los resultados obtenidos aportan en un avance de la caracterización del lahar respecto a estudios anteriores. Además, ayudarían con la caracterización más específica del lahar y a modelamientos a futuros lahares.

PALABRAS CLAVE: Cotopaxi, erupción de 1877, lahar primario, flujo de escombros, granulometría, componentes juveniles.

ABSTRACT

Cotopaxi is characterized as one of the most dangerous volcanoes in Ecuador due to its eruptive history, which is currently in a new eruptive phase with the emission of ash and gases. It is known that its last major eruptive event was on June 26, 1877, which, as a result, presented ash rain, pyroclastic flows, and lahars, whose deposits are in the drainage of the N flank of the volcano. The present study work focuses on the characterization of these primary lahar deposits. The methodology used is based on the granulometric study and analysis of juvenile components. Granulometric analysis shows that the deposit is classified as a non-cohesive debris flow, which implies a very bad draw in its sediments. In the analysis of juvenile components, the percentages observed were from 23 to 48% in a fraction of 500-1000um. Juvenile fragments were defined from a pyroclastic flow sample corresponding to the same eruption. Also, an increasing trend of juvenile components is observed that goes from N to NE of the flank of the volcano within the lahar deposits. With the results obtained, they contribute to an advance in the characterization of the lahar compared to previous studies. In addition, they would help with the more specific characterization of the lahar and modeling of future lahars.

KEYWORDS: Cotopaxi, 1877 eruption, primary lahar, debris flow, granulometry, juvenile components.

CAPITULO I

1. INTRODUCCIÓN

Este estudio se centrará en la granulometría y análisis de componentes juveniles de los depósitos de lahares primarios en el flanco N del volcán Cotopaxi, exactamente el lahar primario de 1877. En el ámbito geológico, el interés de las características granulométricas y el contenido de los componentes juveniles que cuenta cada muestra y así determinar una variación a lo largo del lahar, cartografiado en trabajos previamente escritos. La metodología consto dos fases: uno fue el trabajo de campo donde se verifico lo que en estudios anteriores describían acerca del lahar primario, tomando muestras en el lahar; y el trabajo de laboratorio donde se basó en el uso de tamices y binoculares. Teniendo como objetivo analizar y describir las variaciones observadas mediante características granulométricas y de componentes juveniles y así aportar con datos adicionales e importantes acerca del lahar.

1.1. Objetivo general

Aportar al conocimiento geológico del volcán Cotopaxi, mediante el estudio del lahar de 1877, localizado en el flanco norte de dicho volcán, por medio de la caracterización del depósito, atreves del análisis granulométrico y de componentes juveniles, de esta manera se busca contribuir con datos relevantes sobre este lahar. Que permitirán colaborar en la elaboración de futuros mapas de peligro del volcán Cotopaxi.

1.2. Objetivos específicos

- Obtener 20 muestras en sectores específicos que forman parte del lahar de 1877.
- Realizar el análisis granulométrico, mediante el tamizado manual de las 20 muestras obtenidas del lahar del volcán Cotopaxi del año 1877.
- Realizar el análisis de componentes juveniles en el rango 500 - 1000um de tamaño de las 20 muestras.
- Analizar y describir la variación granulométrica y componentes juveniles observada a lo largo del flanco norte del volcán.

- Realizar un escrito en el que se reúne toda la información obtenida en el presente estudio.

1.3. Alcance

El estudio fue concentrado en los depósitos de lahares primarios correspondientes a la erupción del 26 de junio de 1877 del volcán Cotopaxi, los cuales han sido cartografiados en 2D a una escala 1:5000 en estudios precedentes. Las muestras fueron tomadas en las planicies que se encuentran al pie de los flancos norte y oriental del volcán. Se recolectaron 20 muestras representativas de las principales quebradas que conforman el drenaje norte del volcán. Los análisis granulométricos fueron realizados para tamaños de grano en un rango de -5 hasta 5 phi. Los análisis de componentes fueron realizados mediante un microscopio binocular en una fracción granulométrica adecuada, que será seleccionada luego de los análisis granulométricos.

CAPITULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Volcán Cotopaxi

El Cotopaxi es un estratovolcán activo cubierto de hielo ubicado a 60km al sureste de Quito, dentro de la Cordillera Real (Figura 1), ha sido reconocido como un volcán altamente peligroso, especialmente por su capacidad para producir lahares primarios (Andrade et al, 2022).

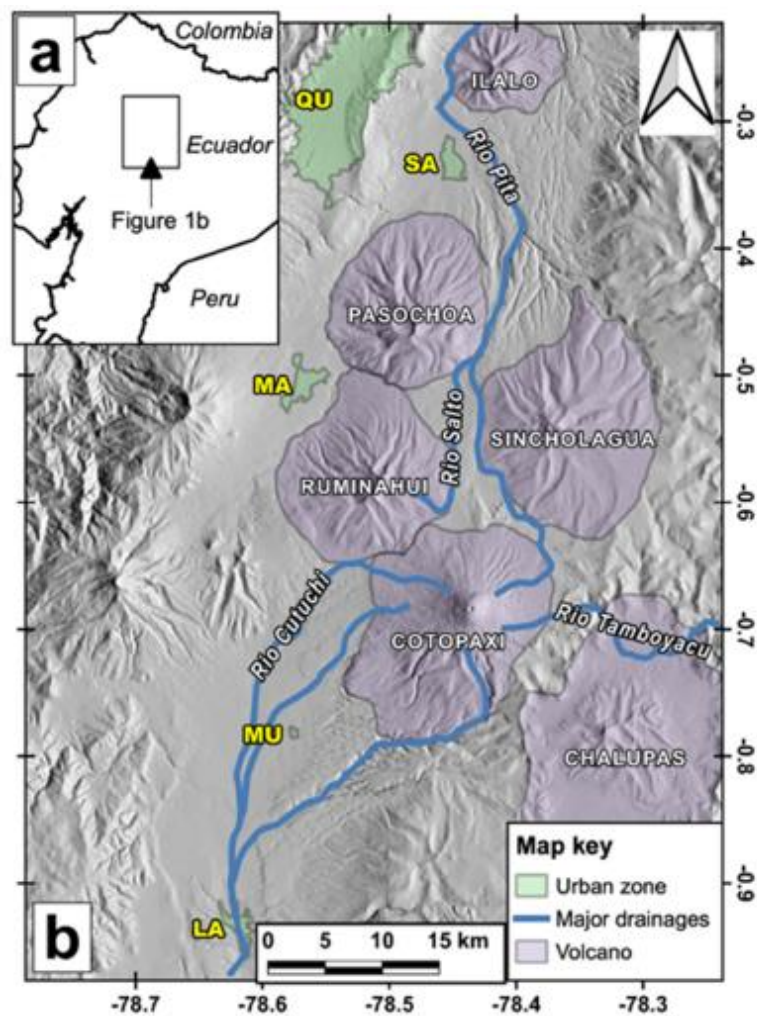


Figura 1. (a) Ubicación regional de la zona de estudio y de (b) Volcán Cotopaxi con relación a los principales drenajes y ciudades (QU: Quito; SA: Sangolquí; MA: Machachi; MU: Mulaló; LA: Latacunga) (Tomada: Andrade et al 2022).

El volcanismo del Cotopaxi presenta dos fuentes magmáticas: andesítica y riolítico con un comportamiento caracterizado por la expulsión de magma riolítico (70-75% SiO₂) y

andesítico (56-62% SiO) del mismo cráter, en poco tiempo y sin mezcla significativa (Hall y Mothes, 2007).

Desde 1532, se ha detectado cinco ciclos eruptivos: 1532 – 1534, 1742 –1744, 1766 – 1768, 1853 –1854, y 1877– 1880, con la presencia de al menos 13 erupciones (Andrade, 2005). Están asociados a fenómenos volcánicos como como: coladas de lava, flujos de lava, flujos de lodo y escombros, lluvia de cenizas, escorias y piedra pómez (Hall y Mothes, 2007).

2.2. Lahares

Los lahares son movimientos en masa que ocurren durante erupciones volcánicas o, de manera menos predecible, cuando grandes masas de agua mezcladas con sedimentos volcánicos descienden por las laderas de los volcanes, incorporando sedimentos y agua. Las fuentes de agua para formar lahares pueden ser intersticial o hidrotermal, nieve y hielo derretidos, agua retenidos subglacialmente, agua de cráter u otro lago y escorrentía de lluvia. Puesto que lahares están saturados de agua, las interacciones tanto líquidas como sólidas influyen en su comportamiento y los distinguen de otros fenómenos relacionados comunes a los volcanes, como las avalanchas de escombros y las inundaciones (Vallance e Iverson,2015).

Los lahares pueden originarse cuando existe una fuente de agua adecuada; materiales no consolidados, pendientes empinadas y relieve sustancial en la fuente; y un mecanismo de activación (Vallance e Iverson,2015).

Clasificación por su Origen

Lahares primarios (Syn-eruptivos)

Los lahares primarios o Syn-eruptivos son aquellos cuya fuente de agua se produce como consecuencia directa de una erupción volcánica, esto nos quiere decir que son más destructivos y con mayor tamaño. En el caso del Cotopaxi se forman cuando flujos piroclásticos tiene contacto con el glaciar del volcán. Como ejemplo se tiene los lahares producidos el 26 de junio de 1877, que al producir los flujos piroclásticos derramados desde el cráter dieron lugar a la formación de grandes lahares (Andrade, 2005) (Figura 2)

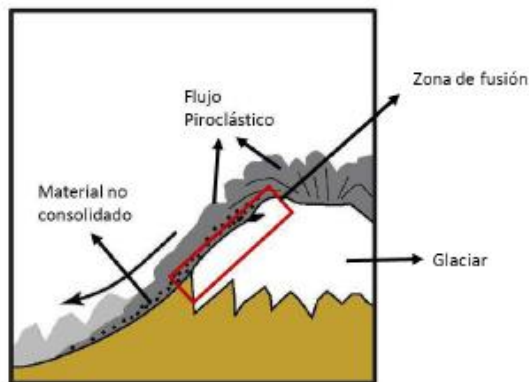


Figura 2. Gráfico de la formación de lahares primarios durante una erupción producirse fusión con el contacto del glaciar. Tomado de (Saltos,2017).

Lahares secundarios (Post-eruptivos)

Los lahares secundarios o post-eruptivos son aquellos cuya fuente de agua no están relacionados con una erupción volcánica, se forman cuando piroclastos y las cenizas son removidas con lluvias ocurridas en la zona del volcán, llegando a ser del tipo de lahar más comunes pero su magnitud es mucho menor a las que tiene un lahar primario (Andrade, 2005) (Figura 3).

En los ciclos de erupción del volcán Cotopaxi estos lahares han sido muy comunes.

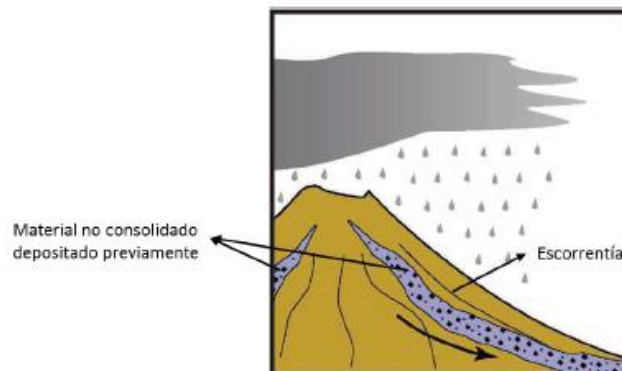


Figura 3. Gráfico de la formación de un lahar secundario durante de fuertes lluvias, cuando se removiliza el material piroclástico suelto depositado previamente. Tomado de (Saltos, 2017).

Tipos de Flujo

Los lahares pueden variar según su comportamiento respecto con el tiempo y la distancia aguas abajo, teniendo así principalmente 2 tipos: Flujo de escombros (Figura 4, A) y flujos hiperconcentrados (Figura 4,C) como se lo indica en la Tabla 1.

Tabla 1. Características de los flujos de escombros y los flujos hiperconcentrados.
Tomado de (Vallance e Iverson,2015).

Características	Flujos de escombros	Flujos hiperconcentrados
Volumen de Sedimento	>60%	20-60%
Distribución de tamaño de sedimento	Desde arcilla hasta bloques. (En unidades desde um a m)	Clastos de arena a grava.
Energía de flujo (grado de agitación)	Mezcla uniforme de los elementos sólidos y líquidos	Mezcla no uniforme de elementos sólidos y líquidos. Mayor contenido de agua
Sorteo	Muy pobre	Pobre
Consistencia	Similar al concreto húmedo	Similar al aceite de motor usado
Viscosidad	Alta	Baja; Flujos más turbulentos

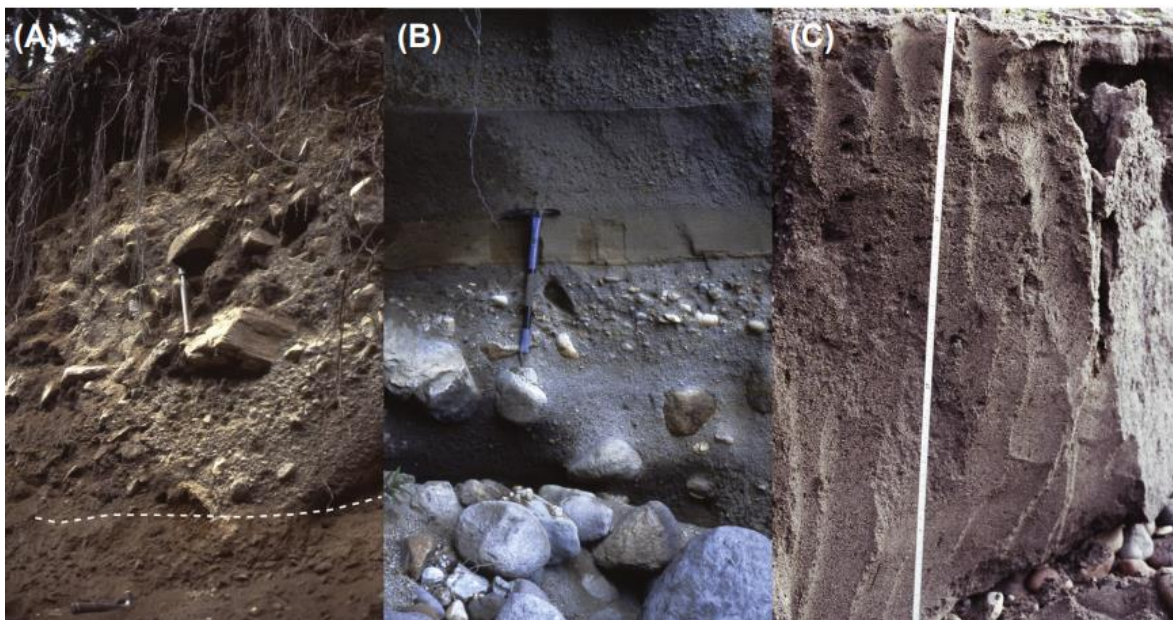


Figura 4. (A) Flujo de escombros (debris flow) pobre en arcilla en el Mount Adams, EE. UU. (B) Depósitos transicionales de flujos de escombros a flujo hiperconcentrado en Mount Rainier, EE. UU. (C) Depósito de flujo hiperconcentrado inversamente gradado en

los dos tercios más bajos del afloramiento y normalmente gradado en el tercio superior, en Mount St Helens en 1982. Tomado de (Vallance e Iverson, 2015).

2.3. Depósitos del Lahar de 1877

Al comienzo de 1877, el volcán comenzó nuevamente con emisiones de ceniza y explosiones hasta un tamaño moderado. Pero en junio del mismo año, la actividad cambió notablemente hasta que el día 26 se desarrolló una fase eruptiva para crear lluvia de cenizas, flujos piroclásticos y lahares. Considerándose como una erupción típica del Cotopaxi, pero el volcán es capaz de dar eventos de mucho más grandes. (Sordido, 1977; Andrade et al 2005) (Figura 5).

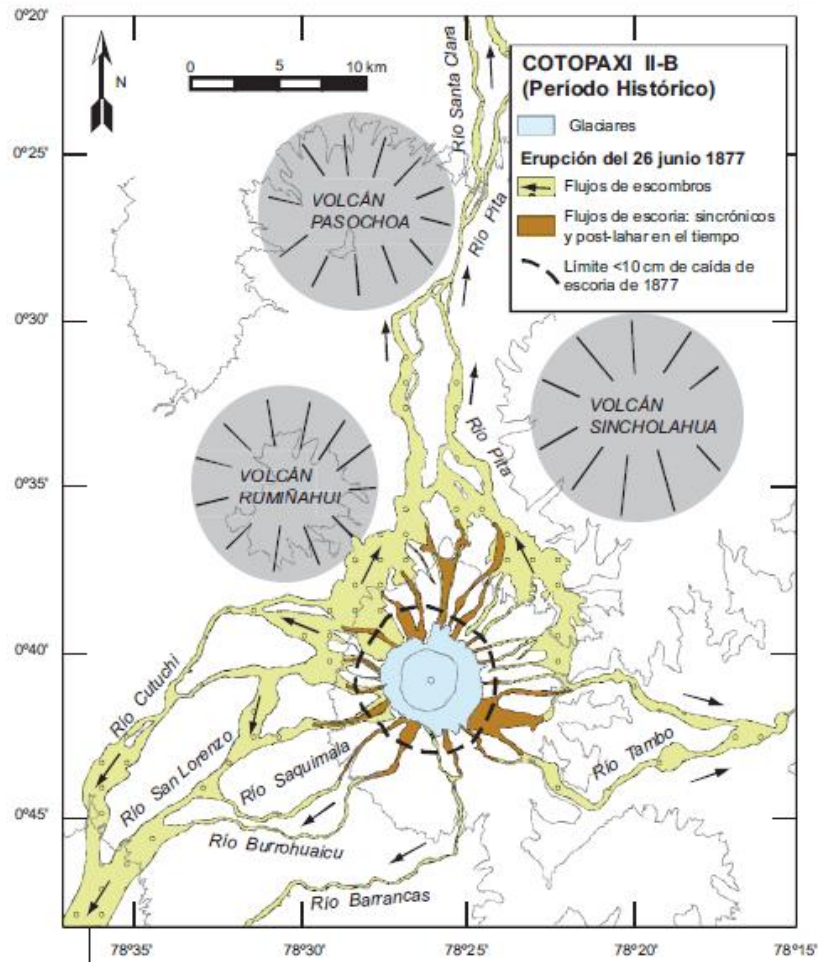


Figura 5. Mapa geológico de los depósitos asociados a la erupción del 26 de junio de 1877. Tomado de (Andrade et al, 2005).

Los principales depósitos asociados con esta erupción fueron una capa de caída de tefra, flujos piroclásticos ricos en bombas y los lahares primarios, aflorando alrededor de los flancos inferiores del Cotopaxi (Andrade, 2022).

Características principales de este depósito son:

- Bombas negras con forma de coliflor, de un tamaño de decímetro a metro. Internamente, estas bombas son de color marrón y muestran márgenes enfriados y fracturas térmicas, rompiéndose fácilmente cuando se golpean levemente varias veces con un martillo. Encuentran tanto los flujos piroclásticos y el lahar primario (Figura 7) (Andrade, 2022).
- La posición estratigráfica del yacimiento: siendo este lahar primario el último en ser emplazado, es también aquel en cuya superficie se ha desarrollado menor cantidad y diversidad de vegetación desde entonces (Figura 6). Sin embargo, como cada planicie se ubica a diferentes altitudes, la cantidad y tipo de vegetación también cambia de una a otra (Andrade, 2022).

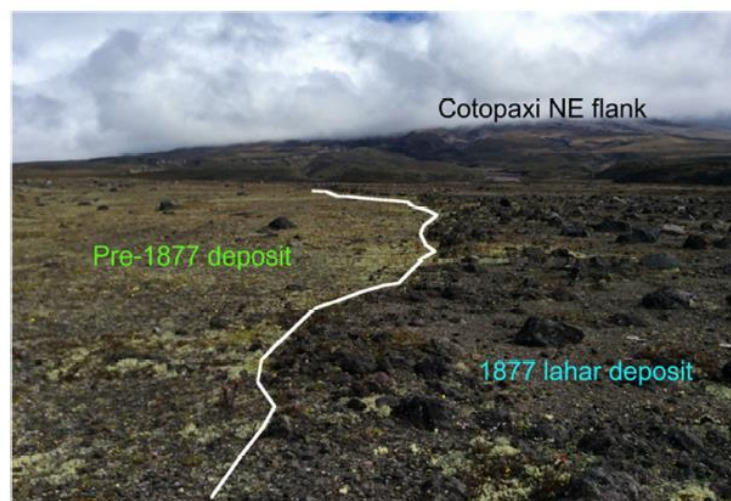


Figura 6. Variación de vegetación y líticos entre depósitos de lahares de la erupción de 1877 y una erupción más antigua, tal como se observa en la llanura nororiental. Tomado de (Andrade, 2022)

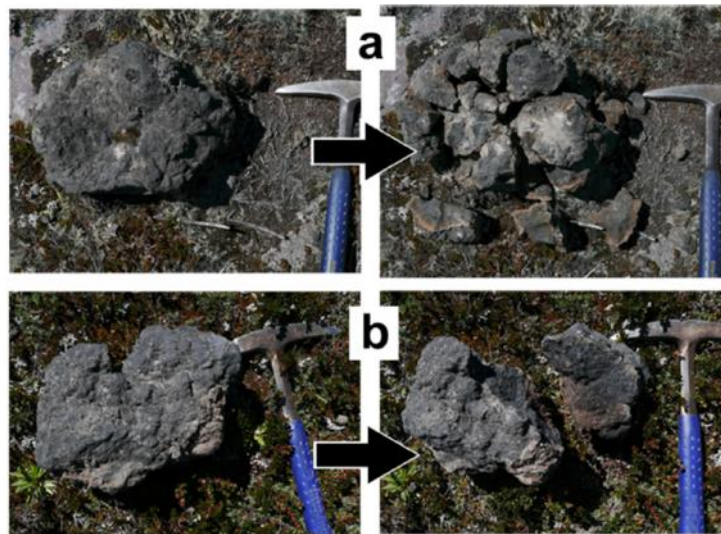


Figura 7. Comportamiento mecánico que se diferencia entre bombas con forma de coliflor que pertenecen a (a) la erupción de 1877, y (b) erupciones más antiguas. Las bombas intactas son muy similares. Tomado de (Andrade, 2022)

2.4. Granulometría

Análisis granulométrico de sedimentos no consolidados

El tamizado se usa para determinar la distribución del tamaño de grano. Se coloca una muestra seca en el tamiz superior de un juego de tamices dispuestos en orden de modo que el tamiz más grueso esté en la parte superior y los más finos debajo, se coloca en una máquina de agitación. Después de diez minutos de agitación, la arena que se ha acumulado en cada tamiz y en la cubeta se retira y se pesa (Lindholm, 2012).

Presentación gráfica de datos en Histograma

El histograma se usa ampliamente para presentar datos de tamaño de grano. Por convención, el tamaño de grano se representa en el eje horizontal y la frecuencia en el eje vertical (Lindholm, 2012).

Parámetros estadísticos del tamaño de grano

Los parámetros estadísticos son datos que se obtienen en base de la distribución estadística, en la Tabla 2 se resumen las características principales de cada parámetro en el uso granulométrico.

Tabla 2. Parámetros estadísticos. Tomado de (Lindholm, 2012).

Parámetros	Uso
Moda	Diámetro de la partícula que ocurre con mayor frecuencia
Mediana	Tamaño el cual la mitad de las partículas (en peso) son mas gruesas y la otra más fina.
Media aritmética	Donde el punto medio de cada grado es el punto medio aritmético entre los límites de tamaño de grado en milímetros.
Desviación estándar	uniformidad de la distribución del tamaño de las partículas. En una distribución normal, el 68% de las muestras se encuentra dentro de «una desviación estándar»
Curtosis	Si la porción central está mejor clasificada que las colas, se dice que la curva de frecuencia es excesivamente puntiaguda o leptocúrtica (Figura 8, E). Si las colas están mejor ordenadas que la parte central, se dice que la curva tiene un pico plano o platycúrtica (Figura 8, D)
Asimetría	Si hay más material en la cola gruesa (sesgo grueso), se dice que el sesgo es negativo (Figura 8, B). Si hay más material en la cola fina (fino sesgado), es positivo (Figura 8, C).

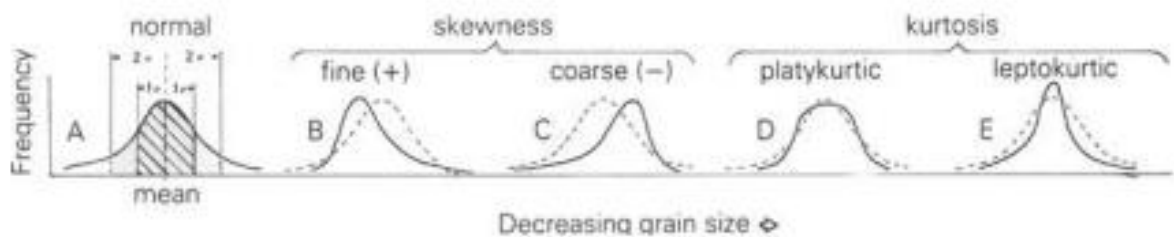


Figura 8. Diagrama de frecuencia. Tomada de (Lindholm, 2012).

CAPITULO III

3. METODOLOGÍA

Se ha realizado una recopilación de información preliminar y síntesis con artículos científicos, libros y trabajos previos acerca la zona para así poder desarrollar la parte escrita de este estudio. Uno de los estudios más recientes fue realizado por Andrade et al., 2022, de donde se obtiene una base preliminar respecto al depósito de lahar primario de 1877.

Se realizaron 2 salidas de campo, donde se recorrió el depósito del lahar. El equipo utilizado fue: GPS, martillo de geólogo, lápiz, lupa. Se realizó la toma de las 20 muestra del lahar 1877 y una muestra de flujo piroclástico, para el fin de desarrollar el trabajo de laboratorio.

3.1. Análisis Granulométrico

Granulometría por tamizado manual

La caracterización granulométrica del lahar de 1877 del volcán Cotopaxi comenzó con la recolección 21 muestras de las cuales 20 muestras distribuidas a lo largo del depósito cartografiado previamente por Andrade 2022 (Figura 19), las muestras corresponden a los depósitos proximales del lahar de 1877. Los sitios de muestreo fueron seleccionados de manera que se cubran las principales quebradas que alimentan el drenaje norte del Cotopaxi (río Pita), desde el flanco norte hasta el nor-oriental.

Antes de comenzar el proceso granulométrico, se coloca las muestras recolectadas en recipientes para ser secadas a 40°C, durante 2 días, hasta constatar que el agua se ha evaporado. Una vez las muestras se encuentren secas, se procede a dividir la muestra de manera aleatoria hasta que llegue a un peso aproximado de 1500g, las cuales fueron medidas en una balanza de precisión.

El ensayo colocando la muestra en una columna de tamices que han sido ordenados de manera ascendente (la abertura más grande del tamiz al techo y la más pequeña al suelo) al final de la columna se toma un plato que se le denomina fondo, el cual va a recoger todas las partículas restantes. La medida de las aberturas se conoce en Phi o mm. En este estudio constara tamices entre -5 a 5 Phi.

Detallada continuación en la Tabla 3:

Tabla 3. Medidas de aberturas de tamices en unidades mm a Phi

Mm	Phi
31.5	-5
16	-4
8	-3
4	-2
2	-1
1	0
0.5	1
0.25	2
0.125	3
0.063	4
Fondo	5

Procedimiento para el tamizado manual

- I) Se constata que se encuentren todos los tamices de la columna para a ser usados, luego se limpia cada uno con alcohol y papel (Figura 9, a) así se verifica el uso correcto de ellos y no tener contaminación de estudios anteriores. Siguiendo a eso pesaremos cada uno de los tamices vacíos, ya que luego tomaremos el valor del peso del tamiz y el restante de la muestra que haya quedado en cada uno de ellos.
- II) Ordenamos la columna de tamices de manera ascendente (Figura 9, b). Limpiamos la superficie donde colocaremos la columna para poder iniciar el tamizaje.
- III) Se toma la muestra que ha sido pesada previamente en su recipiente y se procede poner la muestra por la parte superior de la columna y tras esto mediante movimientos de vibración realizados de manera manual, se desarrolla el proceso de tamizaje.
- IV) Se procede a revisar cada tamiz de la columna y verificar que el material ya no pase, caso contrario, se continua con los movimientos hasta que verifique que ya no pasan fragmentos.
- V) Se pesa cada tamiz y el restante de la muestra, para tomar datos y así constatar, cuanta es la variación de peso y así obtener el valor real del peso de la muestra en cada fracción.

VI) Para finalizar este procedimiento se debe un buen almacenamiento de las muestras el cual es vaciar cada tamiz en bolsas, que se van a ser etiquetadas con el código de la muestra y la fracción de cada tamiz.

Estos resultados son detallados gráficamente, en el cual el eje X son los datos referentes en Phi y eje Y se representa el porcentaje en peso.

También, se visualiza por medio de SFT (Secuencial Fragmentation Transport) que proporciona datos estadísticos de manera grafica. Datos estadísticos que son calculados mediante trabajos de Imán (1952) y Folk y Ward (1957). Los datos obtenidos mediante el Software son: curtosis, asimetría y la desviación estándar, diámetro medio de la muestra analizada, media, etc.

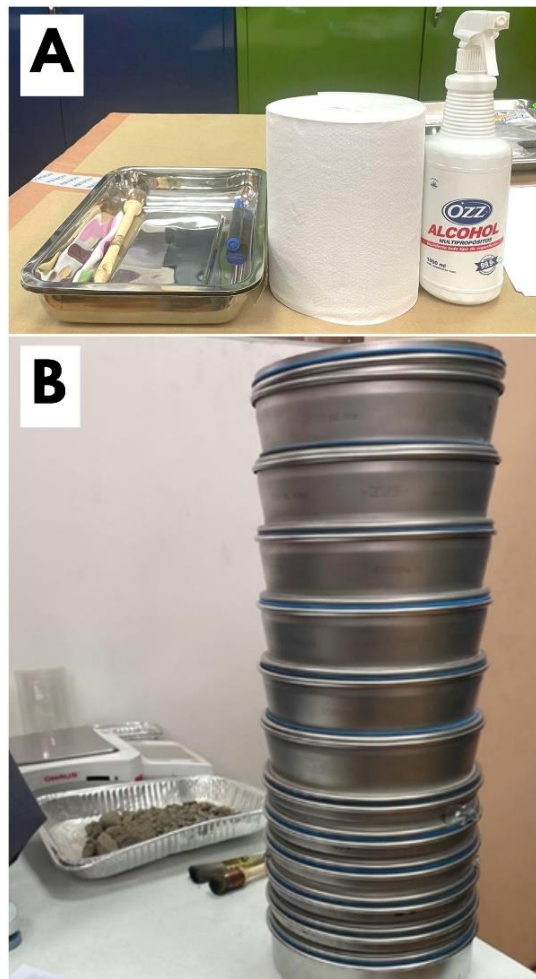


Figura 9. (A) Herramientas de limpieza para los tamices. (B) Columna de tamices y a la derecha de la imagen la muestra seca antes de ser tamizada.

Procedimiento para análisis de datos en SFT

Para el uso del software geológico, se debe crear una tabla (Tabla 4) para cada muestra, con la cual podremos observar los valores en peso, respectivamente para cada fracción tamizada.

Tabla 4. Tabla de resultados granulométricos.

KEL-001					
Abertura de los Tamices (mm)	Peso del Tamiz (g)	Peso Tamiz con muestra (g)	Peso de Muestra (g)	%W	% Acumulado
31,5	451,01	589,35	138,34	11,81	11,81
16	447,26	503,9	56,64	4,83	16,64
8	407,31	584,87	177,56	15,16	31,80
4	376,11	522,82	146,71	12,52	44,32
2	344,44	458,01	113,57	9,69	54,02
1	315,22	420,75	105,53	9,01	63,03
0,5	316,72	428,4	111,68	9,53	72,56
0,25	416	534,19	118,19	10,09	82,65
0,125	406,09	497,59	91,5	7,81	90,46
0,063	199,08	254,2	55,12	4,71	95,16
Fondo	411,11	467,77	56,66	4,84	100,00
Total			1171,5	100	
Peso medido			1176,01	% W perdida	0,38

Teniendo los datos de porcentaje peso en cada tamiz en Phi se comienza los siguientes pasos para el uso de software:

- I) Se abre el software SFT, y se crea un archivo con el nombre de la muestra para luego poder identificar cada dato. Seleccionamos primero full Phi para que el uso de Phi sea en número entero. Ingresamos los porcentajes peso antes obtenidos concordando con la columna de phi. A medida que se ingresa un dato de porcentaje como se va creando el histograma (Figura 10).
- II) El software tiene dos opciones: **Analyze** y **Cumulative Graph**. La función **Analyze** se despliegan los gráficos estadísticos y usando la función de **Log normal statistics** se va a visualizar los siguientes datos en base a dos autores Imán y Folk (Figura 11).

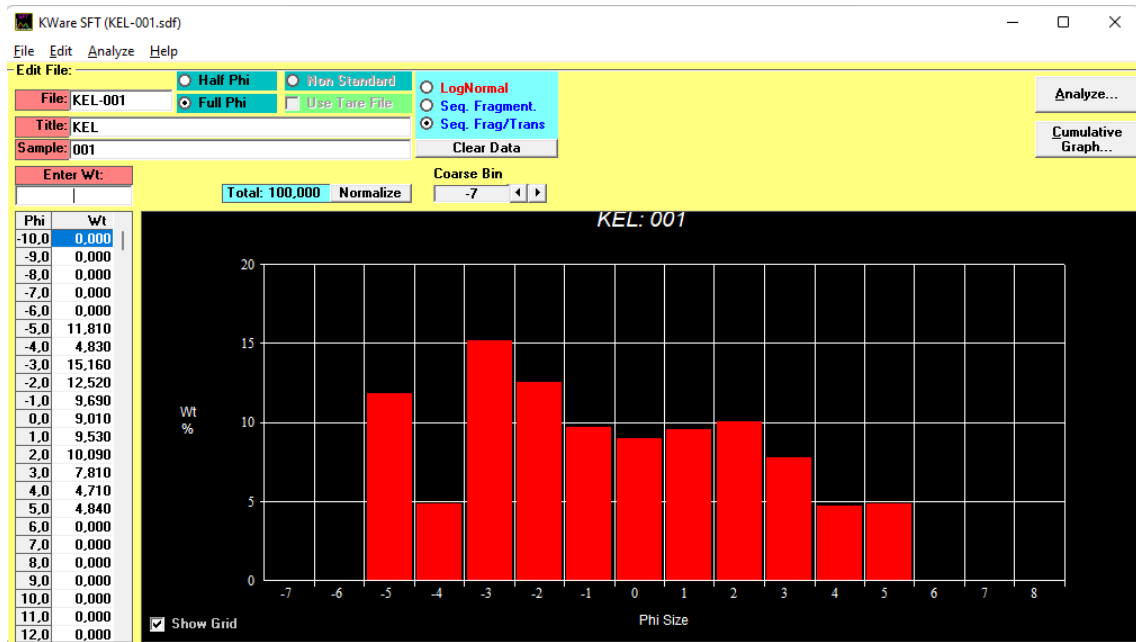


Figura 10. Software SFT, imagen principal del software donde se ingresa el porcentaje en peso de cada sección tamizada para formar histogramas.

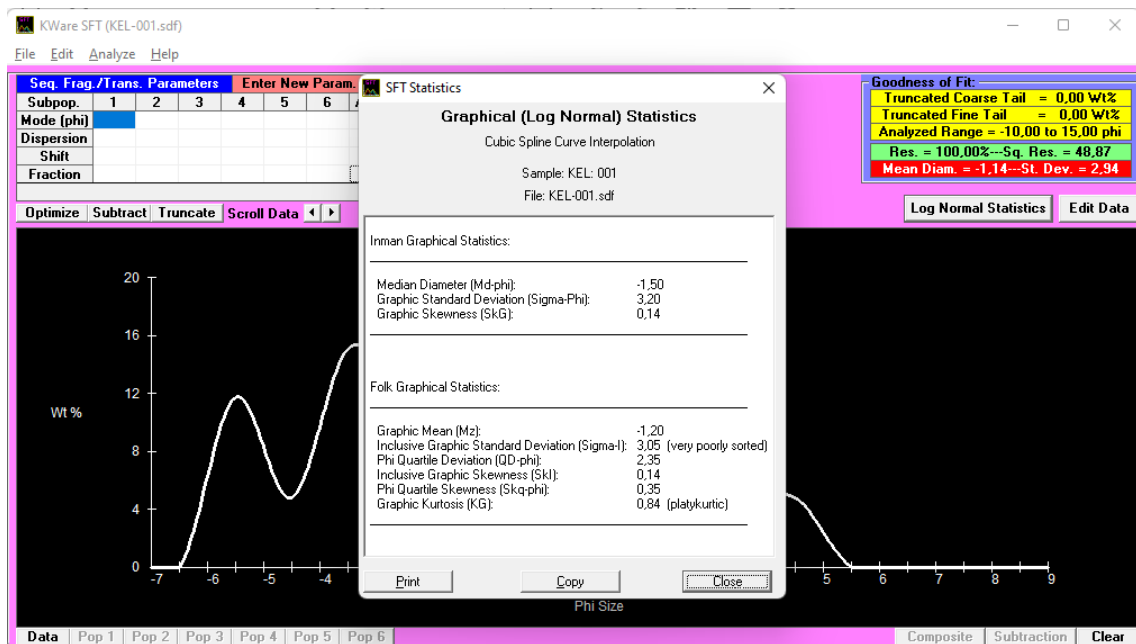


Figura 11. Ventana de resultados del Software SFT

Tratamiento de los datos estadísticos

Los datos granulométricos obtenidos por el software son definidos en la siguiente tabla (Tabla 5):

Tabla 5. Datos estadísticos a datos por SFT

Estadística	SFT
Mediana	Md-Phi
Desviación estándar grafica	Sigma Phi
Asimetría	SkG
Media	Mz
Desviación estándar gráfica inclusiva	Sigma-I
Desviación del cuartil Phi	QD-Phi
Asimetría inclusiva grafica	SkI
Asimetría del cuartil Phi	Skq-phi

Estos parámetros estadísticos se basan en Folk & Ward (1957), y permitan tratar los datos, obteniendo así un resultado gráfico como analítico. Los datos granulométricos sirven para clasificar el depósito según los tipos de lahares que se encuentra en Scott & Vallance, (1995). Esta clasificación se basa en la relación entre el sorteo (Sigma-I) y la media del tamaño de grano y permite diferenciar el depósito entre los siguientes tipos: Flujo de escombros cohesivos (enriquecidos en arcillas), o no cohesivos (empobrecidos en arcillas), Flujos hiperconcentrados o Flujos de agua mediante la caracterización propuesta por Pierson y Scott (1999).

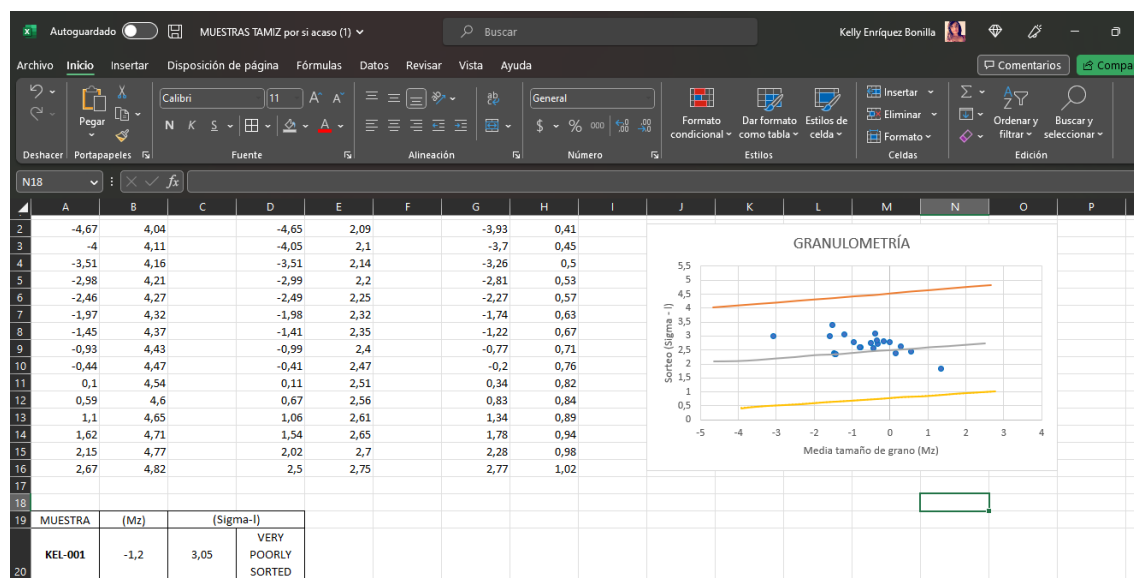


Figura 12. Trabajo de Excel basado en parámetros de Folk & Ward para determina qué tipo de lahar primario correspondiente a las muestras tomadas en el presente estudio. Para la caracterización del flujo por Pierson y Scott (1999).

3.2. Análisis de componentes

Limpieza de las muestras

Lavado ultrasónico es la limpieza que funciona mediante ondas longitudinales producidas en el líquido donde están sumergidas los elementos a limpiar. Consiste en usar ondas de ultrasonido para romper los enlaces de todas las partículas que no forman parte de la pieza, sino que están alojados en ellas. Este método se utilizó para una limpieza profunda de las muestras que se va a utilizar para el análisis de componentes.

El procedimiento consiste en:

- I) La sección etiquetada y almacenada en rango de 500um, lo cual son fragmentos que son menores a 1mm y mayores a 500um
- II) Procedemos a hacer una división aleatoria de cada muestra, y así obtener una porción de aproximadamente 15 gramos que se coloca en un vaso de precipitación (Figura 13, a).
- III) Esta porción será lavada por ultrasonido. Agregando agua desionizada en el vaso de precipitación (Figura 13, b), y activando el ultrasonido en intervalos de 3 min. Retiramos el agua des ionizada del recipiente (Figura 13, c). Repetimos las veces que sea necesario hasta que el agua salga limpia.
- IV) Se procede a colocar en el horno cada muestra por 2 días a 40°C (Figura 13, d).

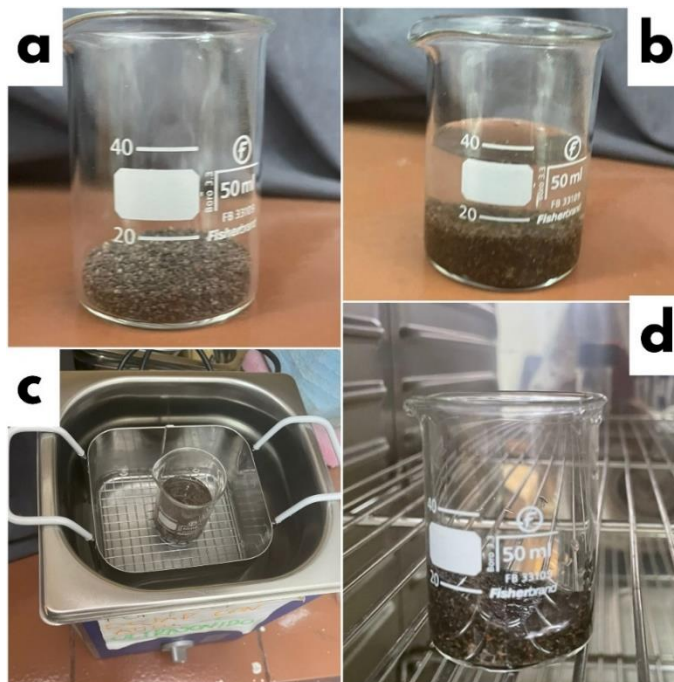


Figura 13. Procedimiento del lavado ultrasónico: a) Se coloca la fracción de muestra seca en un vaso de precipitación; b) La muestra con agua destilada; c) El vaso de

precipitación con la muestra dentro del ultrasónico y d) La muestra lavada dentro del horno a 40°C.

Cuando la muestra se encuentre seca se hará el almacenamiento en funda y el etiquetado de estas. Para luego proceder al análisis de componentes.

Análisis de componentes

Para el análisis de componentes, las muestras lavadas y secas fueron observadas con la lupa, donde se identificaron dos tipos de fragmentos. Como se indica en la Tabla 6:

Tabla 6. Tipo de fragmentos

Clasificación	Descripción
Fragmentos Juveniles	Principalmente vidrio, plagioclasa y piroxenos.
Fragmentos Accidentales	Materias denso, principalmente líticos, incluyendo pómez y escorias.

Este análisis se realizó con el binocular Olympus SZ que se encuentra a cargo del Instituto Geofísico de la escuela politécnica nacional.

El análisis consistió en:

- I) Se prepara los recipientes necesarios para la clasificación antes mencionada y herramientas básicas para realizar cada conteo (Caja de Petri, lápiz, libreta de campo y computador brindado por el IG de la Escuela Politécnica Nacional) (Figura 14).

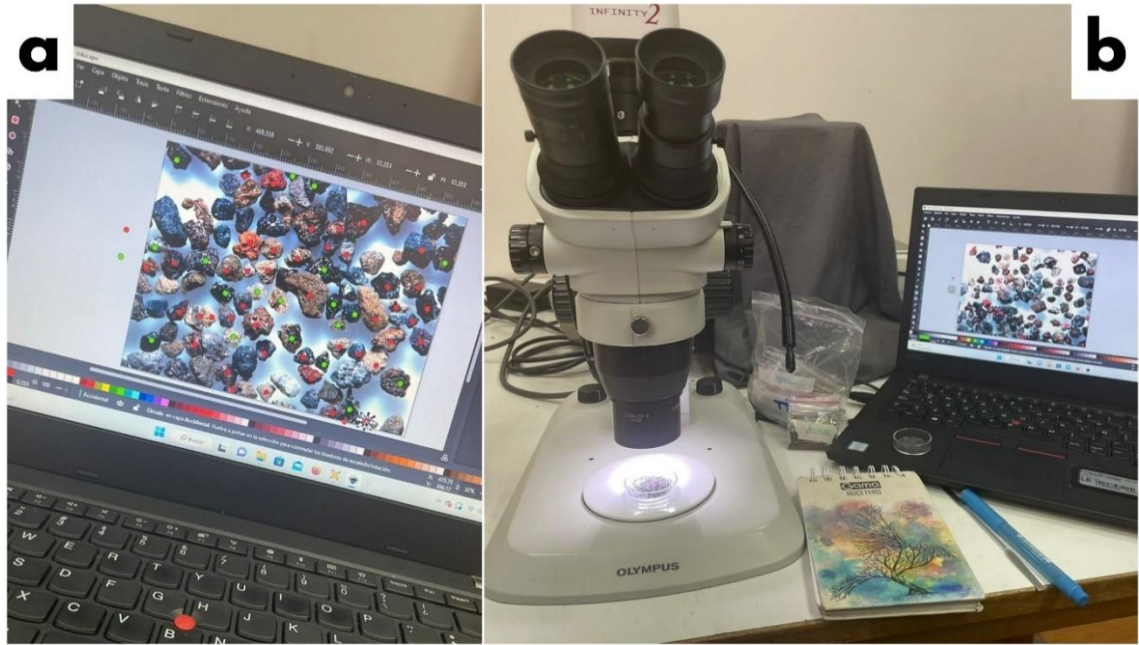


Figura 14. a) Computador brindado por IG de la Escuela Politécnica Nacional para desarrollar el análisis de componentes juveniles; (b) Herramientas principales para el análisis de componentes.

- II) Se toma una porción aleatoria de la muestra, colocando en la caja de Petri y se ubica bajo el binocular.
- III) Se describe cada uno de los fragmentos observados en base de características como forma, tamaño, color, de manera que sea clasificado como fragmento "juvenil" o "accidental". Se debe realizar la clasificación de al menos 300 fragmentos para que se la muestra sea considerada representativa. Se toma fotografías vinculando el binocular a través del programa INFINITY CAPTURE para tener respaldo del estudio.
- IV) Las fotografías tomadas serán procesadas mediante el programa INKSCAPE (Figura 15) que sirve para la clasificación de los componentes mediante el uso de puntos de colores según la división que se haya determinado.

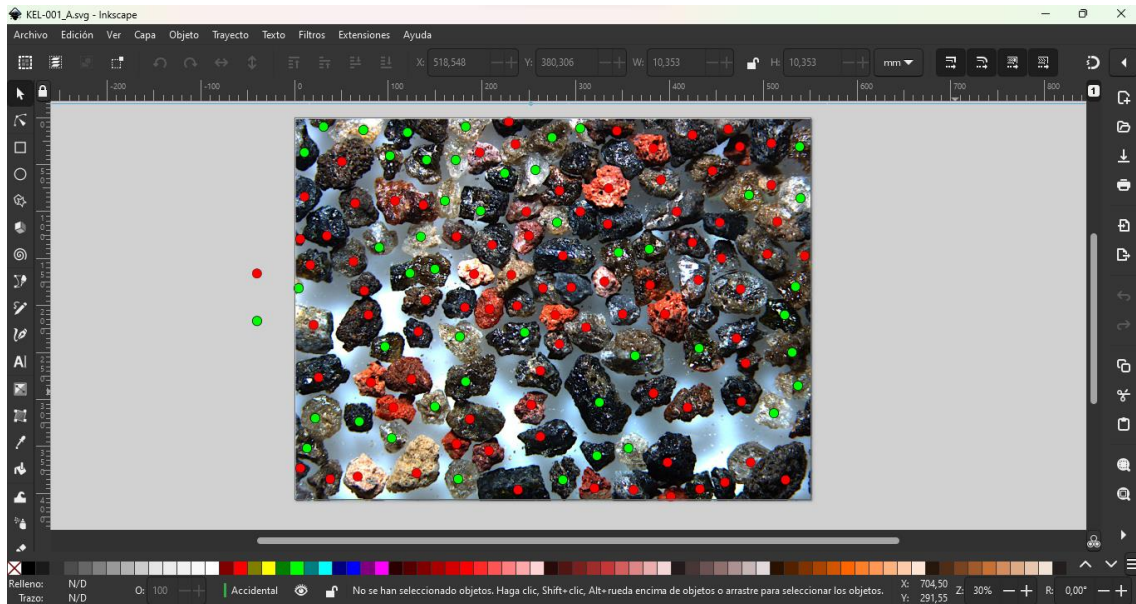


Figura 15. Hoja de trabajo en Inkscape con la que se determina el número de componentes y las clases presentes.

- V) Se toma apunte del valor obtenido del número de componentes y a que división corresponde de cada de cada muestra dentro de una tabla en Excel (Figura 16).

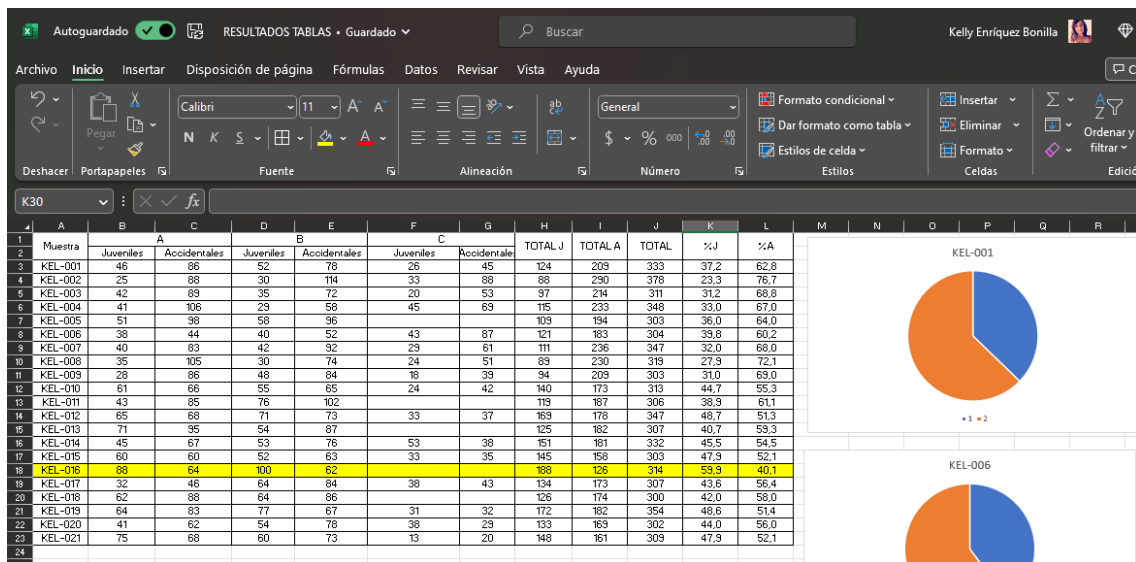


Figura 16. Trabajo Excel en la formación de la tabla y gráficos de datos para el análisis gráfico de componentes.

La identificación de los fragmentos juveniles se realizó a partir de observaciones hechas en una muestra de flujo piroclástico (Muestra KEL-016).

En esa muestra se identificaron 4 tipos de fragmentos que fueron identificados como juveniles y cuyas características son las siguientes:

1. Fragmentos de color negro, bordes angulares, textura vesicular, brillo vitreo (Figura 17, a).
2. Fragmentos de color caramelo oscuro, bordes angulares, textura vesicular, brillo vitreo (Figura 17, b).
3. Fragmentos de color caramelo claro, bordes angulares, textura vesicular, brillo vitreo (Figura 17, c).
4. Fragmentos de piroxeno, color verde claro, bordes angulares, cristal, brillo vitreo (Figura 18).

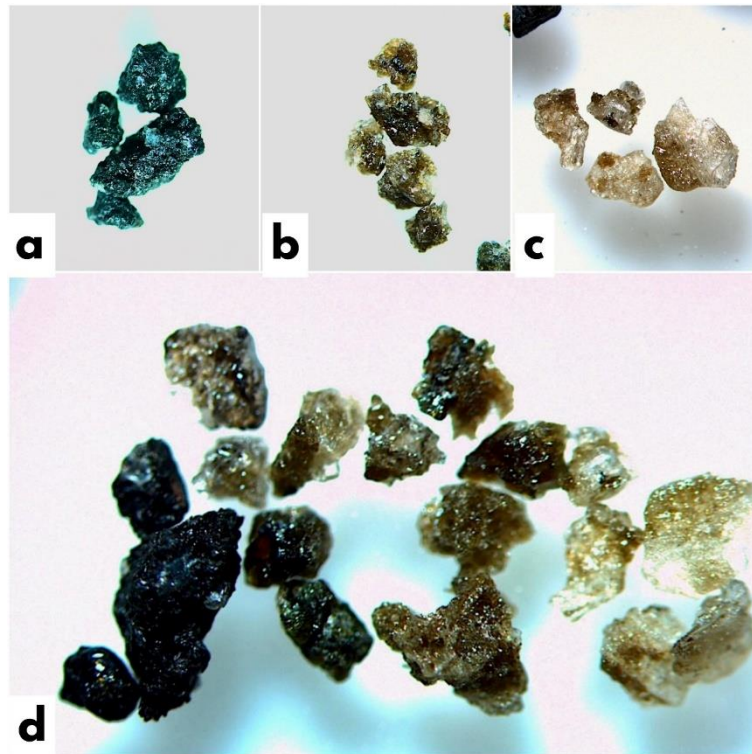


Figura 17. Componentes Juveniles - Vidrio volcánico. Muestra KEL-016. a) Fragmentos de color negro, bordes angulares, textura vesicular, brillo vitreo. b) Fragmentos de color caramelo oscuro, bordes angulares, textura vesicular, brillo vitreo. c) Fragmentos de color caramelo claro, bordes angulares, textura vesicular, brillo vitreo.

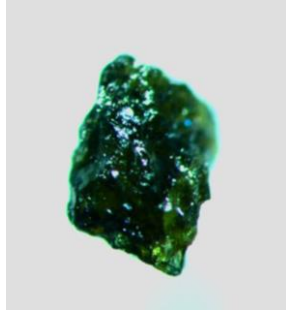


Figura 18. Componente Juvenil - Cristal de piroxeno. Muestra KEL-016

Todos los otros fragmentos observados son clasificados como "accidentales".

Con los datos obtenidos del análisis de componentes acerca el lahar, fueron transcritos en una tabla Excel los datos apuntados en la libreta.

CAPITULO IV

4. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Resultados

Granulometría

Se obtuvo 20 muestras a lo largo del depósito del lahar. Todas las muestras se aplicó la metodología del análisis granulométrico presentado en el capítulo 2.1 (Figura 19).

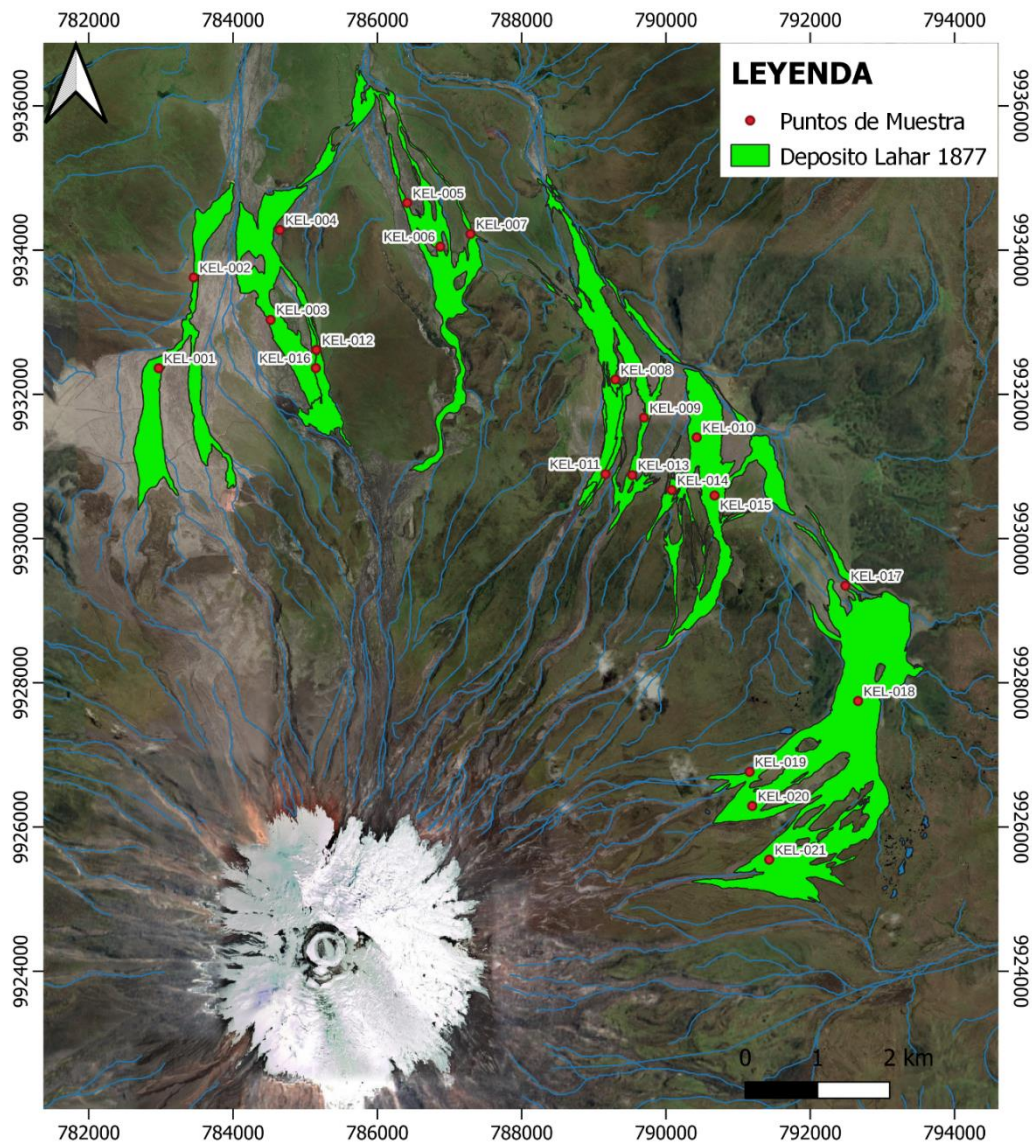


Figura 19. Mapa de ubicación de los puntos de muestreo dentro del lahar primario de 1877. Escala 1:75 000.

Los resultados de los análisis granulométricos indican que las muestras se pueden dividir en tres grupos (Tabla 7): 9 muestras unimodales (Figura 20 y 21), 7 muestras bimodales

(Figura 22 y 23) y 4 muestras multimodales (Figura 24 y 25). Datos que han sido verificados con el uso de los histogramas y el software SFT de acuerdo con la curtosis.

Tabla 7. Clasificación de las muestras según su distribución modal

UNIMODAL		BIMODAL		MULTIMODAL
KEL-002, KEL-005, KEL-008, KEL-012, KEL-017	KEL-003, KEL-007, KEL-011, KEL-015,	KEL-004, KEL-010, KEL-014, KEL-021	KEL-009, KEL-013, KEL-019,	KEL-001, KEL-006, KEL-018, KEL-020

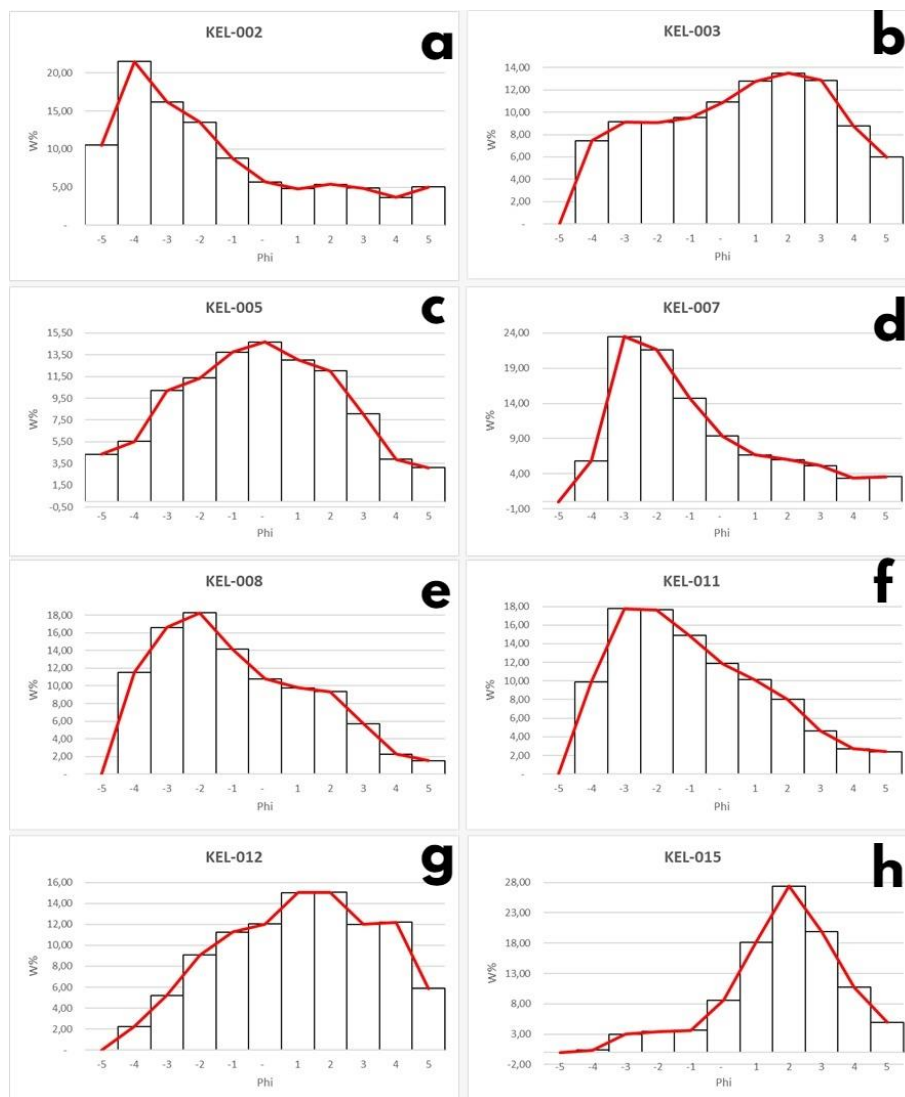


Figura 20. Histogramas y polígonos de frecuencia para el lahar de 1877 (Muestras con distribución unimodal). %W = porcentaje en peso. Phi = Escala del tamaño de grano.

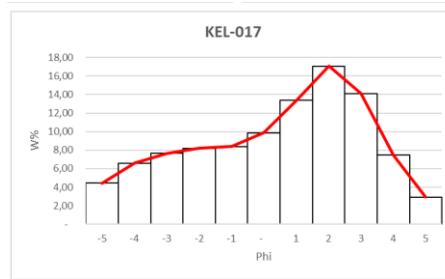


Figura 21. Histograma y polígono de frecuencia para el lahar de 1877 (Muestras con distribución unimodal). %W = porcentaje en peso. Phi = Escala del tamaño de grano.

Las muestras unimodales (Figura 20 y Figura 21), se subdividen en 4 muestras sesgadas a la izquierda con una asimetría negativa, 4 muestras sesgadas a la derecha con una asimetría positiva, y una muestra con asimetría nula (Figura 20, c). La moda observada en los histogramas va a depender de su asimetría. Las muestras con simetría negativa, la moda es entre 1 a 2 Phi. Las muestras con asimetría positiva, la moda va de 1 a 2 Phi. Las muestras KEL-002, KEL-007, KEL-008 y KEL-011 (Figura 20, a, d, e y f) están empobrecidos en finos con un tamaño de grano de lapilli, en cambio las muestras KEL-003, KEL-012, KEL-015 y KEL-017 (Figura 20, b, g, h; Figura 21) están enriquecidos en finos con un tamaño de grano de ceniza. La muestra KEL-005 es simétrica con una moda de 0Phi, muestra con presencia similar de ceniza y lapilli. Presenta el siguiente tipo de curtosis mesocúrtica(Figura 20, a, c, d y f), platicúrtica(Figura 20, b, e, g y Figura 21) y leptocúrtica (Figura 20, h).

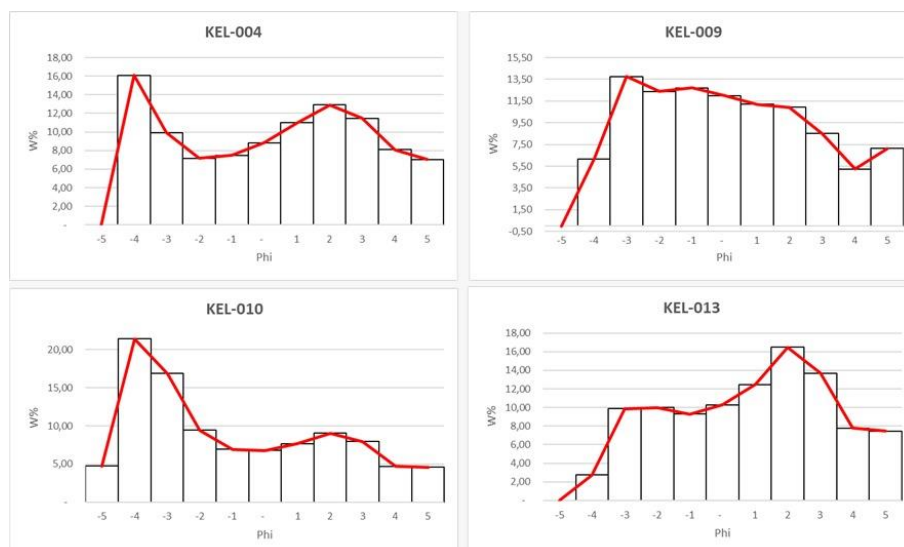


Figura 22. Histogramas y polígonos de frecuencia para el lahar de 1877 (Muestras con distribución bimodal). %W = porcentaje en peso. Phi = Escala del tamaño de grano.

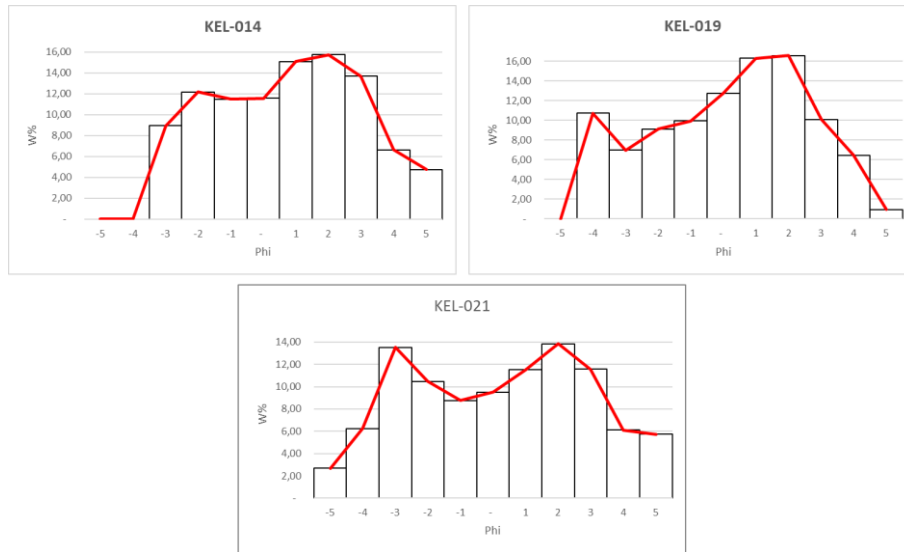


Figura 23. Continuación. Histogramas y polígonos de frecuencia para el lahar de 1877 (Muestras con distribución bimodal). %W = porcentaje en peso. Phi = Escala del tamaño de grano.

Las muestras bimodales (Figura 22 y 23), se subdividen en 3 muestras sesgadas a la derecha con una asimetría positiva y 4 muestras sesgadas a la izquierda con una asimetría negativa. Las modas observadas en los histogramas son los 2 valores: -3 Phi y 2 Phi. Se muestra como las muestras KEL-004, KEL-009 y KEL-010 están empobrecidos en finos con un tamaño de grano de lapilli, en cambio las muestras KEL-013, KEL-014, KEL-019 y KEL-021 están enriquecidos en finos con un tamaño de grano de ceniza. Presenta el siguiente tipo de curtosis platicúrtica

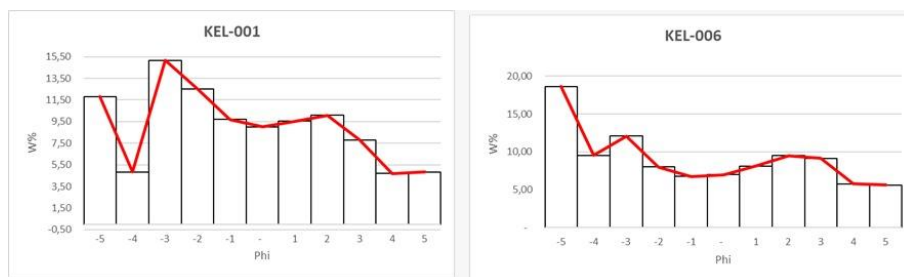


Figura 24. Histogramas y polígonos de frecuencia para el lahar de 1877 (Muestras con distribución multimodal). %W = porcentaje en peso. Phi = Escala del tamaño de grano.

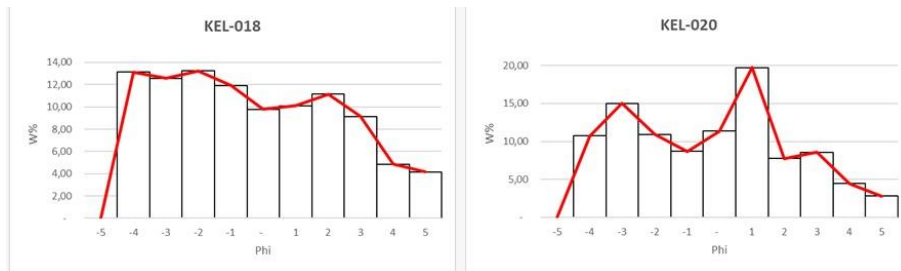


Figura 25. Continuación. Histogramas y polígonos de frecuencia para el lahar de 1877 (Muestras con distribución multimodal). %W = porcentaje en peso. Phi = Escala del tamaño de grano.

Las muestras multimodales (Figura 24 y 25), se subdividen en 1 muestras sesgadas a la izquierda con una asimetría negativa y 3 muestras sesgadas a la derecha con una asimetría positiva. Las modas observadas en los histogramas van entre -5 a -3 Phi y 2 Phi. Las muestras KEL-001 están enriquecidos en finos con un tamaño de grano de lapilli, en cambio las muestras KEL-006, KEL-018 y KEL-020 están empobrecidos en finos con un tamaño de grano de ceniza. Presenta el siguiente tipo de curtosis platicúrtica

En general, para todas las muestras analizadas, se tiene valor medio que va desde -3,08 a 1,35.

El depósito del lahar es muy mal sorteado excepto la muestra KEL-015, la cual solo es mal sorteada, datos observados por los histogramas y verificados con los obtenidos por el software SFT.

En la tabla 8 se hizo un resumen con todos los datos brindados por el software SFT.

Tabla 8. Resultados obtenidos por el Software SFT

MUESTRA	(Mz)	(Sigma-I)	(QD - phi)	(Skl)	(Skq-phi)	(KG)		
KEL-001	-1,2	3,05	MUY MAL SORTEADA	2,35	0,14	0,35	0,84	PLATICÚRTICA
KEL-002	-3,08	3,01	MUY MAL SORTEADA	2,05	0,43	0,6	0,95	MESOCÚRTICA
KEL-003	-0,02	2,79	MUY MAL SORTEADA	2,15	-0,11	-0,25	0,81	PLATICÚRTICA
KEL-004	-0,4	3,1	MUY MAL SORTEADA	2,65	-0,1	-0,5	0,7	PLATICÚRTICA
KEL-005	-0,77	2,61	MUY MAL SORTEADA	1,85	0	0	0,93	MESOCÚRTICA
KEL-006	-1,53	3,4	MUY MAL SORTEADA	2,95	0,16	0,35	0,68	PLATICÚRTICA
KEL-007	-1,47	2,4	MUY MAL SORTEADA	1,58	0,42	0,47	1,01	MESOCÚRTICA
KEL-008	-1,45	2,37	MUY MAL SORTEADA	1,78	0,22	0,33	0,84	PLATICÚRTICA
KEL-009	-0,5	2,75	MUY MAL SORTEADA	2,13	0,11	0,12	0,82	PLATICÚRTICA
KEL-010	-1,58	3,01	MUY MAL SORTEADA	2,6	0,36	0,85	0,71	PLATICÚRTICA
KEL-011	-1,43	2,36	MUY MAL SORTEADA	1,7	0,23	0,25	0,91	MESOCÚRTICA
KEL-012	0,55	2,45	MUY MAL SORTEADA	1,85	-0,07	-0,1	0,84	PLATICÚRTICA
KEL-013	0,28	2,64	MUY MAL SORTEADA	2,03	-0,13	-0,38	0,82	PLATICÚRTICA
KEL-014	0,15	2,4	MUY MAL SORTEADA	1,85	-0,13	-0,25	0,82	PLATICÚRTICA
KEL-015	1,35	1,82	MAL SORTEADA	1,08	-0,16	-0,08	1,25	LEPTOCÚRTICA
KEL-016	-0,32	2,73	MUY MAL SORTEADA	2,3	-0,15	-0,45	0,72	PLATICÚRTICA
KEL-017	-0,17	2,8	MUY MAL SORTEADA	2,13	-0,25	-0,53	0,83	PLATICÚRTICA
KEL-018	-0,95	2,78	MUY MAL SORTEADA	2,25	0,14	0,25	0,77	PLATICÚRTICA
KEL-019	-0,43	2,56	MUY MAL SORTEADA	1,9	-0,18	-0,35	0,85	PLATICÚRTICA
KEL-020	-0,8	2,6	MUY MAL SORTEADA	2	-0,05	-0,5	0,81	PLATICÚRTICA
KEL-021	-0,35	2,85	MUY MAL SORTEADA	2,33	-0,06	-0,33	0,77	PLATICÚRTICA

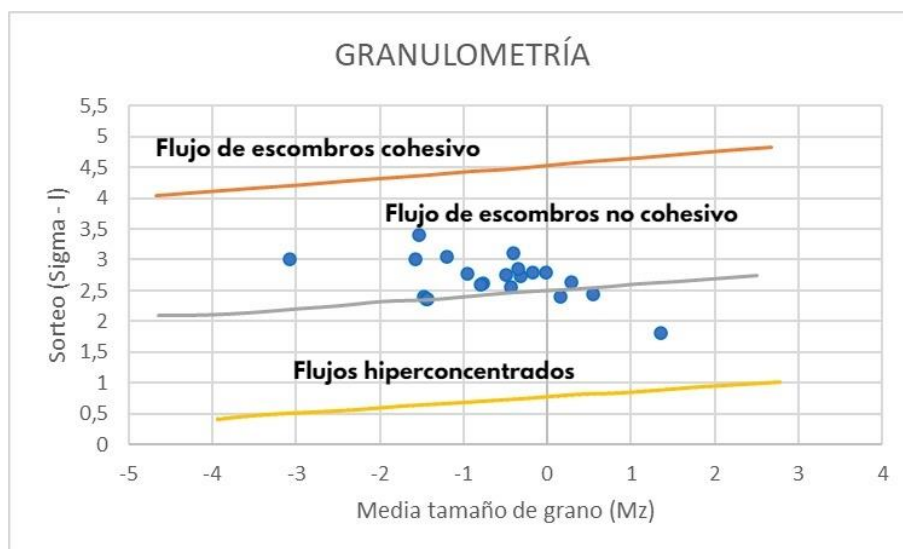


Figura 26. Clasificación de los tipos de flujos de lahares, planteado por Pierson and Scott (1999)

Se puede evidenciar que las muestras tomadas a lo largo de todo el lahar según su tipo corresponderían a las de un lahar primario ya que corresponde a un flujo de escombros no cohesivo, excepto la muestra 15 corresponde a un flujo hiperconcentrado, esta clasificación es según Pierson y Scott (1999) (Figura 26).

Análisis de componentes

El análisis de componentes se presenta en la tabla de resultados (Tabla 9) para la fracción de 0,5mm:

Tabla 9. Resultados del análisis de componentes juveniles y accidentales

Muestra	Cantidad		Total	% Juveniles	% Accidentales	% Total
	Juveniles	Accidentales				
KEL-001	124	209	333	37,24	62,76	100
KEL-002	88	290	378	23,28	76,72	100
KEL-003	97	214	311	31,19	68,81	100
KEL-004	115	233	348	33,05	66,95	100
KEL-005	109	194	303	35,97	64,03	100
KEL-006	121	183	304	39,80	60,20	100
KEL-007	111	236	347	31,99	68,01	100
KEL-008	89	230	319	27,90	72,10	100
KEL-009	94	209	303	31,02	68,98	100
KEL-010	140	173	313	44,73	55,27	100
KEL-011	119	187	306	38,89	61,11	100
KEL-012	169	178	347	48,70	51,30	100
KEL-013	125	182	307	40,72	59,28	100

KEL-014	151	181	332	45,48	54,52	100
KEL-015	145	158	303	47,85	52,15	100
KEL-016	188	126	314	59,87	40,13	100
KEL-017	134	173	307	43,65	56,35	100
KEL-018	126	174	300	42,00	58,00	100
KEL-019	172	182	354	48,59	51,41	100
KEL-020	133	169	302	44,04	55,96	100
KEL-021	148	161	309	47,90	52,10	100

Con los resultados se desarrolló gráficos de porcentaje para así visualizar datos para que puedan ser comparados. Estos gráficos están usados de la siguiente clasificación: componentes juveniles y componentes accidentales.

Los componentes juveniles son cristales de plagioclasa, piroxeno y vidrio volcánico.

Los componentes accidentales corresponderían en su mayoría a líticos (rocas andesíticas principalmente), cristales como vidrio volcánico, pero en un estado de alteración, con bordes más redondeados que nos indican de que este tipo de material ha tenido un mayor transporte.

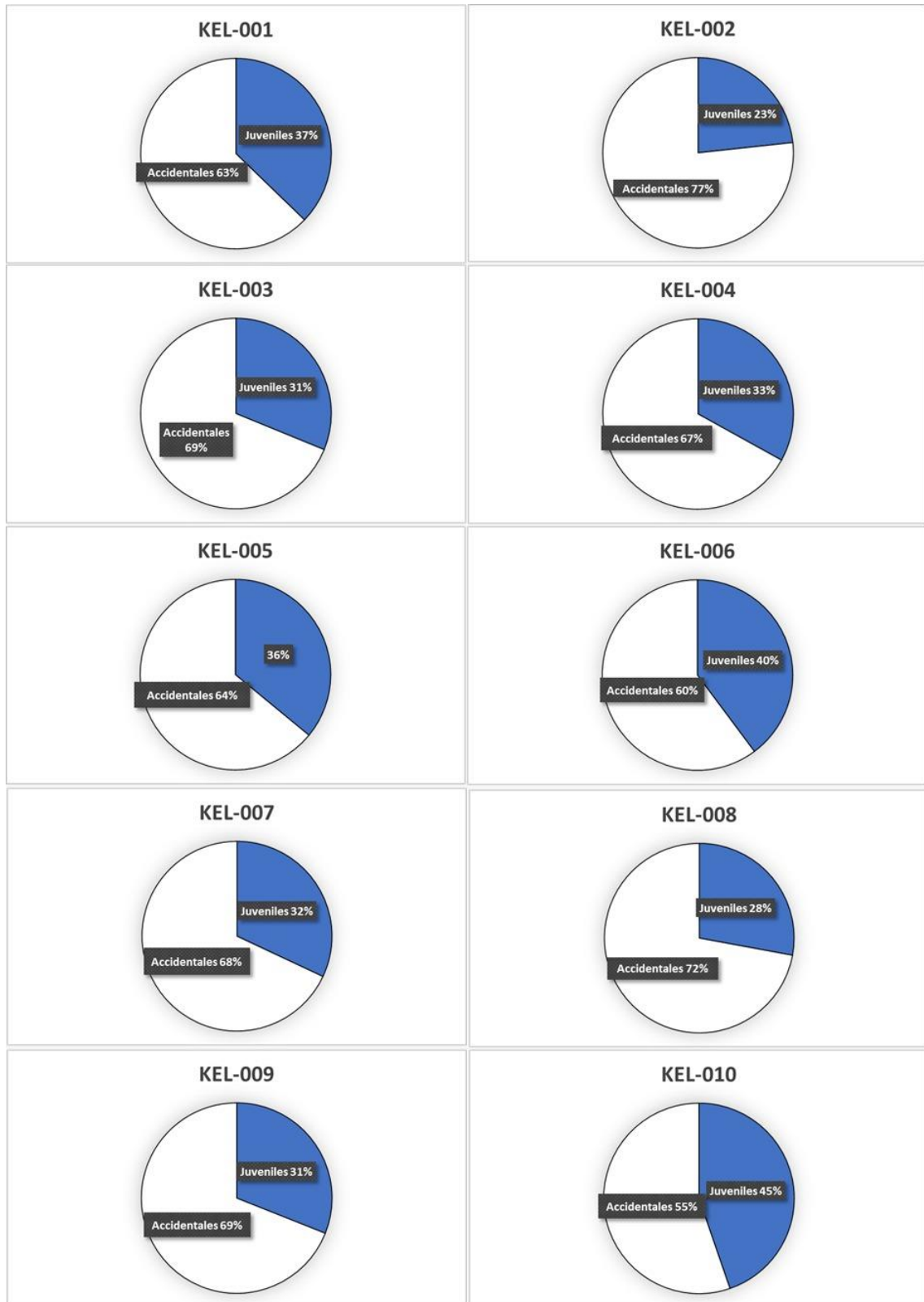


Figura 27. Diagramas pastel sobre el análisis de componentes juveniles y accidentales.

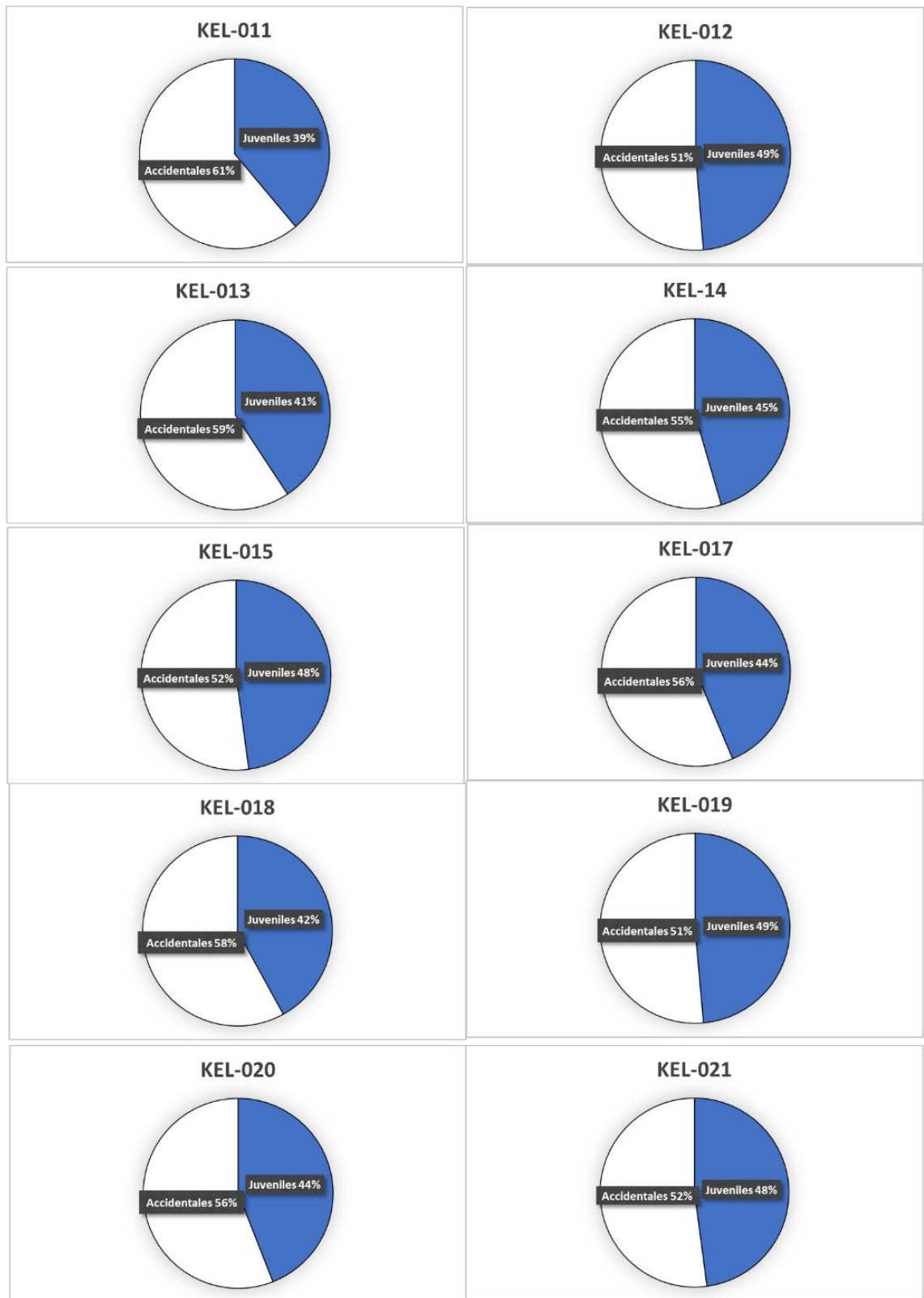


Figura 28. Continuación. Diagramas pastel sobre el análisis de componentes juveniles y accidentales.

EL resultado de este análisis que se puede observar la variación que van teniendo el porcentaje de juveniles en la cada muestra, esto lo podemos observar en las siguientes imágenes donde van de un valor mínimo de 23,28% a 48,70% (Figura 27 y 28).

El porcentaje de juveniles que tiene el flujo piroclástico es de 59,87% KEL-016.

Teniendo un mapa de resultados en el cual se ve el porcentaje de componentes juveniles a lo largo de todo el lahar (Figura 29).

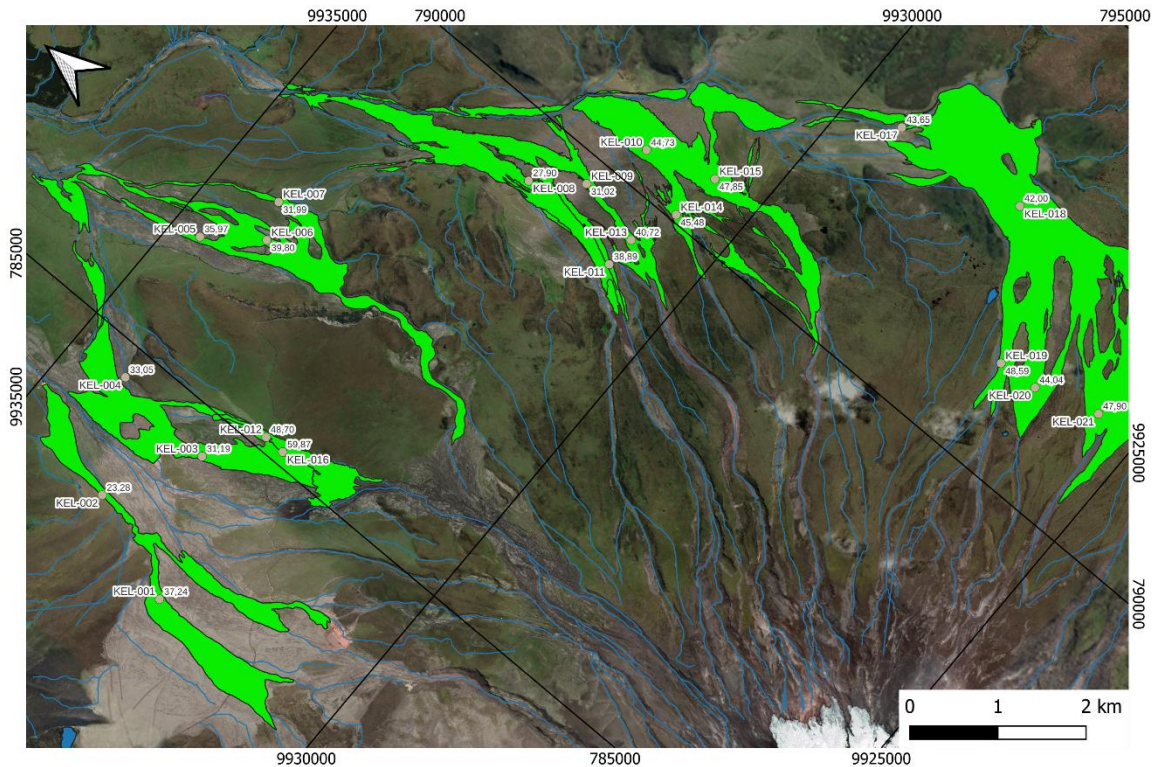


Figura 29. Mapa de resultados con respecto al porcentaje de componentes juveniles.

Escala 1:50 000

Con los datos obtenidos respecto del porcentaje de juveniles de la muestra del lahar podemos observar una la tendencia creciente sacando un ángulo a respecto la primera (a) muestra en el flanco norte hasta dirección este del volcán (Figura 30).

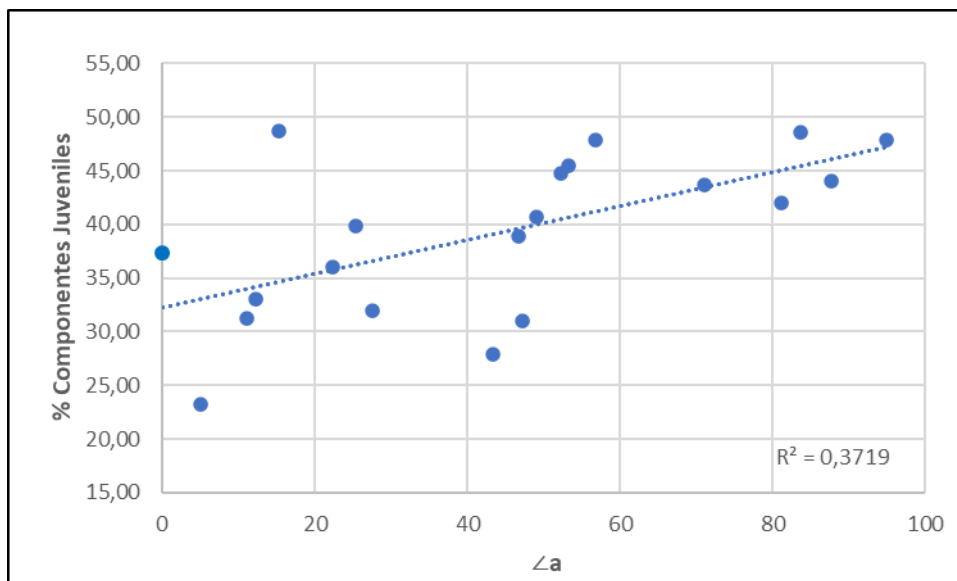


Figura 30. Diagrama en base del porcentaje de juveniles respecto el ángulo α . Ángulo α se definió el ángulo que se obtuvo al medir respecto la muestra KEL-001, el cráter del volcán y todas las muestras tomadas dentro del lahar de 1877.

4.2. Conclusiones

Se obtuvo las 20 muestras del lahar de 1877 en el flanco norte cerca del drenaje principal, también se obtuvo una muestra de sedimento de un flujo piroclástico.

- La granulometría indica que los depósitos del lahar de 1877 en la zona proximal pueden ser unimodales (9 muestras), bimodales (7 muestras) y multimodales (4 muestras).
- Con una excepción, todas las muestras corresponden a depósitos con sorteo muy malo (desviaciones estándar de 2,3 hasta 3,4).
- Según la clasificación de Pierson and Scott (1999) la gran mayoría de muestras corresponde a depósitos de "flujos de escombros no cohesivos".
- En el rango de 500-1000um el contenido de fragmentos juveniles varían en un rango de 25 a 50%.
- El contenido de fragmentos juveniles en el rango de 500-1000 um va creciendo de forma consistente desde el flanco Norte hacia el flanco Oriental

4.3. Recomendaciones

- Se recomienda que las muestras estén completamente secas para el tamizado manual, debido que se pueden obstruir los tamices con orificios de las aberturas muy pequeñas y alterar el resultado.
- Se recomienda un lavado de la sección a observar del binocular, debido que un mal lavado se podría confundir los componentes a clasificar.

CAPITULO V

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilera, E., Pareschi, M. T., Rosi, M., & Zanchetta, G. (2004). *Risk from lahars in the northern valleys of Cotopaxi Volcano (Ecuador)*. *Natural Hazards*, 33(2), 161-189. <https://doi.org/10.1023/B:NHAZ.0000037037.03155.23>
- Andrade, S. D., Saltos, E., Nogales, V., Cruz, S., Lee, G., & Barclay, J. (2022). *Detailed cartography of Cotopaxi's 1877 primary lahar deposits obtained by drone-imagery and field surveys in the proximal northern drainage*. *Remote Sensing*, 14(3), 631. <https://doi.org/10.3390/rs14030631>
- Andrade, D., Hall, M., Mothes, P., Troncoso Salgado, L. P., Eissen, J. P., Samaniego, P., ... & Yepes, H. (2005). *Los peligros volcánicos asociados con el Cotopaxi*. Quito: Corporación Editora Nacional, CEN/Escuela Politécnica Nacional. Instituto Geofísico, IG/Institut de Recherche pour le Développement, IRD.
- Hall, M. L., Samaniego, P., Pennec, J. L. L., & Johnson, J. B. (2008). *Ecuadorian Andes volcanism: A review of Late Pliocene to present activity*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.06.012>
- Hall, M., & Mothes, P. (2007). *The rhyolitic-andesitic eruptive history of Cotopaxi volcano, Ecuador*. *Bulletin of Volcanology*, 70(6), 675-702. <https://doi.org/10.1007/s00445-007-0161-2>
- Pistolesi, M., Cioni, R., Rosi, M., Cashman, K. V., Rossotti, A., & Aguilera, E. (2013). *Evidence for lahar-triggering mechanisms in complex stratigraphic sequences: the post-twelfth century eruptive activity of Cotopaxi Volcano, Ecuador*. *Bulletin of volcanology*, 75(3), 1-18. <https://doi.org/10.1007/s00445-013-0698-1>
- Lindholm, R. (2012). *A practical approach to sedimentology*. Springer Science & Business Media, 157-166.
- Mothes, P. A., & Vallance, J. W. (2015). Lahars at Cotopaxi and Tungurahua Volcanoes, Ecuador. En *Volcanic Hazards, Risks and Disasters* (pp. 141-168). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396453-3.00006-X>
- Mothes, P., Hall, M. L., Andrade, D., Samaniego, P., Pierson, T. C., Ruiz, A. G., & Yepes, H. (2004). *CHARACTER, STRATIGRAPHY AND MAGNITUDE OF HISTORICAL LAHARS OF COTOPAXI VOLCANO (ECUADOR)*.
- Vallance, J. W., & Iverson, R. M. (2015). Lahars and Their Deposits. En *The Encyclopedia of Volcanoes* (pp. 649-664). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00037-7>

ANEXOS

ANEXO I: TABLA DE UBICACIONES EN COORDENADAS UTM

Muestra	X	Y
KEL-001	782968	9932362
KEL-002	783454	9933620
KEL-003	784519	9933032
KEL-004	784647	9934278
KEL-005	786413	9934654
KEL-006	786872	9934048
KEL-007	787290	9934223
KEL-008	789298	9932204
KEL-009	789695	9931676
KEL-010	790426	9931402
KEL-011	789161	9930893
KEL-012	785154	9932616
KEL-013	789532	9930879
KEL-014	790079	9930672
KEL-015	790673	9930596
KEL-016	785146	9932364
KEL-017	792486	9929346
KEL-018	792663	9927746
KEL-019	791159	9926764
KEL-020	791196	9926291
KEL-021	791431	9925547

ANEXO II: TABLA DE DATOS GRANULOMETRICOS

Tablas de datos de las 20 muestras del lahar del 1877 y 1 muestra del flujo piroclástico, resultados de la granulometría de los depósitos de lahares primarios.

KEL-001					
Abertura de los Tamices (mm)	Peso del Tamiz (g)	Peso Tamiz con muestra (g)	Peso de Muestra (g)	%W	% Acumulado
31,5	451,01	589,35	138,34	11,81	11,81
16	447,26	503,9	56,64	4,83	16,64
8	407,31	584,87	177,56	15,16	31,80
4	376,11	522,82	146,71	12,52	44,32
2	344,44	458,01	113,57	9,69	54,02
1	315,22	420,75	105,53	9,01	63,03
0,5	316,72	428,4	111,68	9,53	72,56
0,25	416	534,19	118,19	10,09	82,65
0,125	406,09	497,59	91,5	7,81	90,46
0,063	199,08	254,2	55,12	4,71	95,16
Fondo	411,11	467,77	56,66	4,84	100,00
Total			1171,5	100	
Peso medido			1176,01	% W perdida	0,38

KEL-002					
Abertura de los Tamices (mm)	Peso del Tamiz (g)	Peso Tamiz con muestra (g)	Peso de Muestra (g)	%W	% Acumulado
31,5	451,01	568,58	117,57	10,53	10,53
16	447,27	687,3	240,03	21,50	32,03
8	407,31	588,22	180,91	16,21	48,24
4	376,11	527,46	151,35	13,56	61,80
2	344,44	442,73	98,29	8,80	70,60
1	315,29	378,94	63,65	5,70	76,31
0,5	316,74	370,13	53,39	4,78	81,09
0,25	415,29	475,44	60,15	5,39	86,48
0,125	407,5	461,85	54,35	4,87	91,35
0,063	199,08	239,83	40,75	3,65	95,00
Fondo	411,11	466,97	55,86	5,00	100,00
Total			1116,3	100	
Peso medido			1125,15	% W perdida	0,79

KEL-003					
Abertura de los Tamices (mm)	Peso del Tamiz (g)	Peso Tamiz con muestra (g)	Peso de Muestra (g)	%W	% Acumulado
31,5	451,01	0	0	0,00	0,00
16	447,23	543,98	96,75	7,47	7,47
8	407,28	525,6	118,32	9,13	16,59
4	376,07	493,98	117,91	9,10	25,69
2	344,41	467,89	123,48	9,53	35,22
1	315,21	456,42	141,21	10,90	46,12
0,5	316,5	481,96	165,46	12,77	58,88
0,25	415,72	590,83	175,11	13,51	72,39
0,125	406,75	573,42	166,67	12,86	85,25
0,063	199,1	312,76	113,66	8,77	94,02
Fondo	411,1	488,54	77,44	5,98	100,00
Total			1296,01	100	
Peso medido			1308,11	% W perdida	0,92

KEL-004					
Abertura de los Tamices (mm)	Peso del Tamiz (g)	Peso Tamiz con muestra (g)	Peso de Muestra (g)	%W	% Acumulado
31,5	451,01	0	0	0,00	0,00
16	447,26	664,25	216,99	16,11	16,11
8	407,3	540,96	133,66	9,92	26,03
4	376,11	472,61	96,5	7,16	33,19
2	344,43	445,38	100,95	7,49	40,68
1	315,21	434,37	119,16	8,84	49,53
0,5	316,7	464,66	147,96	10,98	60,51
0,25	415,72	589,5	173,78	12,90	73,41
0,125	406,76	561,18	154,42	11,46	84,87
0,063	199,09	308,19	109,1	8,10	92,97
Fondo	411,11	505,86	94,75	7,03	100,00
Total			1347,27	100	
Peso medido			1353,96	% W perdida	0,49

KEL-005					
Abertura de los Tamices (mm)	Peso del Tamiz (g)	Peso Tamiz con muestra (g)	Peso de Muestra (g)	%W	% Acumulado
31,5	451	502,64	51,64	4,36	4,36
16	447,25	512,77	65,52	5,53	9,89
8	407,29	528,13	120,84	10,20	20,09
4	376,1	510,57	134,47	11,35	31,44
2	344,43	507,38	162,95	13,76	45,20
1	315,24	489,36	174,12	14,70	59,90
0,5	316,71	471,05	154,34	13,03	72,92
0,25	415,71	558,14	142,43	12,02	84,95
0,125	406,77	502,3	95,53	8,06	93,01
0,063	199,29	245,18	45,89	3,87	96,89
Fondo	411,1	447,99	36,89	3,11	100,00
Total			1184,62	100	
Peso medido			1189,7	% W perdida	0,43

KEL-006					
Abertura de los Tamices (mm)	Peso del Tamiz (g)	Peso Tamiz con muestra (g)	Peso de Muestra (g)	%W	% Acumulado
31,5	451,01	704,46	253,45	18,63	18,63
16	447,23	576,88	129,65	9,53	28,15
8	407,28	571,64	164,36	12,08	40,23
4	376,07	484,9	108,83	8,00	48,23
2	344,4	435,83	91,43	6,72	54,95
1	315,22	410,3	95,08	6,99	61,94
0,5	316,7	427,19	110,49	8,12	70,06
0,25	415,74	544,7	128,96	9,48	79,53
0,125	406,5	530,78	124,28	9,13	88,67
0,063	199,15	277,48	78,33	5,76	94,42
Fondo	411,1	487,01	75,91	5,58	100,00
Total			1360,77	100	
Peso medido			1363,61	% W perdida	0,21

KEL-007					
Abertura de los Tamices (mm)	Peso del Tamiz (g)	Peso Tamiz con muestra (g)	Peso de Muestra (g)	%W	% Acumulado

31,5	451	0	0	0,00	0,00
16	447,25	526,13	78,88	5,85	5,85
8	407,29	724,42	317,13	23,52	29,37
4	376,1	668,15	292,05	21,66	51,02
2	344,43	543,5	199,07	14,76	65,79
1	315,24	441,68	126,44	9,38	75,16
0,5	316,71	406,89	90,18	6,69	81,85
0,25	415,71	496,96	81,25	6,03	87,88
0,125	406,77	476,51	69,74	5,17	93,05
0,063	199,29	244,52	45,23	3,35	96,40
Fondo	411,1	459,63	48,53	3,60	100,00
		Total	1348,5	100	
		Peso medido	1354,68	% W perdida	0,46

KEL-008					
Abertura de los Tamices (mm)	Peso del Tamiz (g)	Peso Tamiz con muestra (g)	Peso de Muestra (g)	%W	% Acumulado
31,5	451,01	0	0	0,00	0,00
16	447,25	586,85	139,6	11,52	11,52
8	407,3	608,69	201,39	16,62	28,15
4	376,1	597,54	221,44	18,28	46,42
2	344,44	515,66	171,22	14,13	60,56
1	315,22	446,07	130,85	10,80	71,36
0,5	316,71	435,35	118,64	9,79	81,15
0,25	415,75	528,85	113,1	9,34	90,49
0,125	406,5	475,97	69,47	5,73	96,22
0,063	199,15	226,64	27,49	2,27	98,49
Fondo	411,11	429,42	18,31	1,51	100,00
		Total	1211,51	100	
		Peso medido	1213,97	% W perdida	0,20

KEL-009					
Abertura de los Tamices (mm)	Peso del Tamiz (g)	Peso Tamiz con muestra (g)	Peso de Muestra (g)	%W	% Acumulado
31,5	451,06			0,00	0,00
16	447,28	516,92	69,64	6,18	6,18
8	407,31	562,16	154,85	13,74	19,93
4	376,11	515,7	139,59	12,39	32,32
2	344,44	487,54	143,1	12,70	45,02

1	315,26	450,55	135,29	12,01	57,03
0,5	316,74	442,82	126,08	11,19	68,22
0,25	415,95	538,91	122,96	10,91	79,13
0,125	406,84	502,77	95,93	8,52	87,65
0,063	199,06	257,98	58,92	5,23	92,88
Fondo	411,11	491,35	80,24	7,12	100,00
Total			1126,6	100	
Peso medido			1137,38	% W perdida	0,95

KEL-010					
Abertura de los Tamices (mm)	Peso del Tamiz (g)	Peso Tamiz con muestra (g)	Peso de Muestra (g)	%W	% Acumulado
31,5	451,01	521,92	70,91	4,71	4,71
16	447,26	769,7	322,44	21,41	26,12
8	407,31	661,7	254,39	16,89	43,01
4	376,11	518,21	142,1	9,44	52,45
2	344,45	448,57	104,12	6,91	59,36
1	315,22	416,85	101,63	6,75	66,11
0,5	316,72	432,05	115,33	7,66	73,77
0,25	415,75	551,91	136,16	9,04	82,81
0,125	406,56	526,35	119,79	7,95	90,76
0,063	199,2	269,8	70,6	4,69	95,45
Fondo	411,11	479,66	68,55	4,55	100,00
Total			1506,02	100	
Peso medido			1511,8	% W perdida	0,38

KEL-011					
Abertura de los Tamices (mm)	Peso del Tamiz (g)	Peso Tamiz con muestra (g)	Peso de Muestra (g)	%W	% Acumulado
31,5	451,02				0,00
16	447,28	568,08	120,8	9,91	9,91
8	407,31	623,81	216,5	17,76	27,68
4	376,11	591,16	215,05	17,65	45,32
2	344,43	525,69	181,26	14,87	60,19
1	315,24	459,99	144,75	11,88	72,07
0,5	316,74	440,01	123,27	10,11	82,19
0,25	415,96	513,68	97,72	8,02	90,20
0,125	406,86	463,64	56,78	4,66	94,86
0,063	199,08	232,27	33,19	2,72	97,59

Fondo	411,11	440,52	29,41	2,41	100,00
		Total	1218,73	100	
		Peso medido	1223,82	% W perdida	0,42

KEL-012					
Abertura de los Tamices (mm)	Peso del Tamiz (g)	Peso Tamiz con muestra (g)	Peso de Muestra (g)	%W	% Acumulado
31,5	451,01	0	0	0,00	0,00
16	447,26	476,02	28,76	2,24	2,24
8	407,31	474,39	67,08	5,23	7,47
4	376,11	492,5	116,39	9,07	16,55
2	344,44	488,78	144,34	11,25	27,80
1	315,26	469,69	154,43	12,04	39,84
0,5	316,76	509,52	192,76	15,03	54,87
0,25	415,95	608,86	192,91	15,04	69,91
0,125	406,85	560,91	154,06	12,01	81,92
0,063	199,08	355,49	156,41	12,19	94,11
Fondo	411,11	486,6	75,49	5,89	100,00
		Total	1282,63	100	
		Peso medido	1291,62	% W perdida	0,70

KEL-013					
Abertura de los Tamices (mm)	Peso del Tamiz (g)	Peso Tamiz con muestra (g)	Peso de Muestra (g)	%W	% Acumulado
31,5	451,01	0	0	0,00	0,00
16	447,25	483,43	36,18	2,72	2,72
8	407,3	538,21	130,91	9,86	12,58
4	376,09	508,77	132,68	9,99	22,57
2	344,42	467,8	123,38	9,29	31,86
1	315,2	451,6	136,4	10,27	42,13
0,5	316,7	482,43	165,73	12,48	54,60
0,25	415,74	634,7	218,96	16,48	71,09
0,125	406,09	587,75	181,66	13,68	84,76
0,063	199,08	302,57	103,49	7,79	92,55
Fondo	411,11	510,02	98,91	7,45	100,00
		Total	1328,3	100	
		Peso medido	1332,77	% W perdida	0,34

KEL-014					
Abertura de los Tamices (mm)	Peso del Tamiz (g)	Peso Tamiz con muestra (g)	Peso de Muestra (g)	%W	% Acumulado
31,5	451,01	0	0	0,00	0,00
16	447,25	0	0	0,00	0,00
8	407,28	551,72	144,44	8,94	8,94
4	376,09	572,7	196,61	12,16	21,10
2	344,44	529,88	185,44	11,47	32,57
1	315,22	502,11	186,89	11,56	44,13
0,5	316,71	560,38	243,67	15,07	59,21
0,25	416	670,46	254,46	15,74	74,95
0,125	406,1	627,18	221,08	13,68	88,63
0,063	199,08	306,3	107,22	6,63	95,26
Fondo	411,11	487,73	76,62	4,74	100,00
Total			1616,43	100	
Peso medido			1618,08	% W perdida	0,10

KEL-015					
Abertura de los Tamices (mm)	Peso del Tamiz (g)	Peso Tamiz con muestra (g)	Peso de Muestra (g)	%W	% Acumulado
31,5	451,01	0	0	0,00	0,00
16	447,25	452,37	5,12	0,37	0,37
8	407,28	448,65	41,37	3,00	3,37
4	376,09	423,09	47	3,41	6,78
2	344,44	394,04	49,6	3,60	10,38
1	315,22	433,55	118,33	8,59	18,97
0,5	316,72	566,81	250,09	18,15	37,11
0,25	416	793,2	377,2	27,37	64,48
0,125	406,13	679,6	273,47	19,84	84,32
0,063	199,08	346,61	147,53	10,70	95,03
Fondo	411,11	479,63	68,52	4,97	100,00
Total			1378,23	100	
Peso medido			1384,2	% W perdida	0,43

KEL-016 – flujo					
Abertura de los Tamices (mm)	Peso del Tamiz (g)	Peso Tamiz con muestra (g)	Peso de Muestra (g)	%W	% Acumulado
31,5	451,01	0		0,00	0,00

16	447,26	589,28	142,02	8,53	8,53
8	407,31	621,12	213,81	12,85	21,38
4	376,11	540,15	164,04	9,86	31,24
2	344,44	490,78	146,34	8,79	40,03
1	315,22	461,44	146,22	8,79	48,82
0,5	316,72	507,03	190,31	11,44	60,26
0,25	416	670,81	254,81	15,31	75,57
0,125	406,09	644,94	238,85	14,35	89,92
0,063	199,08	312,46	113,38	6,81	96,73
Fondo	411,11	465,45	54,34	3,27	100,00
Total			1664,12	100	
Peso medido			1664,95	% W perdida	0,05

KEL-017					
Abertura de los Tamices (mm)	Peso del Tamiz (g)	Peso Tamiz con muestra (g)	Peso de Muestra (g)	%W	% Acumulado
31,5	451,01	512,07	61,06	4,45	4,45
16	447,26	537,51	90,25	6,57	11,02
8	407,31	512,13	104,82	7,64	18,66
4	376,11	488,67	112,56	8,20	26,86
2	344,44	459,69	115,25	8,40	35,25
1	315,22	450,8	135,58	9,88	45,13
0,5	316,72	500,01	183,29	13,35	58,48
0,25	416	650,05	234,05	17,05	75,53
0,125	406,09	599,52	193,43	14,09	89,62
0,063	199,08	301,48	102,4	7,46	97,08
Fondo	411,11	451,17	40,06	2,92	100,00
Total			1372,75	100	
Peso medido			1380,1	% W perdida	0,53

KEL-018					
Abertura de los Tamices (mm)	Peso del Tamiz (g)	Peso Tamiz con muestra (g)	Peso de Muestra (g)	%W	% Acumulado
31,5	451,01	0		0,00	0,00
16	447,26	654,54	207,28	13,12	13,12
8	407,31	605,84	198,53	12,57	25,69
4	376,11	585,07	208,96	13,23	38,92
2	344,44	532,77	188,33	11,92	50,84
1	315,22	469,73	154,51	9,78	60,62

0,5	316,72	476,26	159,54	10,10	70,72
0,25	416	592,1	176,1	11,15	81,87
0,125	406,09	550,2	144,11	9,12	90,99
0,063	199,08	275,59	76,51	4,84	95,83
Fondo	411,11	476,96	65,85	4,17	100,00
Total			1579,72	100	
Peso medido			1583,91	% W perdida	0,26

KEL-019					
Abertura de los Tamices (mm)	Peso del Tamiz (g)	Peso Tamiz con muestra (g)	Peso de Muestra (g)	%W	% Acumulado
31,5	451,01	0		0,00	0,00
16	447,26	596,41	149,15	10,75	10,75
8	407,31	504,37	97,06	6,99	17,74
4	376,11	502,72	126,61	9,12	26,87
2	344,44	482,38	137,94	9,94	36,81
1	315,22	492,49	177,27	12,77	49,58
0,5	316,72	542,94	226,22	16,30	65,88
0,25	416	646,14	230,14	16,58	82,47
0,125	406,09	546,3	140,21	10,10	92,57
0,063	199,08	288,78	89,7	6,46	99,03
Fondo	411,11	424,53	13,42	0,97	100,00
Total			1387,72	100	
Peso medido			1391,5	% W perdida	0,27

KEL-020					
Abertura de los Tamices (mm)	Peso del Tamiz (g)	Peso Tamiz con muestra (g)	Peso de Muestra (g)	%W	% Acumulado
31,5	451,01	0		0,00	0,00
16	447,26	579,55	130,04	10,73	10,73
8	407,31	577,3	182,14	15,02	25,75
4	376,11	589,45	132,63	10,94	36,69
2	344,44	508,74	105,41	8,69	45,38
1	315,22	449,85	137,53	11,34	56,73
0,5	316,72	452,75	239,17	19,73	76,46
0,25	416	555,89	93,79	7,74	84,19
0,125	406,09	509,79	103,7	8,55	92,75
0,063	199,08	253,17	54,09	4,46	97,21
Fondo	411,11	444,96	33,85	2,79	100,00

Total	1212,35	100	
Peso medido	1223,68	% W perdida	0,93

KEL-021					
Abertura de los Tamices (mm)	Peso del Tamiz (g)	Peso Tamiz con muestra (g)	Peso de Muestra (g)	%W	% Acumulado
31,5	451,01	488,04	37,03	2,70	2,70
16	447,26	533,04	85,78	6,25	8,94
8	407,31	593,08	185,77	13,53	22,47
4	376,11	519,87	143,76	10,47	32,94
2	344,44	464,58	120,14	8,75	41,69
1	315,22	445,9	130,68	9,52	51,21
0,5	316,72	474,72	158	11,51	62,72
0,25	416	606,1	190,1	13,84	76,56
0,125	406,09	565,1	159,01	11,58	88,14
0,063	199,08	283	83,92	6,11	94,25
Fondo	411,11	490	78,89	5,75	100,00
		Total	1373,08	100	
		Peso medido	1379,25	% W perdida	0,45