



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

ANÁLISIS DE PARÁMETROS ERUPTIVOS DE LA ERUPCIÓN CHUNGARÁ, VOLCÁN PARINACOTA, ANDES CENTRALES, CHILE.

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

MIYALI JAVIERA RIQUELME GARRAU

PROFESOR GUÍA:
ÁNGELO CASTRUCCIO ÁLVAREZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
PATRICIA LARREA MÁRQUEZ
FRANCISCO DELGADO DE LA PUENTE

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Fondecyt regular *the role of volcano edifice dimensions on patterns of volcanic activity of arc-volcanoes* 1211869

SANTIAGO DE CHILE
2024

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE:** Geóloga
ESTUDIANTE: Miyali Javiera Riquelme Garrau
FECHA: 2024
PROFESOR GUÍA: Ángelo Castruccio Álvarez

ANÁLISIS DE PARÁMETROS ERUPTIVOS DE LA ERUPCIÓN CHUNGARÁ, VOLCÁN PARINACOTA, ANDES CENTRALES, CHILE.

En este trabajo se define y analiza la unidad Chungará, correspondiente a un depósito de caída que se sugiere que es de edad 2.6-2.4 ka, donde pertenece a la unidad postcolapso Parinacota 3 del volcán Parinacota (Holoceno; <8 ka). La unidad Chungará presenta hasta aproximadamente 60 cm de espesor y se extiende hacia el Sureste del volcán. Por otra parte, de acuerdo con los resultados de este trabajo, corresponde a una erupción de intensidad pequeña/moderada de estilo eruptivo subpliniana.

La unidad Chungará es un depósito de caída de composición traquiandesítica a traquidacítica, que presenta una matriz de aproximadamente 30-40% y fragmentos mayores de 60-70%. La unidad se compone de principalmente pómez blanquecina (hasta 72 wt.% en fragmentos mayores) y con porcentajes menores de pómez parda y escoria (0.5 a 4 wt.% en fragmentos mayores), fragmentos líticos negros, blanquecinos y rojizos (hasta 1 wt.% en fragmentos mayores) y, cristales (<1% en fragmentos mayores).

Según el modelo de isopleas, la altura de la columna eruptiva que generó el depósito fue de 12 km. Por otra parte, según el modelo de isópacas, el depósito presenta un volumen de 0.01-0.02 km³. Estos valores pueden ser asociados a un VEI de 3 y se desprende que la velocidad del viento al momento de la erupción fue de 30 m/s; según el modelo de isopleas. Además, presenta una tasa eruptada de $(1.62 \text{ a } 2.55) \times 10^3 \text{ (m}^3\text{/s)}$.

Respecto al peligro volcánico, se desprende que el viento presenta dirección hacia el sur/sureste en algunos períodos, lo que, en caso de presentarse una erupción explosiva, podría afectar a la carretera internacional 11CH que conecta Chile-Bolivia y la infraestructura ubicada al sur del volcán y a orilla de la misma carretera.

La vida pasa en un suspiro.

*Para tata y mami
que no pudieron
acompañarme física-
mente en este proceso.*

Agradecimientos

Agradezco a cada persona que me ha ayudado y apoyado en este largo proceso universitario y a lo largo de estos años desde plan común hasta especializarme en la carrera de Geología. Así como también a la Universidad de Chile por darme esta oportunidad para desarrollar mi carrera profesional en el ámbito que lo deseaba desde niña. Gracias a todas las personas que se han hecho partícipe de este proyecto de vida y me ha apoyado en diversos ámbitos de la vida.

Agradecer también al proyecto Fondecyt Regular *The role of volcano edifice dimensions on patterns of volcanic activity of arc-volcanoes*, folio 1211869 junto al profesor a cargo del proyecto y guía de mi trabajo de tesis, así como también a la comisión y a los compañero/as de terreno; gracias por darme la oportunidad de trabajar a la par con ustedes.

Esta etapa universitaria me ha ayudado a mi proceso de formación profesional y crecimiento personal, tanto con sus momentos gratos como con sus momentos no tan gratos. Me ha ayudado para seguir mi carrera adecuadamente con todas las herramientas necesarias. Agradezco al taller de armadillo por guiarme en el proceso escritura de la tesis cuando lo necesitaba y a la universidad de Chile por abrirme sus puertas tan acogedoramente desde que entré, así como también agradezco a todas las instancias en las que participé, a los equipos y agrupaciones de los que formé parte y forjamos lazos que hasta el día de hoy importan, y, agradezco a los y las profesores/as que me dieron la oportunidad para trabajar con ellos y confiar en mí, tanto a nivel de proyectos científicos como siendo ayudante y auxiliar en cursos, sin su apoyo, no hubiera sido posible, por ello, lo agradezco enormemente y recordaré siempre, ya que, para mí es importante seguir aprendiendo y puliéndome en el ámbito de la investigación científica y docencia. De la misma forma, agradezco a los y las compañeras, profesores y funcionarias/os que me han ayudado y animado en el camino, les agradezco rotundamente y un gran abrazo.

Agradecer a mi familia; a mi mamá Leslie, Alba y mi hermano Carlos, que siempre estuvieron conmigo en las buenas y en las malas, apoyándome en momentos cruciales de mi vida, también por hacerse partícipes de este arduo proceso universitario con sus consejos y apoyos, siempre jugándose para que saliéramos adelante y pudiéramos sonreírle a la vida. Así como también a mi padre y el resto de la familia por la compañía y apoyo que brindaban cuando lo necesité.

También agradezco a mis mejores amigo/as de siempre por la luz hermosa y brillante que les caracteriza, sin duda una compañía mutua, única e inigualable para todos los tiempos de la vida desde sus luces hasta sus sombras. Sigo agradeciendo a mis amigos, amigas y compañeros/as del camino, donde con una simple sonrisa alegraban el día por más bajo que fuera.

Por último, agradecerme a mí misma por darme esta oportunidad, que a pesar de todos los obstáculos que tuve que enfrentar, pude seguir adelante en este camino y lograr ser una profesional geóloga adecuada para mis propios proyectos de vida y seguir creciendo como humana. Porque no todo en la vida es como uno lo desea, pero eso es lo bello de los dolores, nos enriquecen el camino y nos hacen mucho más fuertes. Por esto y más agradezco lo aprendido a mí y a la vida.

Tabla de Contenido

Capítulo 1 : Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Hipótesis.....	2
1.3. Objetivos	2
1.3.1. General	2
1.3.2. Específicos	2
1.4. Ubicación y vías de acceso	2
Capítulo 2 : Marco Geológico.....	4
2.1. Marco geológico regional	6
2.2. Marco geológico regional local.....	6
2.2.1. Trabajos previos	6
2.2.2. Basamento Volcán Parinacota	8
2.2.3. Geología Volcán Parinacota	8
2.2.4. Depósitos sedimentarios cuaternarios.....	11
2.2.5. Estructuras.....	11
Capítulo 3 : Metodología	13
3.1. Trabajo de terreno	13
3.2. Trabajo de laboratorio	14
3.2.1. Tamizaje de muestras.....	14
3.2.2. Categorización de componentes	16
3.2.3. Cálculo de densidad	16
3.2.4. Cálculo de porcentaje de vesículas	19
3.3. Trabajo de gabinete	20
3.3.1. Descripción petrológica material juvenil.....	20
3.3.2. Geoquímica	21
3.3.3. Modelos de isópacas e isopletras	23

Capítulo 4 : Resultados	28
4.1. Estratigrafía	28
4.2. Depósito de caída Chungará	34
4.2.1. Generalidades.....	34
4.2.2. Edad	34
4.2.3. Distribución.....	35
4.2.4. Espesores, volumen, isópacas	35
4.2.5. Tamaño clasto, intensidad.....	40
4.2.6. Descripción Macroscópica Unidades, Estructuras.....	49
4.2.7. Descripción Microscópica	52
4.2.8. Geoquímica	69
Capítulo 5 : Discusiones	79
5.1. Volumen de erupción y comparación con registro volcánico.....	79
5.2. Clasificación de erupción.....	80
5.3. Significado químico de juveniles	83
5.4. Peligro volcánico.....	84
Capítulo 6: Conclusiones	86
Bibliografía.....	87
Anexos.....	92
Anexo A. Cálculos de densidad	92
A.1. Cálculo de densidad mediante método manual.....	92
A.2. Cálculo de densidad mediante método Arquímedes	98
Anexo B. Cálculo de volumen lavas	99
B.1. Lavas unidad Parinacota 1.....	99
B.2. Lavas unidad Parinacota 3.....	101
Anexo C. Columnas estratigráficas y edad de Chungará.....	102
Anexo D. Columna estratigráfica 1.....	103
Anexo E. Granulometría y categorización de componentes	106
Anexo F. Análisis de cortes transparentes	112

Anexo G. Análisis geoquímico 115

Índice de Tablas

<i>Tabla 1: Escala de Φ (Boggs, 2009).</i>	15
<i>Tabla 2: Valores de área calculada en cada isópaca, obtenido de Software libre Qgis.</i>	37
<i>Tabla 3: Coeficientes de correlación (R2) para cada ajuste: Exponencial segmento 1, Exponencial segmento 2, Power Law, Weibull.</i>	39
<i>Tabla 4: Valores de volumen calculado en cada isópaca obtenido por medio de Software AshCalc, según cada modelo: Exponencial, Power Law, Weibull.</i>	39
<i>Tabla 5: Parámetros para el modelo Weibull obtenido en la modelación.</i>	40
<i>Tabla 6: Tabla con isopletras 2, 5, 8 [cm] con sus respectivos downwind (km), crosswind (km). En la cuarta columna se observa la densidad de clastos ocupada (kg/m^3) para el cálculo de altura y velocidad del viento.</i>	45
<i>Tabla 7: Tabla con isopletras de 2, 5 y 8 [cm] con su respectiva altura de la columna eruptiva (H (km)), velocidad del viento en la tropopausa (V (m/s)) calculadas para cada isopletra.</i>	46
<i>Tabla 8: Porcentaje por cada componente con respecto a tamaño de fragmentos de cada Muestra de unidad Chungará (M2, M3 y M5) y M6 perteneciente a otra unidad posiblemente. Cada fila representa un tamaño de fragmento, donde se obtiene el porcentaje en peso de cada componente de ese tamaño respecto a la suma de peso total entre los componentes de ese tamaño. NA significa No aplica, donde muestra no presentan granos de ese tamaño, en este caso la muestra M6 no presenta granos de tamaño de 15 [mm].</i>	60
<i>Tabla 9: Densidad para fragmentos juveniles según cálculo de Ley de Arquímedes y método manual descrito en Metodología. Junto al porcentaje de vesículas calculado para cada caso.</i>	68
<i>Tabla 10: Cálculos para duración de erupción según tipo de modelo (Wilson & Walker (2009), Mastin et al. (2009), Sparks et al. (1997)). Se observa en la tercera columna la tasa eruptiva (TE) obtenida del modelo respectivo, en la cuarta columna se observa la duración (s) obtenida del volumen dividido en la Tasa Eruptiva, en la quinta y sexta columna se observa la duración convertida a minutos y horas, respectivamente.</i>	81
<i>Tabla A.A.1.: Tabla de pómez blanquecina con las mediciones de densidad mediante método manual.</i>	97
<i>Tabla A.A.2.: Tabla de escorias con las mediciones de densidad mediante método manual.</i>	98
<i>Tabla A.A.3.: Tabla de pómez blanquecina, pómez parda, escoria y líticos negros con las mediciones de densidad mediante método de Arquímedes.</i>	99
<i>Tabla A.A.4.: Tabla de escoria (muestras T2.M2.E1, T3.M1.M, T1.M5.1) con las mediciones de densidad mediante método de Arquímedes.</i>	99
<i>Tabla A.B.1.: Se observa el volumen en km^3 para cada flujo de lava pertenecientes a la unidad Parinacota 1. Estas son obtenidas de Clavero et al. (2012) y Hora et al. (2007), donde</i>	

<i>notación es de Hora et al. (2007); oclb es andesita-dacita intermedia, ocb es Couleés dacíticos, ocl1 son dacitas del flanco norte y ocl2 son andesitas del flanco oeste. Se observa que lavas oclb-1, oclb-2, ocb-1, ocb-2, ocb-3, ocl1-1, ocl2-1 poseen mayor volumen que unidad Chungará (0.01-0.02 km³).</i>	100
<i>Tabla A.B.2.: Se obtiene un ejemplar de lava sur, lava lateral y lava del norte pertenecientes a la unidad Parinacota 3. Columna sexta “Volumen (km³)” es el volumen de la lava correspondiente, calculado como área (km²) por espesor (km). El espesor se obtiene a partir de perfiles de elevación en 3 puntos de la lava de la sección frontal y lateral de la colada de lava.</i>	101
<i>Tabla A.C.1: Tabla con puntos de columnas estratigráficas levantadas.</i>	102
<i>Tabla A.E.1.: Nombre de muestras utilizadas para el análisis granulométrico y categorización de componentes (columna 3) asociadas con su respectiva unidad (columna 1). Además, se agrega el punto de estudio (columna 2), la columna estratigráfica en la cual se encuentra la muestra (columna 4), coordenadas Este y Sur y, altura del punto (columna 5, 6 y 7, respectivamente).</i>	106
<i>Tabla A.E.2.: Valores de parámetros granulométricos; Mediana y desviación estándar para muestras M2, M3 y M5 de unidad Chungará, obtenidos con Gradistat 9.1.</i>	109
<i>Tabla A.E.3.: Porcentaje por tamaño de grano en porcentaje en peso para cada muestra analizada granulométricamente (M2, M3, M4, M5 y M7).</i>	110
<i>Tabla A.E.4.: Porcentaje de matriz (M) y fragmentos mayores (FM) en porcentaje en peso para cada muestra de unidad Gran Couleé. Tambo Quemado y Chungará. Donde se considera matriz como fragmentos <2 [mm], excepto en muestra PARI.T1.M6.M.U; proveniente de otra unidad, donde se considera como matriz los fragmentos <0.0625 [mm].</i>	110
<i>Tabla A.E.5.: Porcentaje de fragmentos categorizados por tamaño y muestra (M2, M3 y M5) de la Unidad Chungará, todos los valores en porcentaje en peso.</i>	111
<i>Tabla A.F.1.: Muestras (en columna 1) de las cuales se obtuvieron láminas delgadas transparentes pulidas para analizar. Se observa el tipo (columna 2), punto donde se obtiene muestra (columna 3), descripción de la muestra de mano (columna 4).</i>	113
<i>Tabla A.F.2: Porcentaje de fases obtenidas en el análisis de imágenes de los cortes transparentes pulidos de las muestras. Se realiza a través del programa JMicrovision. Se indica de color rosado el porcentaje de “sin muestra” y “vesículas”; estos porcentajes serán eliminados en el recálculo de las fases de “masa fundamental”, “fenocristales”, “microlitos”, “fragmentos líticos”.</i>	114
<i>Tabla A.F.3.: Porcentaje de fases obtenidas en el análisis de imágenes de los cortes transparentes pulidos de las muestras con el recálculo de fases, eliminando “vesículas” y “sin muestra” indicado en rosado en la Tabla A.F.2. Se indica de color verde el porcentaje de masa fundamental y fragmentos piroclásticos; donde los fragmentos piroclásticos engloban a las fases de “fenocristales”, “microlitos” y “fragmentos líticos”.</i>	114
<i>Tabla A.F.4.: Porcentaje por mineral observado en microscopio óptico de los cortes transparentes pulidos de las muestras T1.M3.P1, T1.M3.P2, T1.M4.E1, T1.M4.E2, T1.M4.E3, T1.M5.E1, T2.M2.E1.</i>	115

<i>Tabla A.G.1.: Muestras de fragmentos juveniles tipo pómez blanquecina, pómez parda y escoria enviadas provenientes de la unidad Chungará y enviadas a laboratorio para análisis geoquímico.</i>	<i>115</i>
<i>Tabla A.G.2.: Resultados geoquímicos de muestras de unidad Chungará. Se observan elementos mayores en porcentaje en peso de los óxidos (%). Obtenido a partir de método XRF.....</i>	<i>118</i>
<i>Tabla A.G.3.: Resultados geoquímicos de muestras de unidad Chungará. Se observan elementos traza en unidad de ppm. Obtenido a partir de método ICP-MS.</i>	<i>118</i>
<i>Tabla A.G.4.: Recopilación geoquímica de volcán Parinacota. Elementos mayores en porcentaje en peso de óxidos.....</i>	<i>127</i>
<i>Tabla A.G.5. Parte 4.: Recopilación geoquímica de volcán Parinacota. Elementos traza en unidad de ppm.</i>	<i>132</i>

Índice de Figuras

- Figura 1: Fotografía volcán Parinacota, se observa atrás el volcán Pomerape y adelante del volcán Parinacota, se encuentra el Lago Chungará..... 1*
- Figura 2: Mapa de ubicación zona del volcán Parinacota. a. Mapa Chile continental regional, mapa de escala 1:1.000.000, SERNAGEOMIN. Con un cuadro rojo se presenta la región de Arica y Parinacota de Chile. b. Mapa Región de Arica y Parinacota. Con un cuadro amarillo se presenta la zona del volcán Parinacota. c. Mapa zona del volcán Parinacota con rutas de acceso. 3*
- Figura 3: Fotografía en ruta internacional 11-CH, al fondo se observa el volcán Parinacota a la derecha y volcán Pomerape a la izquierda. 3*
- Figura 4: Mapa geológico volcán Parinacota a escala 1:50000, editado de la carta geológica del volcán Parinacota del SERNAGEOMIN (Clavero et al., 2012), donde se observa Unidad Parinacota 1 de color rojizos, Unidad Parinacota 2 de colores azules/celeste, Unidad Parinacota 3 de colores morados/lila. Los depósitos cuaternarios están en colores amarillos/café pardo y, los depósitos del basamento están en colores verdes, la descripción de cada unidad se puede observar en los recuadros de leyenda y simbología. 6*
- Figura 5: Mapa de puntos de terreno (MIPA) estudiados; los puntos blancos son donde se encuentra la unidad Chungará y los puntos rojos son otros puntos estudiados. 14*
- Figura 6: Experimento cálculo de densidad por Ley de Arquímedes realizado en el laboratorio de sedimentología, Universidad de Chile. En a. se observa que el vaso precipitado presenta el nivel de agua a un poco más de 100 mL. En b. luego se pone el piroclasto con parafina y el peso de fierro donde se observa que el nivel de agua sube a 150 mL aproximadamente. 17*
- Figura 7: Imagen de corte de una muestra de pómez a nícoles cruzados, donde se observa el conteo por puntos de componentes en muestra; observados en la lista de clases (list of classes); sin muestra (puntos azul), vesículas (puntos rojos), masa fundamental (puntos amarillos), cristales (puntos rosados), microcristales (puntos verdes), fragmentos líticos (puntos turquesa). Al lado de cada componente se muestra el porcentaje de esta muestra. 21*
- Figura 8: Trayectoria de clastos desde la región Paraguas (indicado con U de color lila) hasta el suelo, para columnas con altura $H_t=21$ y $H_t=35$ km. Se observa que en la columna de altura 35km, clastos encontrados a una distancia de 10km desde el centro volcánico poseen un diámetro de 6.4cm, mientras clastos encontrados a una distancia de 20km poseen diámetro de 1.6cm y clastos encontrados a 25km poseen diámetro de 0.4cm. Además, se observa que la columna mayor (35km) posee mayor dispersión máxima (hasta 25km desde el centro eruptivo), mientras la columna menor (21km) posee menor dispersión máxima (hasta <10km desde el centro eruptivo). Figura editada de Carey & Sparks (1986). 26*
- Figura 9: En la figura se observa un rango de crosswind versus máximo downwind en diferentes diámetros de clastos y respecto a diferente densidad de clastos (arriba a la izquierda de cada gráfico). Figura editada de Carey & Sparks (1986). 27*

<i>Figura 10: Mapa con puntos donde se levantan columnas estratigráficas para este estudio: MIPA 2, MIPA 3, MIPA 4, MIPA 7 y MIPA 9.</i>	28
<i>Figura 11: a. Columna estratigráfica 5 (MIPA 7), de base a techo: la unidad 1 es Gran Coulé (GC), la unidad 3 es unidad Tambo Quemado (TQ) y la unidad 5 es unidad Chungará (C). Las líneas de rojo son el límite de la unidad, línea de morado ubicada en la u. GC representa el límite de la franja superior que presenta una disminución en el tamaño de los fragmentos. b. Columnas estratigráficas en puntos MIPA 2, 3, 4, 7, 9.</i>	33
<i>Figura 12: Mapa de isópacas Unidad Chungará; 40, 30, 20 y 10 [cm]. Donde se encuentran los puntos del terreno 1 (T1), terreno 2 (T2), terreno 3 (T3).</i>	36
<i>Figura 13: a. Modelo Exponencial, b. Modelo Power Law; donde límites de la integral; B=3.04 y C=7.1894, además el valor de T0 de la fórmula para B, es el valor T0 del segmento 1 del modelo exponencial (a). Y, c. Modelo Weibull. Modelos ajustados a los datos de isópacas que fueron obtenidas en este estudio, utilizando el Software AshCalc.</i>	38
<i>Figura 14: Mapa ubicación de muestras analizadas granulométricamente; M2, M3, M4, M5 y M6; coordenadas geográficas en Tabla A.E.1. La unidad Chungará está presente en M2, M3 y M5. Las demás muestras con su respectivo análisis granulométrico se encuentran en Anexo E.</i>	41
<i>Figura 15: Distribución granulométrica unidad Chungará para muestras a. M2, b. M3, c. M5 y d. M6, perteneciente a otra unidad.</i>	42
<i>Figura 16: Gráfico de parámetros granulométricos; Mediana ($Md\phi$) versus Coeficiente de Desviación (Desviación estándar) ($\sigma\phi$), figura editada de Brown & Andrews (2015). Datos de mediana y desviación estándar presentes en Tabla A.E.2).</i>	43
<i>Figura 17: Modelo de isopletas donde se observa Isopleta de 2, 5 y 8 [cm]. Se observa con círculos rosados; los puntos T1-T2 (terreno 1 y 2), círculos amarillos; los puntos T3 (terreno 3) y con círculos calipso; puntos Bombas (donde se encontraron bombas pumíceas).</i>	45
<i>Figura 18: Figura editada y adaptada de Bonadonna & Costa (2013). Presenta la clasificación para depósitos de tefra en la determinación de la altura de la pluma y MER (Mass Eruption Rate, Tasa de masa eruptada kg/s) estimado acorde a la parametrización de Mastin et al. (2009).</i>	47
<i>Figura 19: Criterio para estimación del Volcanic Explosivity Index (VEI) (Newhall & Self, 1982), editado. Para la unidad Chungará se observa un VEI =3 con columna eruptiva =3-15 (km). Se marca en rojo las clasificaciones para cada criterio de la unidad Chungará. .</i>	49
<i>Figura 20: Calicata realizada en punto MIPA 3. Se observa en b. de base a techo; la unidad Block & Ash, indicada con un número 1. Indicado con un número 2 amarillo, una unidad transicional que se es principalmente de matriz escorácea. La unidad Tambo Quemado está indicada con un número 3 en amarillo. Indicado con un número 4, se encuentra una unidad transicional de ceniza a lapilli fino principalmente escorácea. La unidad Chungará, indicada con un número 5 en amarillo. Indicado con un número 6 amarillo se encuentra unidad transicional entre el nivel erosivo y la unidad Chungará.</i>	51

<i>Figura 21: Calicata realizada en punto MIPA 7. Se observa en b. la unidad Chungará indicada como “5-C” y delimitada por líneas rojas en su base y techo. Para mayor detalle de las otras unidades presentes en este punto, ver en Figura 11.a.</i>	<i>52</i>
<i>Figura 22: Fragmentos juveniles unidad Chungará, en a. se observa escoria, en b. se observa pómez blanquecina, c. pómez parda, d. pómez con bandeamiento escoráceo.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 23: Fragmentos líticos, en a. se observa líticos blanquecinos, en b. se observa líticos negros, en c. líticos rojizos.</i>	<i>55</i>
<i>Figura 24: Cristales libres, se observa Plagioclasa.</i>	<i>56</i>
<i>Figura 25: Porcentaje de juveniles con bandeamiento para los tamaños de grano de 2 [mm], 4 [mm], 8 [mm] y 16 [mm] para las muestras M2, M3 y M5 pertenecientes a la unidad Chungará.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 26: Componentes (fragmentos juveniles, líticos y cristales) por tamaño de fragmentos (de 2 [mm], 4 [mm], 8 [mm] y 16 [mm]) para las muestras M2, M3, M5 y M6.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 27: Líticos (líticos negros, líticos rojizos, líticos blanquecinos) por tamaño de fragmentos (de 2 [mm], 4 [mm], 8 [mm] y 16 [mm]) para las muestras M2, M3, M5 y M6.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 28: Muestra de pómez T1.M3.P1 a nicoles cruzados (arriba) y nicoles paralelos (abajo). A la izquierda se presenta sección con 10x y a la derecha sección con 5x. Se observa la masa fundamental vítrea marrón de una muestra de pómez con cristales de plagioclasa (Plg), anfíboles (Anf) de tipo hornblenda insertos en ella. Se observa la fábrica con vesículas alargadas que presenta la pómez debido al escape de gases.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 29: Muestra T1.M5.P2 a nicoles cruzados arriba y nicoles paralelos abajo en microscopio con 10x donde se observan cristales de anfíboles (por ej. Anf) de tipo hornblenda inserto en la masa fundamental vítrea marrón de menor tamaño.</i>	<i>62</i>
<i>Figura 30: Muestra T1.M4.E1 a nicoles cruzados arriba y nicoles paralelos abajo en microscopio con 10x donde se observan cristales de piroxeno (Px), plagioclasa (Plg) inserto en la masa fundamental vítrea marrón de menor tamaño.</i>	<i>63</i>
<i>Figura 31: Muestra T1.M4.E3 a nicoles cruzados arriba y a nicoles paralelos abajo en microscopio con 10x donde se observan fragmentos líticos máficos (Por ej. FL), óxidos de hierro (óxido de Fe) insertos en la masa fundamental vítrea grisácea de menor tamaño. ..</i>	<i>64</i>
<i>Figura 32: Muestra T1.M5.E1 a nicoles cruzados (arriba) y nicoles paralelos (abajo) en microscopio con 5x se observan cristales de plagioclasa (Plg). Además, se observa la poca cantidad de masa fundamental (MF) con los espacios en azul a NC (Pérdida de material). Las zonas redondeadas de los espacios vacíos evidencian vesículas de la muestra.</i>	<i>65</i>
<i>Figura 33: Muestra T2.M2.E1 a nicoles cruzados en microscopio con 10x donde se observan cristales de plagioclasas (Por ej. Plg), se observan anfíbole (Por ej. Hbl), piroxeno (Px) insertos en la masa fundamental grisácea oscura de menor tamaño. Se observan vesículas muy redondeadas en masa fundamental.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 34: Diagrama TAS (Total Alcalis versus sílice; (Le Bas et al., 1986)), donde se observan las muestras obtenidas de literatura según tipo y unidad evolutiva del volcán (Parinacota 1, en morado, Parinacota 2 en celeste y Parinacota 3 en rojo). Las muestras de depósito de caída de Chungará (pertenecientes a la unidad Parinacota 3) se encuentran en color</i>	

amarillo donde, con una cruz se observa la pómez parda, con una equis la escoria y con una estrella con ocho puntas la pómez blanquecina. Cabe destacar que los círculos rojos son lavas provenientes del cono principal pertenecientes a la unidad Parinacota 3. 69

Figura 35: Diagramas Harker del material juvenil de Chungará para elementos mayores (wt.%) en óxidos no normalizados versus SiO₂ (wt%) (datos geoquímicos ver en Tabla A.G.2); en **a** MgO, en **b** TiO₂, en **c** FeO, en **d** Al₂O₅, en **e** CaO, en **f** Na₂O, en **g** K₂O, en **h** P₂O₅, en **i** MnO; con una cruz se presenta la pómez parda, con una equis la escoria y con una estrella con 8 puntas se presenta la pómez blanquecina. 72

Figura 36: Diagramas Harker para elementos mayores (wt.%) en óxidos no normalizados versus SiO₂ (wt%); en **a** MgO, en **b** TiO₂, en **c** FeO, en **d** Al₂O₅, en **e** CaO, en **f** Na₂O, en **g** K₂O, en **h** P₂O₅, en **i** MnO. Se agregan datos de literatura del volcán (datos geoquímicos ver en Tabla A.G.4). En la figura se observa que los datos de color morado pertenecen a la unidad Parinacota 1, los datos de color celeste pertenecen a la unidad Parinacota 2 y los datos rojos pertenecen a la unidad Parinacota 3. Los datos en amarillo pertenecen al material juvenil Chungará; con una cruz se presenta la pómez parda, con una equis la escoria y con una estrella con 8 puntas se presenta la pómez blanquecina. Cabe destacar que los círculos rojos son lavas provenientes del cono principal pertenecientes a la unidad Parinacota 3 y que, no se grafican los datos pertenecientes a material de la avalancha volcánica de la unidad Parinacota 2, debido a que no se tiene claridad de donde provienen. 74

Figura 37: Diagramas bivariantes de elementos traza (ppm) versus SiO₂ wt.% de Chungará (datos geoquímicos ver en Tabla A.G.3). En **a** Rb (Rubidio), en **b** Th (Torio), en **c** U (Uranio), en **d** Pb (Plomo), en **e** Nd (Neodimio), en **f** Sr (Estroncio), en **g** Sm (Samadio), en **h** Eu (Europio), en **i** Tb (Terbio), en **j** Y (Ytrio), en **k** Ba (Bario), en **l** Nb (Niobio), en **m** Ta (Tántalo), en **n** Zr (Circonio), en **o** Tm (Tulio), en **p** Hf (Hafnio). Se agregan datos de literatura del volcán (datos geoquímicos ver en Tabla A.G.5), donde los datos de color morado pertenecen a la unidad Parinacota 1, los datos de color celeste pertenecen a la unidad Parinacota 2 y los datos rojos pertenecen a la unidad Parinacota 3. Los datos de color amarillo pertenecen al material juvenil Chungará; con una cruz se presenta la pómez parda, con una equis la escoria y con una estrella con 8 puntas se presenta la pómez blanquecina. Cabe destacar que los círculos rojos son lavas provenientes del cono principal pertenecientes a la unidad Parinacota 3. 76

Figura 38: **a.** Diagrama multielemental de elementos traza con normalización a N-MORB. En **b.** diagrama de tierras raras con normalización a N-MORB. Diagramas con datos de unidad Chungará (Tabla A.G.3) y datos de literatura (Tabla A.G.5; donde los elementos Ti, K, P son obtenidos a partir de los elementos mayores provenientes de Clavero et al. (2004); ver en Tabla A.G.4). 78

Figura 39: Modelo erupción Chungará, donde se observa el reservorio magmático de Chungará que presenta fundidos con composición traquidacítica (representada por pómez blanquecina y escoria) y una recarga magmática que gatilló la erupción Chungará; la recarga magmática es de composición traquiandesítica (representada por pómez parda). Se observa que subió parte del material del reservorio magmático a través del conducto volcánico, generando un proceso de fragmentación y luego se generó la columna de humo y ceniza en la superficie, que tuvo una altura de 12 km. 83

<i>Figura A.B.1.: Mapa de lavas principales pertenecientes a la unidad Parinacota 1. Lavas están indicadas con diferentes líneas de color según a la litología que pertenecen de Hora et al. (2007).</i>	100
<i>Figura A.B.2.: Mapa de lavas seleccionadas pertenecientes a unidad Parinacota 3. Se observa la lava sur, lateral y norte.</i>	101
<i>Figura A.C.1.: Mapa donde se presenta el punto Pómez Hito XVII obtenido de Bertin et al. (2022). Este punto es obtenido de la columna estratigráfica Hito XVII; este punto es definido con aproximadamente 0.36 cm de espesor. Cabe destacar que este punto está contenido en la isópaca de 30 cm de la unidad Chungará.</i>	103
<i>Figura A.D.1.: Se observa la calicata realizada en MIPA 1. A la derecha se observa las unidades y subunidades descritas, en la figura siguiente (Figura A.D.2) se encuentra la columna estratigráfica levantada.</i>	104
<i>Figura A.D.2.: Se observa columna estratigráfica en MIPA 1. Con el detalle de las unidades y subunidades, elaboración propia.</i>	105
<i>Figura A.E.1.: Distribución granulométrica unidad Tambo Quemado para muestras M2 (a), M4 (b) y M5 (c).</i>	107
<i>Figura A.E.2.: Distribución granulométrica unidad Gran Couleé para muestras M5 (a), M7. subunidad A (b), M7. subunidad B (c) y M7. subunidad C (d).</i>	108
<i>Figura A.E.3.: Distribución granulométrica unidad Block & Ash para muestras M2 (a) y M3 (b).</i>	109
<i>Figura A.E.4.: Distribución granulométrica componentes unidad Chungará para fragmentos mayores, basado en Tabla A.E.5.</i>	112
<i>Figura A.F.1.: Fotos de dos fragmentos piroclásticos a partir de los cuales se prepararon las láminas transparentes pulidas. En a, pómez blanquecina; T1.M5.P1 y, en b, se observa escoria superficial; T1.M5.E1. Ambas poseen su respectiva descripción en Tabla A.F.1.</i> 113	
<i>Figura A.G.1.: Diagramas bivariantes para los tres tipos de juveniles (cruz amarilla; pómez parda, equis amarilla; escoria, estrella amarilla; pómez blanquecina) de elementos traza (ppm) versus SiO₂ (wt.%). En a La (Lantano), en b Pr (Praseodimio), en c Gb (Gadolinio), en d Dy (Disprosio), en e Ho (Homio), en f Er (Erbio), en g Sc (Escandio), en h Cs (Cesio).</i>	116
<i>Figura A.G.2.: Diagramas bivariantes de elementos traza (ppm) versus SiO₂ wt.%. En a Yb (Yterbio), en b Lu (Lutecio), en c Ce (Cesio). Se agregan datos de literatura del volcán, donde los datos de color morado pertenecen a la unidad Parinacota 1, los datos de color celeste pertenecen a la unidad Parinacota 2 y los datos rojos pertenecen a la unidad Parinacota 3. Los datos en amarillo pertenecen al material juvenil Chungará; con una cruz se presenta la pómez parda, con una equis la escoria y con una estrella con 8 puntas se presenta la pómez blanquecina.</i>	117

Capítulo 1: Introducción

1.1. Motivación

El volcán Parinacota ($18^{\circ}06'S/69^{\circ}30'W$; 6.250 m.s.n.m.) ubicado en la frontera entre Chile y Bolivia es un estratovolcán activo (Clavero et al., 2012) que en el Holoceno ha emitido más de 18 km^3 , lo que lo hace uno de los volcanes más activos de la Zona Volcánica Central del Norte de Chile en el período del Holoceno. Este volcán posee una historia eruptiva donde primero se formó un estratocono, luego se generó una avalancha de detritos (datado en menos de 8 ka (Clavero et al., 2002) a 8.8 ka (Jicha et al., 2015)) y, posterior a este colapso se edificó un nuevo edificio que constituye el actual volcán.

Este volcán es interesante debido a su régimen postcolapso donde se generó la construcción de un edificio volcánico y debido a que es uno de los volcanes más activos de la ZVC, donde estudiar el régimen explosivo postcolapso a través de la unidad Chungará fue motivado gracias a la falta de trabajos previos en profundidad del régimen postcolapso, al registro preservado de los depósitos y gracias al interés por estudiar las erupciones volcánicas que favorezcan el estudio de peligros volcánicos a otras investigaciones.

Los estudios geológicos previos se pueden englobar en tres grandes líneas investigativas: estudios sobre la geología (cartas geológicas del Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile; SER-NAGEOMIN) y evolución de volcán, estudios en torno al sistema magmático del volcán y estudios de caracterización de la avalancha de detritos. Pese a estos trabajos previos, no existen trabajos de detalle sobre la volcanología física del régimen explosivo postcolapso.

Por otra parte, el volcán presenta un registro preservado de los episodios de erupciones efusivas y explosivas, debido a las condiciones de aridez de la zona. Este registro preservado permite estudiar los depósitos piroclásticos de caída.

Estudiar las erupciones volcánicas es importante para poder crear estudios que favorezcan el entendimiento científico en esta materia para así avanzar en el estudio de peligros volcánicos. Los estudios de peligros volcánicos ayudan a entender cómo afectan las erupciones volcánicas a la comunidad e infraestructura cercana, así como también, ayudan en la creación de medidas de mitigación frente a estos desastres volcánicos.



Figura 1: Fotografía volcán Parinacota, se observa atrás el volcán Pomerape y adelante del volcán Parinacota, se encuentra el Lago Chungará.

1.2. Hipótesis

Las unidades volcánicas reflejan las características de una erupción, donde se tiene que el estilo eruptivo influye en las características físicas de la unidad volcánica. Dentro de las características que se pueden estudiar en la unidad volcánica están el espesor, el tamaño de grano, los componentes tanto de la matriz como de los fragmentos mayores y, por otra parte, la geoquímica del material juvenil. A partir de las características físicas se puede desprender información de la intensidad, volumen, tasa eruptiva de la erupción.

1.3. Objetivos

1.3.1. General

Determinar y analizar los principales parámetros eruptivos de la erupción explosiva que generó el depósito piroclástico de caída denominado Chungará. Esta unidad es definida en este trabajo a nivel morfológico, geoquímico y petrológico.

1.3.2. Específicos

- Establecer la correlación entre unidades de diferentes depósitos piroclásticos de caída y de block and ash.
- Describir petrológica y geoquímicamente la unidad Chungará.
- Determinar los parámetros físicos de volumen emitido, altura de la columna eruptiva y tasa eruptiva de la Unidad Chungará.
- Comparar parámetros físicos de la Unidad Chungará con otras unidades eruptivas del volcán.

1.4. Ubicación y vías de acceso

El volcán Parinacota se ubica a 18°06'S y 69°30'W, posee una elevación de 6.250 msnm. Se encuentra en la Región de Arica y Parinacota de Chile, en la provincia de Parinacota y en la comuna de Putre. Geográficamente, se ubica hacia el noreste de la ciudad de Arica y a aproximadamente 50 km al noreste de Putre. Se localiza al interior del Parque Nacional Lauca.

La principal vía de acceso es desde Arica recorrer la carretera hacia el Este aproximadamente 160 km por la ruta internacional 11-CH que conecta Chile-Bolivia, o desde Putre tomar la ruta A-149 o A-47 para llegar a la ruta internacional 11-CH y dirigirse aproximadamente 50 km.

Mapa de ubicación Volcán Parinacota

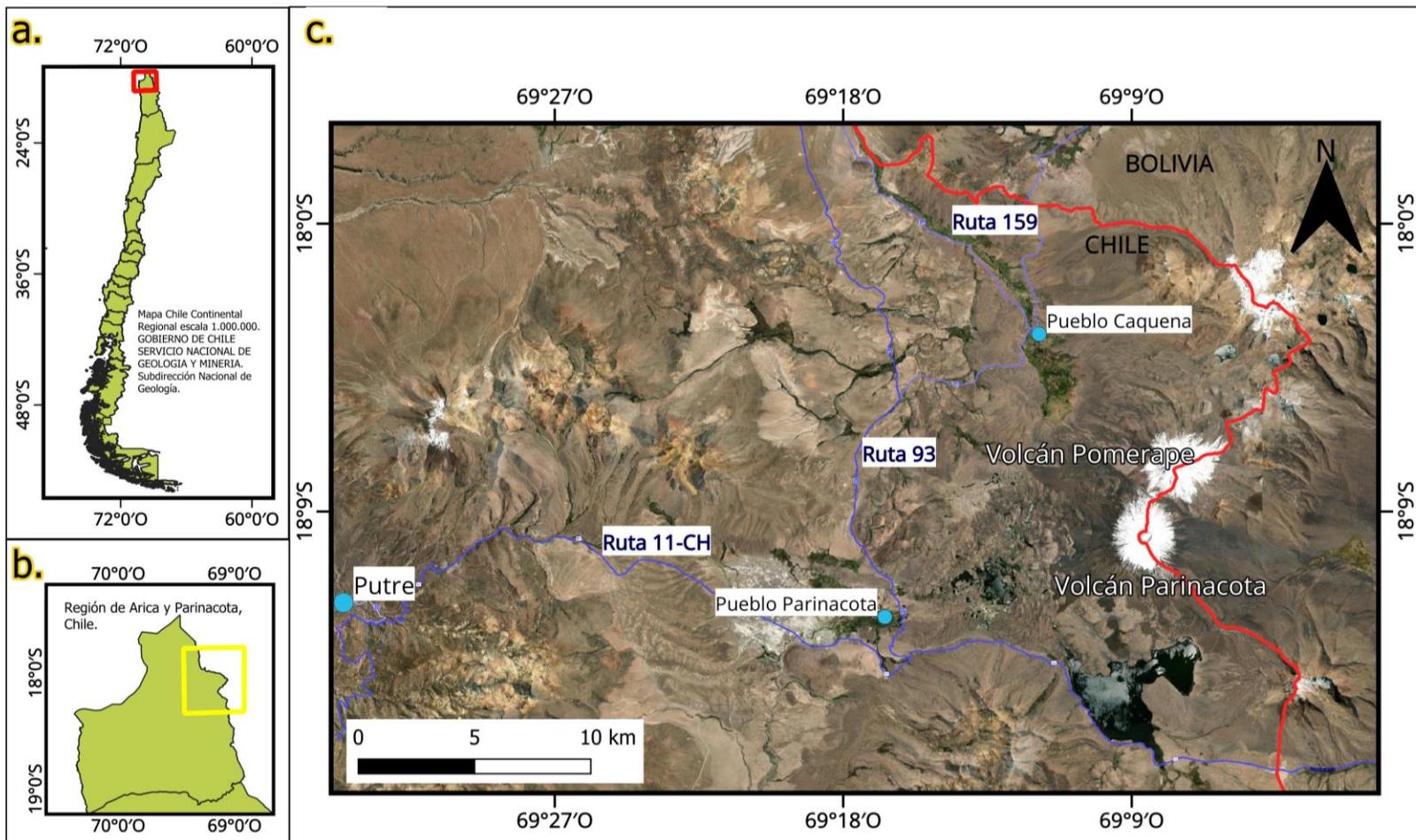


Figura 2: Mapa de ubicación zona del volcán Parinacota. a. Mapa Chile continental regional, mapa de escala 1:1.000.000, SERNAGEOMIN. Con un cuadro rojo se presenta la región de Arica y Parinacota de Chile. b. Mapa Región de Arica y Parinacota. Con un cuadro amarillo se presenta la zona del volcán Parinacota. c. Mapa zona del volcán Parinacota con rutas de acceso.

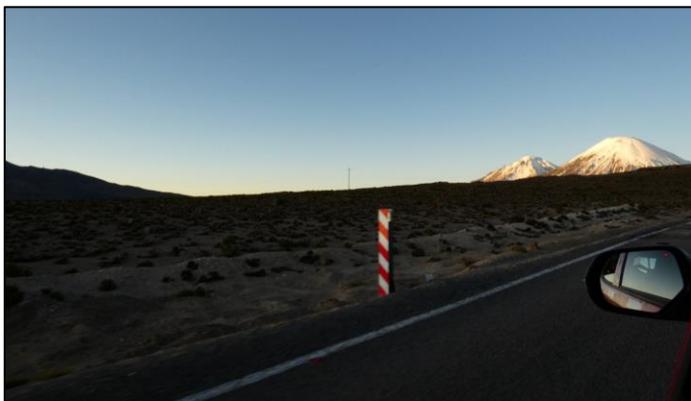
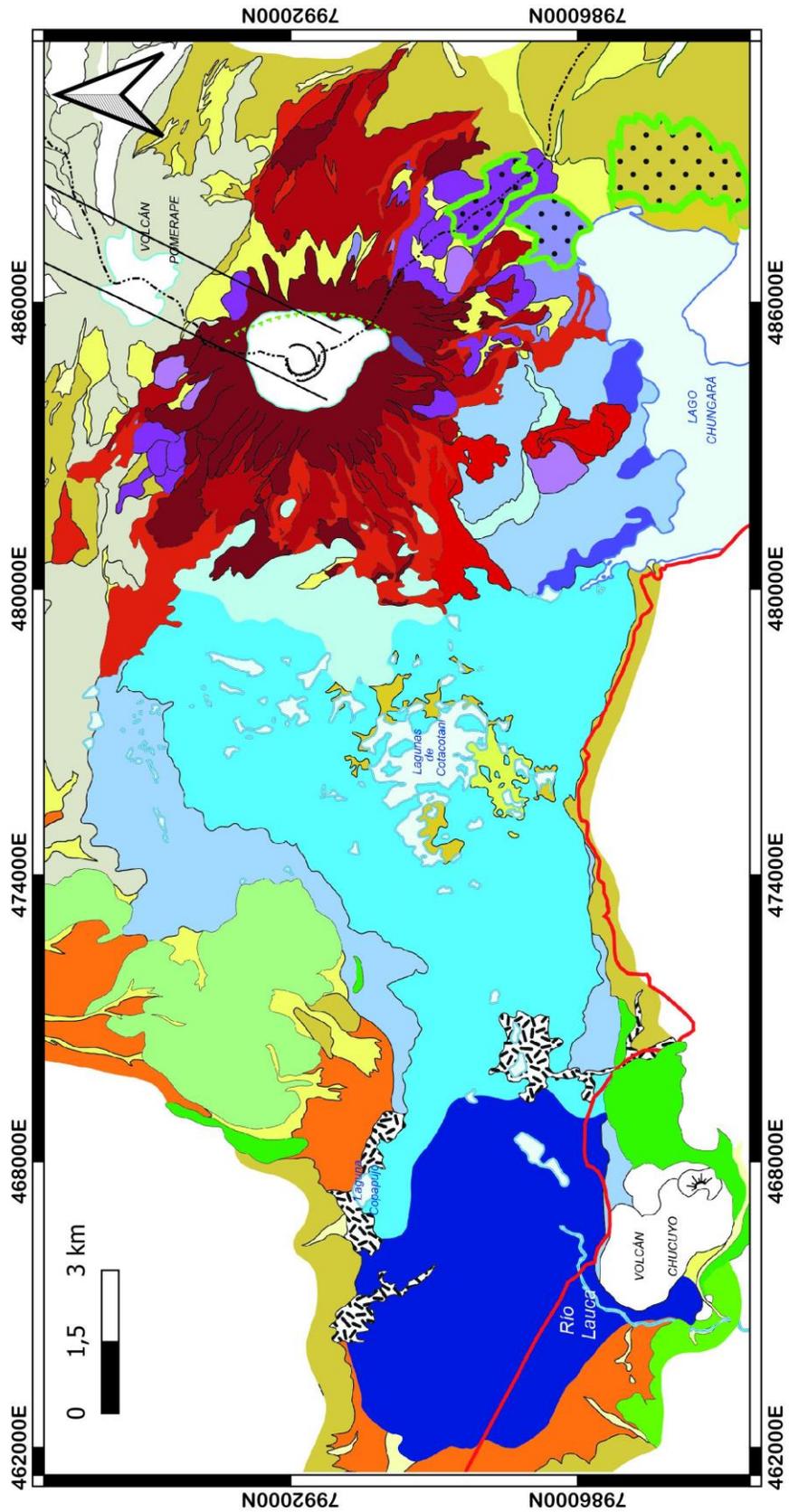


Figura 3: Fotografía en ruta internacional 11-CH, al fondo se observa el volcán Parinacota a la derecha y volcán Pomerape a la izquierda.

Capítulo 2: Marco Geológico

Mapa geológico volcán Parinacota con Unidades Parinacota I, Parinacota II, Parinacota III



Leyenda



Simbología			
	Alineamiento de centros volcánicos		Glaciar
	Cicatriz de colapso y/o glacial		Ruta internacional 11- CH
	Sección cicatriz de colapso de Avalancha Volcánica Parinacota		Límite internacional Chile-Bolivia

Figura 4: Mapa geológico volcán Parinacota a escala 1:50000, editado de la carta geológica del volcán Parinacota del SERNAGEOMIN (Clavero et al., 2012), donde se observa Unidad Parinacota 1 de color rojizos, Unidad Parinacota 2 de colores azules/celeste, Unidad Parinacota 3 de colores morados/lila. Los depósitos cuaternarios están en colores amarillos/café pardo y, los depósitos del basamento están en colores verdes, la descripción de cada unidad se puede observar en los recuadros de leyenda y simbología.

2.1. Marco geológico regional

La cordillera de los Andes es una cadena montañosa continua a lo largo del margen tectónico activo al lado Oeste de Sur América. Este orógeno se divide en las zonas volcánicas Norte (NVZ), Central (CVZ), Sur (SVZ), Austral (AVZ) (Stern, 2004). El volcán Parinacota (Figura 2) se encuentra en la Zona Volcánica Central (CVZ), donde la Placa de Nazca (<60 Ma) subduce a la Placa Sudamericana a una velocidad de 7-9 cm/año (Stern, 2004). Esta zona presenta volcanismo Pleistoceno-Holoceno y se caracteriza por un magmatismo evolucionado con elevados niveles $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (James, 1982, 1984) y bajos niveles de $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (Wörner et al., 1998, Davidson et al., 1990). La corteza debajo de la zona del altiplano es mayor que la corteza de las otras zonas volcánicas; presenta una corteza con espesor 60-65 km y con edades menores a ~2000 Ma (Stern, 2004). En la CVZ existen edificios volcánicos activos con morfologías de estratovolcán junto a centros eruptivos menores, depósitos ignimbríticos y sistemas de calderas (Stern, 2004).

2.2. Marco geológico regional local

2.2.1. Trabajos previos

Los estudios previos realizados en el Volcán Parinacota se pueden dividir en grandes grupos: Geología básica del volcán, estudio del sistema magmático del volcán, y caracterización de una unidad de avalancha de detritos.

En el trabajo de la carta geológica del SERNAGEOMIN (Clavero et al., 2012) se describe la geología del volcán Parinacota, además la estratigrafía con formaciones, complejos volcánicos e ignimbritas de la zona. Se describe la geoquímica del volcán Parinacota, peligros volcánicos y geología estructural.

(Wörner et al., 1988) realizó estudios geoquímicos de los productos volcánicos para definir cinco etapas eruptivas (etapa 1; 264-112 ka, etapa 2; >53-12 ka, etapa 3; 12-1.35 ka, etapa 4; Holoceno temprano, etapa 5; Holoceno tardío). ; entre ellas la etapa 1; denominada “Andesitas Chungará”, ubicadas en la orilla Norte del lago Chungará y sobre esta subunidad, se ubica un plateau de domos dacíticos a riolíticos, sin embargo, según dataciones de Hora et al. (2007) existe un hiato a 65 ka entre las andesitas Chungará y el resto de las etapas eruptivas. Luego, define la etapa 2 donde se forma un estratocono con rocas andesita olivino-piroxeno hasta andesita rica en anfíboles. En la etapa 3 se produce un colapso datado entre menos de 8 ka (Clavero et al., 2002) a 8.8 ka (Jicha et al., 2015), que genera una avalancha de escombros; agregado a este suceso, en la etapa 3 existe una erupción representada por bombas dacíticas. Después, en la etapa 4 se reconstruye el edificio volcánico luego del colapso, estas erupciones corresponden a flujos de escoria y piedra pómez andesítica subpliniana junto a flujos andesíticos de lava tipo Aa. Finalmente, la etapa 5 correspondería a la actividad volcánica más reciente, donde se generan centros eruptivos menores máficos denominados “Ajata Inferior”, “Ajata Superior”.

Dentro de la misma línea, Hora et al. (2009), a través de análisis petrológico, geoquímico y dataciones, postula un modelo de evolución magmática donde previo a 35 ka, se describen tres almacenamientos magmáticos; aquí se describe que el almacenamiento del flanco Norte posee un sistema abierto. Luego, a los 35-28 ka se desprende que existe una contaminación cortical en el almacenamiento del flanco Norte posterior a una recarga magmática. Después, a los 28-20 ka, luego de una recarga máfica constante, se conduce a un solo almacenamiento magmático. Posteriormente, se genera un colapso del cono, y después del colapso; en 15 ka al presente, se construye el cono joven, donde la simetría del cono indica que el magma brotó principalmente del mismo conducto. En la investigación de Hora et al. (2007), se realizan estudios de los volúmenes de las diferentes unidades volcánicas, incluyendo los centros monogenéticos formados hacia el Sur del volcán Parinacota.

En el trabajo de (Bourdon et al., 2000) se analizan dos regímenes de evolución y almacenamiento de magma, donde primero se presenta un cono joven reconstruido con tiempos de residencia muy cortos y tasas de erupción más altas, en cambio en el cono antiguo se presenta un tiempo de residencia significativo (>100 ka) y bajas tasas de erupción.

En el estudio de Ginibre et al. (2002), se analiza la existencia de gradientes composicionales entre un cuerpo de magma principal y una capa límite relativamente diferenciada con tipos de cristales (I y II) de Plagioclasa observados. Luego, Ginibre & Wörner (2007), a partir de la zonificación de Fe, Mg, Sr en Plagioclasas, se postulan procesos de recarga magmática máfica y cristalización fraccionada de la cámara magmática. Donde se concluye que en el cono nuevo los eventos de recarga de magma son más prominentes y numerosos, a diferencia del cono antiguo.

En Ginibre et al. (2005) se describen eventos de recarga magmática alternantes con dos tipos de magmas que se asemejan a flujos Ajata (erupciones laterales recientes; descritos en **Centros eruptivos menores**), donde el miembro andesita basáltica de alto Sr es similar a Ajata Superior que posee alto contenido de Sr y relaciones isotópicas de Sr menores (Ginibre & Davidson, 2014) y el miembro andesita basáltica de menor Sr es similar a Ajata Inferior. Por otra parte, se demuestra que, en el cono viejo, los magmas de recarga son generalmente más diferenciados que flujos posteriores Ajata (Ginibre & Davidson, 2014).

Finalmente, respecto a la avalancha de escombros generada por el colapso, ésta es descrita morfológica y texturalmente en Clavero et al. (2002); la cual presenta montículos pronunciados donde el volumen y proporciones disminuyen con la distancia de transporte. La avalancha de detritos se encuentra compuesta por dos unidades: Unidad Inferior y Unidad Superior. La Unidad Inferior; compuesta principalmente de brechas riódacíticas con bandas de flujo, presenta una subunidad de bloques Toreva provenientes de domos de lava riódacítica al pie occidental del volcán y, otra subunidad compuesta principalmente por depósitos de flujo de bloques y cenizas riódacíticas. La Unidad Superior; compuesta principalmente de lava, de grandes bloques coherentes hasta montículos de brechas, presentan composición andesita basáltica hasta dacita.

2.2.2. Basamento Volcán Parinacota

Según carta geológica del volcán Parinacota, se presentan secuencias volcanoclásticas de la formación Lupica del Oligoceno Superior-Mioceno Inferior, depósitos lacustres de la Formación Lauca del Mioceno-Plioceno, Ignimbrita Lauca del Plioceno Superior y depósitos lacustres y fluvio-glaciales del Pleistoceno Superior- Holoceno, observables en el mapa de la *Figura 4*.

Donde, según Montecinos (1963) y García et al. (2004) la Fm. Lupica aflora en el sector noroccidental formada por ignimbritas riolíticas de hasta 50 m de espesor.

Muñoz (1988), Kött et al. (1995) y García et al. (2004) define la Fm. Lauca como depósitos lacustres con intercalaciones epiclásticas de hasta 80 cm de espesor.

Kött et al. (1995), Wörner et al. (2000) y García et al. (2004) describen Ignimbrita Lauca como depósitos de flujo piroclástico riolítico moderada a fuertemente soldada con espesores de hasta 30 cm en el área de estudio.

2.2.3. Geología Volcán Parinacota

Según Clavero et al. (2004, 2006), el edificio volcánico corresponde a un cono formado por sucesivas emisiones de lava. Se tiene que en base a criterios evolutivos se describen 3 unidades:

Unidad Parinacota 1 (Pleistoceno Medio?-Superior, ca. 300-40? ka).

Unidad asociada al período antes de la avalancha volcánica, se observa en el mapa de la *Figura 4* con colores morados. Se subdivide en Subunidad Inferior (a) datada en 260-110 ka y, la Subunidad Superior ((b), (c), (d)) datada en ca. 55-40 ka.

La Unidad está compuesta de lavas andesíticas (a) en el borde septentrional del lago Chungará. Están parcialmente cubiertas por domos riódacíticos (b) y lavas andesítico-basálticas de la Unidad Parinacota 3 (Volcanes de Ajata, (e)).

Los domos riódacíticos se encuentran en flanco sur y norte, varios se encuentran como bloques tipo “Toreva”.

Las lavas y lavas-domo dacíticos (c) afloran en flancos sur, sureste y norte del edificio, se encuentran cubiertas por lavas, depósitos piroclásticos y laháricos de la Unidad Parinacota 3 ((d), (b)).

Depósitos piroclásticos (d) afloran en parte baja del flanco sureste, son depósitos piroclásticos de bloque y ceniza (block and ash) asociado al colapso parcial o total de domos. Estos depósitos poseen poca extensión y espesor.

Unidad Parinacota 2 (Pleistoceno Superior-Holoceno, 40?-8 ka).

Se infiere la presencia de un estratocono y, se presentan lavas andesíticas y depósitos piroclásticos de caída y laháricos. Luego, se produce una avalancha que colapsó edificio parcialmente hacia el oeste. Unidad asociada a estos procesos, se observa en el mapa de la *Figura 4* con colores celestes/azules.

El depósito de avalancha volcánica DAVP (Holoceno, ca. 7-8 ka), es un depósito volcanoclástico ubicado en la parte baja del flanco occidental del volcán. Este depósito se subdivide en la Unidad de Flujo Inferior y, Unidad de Flujo Superior.

En la Unidad de Flujo Inferior, se presentan grandes bloques “Toreva”, formados por domos riódacíticos en el flanco occidental bajo el volcán. Se observan depósitos sedimentarios y piroclásticos. También por cerrillos (“Hummocks”) de pequeño volumen. Se encuentran principalmente hacia el norte y sur del depósito. Se disponen sobre lavas y depósitos de la Unidad Parinacota 1 y sobre depósitos lacustres del Pleistoceno Superior-Holoceno.

En la Unidad de Flujo Superior, se presentan cerrillos (“Hummocks”) continuos y aislados donde los continuos son de mayor volumen y se ubican en la parte central del depósito de avalancha, y los aislados son de menor tamaño y se ubican en las zonas más distales del depósito. Se disponen sobre los depósitos de la Unidad de Flujo Inferior 1 y depósitos sedimentarios del Pleistoceno Superior-Holoceno.

Unidad Parinacota 3 (Holoceno, <8 Ka).

Depósitos volcánicos que se depositaron después de ocurrida la avalancha volcánica. Estos depósitos se observan en el mapa de la *Figura 4* con colores rojos.

Lavas y depósitos piroclásticos emitidos por el edificio principal ((a), (b), (c), (d), datados en el Holoceno) y por los centros eruptivos menores adventicios Volcanes Ajata ((e), datados en el Holoceno).

Asociados al edificio principal corresponden a lavas andesíticas (a), depósitos de flujo piroclástico andesítico-basálticos/dacíticos (c), depósitos piroclásticos de caída (d) y depósitos laháricos (b), mientras depósitos asociados a Volcanes Ajata son caída de piroclásticos y lavas andesítico-basálticas (e).

Del edificio principal corresponden a lavas andesíticas (a) distribuidas de forma radial en torno al volcán, son coladas de tipo Aa con depósitos laháricos e intercalaciones de depósitos piroclásticos de flujo y caída.

Depósitos laháricos (b) se encuentran en flancos del volcán, con excepción del flanco norte. Corresponden a depósitos mal seleccionados, con fragmentos subangulares a subredondeados y poli-mícticos de hasta 3 m de diámetro (de lavas y bombas de productos del mismo estadio), inmersos en matriz arenosa con laminación paralela pobremente a bien desarrollada.

Depósitos de flujo piroclástico (c) que se distribuyen igualmente en forma radial en torno al edificio volcánico.

Depósitos piroclásticos de caída (d) se distribuyen hacia el este, son marcados en el mapa en sectores que el mando de cubrimiento supera los 15 cm sobre otras unidades. Son depósitos bien seleccionados, con tamaño variable de ceniza fina a lapilli medio, de composiciones idénticas a los fragmentos juveniles de los depósitos piroclásticos de la misma unidad.

Se sugiere que son depósitos de caída asociados a erupciones subplinianas que originan flujos piroclásticos.

Flujos desde volcanes Ajata ((e), Holoceno) corresponden a serie de conos de piroclastos adventicios y lavas asociadas ubicadas en flanco suroccidental del edificio. Lavas de tipo Aa, morfologías primarias como levées, lóbulos de avance y frontales, superficies brechosas. Composición andesítico-basáltica, aférricas con fenocristales de clinopiroxeno y olivino con xenocristales de sanidina y plagioclasa.

Un centro eruptivo ubicado más al norte se encuentra parcialmente cubierto por depósitos de flujo piroclástico proveniente del cono principal.

Centros eruptivos menores.

Con la formación del estratocono posterior se generan los volcanes Ajata Superior y Ajata Inferior (de edad 6-1.4 ka) con conos de piroclastos de flanco y lavas de composición andesítico-basálticas asociadas. Estos conos se ubican a lo largo de fracturas NNE y N-S del flanco Suroeste del volcán (Clavero et al., 2012), observable en el mapa de la *Figura 4* como volcanes Ajata (e).

El volcán Ajata Superior ubicado más al Oeste que el volcán Ajata Inferior. Presentan un volumen máximo total de aproximadamente 0.2 km³ (Hora et al., 2007), geoquímicamente se diferencian en que miembro Ajata Superior presenta alto contenido de Sr y relación isotópica $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ menor y, miembro Ajata Inferior presenta bajo contenido de Sr con relación isotópica $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ alto (Ginibre & Davidson, 2014).

2.2.4. Depósitos sedimentarios cuaternarios

Según Clavero et al. (2012), corresponden a depósitos lacustres y fluvio-glaciales del Pleistoceno, ubicados alrededor de la cuenca del río Lauca y laderas bajas de volcanes, los depósitos fluvio-glaciales se encuentran formados por capas subhorizontales de hasta 2 m de espesor, mientras los depósitos lacustres se intercalan con los anteriores, espesor mínimo de 6 m expuestos, bien seleccionados de arena fina y limo. Se encuentran dentro del Depósito de Avalancha Volcánica Parinacota como bloques.

Depósitos glaciales del Pleistoceno Superior-Holoceno, que corresponden a depósitos brechosos, polimícticos inmersos en matriz limoarenosa.

Depósitos lacustres del Pleistoceno Superior-Holoceno. Intercalaciones donde niveles de turba presentan entre 10 y 30 cm, mientras los niveles piroclásticos son depósitos de caída de grano fino, bien seleccionados, tamaño de ceniza media a gruesa, de composición andesita-basáltica y de espesores de hasta 10 cm, asociados a erupciones del cono antiguo durante la etapa evolutiva Parinacota 2 ubicada alrededor de lagunas Cotacotani. Está sobreyacida por Depósito de Avalancha Volcánica Parinacota (perteneciente a Unidad Parinacota 2).

Además, se encuentran depósitos aluviales y coluviales indiferenciados, depósitos aluviales y depósitos coluviales del Pleistoceno Superior-Holoceno. Junto a depósitos salinos del Holoceno.

2.2.5. Estructuras

Según Clavero et al. (2012), existen estructuras de compresión N-S a NNW-SSE (Muñoz & Charrier, 1996; García et al., 2004).

Los centros volcánicos Condorini, Larancagua, Pomerape y Parinacota forman un lineamiento de orientación NNE-SSW, donde la actividad volcánica ha ido migrando temporalmente hacia el SSW

(Clavero & Sparks, 2005), concentrándose en el volcán Parinacota, Guallatiri y Taapaca en el Pleistoceno Superior-Holoceno. Además, se presentan paralelamente fallas normales con bloques colgantes hacia el Oeste.

Capítulo 3: Metodología

3.1. Trabajo de terreno

El trabajo de terreno fue llevado a cabo en tres campañas: la primera fue llevada a cabo desde el día 13/06/2022 hasta el día 18/06/2022, la segunda campaña fue llevada a cabo desde el día 17/10/2022 hasta el día 21/10/2022 y la tercera campaña fue llevada a cabo desde el 01/06/2023 hasta el día 03/06/2023. El objetivo de las campañas de terreno fue estudiar los depósitos de caída postcolapso del volcán.

El trabajo de terreno consistió en estudiar 48 puntos (denominados MIPA) en terreno (*Figura 5*). En estos puntos se realizaron calicatas para estudiar las unidades pertenecientes al régimen explosivo del volcán. Se realizaron columnas estratigráficas en los puntos para identificar unidades de depósitos de caída correlacionables entre sí, donde se obtuvieron descripciones morfológicas y litológicas. En cada punto se midieron características como espesores, petrografía y tamaño de fragmentos, estructuras presentes, entre otras. Además, se obtuvieron muestras de fragmentos mayores y matriz de cada unidad para realizar análisis de granulometría.

En este trabajo se analizó en detalle la unidad piroclástica de caída más somera y, por lo tanto, la más reciente, denominada Chungará. Para esta unidad se siguió el mismo procedimiento que las demás unidades estudiadas, donde se obtuvo información en terreno del depósito y, se recolectaron muestras para su posterior análisis en laboratorio.

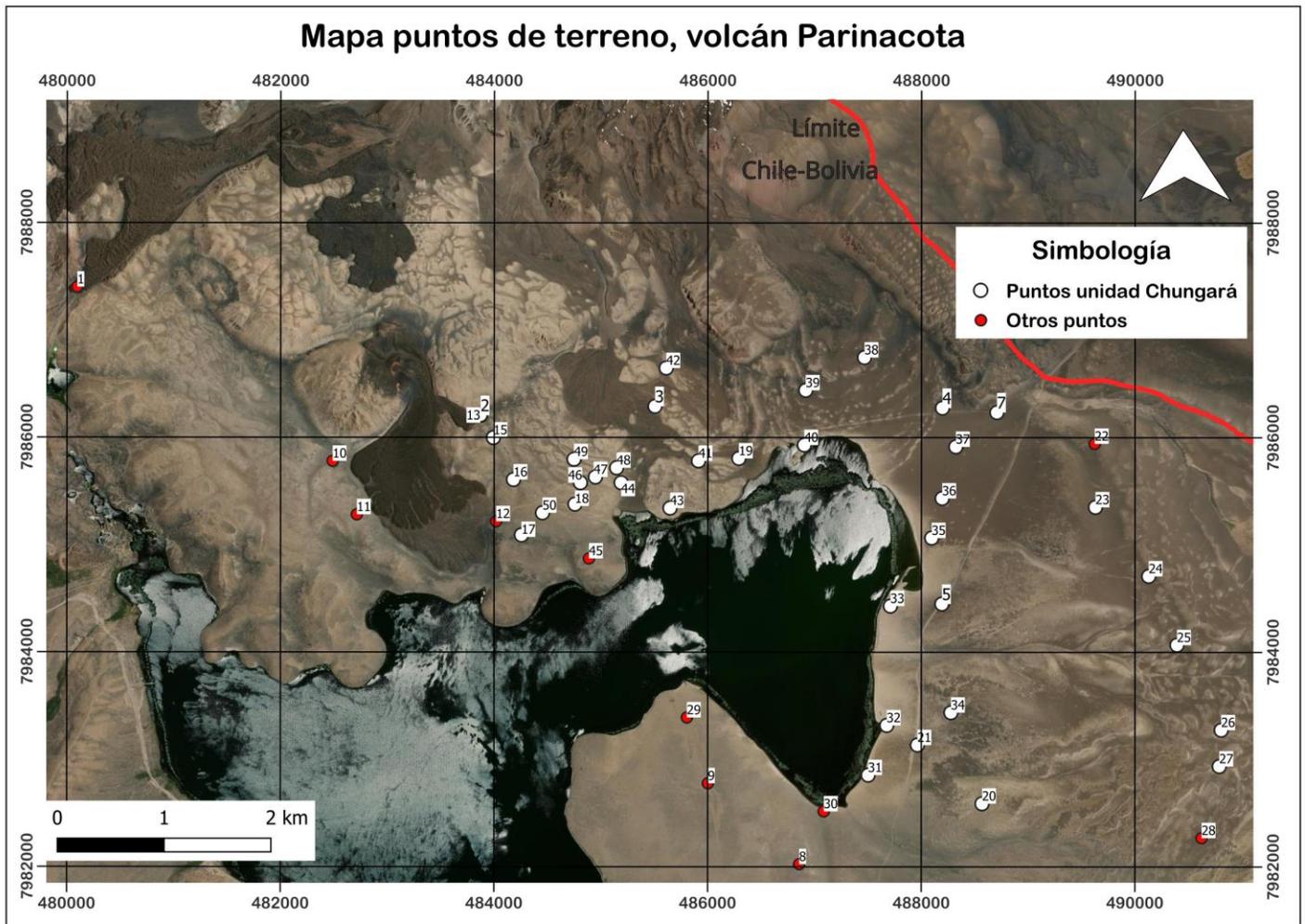


Figura 5: Mapa de puntos de terreno (MIPA) estudiados; los puntos blancos son donde se encuentra la unidad Chungará y los puntos rojos son otros puntos estudiados.

3.2. Trabajo de laboratorio

Se realiza un tamizaje de muestras en el laboratorio para posteriormente realizar un análisis granulométrico y categorización de componentes de las diferentes unidades. Por otra parte, se seleccionan piroclastos de fragmentos mayores juveniles de la Unidad Chungará para enviarlos a laboratorio de cortes y posteriormente realizar un análisis petrográfico.

3.2.1. Tamizaje de muestras

Se realizó un tamizaje de muestras y posterior análisis granulométrico para 13 muestras (*Tabla A.E.1*) que fueron obtenidas. Estas muestras pertenecen a depósitos volcánicos de tipo depósito de caída y Block & Ash.

Para realizar el tamizaje de muestras, primero se secaron en el horno a una temperatura de 60°C durante 5 días en el laboratorio de Sedimentología del Departamento de Geología de la Universidad

de Chile, para luego ser tamizadas en el laboratorio de Tamizaje de muestras del mismo edificio, donde se dispone de mallas con diferentes tamaños de abertura, que sirven para clasificar por tamaño de grano.

Para realizar la clasificación por tamaños, se utiliza la escala de Φ (Tabla 1), donde se utiliza la escala de $\phi_i = \Phi$, donde $\Phi = -\log_2(s)$, donde s es el tamaño de grano en milímetros y, la abertura de la malla.

Φ	[mm]
-5	32
-4	16
-3	8
-2	4
-1	2
0	1
1	0.5
2	0.25
3	0.125
4	0.0625
5 (Base)	<0.0625

Tabla 1: Escala de Φ (Boggs, 2009).

Con los resultados obtenidos, se calcularon los parámetros estadísticos de moda, media y desviación estándar (Folk & Ward, 1957). Primero, la Moda es el tamaño que más se repite, ayudando a describir el tamaño medio del grano.

Por otra parte, la Media (M_z), que da el tamaño promedio del grano, se calculó de la siguiente manera (Folk & Ward, 1957):

$$M_z = \frac{\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}}{3} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde ϕ_{16} es el tamaño promedio de la tercera parte más gruesa de la muestra, ϕ_{84} es el tamaño promedio de la tercera parte más fina de la muestra, ϕ_{50} es el tamaño promedio del tercio medio.

La desviación estándar mide la uniformidad del tamaño de grano y, es la dispersión de tamaños de los dos tercios centrales y la de los extremos y se calculó como se indica a continuación (Folk & Ward, 1957):

$$\sigma_{\phi} = \frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{4} + \frac{\phi_{95} - \phi_5}{6,6} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde ϕ_{95} es el percentil 95 y ϕ_5 es el percentil 5.

3.2.2. Categorización de componentes

Posterior al procedimiento de tamizaje de las unidades, se realizó una categorización de componentes del depósito Chungará. Este procedimiento se lleva a cabo con lupa para muestra de mano con aumento de 20x y con lupa binocular que se encuentra en el Laboratorio de Sedimentología del Departamento de Geología de la Universidad de Chile.

Se realizó para las mallas de $\Phi=-1$ a $\Phi=-4$, con piroclastos de tamaño 2 mm a 16 mm, donde se seleccionan del orden de 100 a 200 fragmentos de cada malla para categorizar. Estos fragmentos son pesados con una pesa para obtener la información en porcentaje en peso (wt.%) de cada componente. Se ocupó una pesa Sartorius CP224S, que tiene una capacidad de 220g con una legibilidad de 0.0001g y linealidad de 0.0002g para fragmentos de menor tamaño y una pesa Sartorius TE412, que posee mayor capacidad de 410g con legibilidad de 0.01g, linealidad de 0.02g y reproducibilidad de 0.01g.

3.2.3. Cálculo de densidad

Para muestras de la unidad Chungará, se calculó la densidad promedio del material juvenil. Este cálculo se realizó mediante la ley de Arquímedes; utilizado para la pómez blanquecina, pómez parda y escoria y mediante el método manual; utilizado para la pómez blanquecina y escoria. En ambos se utilizó la fórmula de densidad:

$$Densidad = \frac{masa}{Volumen} \quad \text{Ec. 3}$$

3.2.3.1. Ley de Arquímedes

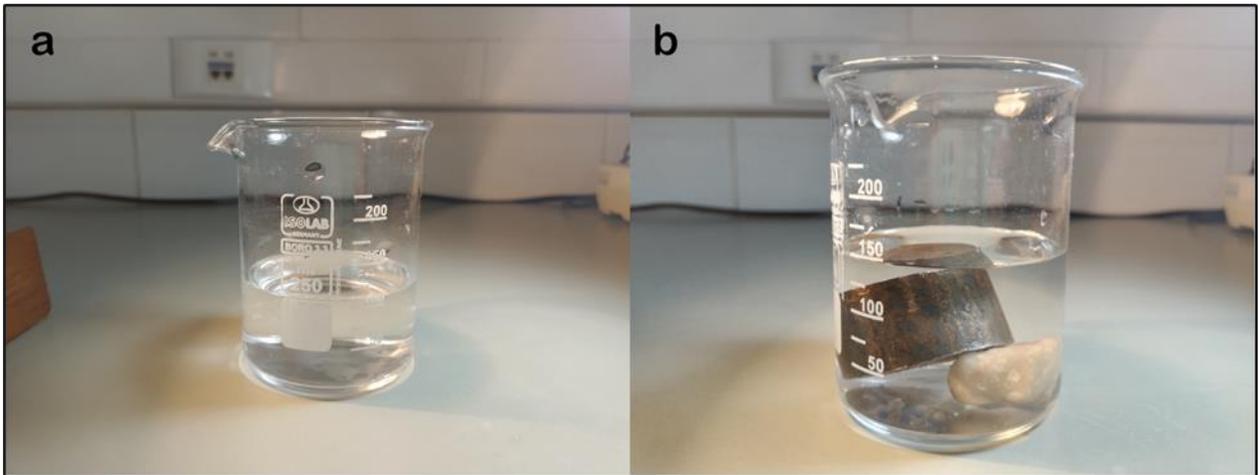


Figura 6: Experimento cálculo de densidad por Ley de Arquímedes realizado en el laboratorio de sedimentología, Universidad de Chile. En a. se observa que el vaso precipitado presenta el nivel de agua a un poco más de 100 mL. En b. luego se pone el piroclasto con parafina y el peso de hierro donde se observa que el nivel de agua sube a 150 mL aproximadamente.

Para el procedimiento se utilizó la Ley de Arquímedes, donde en un recipiente graduado (Figura 6.a) se tiene que el volumen de agua desplazada es igual al volumen del material que se sumerge. Para efectos de este trabajo, las muestras se recubren en parafina para cubrir las vesículas que poseen los piroclastos y que de esta manera no floten los fragmentos.

Luego de obtenido el volumen de las muestras se calcula su densidad, dividiendo la masa por el volumen de agua desplazado restado al volumen de la parafina en la muestra. De esta forma, se calcula la densidad de la siguiente manera (Ec. 4):

$$d = \frac{m}{V - \frac{m_p - m}{d_p}} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

- D = Densidad promedio de la muestra
- M = Masa muestra sin parafina
- Mp = Masa muestra con parafina
- V = Volumen de agua desplazado
- Dp = Densidad parafina (0,89 [g/cm³])

En el caso de los piroclastos que flotaban se ubica una placa de acero sobre la muestra (*Figura 6.b*) para que logre sumergirse, luego se resta el volumen de la placa. El volumen de la placa es el volumen de agua desplazada, calculada con la ley de Arquímedes. Entonces en este caso, la densidad es:

$$d = \frac{m}{\left(V - \frac{mp - m}{dp}\right) - V_{placa}} \quad \text{Ec. 5}$$

Donde:

V_{placa} = Volumen de Placa

Para efectos de este experimento se utilizaron dos placas de acero, dependiendo las dimensiones de los piroclastos, una placa es cilíndrica de radio 2,3 cm y altura 2,4 cm, la otra placa es de forma rectangular de dimensiones 3,6 cm x 2,9 cm x 0,8 cm. Para los clastos que flotaban, se utiliza la placa cilíndrica para clastos de mayor tamaño y la placa rectangular para los de menor tamaño.

3.2.3.2. Método manual

Para el procedimiento de método manual se calcula el volumen de una elipse que encierra el clasto:

$$V = \frac{\pi}{6} a b c \quad \text{Ec. 6}$$

Donde a, b y c son los ejes ortogonales mayores medidos para cada piroclasto. Se tiene que a es el eje más largo, b es el intermedio y c el más corto en este caso.

Luego se utiliza la fórmula para la densidad (Ec. 3), donde masa es el peso que se obtiene para cada piroclasto. Este peso es calculado con una pesa; donde para fragmentos de mayor tamaño se utiliza una balanza con una capacidad de 500g y una precisión de 0.1g y, para fragmentos de menor tamaño se utiliza una balanza electrónica profesional serie 8028 con una capacidad de 50g y una precisión de 0.001g.

Este método se utiliza para aproximadamente 120 piroclastos de pómez blanquecina y 30 piroclastos de escoria.

3.2.4. Cálculo de porcentaje de vesículas

Para las muestras de la unidad Chungará, se realiza el cálculo de porcentaje de vesículas del material juvenil, por medio de los siguientes cálculos para cada piroclasto:

$$\rho_{Piroclasto} = (X) \rho_{Vesicula} + (1 - X) \rho_{Vidrio} \quad \text{Ec. 7}$$

$$X = 1 - \frac{\rho_{Piroclasto}}{\rho_{Vidrio}} \quad \text{Ec. 8}$$

Donde:

X = Porcentaje en volumen de vesículas.

(1-X) = Porcentaje en volumen de vidrio.

$\rho_{Piroclasto}$ = Densidad de cada piroclasto.

ρ_{Vidrio} = Densidad del vidrio del material juvenil.

Para obtener la densidad de los piroclastos ($\rho_{Piroclasto}$) se utiliza el método detallado en la sección 3.2.3 de Metodología (Cálculo de densidad).

La densidad del vidrio (ρ_{Vidrio}) se asume para todos los piroclastos. Se calcula con el método de (Bottinga & Weill, 1970), donde se calcula la densidad del líquido en sistemas silicatados desde los volúmenes molares parciales de los componentes mayores en óxidos. Para esto se utiliza el código de Matlab de Pering (2013). En este código se ingresa el porcentaje de los elementos mayores (wt.%), agua (wt.%), temperatura (°C), presión del magma (MPa). Los elementos mayores son SiO_2 (wt.%), TiO_2 (wt.%), Al_2O_3 (wt.%), FeO (wt.%), MgO (wt.%), CaO (wt.%), Na_2O (wt.%), K_2O (wt.%). Los cuales se obtienen como un promedio simple de las muestras analizadas geoquímicamente.

Luego de obtener el porcentaje en volumen de vesículas para cada piroclasto se realiza un promedio simple para la pómez y para la escoria.

3.3. Trabajo de gabinete

3.3.1. Descripción petrológica material juvenil

Para muestras de la unidad Chungará, se seleccionaron 8 muestras; de las cuales 5 son de material juvenil, a partir de estas 8 muestras (*Tabla A.F.1 y Figura A.F.1*) se realizaron cortes transparentes pulidos para luego someterlas a observación y análisis.

Los cortes transparentes se realizan en el taller de cortes del Departamento de Geología de la Universidad de Chile. Luego se realiza una descripción petrológica observando los cortes en el microscopio a luz transmitida (Olympus modelo BX51) ubicado en el Laboratorio de Microscopio del Departamento de Geología. Se obtuvieron fotografías a través del Programa MShot Image Analysis System, además se obtienen fotografías del microscopio óptico ubicado en el Núcleo Milenio.

En la descripción de microscopio se estudia los cristales, masa fundamental y morfologías especiales como las vesículas. Además, se realiza un conteo de cristales para obtener un porcentaje relativo de cada fase mineral.

Luego, se realiza un conteo modal de las fases de las muestras para unirla a la descripción petrológica de las muestras de material juvenil. Este procedimiento se lleva a cabo a través del Software JMicroVision v1.3.4, donde por medio de la herramienta *Point Counting* se realiza el conteo modal de las fases con las imágenes escaneadas a nícoles cruzados y nícoles paralelos de los cortes transparentes pulidos de las 8 muestras obtenidas. Estas muestras se describen en la sección 4.2.7.2 de Resultados.

Las fases de las muestras son las siguientes:

- Masa Fundamental (<0.2 mm): Se compone de vidrio principalmente, de color marrón, a veces más grisáceo.
- Fenocristales (>0.5 mm de largo): Correspondientes a plagioclasas, piroxenos y biotitas.
- Microlitos (0.5-0.2 mm de largo): Correspondientes a plagioclasas, piroxenos y biotitas.
- Fragmentos líticos: Se observan principalmente como fragmentos líticos máficos con cristales u partes de cristales de minerales como plagioclasas.
- Vesículas mayores.

Además, se suma el porcentaje de pérdida de material como una fase más (denominada “sin muestra”). El porcentaje de pérdida de material son zonas grandes y rectangulares generalmente, donde se identifica que no hay muestra y no son vesículas, esta pérdida tiene su origen en el proceso de construcción de las láminas transparentes pulidas, cuando se corta y se pule la muestra se pierde material debido a la fragilidad del material juvenil pumíceo.

El porcentaje de masa fundamental, cristales, microcristales y fragmentos líticos se obtuvo normalizando al restar las vesículas y el porcentaje de pérdida de material. Por otra parte, el porcentaje

obtenido es de vesículas mayores que son las observables en la fotografía del corte transparente pulido; el porcentaje real de vesículas se obtiene según la metodología descrita en la sección 3.2.4 de Metodología.

A continuación (*Figura 7*), se muestra un ejemplo de la forma en que se realiza el conteo en la muestra:

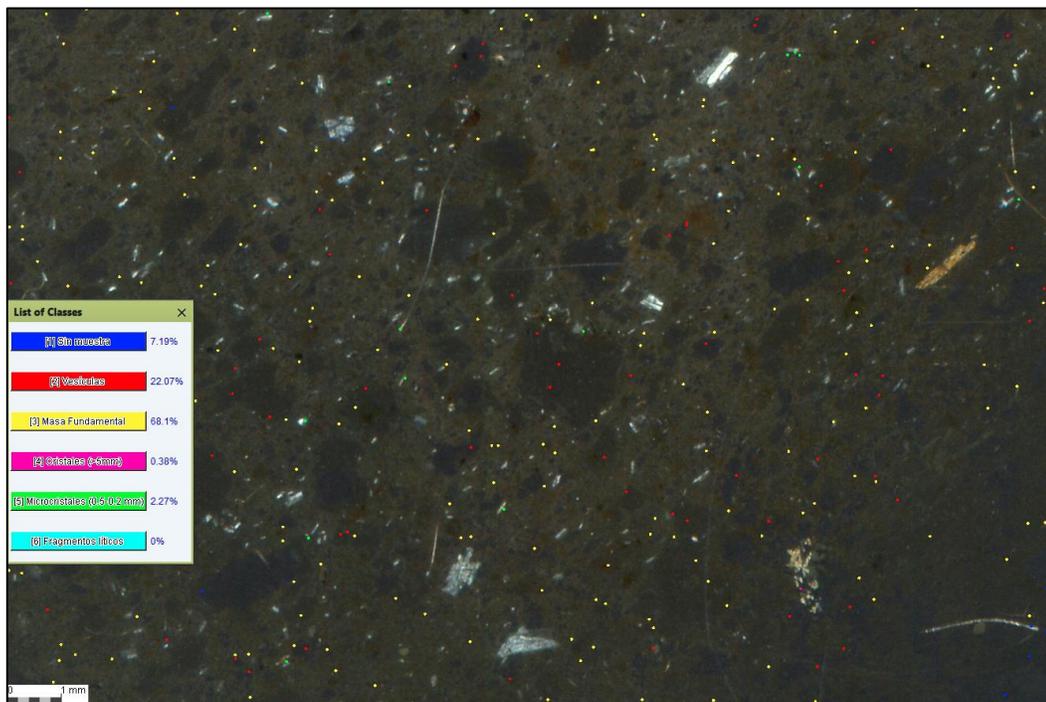


Figura 7: Imagen de corte de una muestra de pómez a nícoles cruzados, donde se observa el conteo por puntos de componentes en muestra; observados en la lista de clases (list of classes); sin muestra (puntos azul), vesículas (puntos rojos), masa fundamental (puntos amarillos), cristales (puntos rosados), microcristales (puntos verdes), fragmentos líticos (puntos turquesa). Al lado de cada componente se muestra el porcentaje de esta muestra.

3.3.2. Geoquímica

Se seleccionaron 6 muestras inalteradas de material juvenil del depósito Chungará para análisis geoquímico, se analizan pómez blanquecina, pómez parda y escoria (*Tabla A.G.1*).

Los análisis químicos se llevaron a cabo en el Laboratorio Geoanalítico de Washington State University, Washington D.C., EE.UU. Los elementos mayores se analizaron mediante un espectrómetro de fluorescencia de rayos X (XRF) secuencial ThermoARL Advant'XP y los elementos traza se analizaron mediante un espectrómetro de masas con plasma acoplado inductivamente de un solo colector con alta resolución (HR-ICP-MS); Finnigan Element2. En estas mismas muestras se llevó a cabo la determinación de la pérdida por calcinación (LOI).

Preparación de muestras y análisis en el GeoAnalytical Lab.

Para la preparación de muestra para el análisis de elementos mayores con XRF (Johnson et al., 1999) en el WSU GeoAnalytical Lab, primero se muele la muestra en un molino de carburo de tungsteno por 2 minutos, luego se mezcla 3.5g de la muestra con 7g tetraborato de litio ($Li_2B_4O_7$) durante 10 minutos. Luego se ponen en crisoles de grafito sobre una bandeja de sílice y se fusionan en el horno por 5 minutos a $<100^\circ C$. Luego se vuelven a moler cada perla (35 segundos). Se vuelven a poner en los crisoles y se deja reposar 5 minutos. Tras la segunda fusión, se muele y se mezcla con alcohol para eliminar metal en la muestra. Se lava con limpiador ultrasónico, se enjuaga con alcohol y se seca, generando perlas de vidrio para el análisis con el equipo.

La preparación de muestras para el análisis de elementos traza en el WSY GeoAnalytical Lab implica un método combinado de fusión y disolución que descompone eficazmente las fases minerales refractarias y elimina la mayor parte de los elementos de la matriz no deseados. El procedimiento consiste en una fusión de baja dilución con tetraborato de litio ($Li_2B_4O_7$) seguida de una digestión ácida mixta en vial abierto. Luego, se genera una evaporación con HNO_3 (2ml), HF (6 ml), and $HClO_4$ (2 ml) a $110^\circ C$, luego la muestra es secada y sometida a una segunda evaporación con $HClO_4$ (2 ml) a $160^\circ C$. Luego, es secada la muestra y llevada a solución con 10 ml de agua, 3 ml HNO_3 , 5 gotas H_2O_2 , 2 gotas de HF y calentada hasta obtener una solución clara. Finalmente, en una botella de 60 ml se diluye con agua desmineralizada hasta generar un peso total de 60g, generando la solución para el análisis con el equipo.

Precisión y exactitud de los análisis.

Para calcular la precisión se realizan 2 análisis geoquímicos en el laboratorio de una misma muestra (réplica) para elementos mayores. La exactitud se mide comparando el resultado del análisis de muestras de composición conocida con el resultado de analizar las mismas muestras normalizadas en base anhidra.

Para elementos mayores el laboratorio reporta precisión $<1.3\%$ para FeO y P_2O_5 y, $<0.5\%$ para el resto de los elementos mayores (en desviación estándar relativa). Para la exactitud, fueron 3 muestras las comparadas AGV-2 (USGS, 2022.b), BCR-2 (USGS, 2022.c) y GSP-2 (USGS, 2022.d), donde se obtiene que la exactitud en desviación estándar relativa es $<1.4\%$ para P_2O_5 y $<0.8\%$ para el resto de los elementos mayores.

Para los elementos traza, la precisión en desviación estándar relativa es de $<4\%$ para las Tierras Raras, mientras que es $<1\%$ para los demás elementos traza, con excepción del Tantalio que es $<14\%$. Con respecto a la exactitud de los elementos traza, las muestras comparadas son BCR-2 (USGS, 2022.c), BHVO-2 (USGS, 2022.a), AGV-2 (USGS, 2022.b). La exactitud en desviación estándar relativa, se tiene que es $\leq 2\%$ para las Tierras Raras y $<4\%$ para los demás elementos traza.

Trabajo de gabinete.

Se realizó una recopilación bibliográfica de la geoquímica de roca total y de elementos traza del volcán Parinacota. Estos datos pertenecen a diversos trabajos previos. Esta compilación de la composición del volcán se usa para la comparación con las muestras del depósito Chungará analizadas en este trabajo.

Las muestras se clasifican de acuerdo con el diagrama TAS (Le Bas et al., 1986) y se realizaron gráficos bivariantes, donde se presentan los elementos mayores versus sílice, y elementos traza versus sílice, mediante el software Grapher 12. También se realizaron gráficos multielementales.

3.3.3. Modelos de isópacas e isopletras

Se tabularon en el Software Microsoft Excel los datos obtenidos en terreno de espesores y medidas de clastos mayores en cada punto de la Unidad Chungará, donde el total de puntos estudiados fue de 41. Para la medición de clastos mayores en cada punto; se midieron los tres ejes de cada clasto en su largo, alto y ancho en centímetros. Luego, los valores de espesores y los valores de los ejes de clastos mayores se grafican en el Software libre QGIS versión 3.10.6-A Coruña.

3.3.3.1. Modelo de isópacas

En el programa QGIS se realiza el modelo de isópacas elipsoidales para espesores de 10, 20, 30, 40 cm, esto se realiza a través de la interpolación manual de todos los puntos de espesores graficados, además se realiza una extrapolación para las zonas donde no se presenta la unidad Chungará en la dirección opuesta al eje principal de dispersión. De esta forma, se construyen isópacas con una geometría aproximadamente elipsoidal.

Se obtiene el área encerrada por cada isópaca, la cual es utilizada en el software AshCalc (Daggitt et al., 2014). El cual procesa los datos y calcula el volumen total de la erupción utilizando modelos Exponencial, Power-law o Weibull. Modelos que se describen a continuación:

Primero, para obtener el volumen integral V (m^3), en todos los casos se calcula la integral del área del gráfico de espesor vs $\sqrt{\text{ÁREA}}$:

$$V = \int_0^{\infty} T dA \quad \text{Ec. 9}$$

Si A (m^2) es el área que encierra la isópaca de espesor T , entonces dA es el diferencial de área de la integral que va de 0 a ∞ . Este cálculo se realiza según los siguientes modelos:

Modelo Exponencial (Bonadonna & Houghton, 2005)

Modela el volumen total de una erupción cuando el adelgazamiento es exponencial. Donde se tiene que el espesor es:

$$T = T_0 e^{-k\sqrt{A}} \quad \text{Ec. 10}$$

Donde A (m^2) es el área total de la isópaca del espesor $T(m)$, T_0 es el máximo espesor y k es la pendiente del gráfico de $\ln(\text{espesor})$ vs $\sqrt{\text{ÁREA}}$.

Luego, reemplazando T (Ec. 10) en ecuación Ec. 9 e integrando la ecuación se obtiene el volumen. Además, en los datos pueden existir cambios de pendiente en el gráfico, por lo que, se pueden agregar segmentos de línea (rectas) para ajustar el modelo a los datos y así obtener un modelo que se ajuste a la realidad. Para el caso de n segmentos de línea y $(n-1)$ quiebres de pendiente se tiene la fórmula para cada una de las n rectas:

$$V = \frac{2T_1}{k_1^2} + \sum_2^n 2T(n-1)_0 \left[\frac{K_n BS_{(n-1)} + 1}{K_n^2} - \frac{K_{n-1} BS_{n-1} + 1}{K_{(n-1)}^2} \right] e^{(-k_{(n-1)} BS_{(n-1)})} \quad \text{Ec. 11}$$

Donde, Tn_0 es el coeficiente, $-k_n$ es la pendiente, BS_n es el cambio de pendiente del segmento de línea n .

Ley de Potencia (Power-Law) (Bonadonna & Houghton, 2005)

En este método el espesor se modela de la siguiente manera; agregando la relación de el espesor y $\sqrt{\text{ÁREA}}$. Se tiene que el espesor es:

$$T = T_{pl} \sqrt{A}^{(-m)} \quad \text{Ec. 12}$$

Donde T es el espesor, T_{pl} es una constante, m es el coeficiente de ley de potencia.

Luego, sustituyendo T (Ec. 12) y reemplazando en Ec. 9 e integrando, se tiene la siguiente ecuación para el volumen (Ec. 13). Donde se cambian los límites $(0, \infty)$ de la Ec. 9 por los límites arbitrarios B y C , respectivamente:

$$V = \frac{2T_{pl}}{2-m} (C^{(2-m)} - B^{(2-m)}) \quad \text{Ec. 13}$$

Para el cálculo de B , se tiene que T_0 es el coeficiente de ajuste exponencial cuando se ajustan los datos proximales (mayor espesor). Luego igualando $T=T_0$ en la ecuación Ec. 10 del modelo exponencial, y reemplazando constantes, B es calculado con:

$$B = \left(\frac{T_0}{T_{pl}} \right)^{\left(\frac{-1}{m} \right)} \quad \text{Ec. 14}$$

C es elegido como $\sqrt{\text{ÁREA}}$ de la isópaca más lejana obtenida.

Modelo de Weibull (Bonadonna & Costa, 2013)

En este método se tiene que la modelación del espesor es:

$$T = \theta_{th} \left(\frac{x}{\lambda_{th}} \right)^{(n_{th}-2)} e^{-\left(\frac{x}{\lambda_{th}} \right)^{n_{th}}} \quad \text{Ec. 15}$$

Reemplazando en ecuación Ec. 9, integrando y agregando los límites de integración 0 y $x=\sqrt{A}$. Luego volviendo a integrar entre 0 y ∞ :

$$V = 2 \frac{\theta_{th} (\lambda_{th})^2}{n_{th}} \quad \text{Ec. 16}$$

Donde n_{th} es la forma de la distribución (dimensional), θ_{th} es la escala del espesor (usualmente en cm), λ_{th} es la escala de decaimiento característico del adelgazamiento de espesor (usualmente en km).

3.3.3.2. Modelo de isopletras

Se confeccionó un modelo de isopletras elipsoidales para diámetros de clasto 2, 5 y 8 cm, esto se realizó a través de la interpolación de todos los puntos de diámetros graficados, además se realiza una extrapolación para las zonas donde no se presenta la unidad Chungará, de tal forma que se genera una geometría elipsoidal con fuente en el cráter del volcán.

El diámetro graficado es el promedio de los ejes largo, ancho y alto de los clastos mayores. Para este diámetro máximo, primero se seleccionaron 3 clastos mayores por punto de muestreo, luego se calculó un promedio simple entre los 3 ejes ortogonales mayores para cada clasto. Finalmente, se obtuvo un promedio simple de los 3 clastos por punto de muestreo, de esta forma se generó un diámetro máximo por punto de muestreo.

A partir de las elipses construidas se obtiene el downwind, el cual es el eje mayor de la elipse geoméricamente y el eje de dispersión de los clastos en el modelo, y se obtiene el crosswind, el cual es la mitad del eje menor de la elipse generada y es perpendicular al eje de dispersión.

Luego, se utiliza el código de Matlab de Biass et al. (2015) que implementa el modelo de Carey & Sparks (1986) para obtener la altura de la columna eruptiva y la velocidad del viento.

Modelo Carey & Sparks (1986).

Modelo que estima la altura de la columna eruptiva y la velocidad del viento en la tropopausa al momento de la erupción explosiva. La teoría en que se basa el modelo es que luego de generarse una columna eruptiva de humo y ceniza, los fragmentos caen por gravedad desde la región Paraguas (U; *Figura 8*). Estos fragmentos que caen van disminuyendo su tamaño mientras más lejos del centro del cráter se encuentre (*Figura 8*).

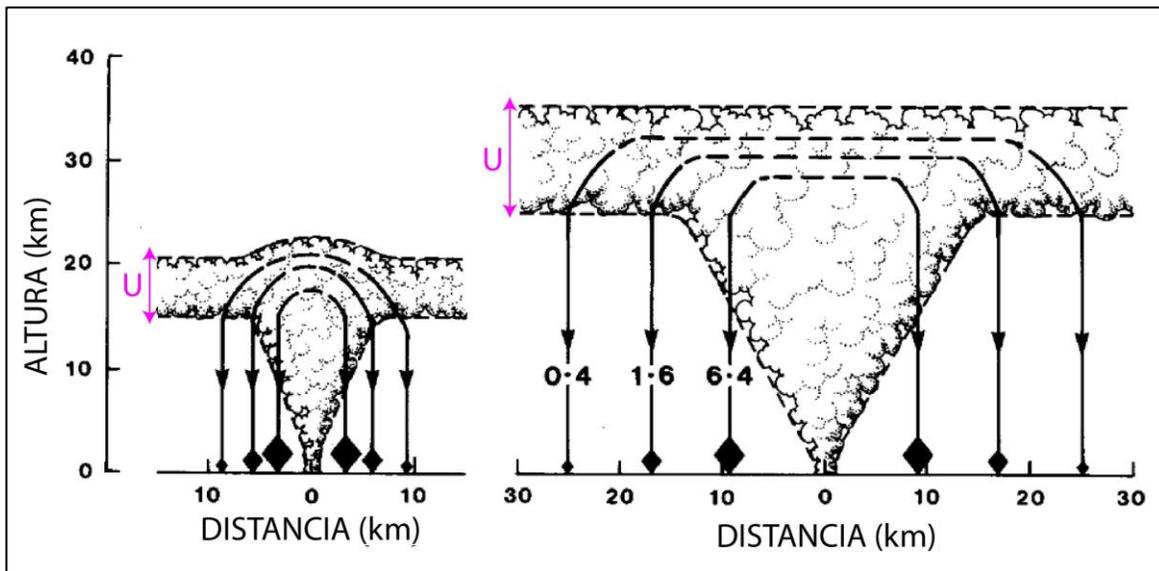


Figura 8: Trayectoria de clastos desde la región Paraguas (indicado con U de color lila) hasta el suelo, para columnas con altura $H_t=21$ y $H_t=35$ km. Se observa que en la columna de altura 35 km, clastos encontrados a una distancia de 10 km desde el centro volcánico poseen un diámetro de 6.4 cm, mientras clastos encontrados a una distancia de 20 km poseen diámetro de 1.6 cm y clastos encontrados a 25 km poseen diámetro de 0.4 cm. Además, se observa que la columna mayor (35 km) posee mayor dispersión máxima (hasta 25 km desde el centro eruptivo), mientras la columna menor (21 km) posee menor dispersión máxima (hasta <10 km desde el centro eruptivo). Figura editada de Carey & Sparks (1986).

El procedimiento para utilizar el modelo es el siguiente:

Primero, se interpola la densidad de los clastos según el diámetro de clastos. Se utiliza **a**, **b**, **c** o **d** de la Figura 9, según corresponda el diámetro y densidad del clasto. Luego, una vez en la sección **a**, **b**, **c** o **d**, se interpola el crosswind y downwind de las isopletas, primero, se interpola el valor de crosswind y se obtiene el valor de la altura de la columna en km. Luego, se interpola el valor de downwind y se obtiene el valor de la velocidad del viento en m/s. Además, cabe destacar que el downwind indica la dirección del viento al momento de la erupción.

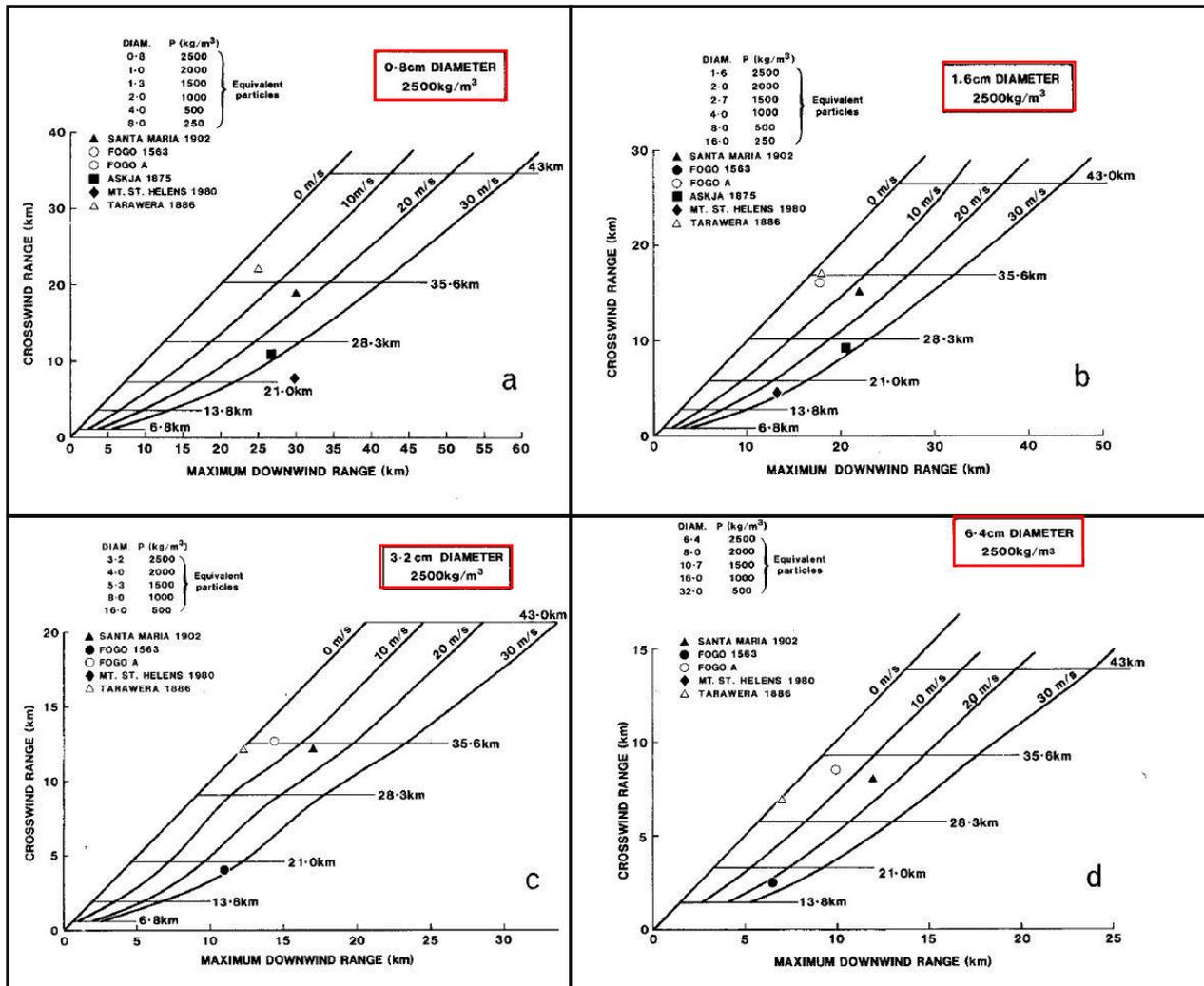


Figura 9: En la figura se observa un rango de crosswind versus máximo downwind en diferentes diámetros de clastos y respecto a diferente densidad de clastos (arriba a la izquierda de cada gráfico). Figura editada de Carey & Sparks (1986).

El código de Biass et al. (2015) utilizado en la plataforma de Matlab adapta el modelo de Carey & Sparks (1986), donde genera un ajuste polinomial que genera un rango continuo de tamaño de clasto y densidad. En el código, los datos a ingresar son el downwind de la isopleta (km), crosswind de la isopleta (km), diámetro del clasto (cm), densidad del clasto (kg m^{-3}) y, se calcula la altura de la columna eruptiva (km) y la velocidad del viento al momento de la erupción (m s^{-1}).

La densidad utilizada en el código es un promedio de los 3 tipos de fragmentos juveniles de la unidad Chungará. Esta densidad es calculada según la metodología descrita en la sección 3.2.3.1 de la Metodología.

Capítulo 4: Resultados

4.1. Estratigrafía

Durante las campañas de terreno se definieron unidades volcánicas pertenecientes al volcán Paríacota, luego se correlacionaron entre sí. Para llevar a cabo esta tarea, lo primero que se realizó fue la confección de columnas estratigráficas (*Figura 11.b*) durante las campañas de terreno. Este levantamiento de columnas se realizó en los puntos MIPA 2, MIPA 3, MIPA 4, MIPA 7 y MIPA 9 (las coordenadas están presentes en *Tabla A.C.1*). La ubicación de los puntos está graficada en el mapa de la *Figura 10*.

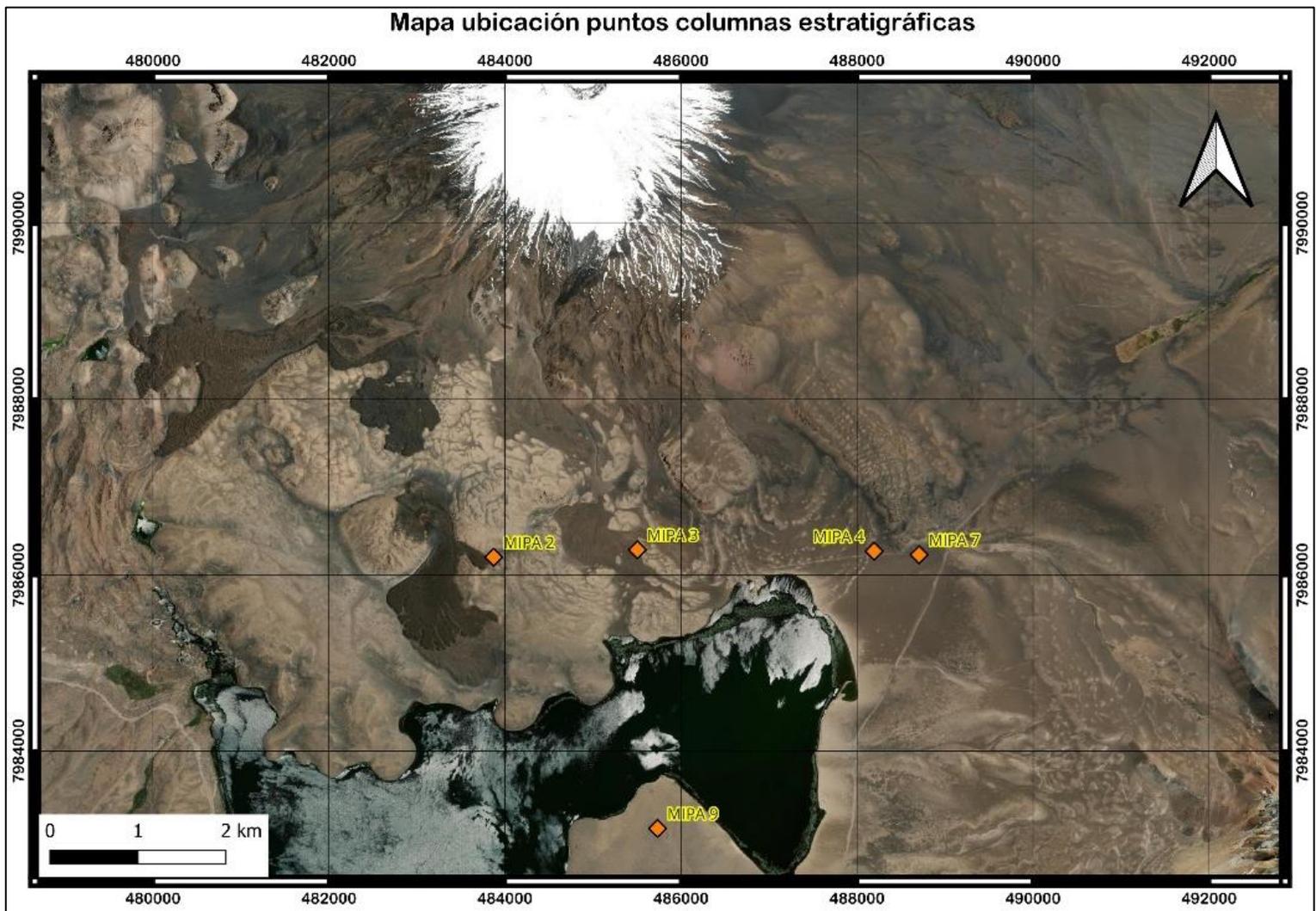


Figura 10: Mapa con puntos donde se levantan columnas estratigráficas para este estudio: MIPA 2, MIPA 3, MIPA 4, MIPA 7 y MIPA 9.

Definición de unidades

A partir de las columnas estratigráficas realizadas en los puntos estudiados en terreno, se definieron 4 unidades volcánicas. La unidad Chungará en este caso es la más reciente, seguida por la unidad de depósito de caída Tambo Quemado, la unidad de depósito de Gran Couleé y finalmente el nivel base Block & Ash. Cabe destacar que se observa que entre cada unidad de interés existen otras capas más finas de material volcánico (*Figura 11.a.*).

Las unidades fueron descritas a través de la geometría que poseen, litología y estructuras internas. En la geometría se definieron las formas de las unidades, sus relaciones de contacto, su relación con la topografía previa y el espesor de la unidad. En la litología se describió el tipo de material de la unidad y finalmente, en las estructuras internas se definió si posee estructuras sedimentarias como gradación, entre otros. A continuación, se describen las unidades que fueron definidas desde el techo hacia la base:

Unidad Chungará:

Unidad de depósito de caída compuesta principalmente por material pumíceo de tamaño lapilli grueso a bloques. La unidad se describirá en detalle en la siguiente sección.

Unidad Tambo Quemado:

Unidad de depósito de caída de color pardo oscuro, está compuesta de material pumíceo y escoráceo juvenil de tamaño ceniza gruesa-lapilli fino con fragmentos mayores tamaño lapilli medio de pómez principalmente con fragmentos escoráceos y líticos. Se podría asociar a un tipo de erupción explosiva debido a su material piroclástico. Correspondería a una unidad perteneciente a la etapa post-colapso del edificio volcánico en la evolución del volcán (posterior a 8ka).

Esta unidad es más antigua que la unidad Chungará y se ubica en el sureste del volcán. Posee un espesor de que varía entre 35 cm a 3 cm; desde 7km aprox. al sureste del volcán hasta 5km aprox. al suroeste del punto anterior y 8km aprox. al sureste del volcán.

Presenta fragmentos mayores (30%) y matriz (70%) distribuidas de forma homogénea en la capa.

La matriz se compone de material juvenil de tipo pumíceo (30%) y escoráceo (30%) con granulometría ceniza gruesa-lapilli fino. Se observa de 10% a 30% de presencia de líticos; principalmente negros. Presenta aproximadamente 20% de cristales; los cuales son de plagioclasa, cuarzo, olivino de color amarillo.

Existen fragmentos mayores de pómez con tamaño lapilli medio. Además, se presentan otros fragmentos de escoria y fragmentos líticos en menor medida de tamaño lapilli medio. Los fragmentos pumíceos presentan ocasionalmente cristales subhedrales de plagioclasa, biotita y fragmentos líticos. El tamaño de los fragmentos mayores tiene un promedio de 2.5 cm, que varía desde 3.2 cm

hasta 1.9 cm; calculado como un promedio simple entre los 3 ejes ortogonales mayores de los fragmentos mayores (largo, ancho y alto).

Ocasionalmente presenta hacia el techo una zona con clastos más redondeados con límite difuso, lo que puede indicar un nivel de retrabajo en la parte superior de la unidad.

Se dispone aparentemente concordante en base y techo con unidades de ceniza media -gruesa de material escoráceo y pumíceo juvenil con fragmentos mayores de pómez de granulometría lapilli fino.

Unidad Gran Couleé:

Unidad de depósito de caída de color pardo claro, está compuesta por material juvenil pumíceo y un poco escoráceo de tamaño de ceniza gruesa-lapilli fino a medio con fragmentos mayores de tamaño lapilli medio de pómez con escasos fragmentos líticos. Se asocia a un tipo de erupción explosiva, debido a su material piroclástico. Correspondería a una unidad perteneciente a la etapa post-colapso del edificio volcánico en la evolución del volcán (posterior a 8ka).

Se encuentra ubicada bajo la unidad Tambo Quemado, en el sector sureste del volcán. Posee un espesor que varía de 30 cm a 8 cm; donde a 9 km aprox. al sur del volcán posee un espesor de 30 cm y, a 7 km aprox. al sur y al sureste del volcán posee un espesor de 8 cm.

La matriz se compone de material juvenil pumíceo (hasta 80% del total) y algo de material juvenil escoráceo (5-10%) de granulometría ceniza gruesa-lapilli fino a medio. Presenta poco porcentaje de fragmentos líticos (hasta 10%) y poco porcentaje de cristales (5-10%) donde se identifica principalmente cuarzo.

Presenta fragmentos mayores de pómez y escasos fragmentos líticos. Los fragmentos mayores de pómez van de aproximadamente 0.5cm a 3 cm de largo (lapilli medio) y se observa que la pómez presenta cristales de biotita, plagioclasa y anfíboles. Los fragmentos mayores de líticos son de color negro y rojo de menor tamaño de 0.5 a 1 cm. El tamaño de los fragmentos mayores tiene un promedio de 2.3 cm, donde varían de rango entre 3.3 cm a 0.7 cm; calculado como un promedio simple entre los 3 ejes ortogonales mayores de los fragmentos mayores (largo, ancho y alto).

Se observa una distribución no homogénea de partículas en la unidad. Hacia el techo se observan franjas que presentan una disminución en el tamaño de los fragmentos a lapilli fino-medio con tamaño promedio de hasta 0.5 cm de largo. Esta franja superior varía de 10 cm a 19 cm hacia más al sur del volcán.

Hacia la base, se dispone ondulante con otra unidad; un nivel base de color gris oscuro con granulometría ceniza media. Hacia el NE, en el nivel base se observan fragmentos mayores redondeados de tamaño bloque hasta 7-8 cm.

Hacia el techo se encuentra en contacto con una unidad de material juvenil de tipo pumíceo y escoráceo con granulometría de ceniza gruesa con fragmentos mayores de tipo pumíceos con granulometría lapilli fino.

Unidad nivel base. (Block & Ash):

Unidad de depósito de bloque y ceniza de color pardo oscuro compuesta de ceniza media con fragmentos lapilli fino de principalmente cristales y escasos fragmentos pumíceos. Esta unidad presenta fragmentos mayores de tamaño bloque. Correspondería probablemente a la etapa postcolapso de la evolución del volcán (posterior a 8 ka).

Se ubica en el sector sur del volcán y muy levemente hacia el suroeste y sureste del mismo. Posee un espesor mínimo de 22 a 25 cm a 5.5 km aprox. al sur del volcán.

Es un depósito mal seleccionado con 95% de matriz y 5% de fragmentos mayores.

La matriz (95%) es de ceniza media con fragmentos de lapilli fino redondeados a subredondeados. Se observa escasos fragmentos pumíceos (<1%) de forma irregular, subangulosos. Presenta abundantes fragmentos de cristales (30-50%) subangulosos a subredondeados de plagioclasa, cuarzo, biotita. El resto es vidrio argilizado (amarillo/pardo).

Los fragmentos mayores son de tamaño bloque (5%) de hasta 20 cm de diámetro. Los bloques son de roca densa, se presentan monomíticos subangulosos a subredondeados de textura holocristalina, equigranular, con granulometría tamaño fino-medio. Presenta cristales de cuarzo, esfeno y anfíbol. Estos fragmentos provienen de los domos riolíticos cercanos.

En el techo de la unidad, se encuentra en contacto ondulante con otra unidad de ceniza media.

Correlación de unidades

Según las características de geometría, litología y estructuras internas, se correlacionaron las unidades de (base a techo) Block & Ash, Gran Couleé, Tambo Quemado, Chungará anteriormente descritas (Figura 11.b.). Se observa que en los puntos MIPA 2 y MIPA 3 ubicados hacia el sur del volcán se encuentra la unidad Block & Ash en la base de la columna respectiva al punto. En los puntos MIPA 2, MIPA 3, MIPA 4, MIPA 7 se encuentra la unidad Tambo Quemado. La unidad Chungará se encuentra en los puntos MIPA 2, MIPA 3, MIPA 4, MIPA 7. Y, se observa que la unidad Gran Couleé se ubica en los puntos MIPA 7 y MIPA 9, que están ubicados hacia el sur/sureste de volcán, correlacionando ambos puntos de terreno.

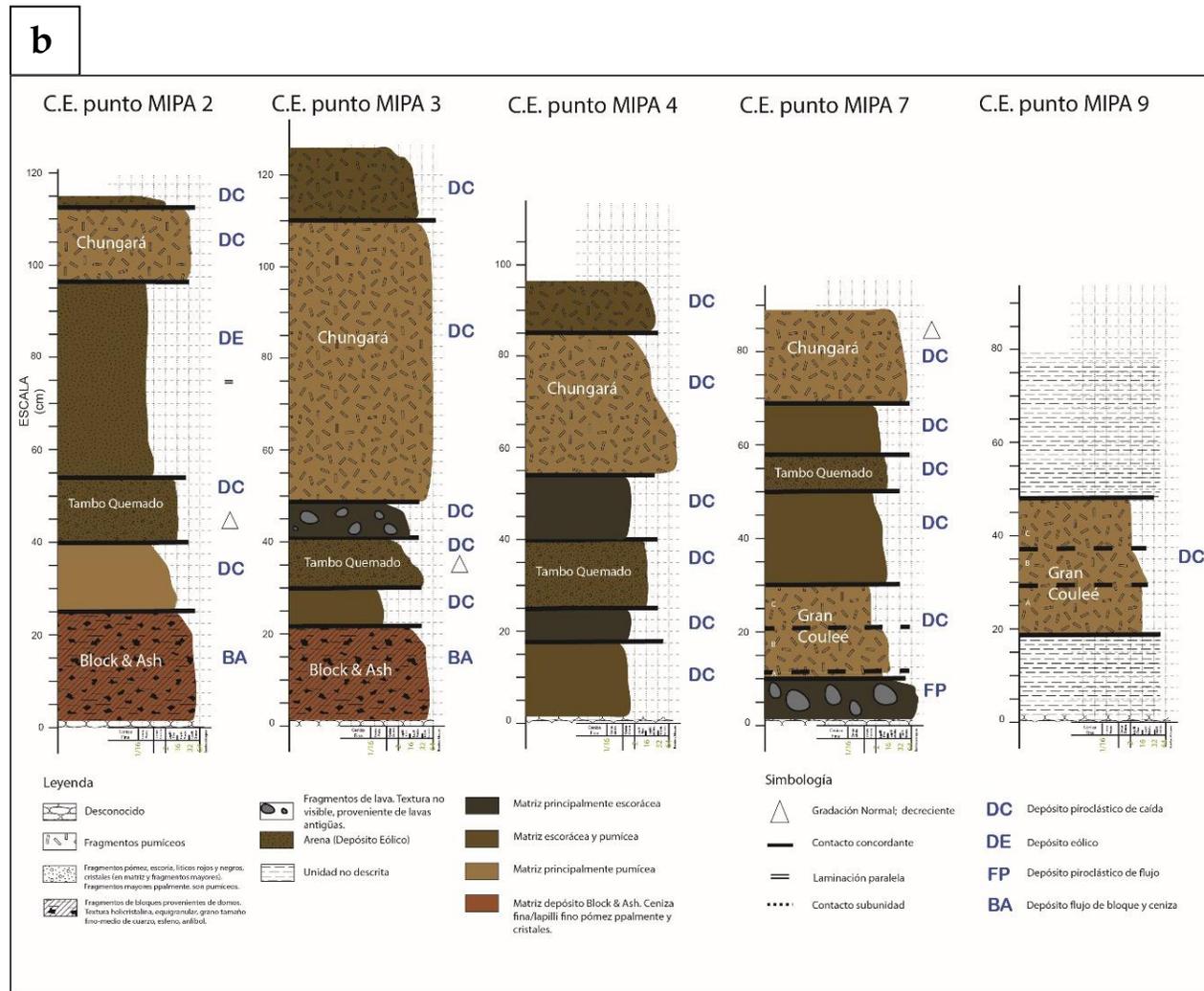
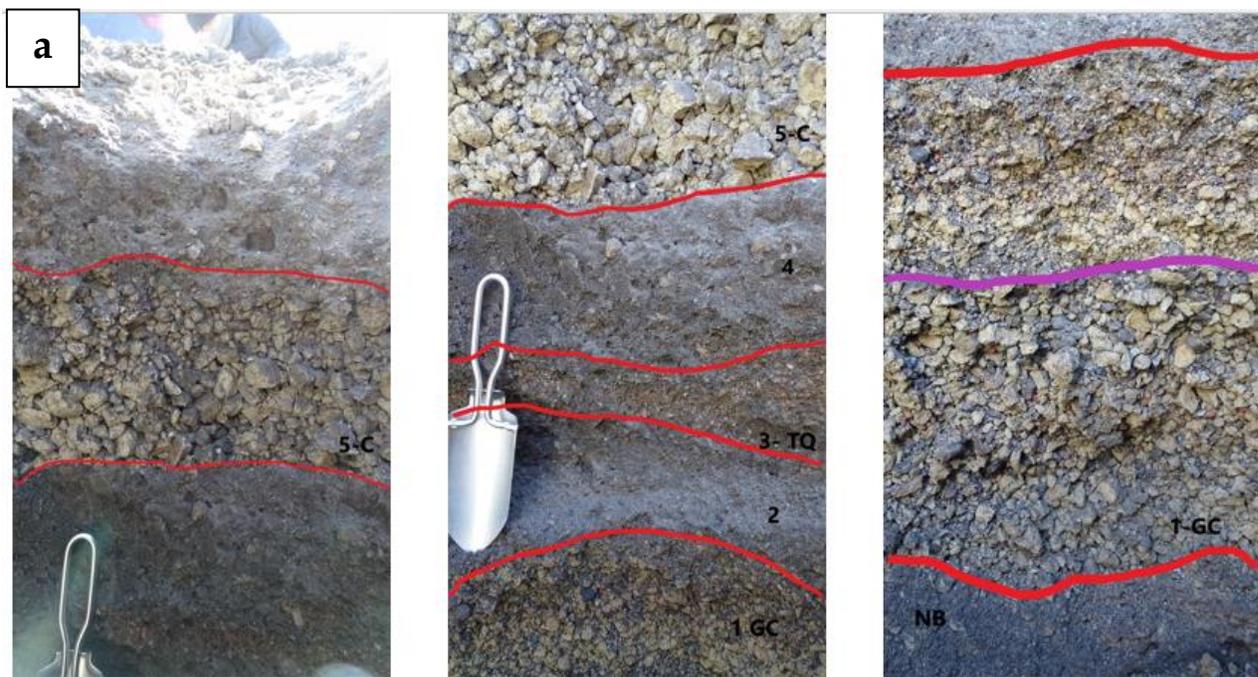


Figura 11: a. Columna estratigráfica 5 (MIPA 7), de base a techo: la unidad 1 es Gran Couleé (GC), la unidad 3 es unidad Tambo Quemado (TQ) y la unidad 5 es unidad Chungará (C). Las líneas de rojo son el límite de la unidad, línea de morado ubicada en la u. GC representa el límite de la franja superior que presenta una disminución en el tamaño de los fragmentos. b. Columnas estratigráficas en puntos MIPA 2, 3, 4, 7, 9.

4.2. Depósito de caída Chungará

4.2.1. Generalidades

La unidad Chungará es un depósito de caída de color pardo claro, compuesta por material juvenil de tipo pumíceo y escoráceo de tamaño ceniza gruesa a lapilli fino y posee fragmentos mayores tamaño lapilli grueso a bloque de pómez. Correspondería a los productos de una erupción generada durante la etapa post-colapso del edificio volcánico.

Se encuentra distribuida hacia el sureste del volcán. Presenta un espesor que varía entre 10 a 62 cm, con una disminución del espesor hacia el sureste.

Presenta fragmentos mayores (70%) y matriz (30%) distribuidas de manera homogénea por toda la capa.

La matriz se compone de material juvenil pumíceo (30%) y escoráceo (30%) con granulometría ceniza fina a ceniza gruesa, presenta poca presencia de líticos, aproximadamente 10-20% y poco contenido de cristales con proporción de 10-20%.

Presenta fragmentos mayores de pómez tamaño lapilli fino a bomba. La pómez se presenta con vesículas redondeadas a semialargadas, de subangulosas a subredondeadas (presente entre 43-72 wt.%). Además, en muy escaso porcentaje presenta fragmentos líticos (hasta 8 wt.% aproximadamente) y escoráceos (hasta 3 wt.% aproximadamente) (ver porcentajes en *Figura A.E.4;Tabla A.E.5*). El tamaño de los fragmentos mayores presenta un promedio de 4 cm. donde varía de 7 cm hasta 3.8 cm; según promedio simple de los 3 ejes ortogonales (largo, ancho y alto).

Hacia el sureste, disminuye el tamaño de grano, llegando a un tamaño promedio de lapilli medio (2 cm aprox.) a aproximadamente 11 km de la fuente. Por otra parte, a aproximadamente 5 km de la fuente, hacia el este del eje de dispersión, se presenta una estructura sedimentaria de leve gradación normal en el último quinto de la capa hacia el techo.

La unidad se dispone aparentemente concordante en la base con unidades de material juvenil escoráceo con granulometría de ceniza media a lapilli fino, y en el techo presenta un contacto concordante con la unidad que corresponde a material juvenil escoráceo y pumíceo con granulometría de ceniza gruesa a lapilli fino. Esta unidad se encuentra cercana a superficie de erosión.

4.2.2. Edad

La edad de la unidad Chungará podría ser de 2.6-2.4 ka ca AP. Esta edad fue definida a partir de la correlación con la unidad Pómez Hito XVII (ver en mapa de *Figura A.C.1*), definida en Bertin et al. (2022). La unidad Pómez Hito XVII es un depósito piroclástico de caída pumíceo que posee eje de dispersión hacia el sureste con hasta 36 cm de espesor y el cual disminuye hacia el sur. Los

fragmentos juveniles son tamaño lapilli grueso de pómez blancas bandeadas y rojizas de composición dacítica con cristales de óxido de hierro y hornblenda.

Según Bertin et al. (2022), en el trabajo de Sáez et al. (2007) se reportó una edad ^{14}C de 2.620 ± 130 en materia orgánica ubicada inmediatamente sobre el depósito de caída y en el trabajo de Guédron et al. (2019) se informó una edad modelo ^{14}C de 2.454 años cal AP para la tefra.

4.2.3. Distribución

La unidad Chungará se distribuye hacia el sureste del cráter del volcán Parinacota, extendiéndose a través de la zona norte del lago Chungará hasta 11 km aproximadamente hacia el sureste del volcán.

Presenta un espesor máximo de 62 cm, el cual está ubicado a aproximadamente 5 km al sur del cráter del volcán, mientras el espesor mínimo medido es de 2-3 cm ubicado al sur del cráter y un poco hacia el oeste del punto de mayor espesor (mapa de isópacas; *Figura 12*).

Por otra parte, el punto MIPA 8, presenta diferencias litológicas, granulométricas y geoquímicas con la unidad Chungará. Además, se observa que el punto MIPA 1; lugar donde se obtiene la primera columna estratigráfica (CE1; *Figura A.D.1; Figura A.D.2*) y está ubicado a los pies de Ajata Superior (*Figura 5*), no se encuentra la unidad Chungará; sólo se observan intercalaciones de depósito de caída tamaño ceniza, intercalados entre blanquecinos y grises.

4.2.4. Espesores, volumen, isópacas

Se realizaron mediciones de espesores de la unidad Chungará en 38 puntos de control, el rango de espesores va desde 62 cm a menos de 3 cm. En base a esto se realizó una interpolación y extrapolación de los puntos para obtener 4 isópacas de espesores 10, 20, 30 y 40 cm. En el mapa de la *Figura 12* se observan los puntos y las isópacas dibujadas. Como se observa en el mapa, hacia el este se realiza una extrapolación de puntos, esto debido a que no se pudo analizar esta zona debido a ser parte de Bolivia y no se llegó a cruzar la frontera Chile-Bolivia.

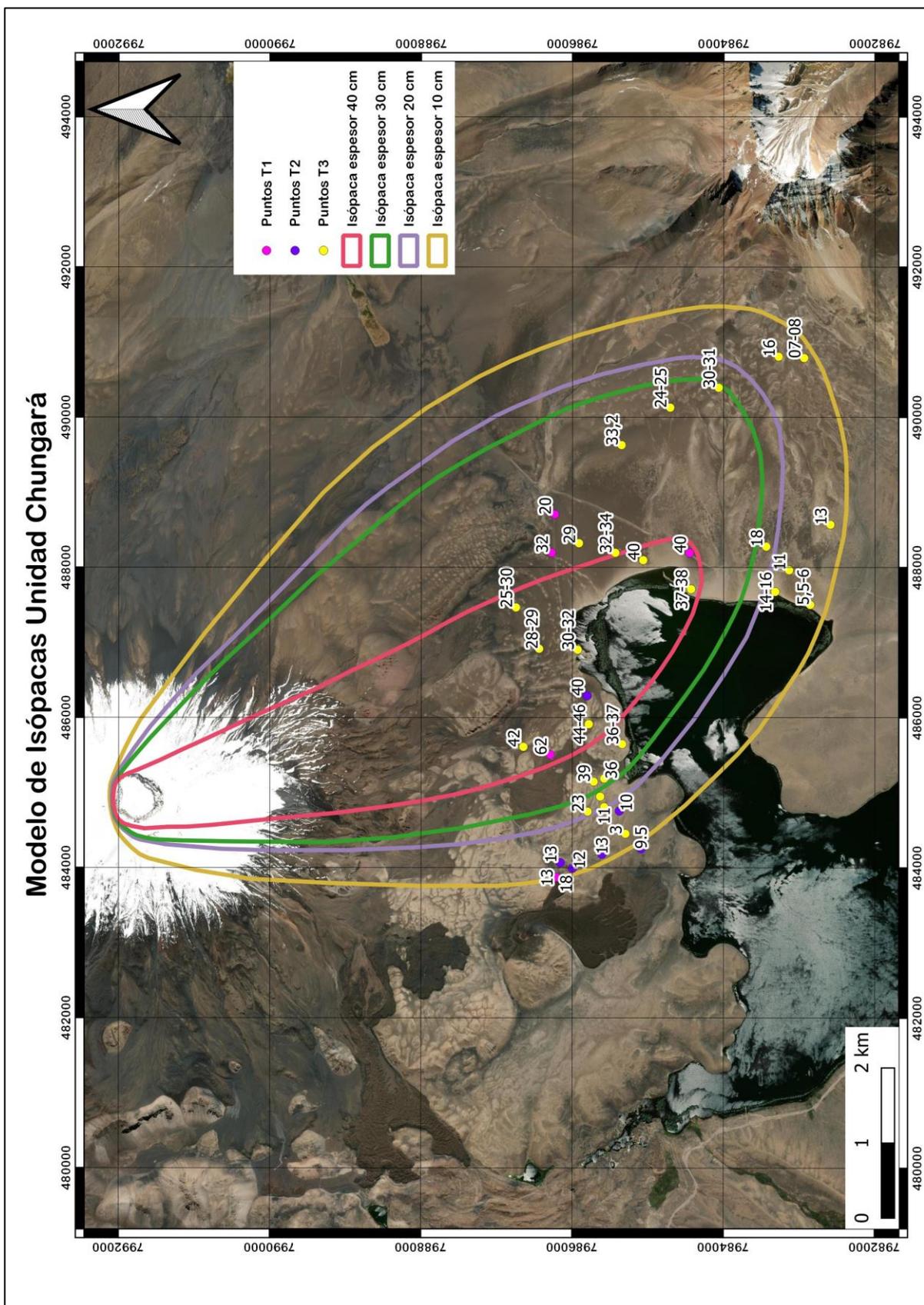


Figura 12: Mapa de isópacas Unidad Chungará; 40, 30, 20 y 10 [cm]. Donde se encuentran los puntos del terreno 1 (T1), terreno 2 (T2), terreno 3 (T3).

Luego de haber graficado las isópacas elipsoidales, se obtuvo el área que encierra cada una (*Tabla 2*), donde a medida que aumenta el espesor de la isópaca; el área es menor. Se calculó que la isópaca de 10 cm presenta un $\sqrt{\text{Área}}$ de 7.2 km aproximadamente, mientras la isópaca de 40 cm presenta un $\sqrt{\text{Área}}$ de 3.8 km aproximadamente.

Isópaca (cm)	$\sqrt{\text{Área}}$ (km)
10	7.1894
20	6.0399
30	5.6763
40	3.7689

Tabla 2: Valores de área calculada en cada isópaca, obtenido de Software libre Qgis.

A partir de las isópacas dibujadas y el $\sqrt{\text{Área}}$ obtenida, se calculó el volumen eruptado por la unidad Chungará en base al modelo Exponencial, Power Law y Weibull (Sección 3.3.3.1 de Metodología). Estos modelos fueron obtenidos en el Software AshCalc, donde se obtuvieron los gráficos de la *Figura 13*.

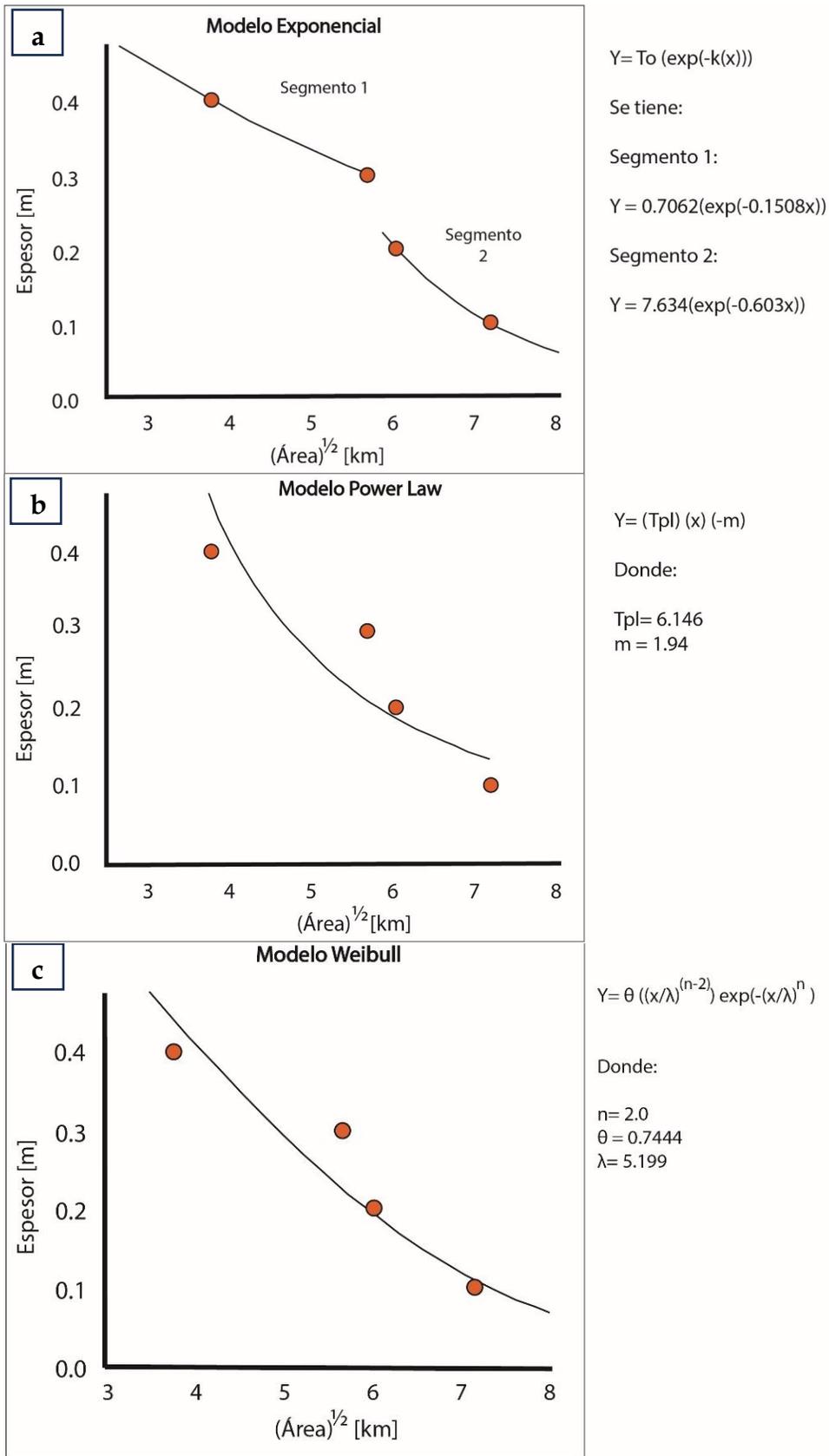


Figura 13: **a.** Modelo Exponencial, **b.** Modelo Power Law; donde límites de la integral; $B=3.04$ y $C=7.1894$, además el valor de T_0 de la fórmula para B , es el valor T_0 del segmento 1 del modelo

exponencial (a). Y, c. Modelo Weibull. Modelos ajustados a los datos de isópacas que fueron obtenidas en este estudio, utilizando el Software AshCalc.

Modelo	R ²
Exponencial Segmento 1	1
Exponencial Segmento 2	1
Power Law	0.89
Weibull	0.93

Tabla 3: Coeficientes de correlación (R²) para cada ajuste: Exponencial segmento 1, Exponencial segmento 2, Power Law, Weibull.

En la *Figura 13.a.* se observa el modelo Exponencial, donde se eligieron dos segmentos debido a que permite ajustar la cantidad de datos (4 isópacas). A partir de este modelo, de forma gráfica, se observa que las 2 isópacas proximales se ajustan a una recta denominada segmento 1, y las 2 isópacas distales se ajustan a otra recta denominada segmento 2. El segmento 1 se ajusta a las isópacas de mayor espesor y el segmento 2 se ajusta a las isópacas de menor espesor; además ambos segmentos poseen R² igual a 1 (*Tabla 3*).

Por otra parte, el modelo Power Law (*Figura 13.b.*) se ajusta a pocos datos, en particular se acerca a la isópaca de 0.2 m y posee un un R² menor de 0.89 (*Tabla 3*). El modelo de Weibull (*Figura 13.c.*) se ajusta mejor a los datos distales de menor espesor; las isópacas de 0.1 y 0.2 m y posee un un R² de 0.93 (*Tabla 3*).

Los volúmenes obtenidos por cada modelo a través del software AshCalc (*Tabla 4*) son:

Modelo	Volumen (km ³)
Exponencial	0.01932
Power Law	0.01115
Weibull	0.02012

Tabla 4: Valores de volumen calculado en cada isópaca obtenido por medio de Software AshCalc, según cada modelo: Exponencial, Power Law, Weibull.

Según los modelos Exponencial, Power Law y Weibull, se estima que el volumen eruptado está acotado entre 0.01- 0.02 (km³). El modelo Power Law presenta un volumen eruptado de 0.01 (km³), mientras el modelo Exponencial y de Weibull presentan valores que se asemejan, siendo aproximadamente de 0.02 (km³).

A través del método de Weibull, se obtienen los parámetros expuestos en la siguiente tabla (*Tabla 5*), donde λ_{th} indica la escala de decaimiento característico del adelgazamiento del espesor en metros, n_{th} es la forma de la distribución y, θ_{th} es la escala del espesor en metros.

λ_{th} [m]	n_{th}	θ_{th} [m]
5.199	2.0	0.7444

Tabla 5: Parámetros para el modelo Weibull obtenido en la modelación.

Respecto a los métodos utilizados, se tiene que, el modelo exponencial tiene una incerteza que deriva de los límites no definidos, debido a que se integra entre 0 e ∞ . Mientras, el método Power Law define límites a partir de la isópaca más lejana y T_0 de los datos proximales (isópacas más cercanas), acotando y disminuyendo el volumen estimado de la erupción. Entonces, como los límites fueron elegidos a partir de los datos de espesores que fueron obtenidos en terreno, puede ser que la erupción haya sido de mayor tamaño, pero faltan datos proximales y distales. Otra opción es que haya sido retrabajada con otro evento de eruptivo dentro de una zona vasta de volcanes; sin embargo, para descartar o aprobar esta teoría hace falta obtener más datos. De esta forma, si existiesen mayor cantidad de datos, podría crecer el área de las isópacas y a su vez el volumen de la erupción. Entonces, se considera el volumen obtenido por el método Power Law como un posible volumen mínimo del método.

Por otra parte, para el método de Power Law, según Bonadonna & Houghton (2005) un coeficiente de ley de potencia cercano a 2 hace confiable el resultado del modelo; como para el caso Chungará m es similar a 2, el resultado es confiable y, además, es un depósito con adelgazamiento rápido y no es muy sensible a los límites de integración.

Respecto al modelo de Weibull, se observa un ajuste acorde a la sección distal de los datos (isópacas más lejanas). Agregando a esto, según Bonadonna & Costa (2013), el parámetro de λ_{th} , el cual es la escala de decaimiento característico del adelgazamiento del espesor, aumenta con la magnitud de la erupción, donde para erupciones de pequeña y moderada intensidad (VEI \leq 3) se tiene que $\lambda_{th} < 20$ km, lo que guarda relación con el VEI=3 (*Figura 19*) obtenido y $\lambda_{th}=5.1$ km (*Tabla 5*).

4.2.5. Tamaño clasto, intensidad

4.2.5.1. Granulometría

Se realizó el tamizaje de las muestras para las 4 unidades que fueron definidas en este trabajo. Esta tarea fue realizada con el fin de caracterizar los depósitos de caída piroclásticos contemporáneos

del volcán y delimitar adecuadamente la unidad a analizar (unidad Chungará). Esta información está expuesta en *Anexo E. Granulometría y categorización de componentes*, donde se presenta una tabla de la distribución por tamaños de cada unidad (*Tabla A.E.3*), gráficos de distribución granulométrica de la unidad Block & Ash (*Figura A.E.*), Gran Couleé (*Figura A.E.2*) y Tambo Quemado (*Figura A.E.1*), junto a un análisis al respecto.

A continuación, en la *Figura 15* se muestra la distribución modal de las muestras pertenecientes a la Unidad Chungará (M2, M3 y M5), donde se define que la matriz del depósito son fragmentos < 2 [mm] ($\Phi < -1$, tamaño menor a lapilli fino) y los fragmentos mayores son > 2 [mm] (tamaño mayor a ceniza gruesa). La ubicación de las muestras analizadas se observa en el mapa (*Figura 14*), donde M6 no pertenece a la unidad Chungará.

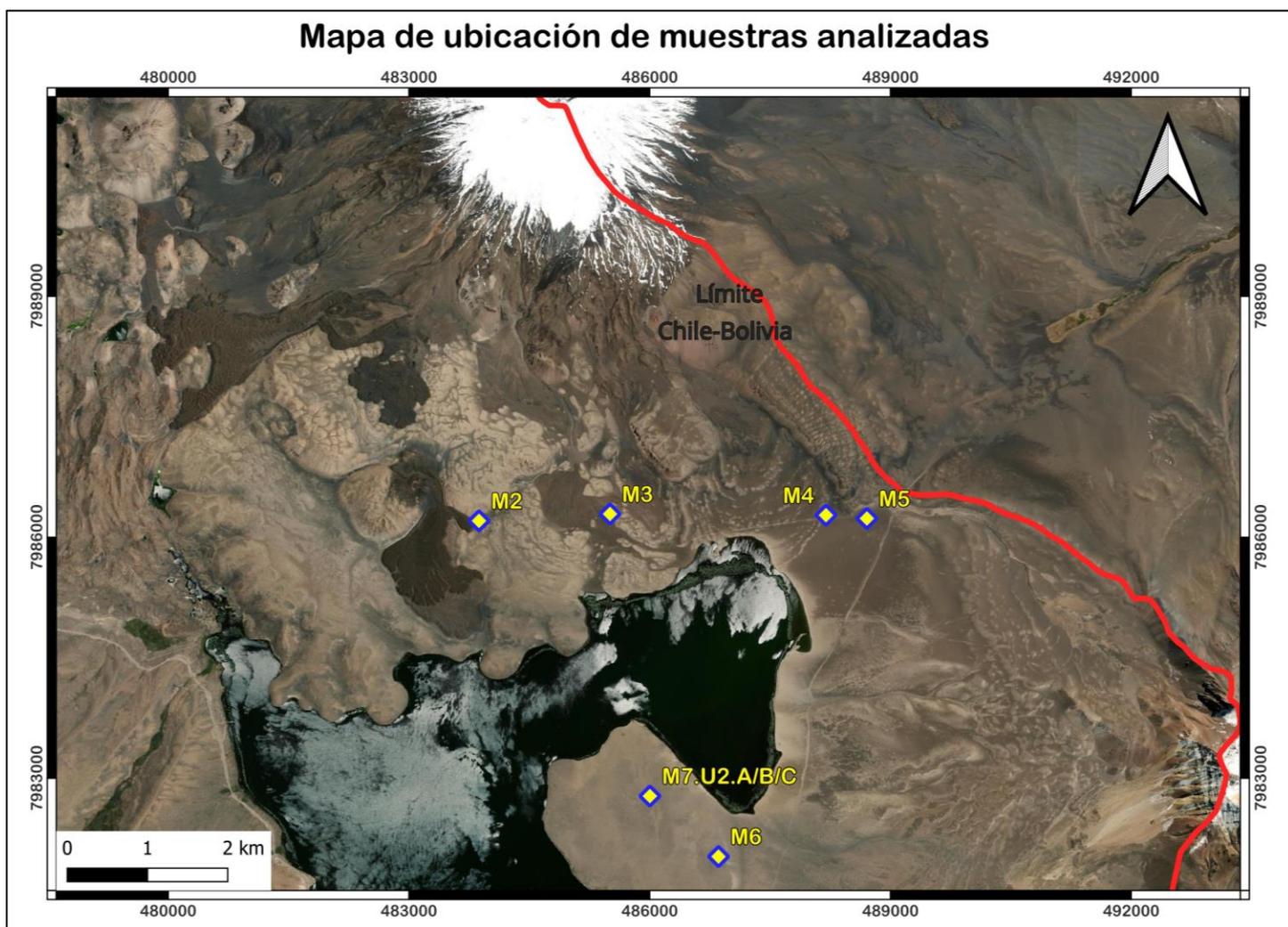


Figura 14: Mapa ubicación de muestras analizadas granulométricamente; M2, M3, M4, M5 y M6; coordenadas geográficas en Tabla A.E.1. La unidad Chungará está presente en M2, M3 y M5. Las demás muestras con su respectivo análisis granulométrico se encuentran en Anexo E.

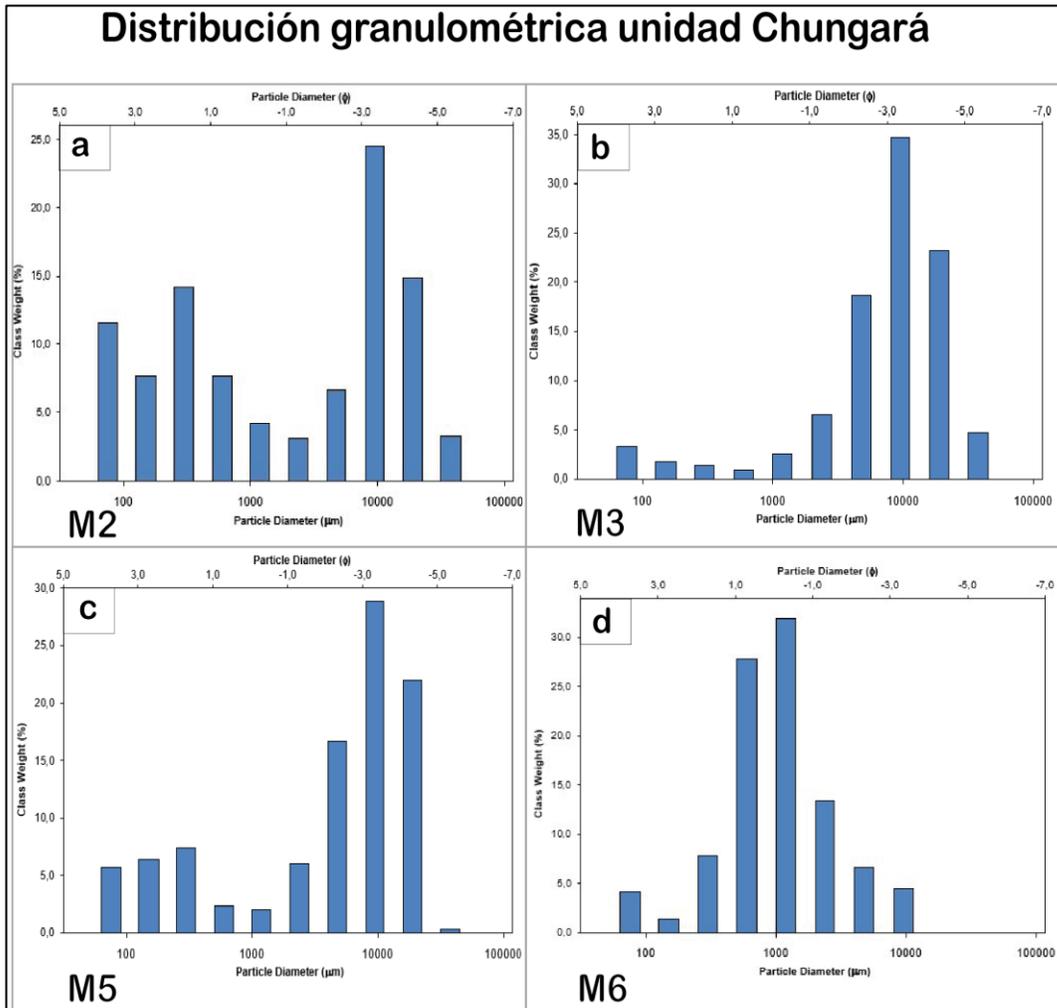


Figura 15: Distribución granulométrica unidad Chungará para muestras *a.* M2, *b.* M3, *c.* M5 y *d.* M6, perteneciente a otra unidad.

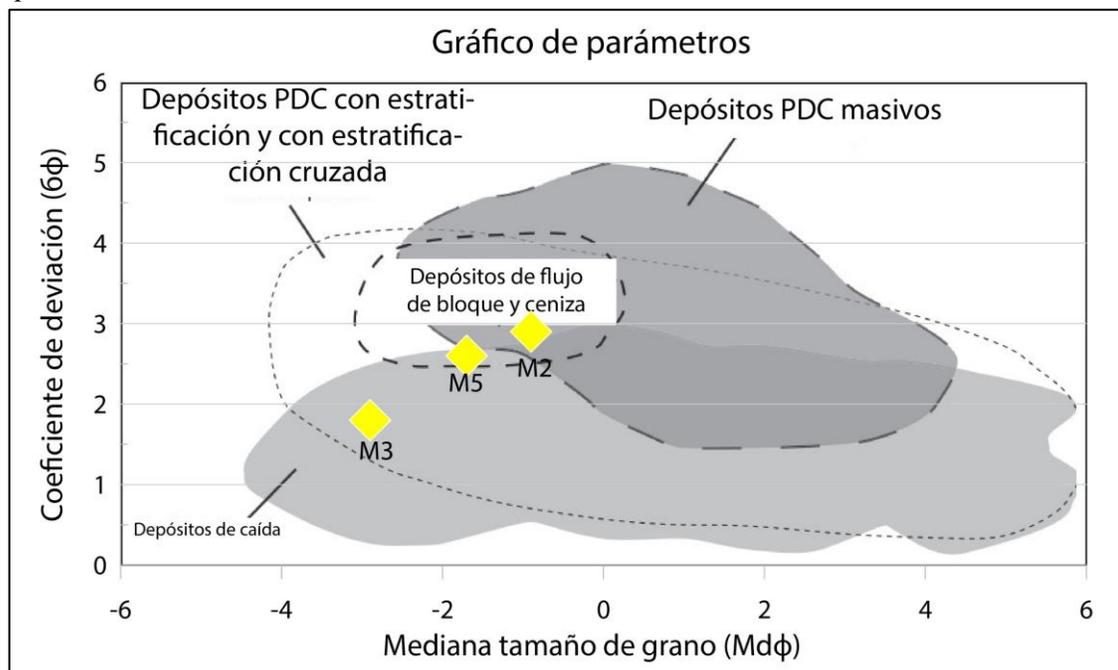


Figura 16: Gráfico de parámetros granulométricos; Mediana ($Md\phi$) versus Coeficiente de Desviación (Desviación estándar) ($\sigma\phi$), figura editada de Brown & Andrews (2015). Datos de mediana y desviación estándar presentes en Tabla A.E.2).

Respecto al porcentaje de matriz y fragmentos mayores, se tiene que la unidad Chungará presenta de aproximadamente 11 wt.% a 50 wt.% de matriz y 75 wt.% a 53 wt.% de fragmentos mayores (Tabla A.E.4), lo que indica que la unidad Chungará posee principalmente fragmentos mayores frente a un menor porcentaje de matriz (hasta 50 wt.%).

Se desprende que la unidad Chungará posee granulometría de principalmente fragmentos mayores tamaño lapilli grueso a bloque de pómez. Y, posee mayoría de granos (moda) en $\phi = -3$; 8 mm, según Figura 15, además, según parámetros de Mediana y Desviación estándar (Figura 16); se verifica que pertenece a un depósito de caída.

Por otra parte, en la muestra M6 (proveniente del punto MIPA 8), la cual no pertenece a la unidad Chungará, se observa que el mayor porcentaje de granos (moda) se concentra en un ϕ mayor $\phi = 0$; 1 mm, por lo tanto, se desprende que el punto MIPA 8 posee menor tamaño de grano (moda de tamaño 0 mm) que los demás puntos de la unidad Chungará (M2, M3 y M5).

4.2.5.2. Isopletas

Se realizaron mediciones de los fragmentos mayores en los puntos de control. El valor utilizado es el diámetro máximo elegido de los clastos mayores en cada punto. La medida de cada diámetro se obtuvo a partir de un promedio simple entre los 3 ejes ortogonales principales (largo, ancho y alto), este promedio se obtuvo para 3 piroclastos de mayores dimensiones del punto de control y, luego estos 3 valores se promediaron de forma simple.

Los valores de diámetro máximo rondan entre 8 cm a 2 cm aproximadamente, los que se interpolaron y extrapolaron para crear las isopletas. Se generaron 3 isopletas elipsoidales; de 2 cm, 5 cm y 8 cm, observables en el mapa de la Figura 17. Además, cabe destacar que hay muestras que son bombas pumíceas, éstas poseen un diámetro máximo de hasta 15 cm aproximadamente; ubicada a aproximadamente 8 km en línea recta con dirección sureste desde el cráter del volcán. Para efectos del mapa de isopletas no se utilizan las mediciones de bombas pumíceas encontradas.

Se observa que las isopletas presentan dirección hacia el sureste, al igual que el mapa de isópacas. El eje en el mapa de isopletas indica la dirección del viento al momento de la erupción.

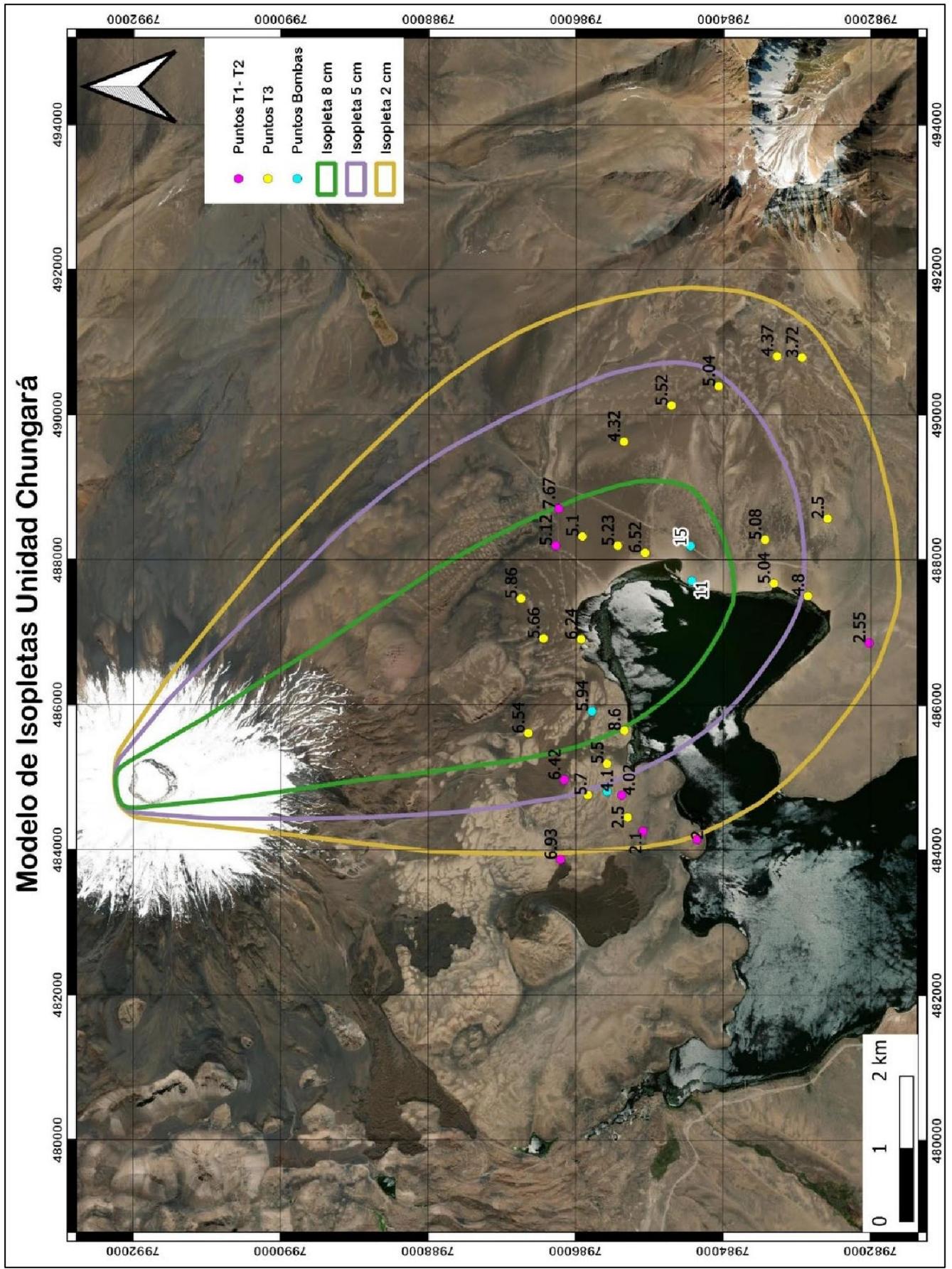


Figura 17: Modelo de isopletras donde se observa Isopletra de 2, 5 y 8 [cm]. Se observa con círculos rosados; los puntos T1-T2 (terreno 1 y 2), círculos amarillos; los puntos T3 (terreno 3) y con círculos calipsos; puntos Bombas (donde se encontraron bombas pumíceas).

A partir de las isopletras elipsoidales, se obtuvieron los valores (Tabla 6) de downwind (eje largo de la elipse) y el valor de crosswind (mitad del eje menor de la elipse) de cada isopletra graficada. Para la isopletra de mayor diámetro de clasto (8 cm); el downwind es de 9 km aproximadamente y el crosswind es de 2 km aproximadamente, mientras que para la isopletra de menor diámetro de clasto (2 cm); el downwind es de 11 km aproximadamente y el crosswind es de 3 km aproximadamente.

Isopletra (cm)	Downwind (km)	Crosswind (km)	Densidad clastos (kg/m ³)
2	11.3	3.3	534.15
5	10.1	2.5	
8	8.9	1.5	

Tabla 6: Tabla con isopletras 2, 5, 8 [cm] con sus respectivos downwind (km), crosswind (km). En la cuarta columna se observa la densidad de clastos ocupada (kg/m³) para el cálculo de altura y velocidad del viento.

La densidad de clastos (indicada en la Tabla 6) es un promedio entre piroclastos de escoria, pómez blanca y pómez parda (en la Sección 3.2.3.1 de la Metodología se describe el procedimiento utilizado para el promedio de los clastos; Ley de Arquímedes).

Luego, se ingresaron los valores de downwind, crosswind y densidad de clasto en el código de Biass et al. (2015) en el Software Matlab. Estos valores se ingresaron para cada isopletra (2, 5, 8 cm), donde se obtuvieron los valores descritos en la Tabla 7:

Isopletra (cm)	H (km)	V (m/s)
2	12.4	25
5	12.1	30
8	10.3	36

Tabla 7: Tabla con isopletras de 2, 5 y 8 [cm] con su respectiva altura de la columna eruptiva (H (km)), velocidad del viento en la tropopausa (V (m/s)) calculadas para cada isopletra.

En la Tabla 7 se observa que H es la altura de la columna eruptiva, V la velocidad del viento en la tropopausa al momento de la erupción. Para las tres isopletras, se observan valores similares en la altura de la columna eruptiva, donde a mayor medida de la isopletra, disminuye la altura de la columna y aumenta la velocidad del viento.

Para obtener los valores de la erupción Chungará, se realiza un promedio simple entre los valores de H y V para las tres isopletras, finalmente se obtiene que para la erupción Chungará, la altura de la columna es de 12 (km) y la velocidad del viento al momento de la erupción es de 30 (m/s).

4.2.5.3. Tipo de erupción

La erupción Chungará se asocia a erupción pequeña/moderada cercana a subpliniana de acuerdo con el criterio de Bonadonna & Costa (2013). Esta clasificación se observa con una estrella amarilla en la Figura 18 a continuación. Esta categorización se determinó por medio de la altura de la pluma (columna eruptiva) representada en kilómetros y por medio de MER, la cual es la Tasa de Masa Eruptada, que es el flujo de masa que sale del conducto volcánico y tiene dimensiones de masa dividido en tiempo (kg/s).

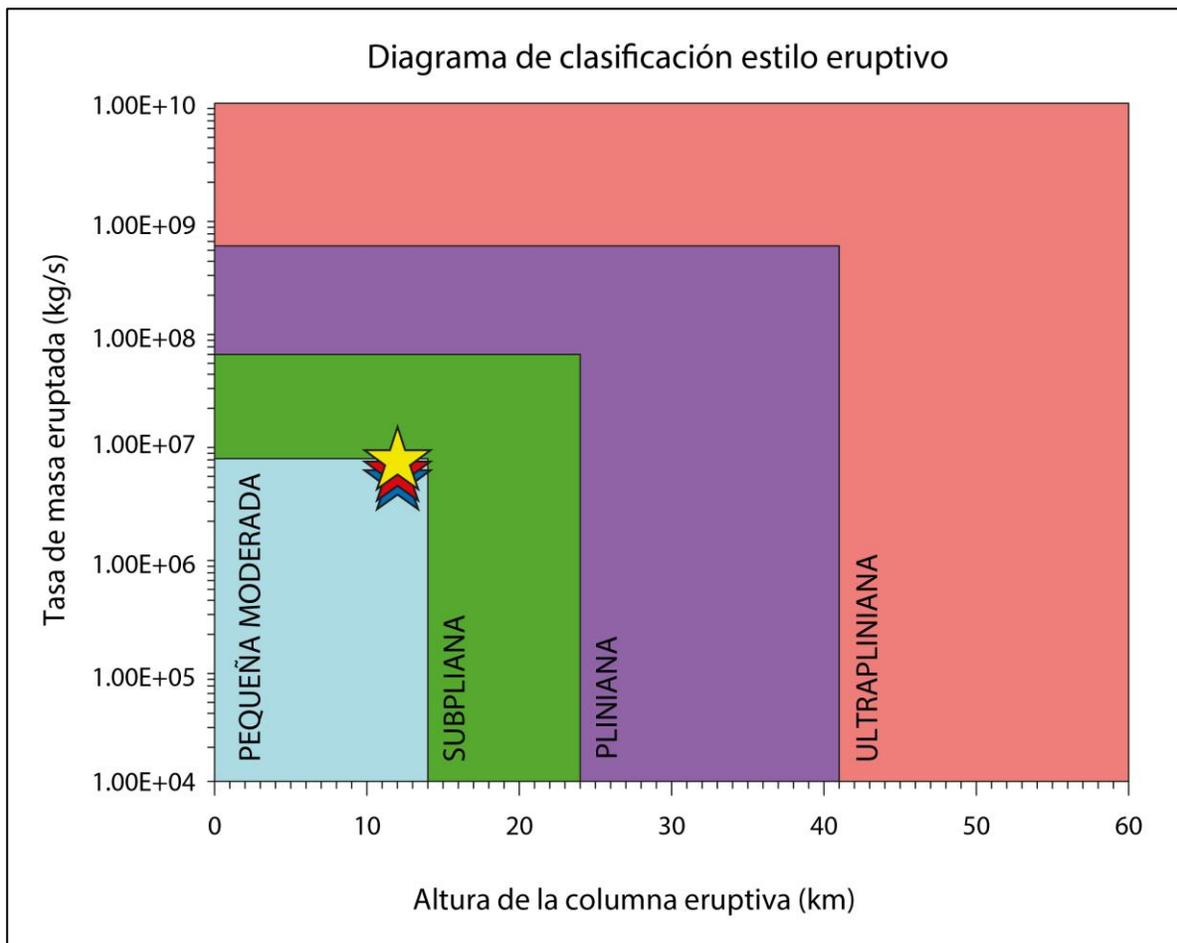


Figura 18: Figura editada y adaptada de Bonadonna & Costa (2013). Presenta la clasificación para depósitos de tefra en la determinación de la altura de la pluma y MER (Mass Eruption Rate, Tasa de masa eruptada kg/s) estimado acorde a la parametrización de Mastin et al. (2009). Indicado con estrellas de colores está la erupción Chungará; con estrella amarilla, para el modelo de Wilson & Walker (2009) (Ec. 17), estrella roja, según Sparks et al. (1997) (Ec. 19) y, estrella azul según Mastin et al. (2009) (Ec. 18). Chungará se encuentra en el campo de tipo erupción pequeña/moderada (celeste) y cercana al límite con el campo de tipo erupción subpliniana (verde).

En el gráfico de la *Figura 18*, se utilizó el valor de 12 km calculado anteriormente según el método de isopletras y, para la tasa de masa eruptada (kg/s), se utilizó la fórmula para altura de la columna (H) según la tasa de masa eruptada (M), según Wilson & Walker (2009) (Ec. 17), según Mastin et al. (2009) (Ec. 18) y según Sparks et al. (1997) (Ec. 19). Para las tres ecuaciones se ocupó H=12 km (altura de la columna) y se despegó M (Tasa de Masa Eruptada).

Según Wilson & Walker (2009), esta fórmula se obtiene cuando el 70% del total del calor proveniente del magma es transferido a la columna eruptiva y tomando en cuenta el cambio de dirección del viento:

$$H(\text{km}) = 0.236 * \left(M \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) \right)^{1/4} \quad \text{Ec. 17}$$

Donde se obtuvo una tasa de masa eruptada de 6684623.8 (kg/s) $\approx 6.68 \times 10^6$ (kg/s), este valor es obtenido para graficar en el gráfico anterior. Por otra parte, se puede obtener la tasa eruptada en (m^3/s), dividiendo por la densidad del magma de composición dacítico (2620 (kg/m^3)); obteniendo una tasa eruptada de 2551.38 (m^3/s) $\approx 2.55 \times 10^3$ (m^3/s) (valor utilizado en *Tabla 10*).

Según Mastin et al. (2009), donde obtiene el mejor ajuste de la altura de la columna según la tasa de masa eruptada según una serie de 35 datos de erupciones conocidas:

$$H(\text{km}) = 2.00 * \left(M \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) \right)^{0.241} \quad \text{Ec. 18}$$

Donde se obtuvo una tasa eruptada de 1693.7 (m^3/s) $\approx 1.69 \times 10^3$ (m^3/s); valor convertido a tasa de flujo volumétrico. Luego, se convierte a kg/s, multiplicando por la densidad del magma de composición dacítica, el cual es 2620 (kg/m^3). Se tiene una tasa de masa eruptada de 4437494 (kg/s) $\approx 4.43 \times 10^6$ (kg/s).

Según Sparks et al. (1997), donde 1.67 es la constante relativa a la estratificación de la atmósfera (Carey & Bursik, 2015):

$$H(\text{km}) = 1.67 * \left(M \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) \right)^{0.259} \quad \text{Ec. 19}$$

Donde se obtuvo una tasa eruptada de 2026.8 (m^3/s) $\approx 2.02 \times 10^3$ (m^3/s); valor convertido a tasa de flujo volumétrico. Luego, se convierte a kg/s, multiplicando por la densidad del magma de composición dacítica el cual es 2620 (kg/m^3). Se tiene una tasa de masa eruptada de 5310216 (kg/s) $\approx 5.31 \times 10^6$ (kg/s).

La erupción Chungará para las ecuaciones de Wilson & Walker (2009), Mastin et al. (2009) y Sparks et al. (1997), se ubica dentro del campo de las erupciones pequeñas/moderadas (campo celeste; *Figura 18*); y, se observa cercana a los límites superiores del campo de estas erupciones y por consiguiente cercanos a los límites menores del campo de las erupciones subplinianas (campo verde; *Figura 18*). Por lo tanto, la erupción Chungará según Bonadonna & Costa (2013) es de tipo pequeña a moderada casi subpliniana.

Además, se puede desprender que la tasa eruptada de Chungará es de 1.69×10^3 a 2.55×10^3 (m^3/s), y el valor equivalente en tasa de masa eruptada es 4.43×10^6 a 6.68×10^6 (kg/s), asumiendo una densidad del magma de 2620 (kg/m^3).

4.2.5.4. Índice de Explosividad Volcánica (IEV)

El índice de explosividad volcánica (VEI en inglés, IEV en español) (Newhall & Self, 1982) fue creado para estimar la intensidad de una erupción volcánica a partir de varios factores medibles de una erupción volcánica.

Los factores que toma en consideración son la altura de la columna y volumen emitido obtenidos en los resultados anteriores, para compararlos con los demás resultados obtenidos de la erupción Chungará y estimar la peligrosidad de la erupción.

CRITERIO	VEI 0	VEI 1	VEI 2	VEI 3	VEI 4	VEI 5	VEI 6	VEI 7	VEI 8+
Descripción	No explosiva	Pequeña	Moderada	Moderada-Grande	Grande	Muy Grande	→		
Volumen eyectado (m ³)	<10 ⁴	10 ⁴ -10 ⁶	10 ⁶ -10 ⁷	10 ⁷ -10 ⁸	10 ⁸ -10 ⁹	10 ⁹ -10 ¹⁰	10 ¹⁰ -10 ¹¹	10 ¹¹ -10 ¹²	> 10 ¹²
Altura de columna (km)	<0.1	0.1-1	1-5	3-15	10-25	>25	→		
Descripción cualitativa	"Suave, efusiva"		"Explosiva"		"Cataclísmica, paroxística, colosal"			→	
					"Severa", "violenta", "terrorífica"			→	
Clasificación	← "Estromboliana" →		← "Hawaiana" →		← "Vulcaniana" →		← "Pliniana" →		← "Ultrapliniana" →

Figura 19: Criterio para estimación del Volcanic Explosivity Index (VEI) (Newhall & Self, 1982), editado. Para la unidad Chungará se observa un VEI = 3 con columna eruptiva = 3-15 (km). Se marca en rojo las clasificaciones para cada criterio de la unidad Chungará.

Debido a que el volumen obtenido es del orden de $1 \times 10^7 \text{ m}^3$ (específicamente 0.01-0.02 (km³)) y la altura es de 12 km aproximadamente, se obtiene un VEI de 3, lo cual puede indicar una moderada a gran erupción. Este valor es congruente con la clasificación de Bonadonna & Costa (2013) expuesta en la subsección anterior, donde se indica una erupción pequeña a moderada erupción.

En el criterio de clasificación, se observa un campo vacío entre el tipo de erupción estromboliana y pliniana, así como definida como erupción Vulcaniana, sin embargo, para realizar esta clasificación hay que ver otros criterios que se discutirán más adelante.

4.2.6. Descripción Macroscópica Unidades, Estructuras

4.2.6.1. Afloramientos

En varios puntos hacia el sureste del volcán se encuentra la unidad Chungará. Por otra parte, en el punto MIPA 1, en lava Ajata Superior no se observa la unidad Chungará (ver columna estratigráfica en Figura A.D.2).

A continuación, se describen dos puntos donde se encuentra la unidad. Las descripciones se realizan a muestra de mano.

MIPA 3 (Columna estratigráfica 3).

Depósito piroclástico de caída ubicado a aproximadamente 5,5 km hacia el sureste desde el cráter del volcán (MIPA 3), (3;Figura 5).

El depósito (Figura 20) es de color blanquecino pardo y presenta 62 cm de espesor. Está compuesto por fragmentos mayores tamaño lapilli grueso a bloques y matriz tamaño ceniza grueso a lapilli fino. Los fragmentos mayores representan el 70%, mientras la matriz representa el 30%.

La matriz contiene pómez (30%), escoria (40%), líticos (20%) y cristales (cuarzo principalmente, 10%).

Los fragmentos mayores son principalmente de tipo pumíceo. Los fragmentos de pómez poseen vesículas redondeadas a semialargadas, de subangulosas a subredondeadas.

Hacia la base delimita con un depósito de ceniza media a lapilli fino tipo escoráceos principalmente, mientras hacia el techo delimita con un depósito retrabajado de tamaño ceniza gruesa a lapilli fino con fragmentos mayores pumíceos de tamaño lapilli medio.



Figura 20: Calicata realizada en punto MIPA 3. Se observa en **b**. de base a techo; la unidad Block & Ash, indicada con un número 1. Indicado con un número 2 amarillo, una unidad transicional que se es principalmente de matriz escorácea. La unidad Tambo Quemado está indicada con un número 3 en amarillo. Indicado con un número 4, se encuentra una unidad transicional de ceniza a lapilli fino principalmente escorácea. La unidad Chungará, indicada con un número 5 en amarillo. Indicado con un número 6 amarillo se encuentra unidad transicional entre el nivel erosivo y la unidad Chungará.

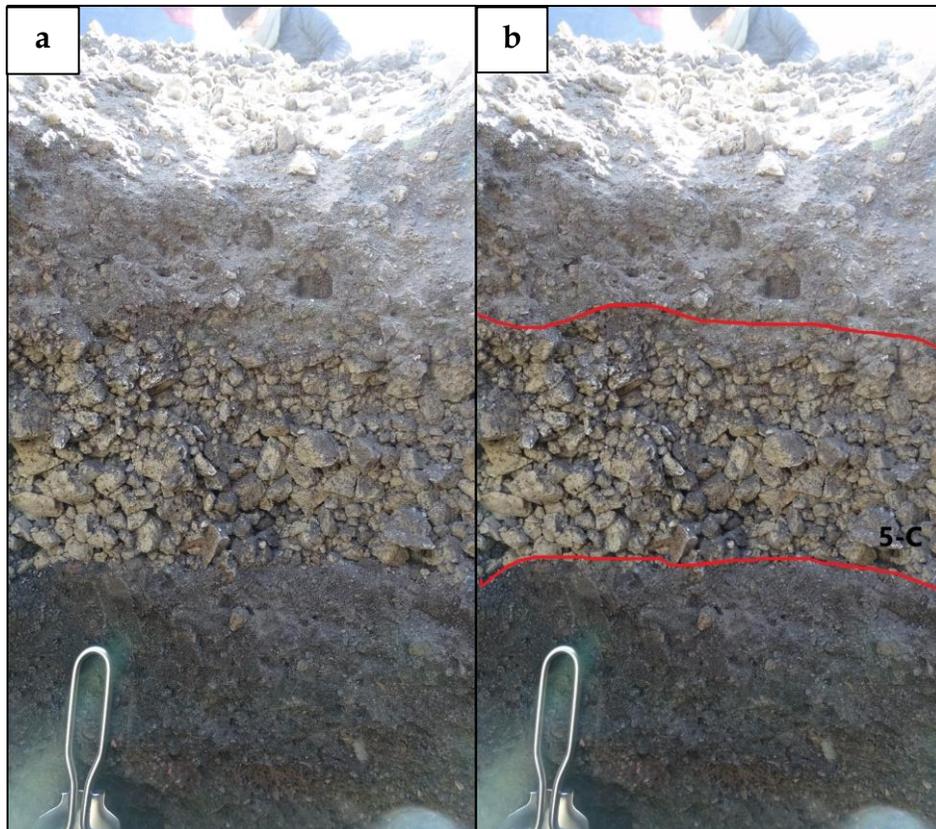
MIPA 7 (Columna estratigráfica 5).

Depósito piroclástico de caída ubicado a aproximadamente 8 km al sureste del volcán (MIPA 7), (7;Figura 5).

El depósito (Figura 21) es de color blanquecino pardo y presenta 20 cm de espesor. Se presenta de forma maciza con grano de tamaño lapilli medio a grueso. Los fragmentos juveniles son pumíceos (95%) y escoráceos (5%). Se presentan fragmentos escoráceos bandeados de pómez.

Predominan los fragmentos de tamaño 1-3 cm, y el depósito presenta leve gradación normal en los últimos 5 cm del techo.

Se encuentra delimitado en su base con un depósito piroclástico de tamaño ceniza gruesa a lapilli fino y en el techo delimitado con un depósito retrabajado de ceniza tipo escorácea principalmente y algunos fragmentos mayores pumíceos.



*Figura 21: Calicata realizada en punto MIPA 7. Se observa en **b.** la unidad Chungará indicada como “5-C” y delimitada por líneas rojas en su base y techo. Para mayor detalle de las otras unidades presentes en este punto, ver en Figura 11.a.*

4.2.7. Descripción Microscópica

4.2.7.1. Componentes Unidad Chungará

La Unidad Chungará ubicada en la parte superior de las columnas estratigráficas realizadas (*Figura 11.b*) fue caracterizada granulométricamente y se realizó categorización de los componentes. La separación de componentes se realizó para las muestras M2, M3 y M5 ubicadas en los puntos MIPA 2, MIPA 3 y MIPA 7, respectivamente. Sumado a M6 presente en MIPA 8, donde cabe destacar que M6 ubicado al sur de volcán y del Lago Chungará es probablemente perteneciente a otra unidad.

4.2.7.1.1. Descripción componentes

Se realizó una categorización de fragmentos que componen la unidad Chungará, las muestras analizadas fueron M2 (punto MIPA 2), M3 (punto MIPA 3), M5 (punto MIPA 7) y se agregó la muestra M6; perteneciente al punto MIPA 8 a modo de comparación.

A continuación, se presentan los componentes encontrados y separados en fragmentos juveniles, fragmentos líticos y cristales. De los cuales, el primer grupo representan la composición de la erupción y el segundo grupo, representan los fragmentos que no provienen directamente de la inyección magmática que origina la erupción.

Fragmentos Juveniles:

Pómez blanquecina (*Figura 22.b*): Fragmento pumíceo color blanco de composición traquidacítica (TAS; *Figura 34*). Presenta forma subredondeada a redondeada y en algunos casos angulosa a subangulosa. Se observan vesículas finas alargadas a redondeadas.

Su mineralogía es de anfíboles subhedrales a euhedrales, plagioclasas anhedrales a subhedrales, a veces se presentan en cúmulos los cristales. Algunos fragmentos se encuentran bandeados con material juvenil oscuro; escoria.

La densidad promedio de los fragmentos es de aproximadamente 440-500 (kg/m^3) (detallado en *Tabla 9*).

Este tipo de fragmento se encuentra distribuido en toda la unidad; desde el suroeste a sureste del volcán Parinacota.

Se observa en porcentaje mayoritario en el depósito, con hasta 72 wt.% (*Figura A.E.4*), siendo de 93 wt.% hasta 99 wt.% en fragmentos de tamaño 16 mm (*Figura 26; Tabla 8*). En el punto MIPA 8 no se encuentra.

Pómez Parda (Figura 22.c): Fragmento pumíceo color pardo de composición traquiandesítica (TAS;Figura 34). Presenta forma subredondeada a redondeada y angulosa a subangulosa. Se observan vesículas subredondeadas a redondeadas. Su mineralogía es la misma que la pómez blanquecina. Algunos fragmentos se encuentran bandeados con material juvenil oscuro; escoria.

Su densidad promedio es de 600 (kg/m^3) (detallado en detallado en Tabla 9).

Se encuentra distribuida en toda la unidad de suroeste a sureste del volcán, con un porcentaje de hasta 4.3 wt.% (Figura A.E.4), predomina en los fragmentos de menor tamaño donde constituye 5 a 50 wt.% en fragmentos de 2 mm (Figura 26; Tabla 8).

En el punto MIPA 8 se encuentra en casi todos los tamaños de fragmentos incrementando el porcentaje desde 61 wt.% en fragmentos de 2 mm hasta 92 wt.% en fragmentos de 8 mm.

Escoria (Figura 22.a): Fragmento escoráceo color oscuro negro grisáceo con algunos fragmentos marrón oscuro de composición traquidácica (TAS;Figura 34). Presenta forma muy angulosa a subangulosa. Presenta vesículas semiredondeadas a redondeadas. Algunos fragmentos se encuentran bandeados con pómez.

Su densidad promedio es de aproximadamente 580-530 (kg/m^3) (detallado en detallado en Tabla 9). Se encuentra distribuida en toda la unidad de suroeste a sureste del volcán.

La escoria en el depósito constituye hasta 2.6 wt.% (Figura A.E.4), donde el 0.2 a 6 wt.% en fragmentos de 2 mm, de 3 a 8 wt.% en fragmentos de 4 mm, 2 a 4 wt.% en fragmentos de 8 mm, hasta 7 wt.% en fragmentos de 16 mm. Por otra parte, se observa que en MIPA 8, se presenta hasta fragmentos de 4 mm con 4 wt.%.

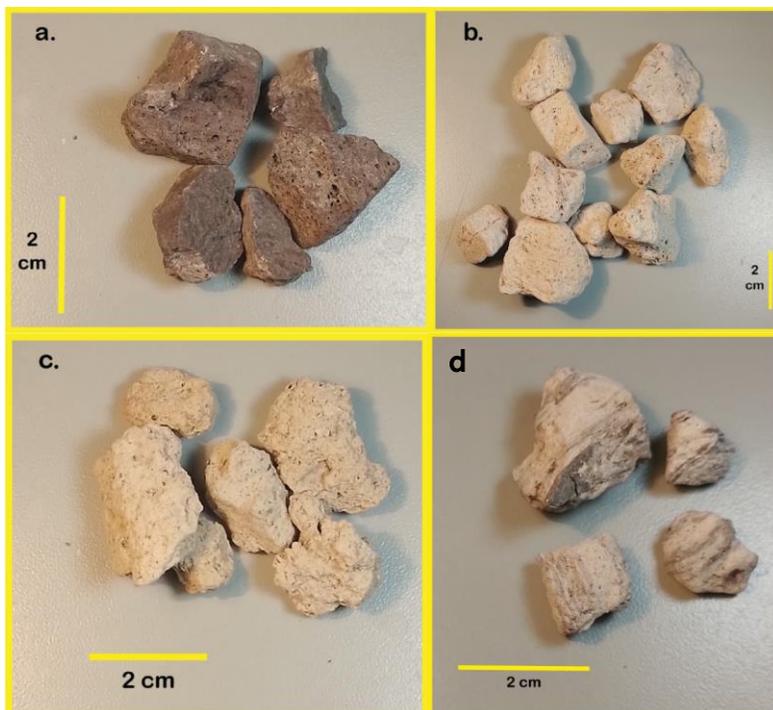


Figura 22: Fragmentos juveniles unidad Chungará, en a. se observa escoria, en b. se observa pómez blanquecina, c. pómez parda, d. pómez con bandeamiento escoráceo.

Fragmentos Líticos:

Negros (*Figura 23.b*): Se dividen en dos grupos; el primero es de fragmentos angulosos densos y el segundo grupo es de fragmentos más vesiculares.

El primer grupo de fragmentos angulosos densos presentan una textura porfídica con fenocristales de plagioclasa subhedral a euhedral y de anfíboles con forma subhedral a euhedral en una masa fundamental gris oscura. Presenta pocas vesículas de forma redondeadas.

El segundo grupo son fragmentos escoráceos subredondeados a angulosos de color negro-rojizo, presentan vesículas semiredondeadas a redondeadas. Presentan alteración blanquecina y se observa una mayor densidad que la escoria gris. La mineralogía es de plagioclasa anhedral a subhedral y anfíboles subhedrales.

Se observa que los fragmentos líticos negros, en los puntos MIPA 2, MIPA 3 y MIPA 7 presentan tamaños de hasta 8 mm, donde a mayor tamaño de grano se observa menor porcentaje en peso. Se tiene que en fragmentos de 2 mm representa 10-25 wt.%, mientras en fragmentos de 8 mm representa 1-6 wt%. Se agrega que el punto MIPA 8 presenta tamaños de hasta 4 mm con 17 wt.%.

Por otra parte, se observa que los líticos negros representan el mayor porcentaje frente a los líticos rojizos y blanquecinos.

Corresponden a líticos accesorios, ya que las características petrológicas del primer grupo corresponden a una lava; donde este tipo de fragmento lítico podría provenir de magmas máficos similar a los conos Ajata actuales o provenir de lavas posteriores al colapso, que vienen del conducto volcánico. Por otro lado, el segundo grupo son fragmentos escoráceos que están alterados y se puede desprender que provienen de erupciones anteriores.

Rojizos (*Figura 23.c*): Los fragmentos rojizos se dividen en dos grupos; fragmentos más angulosos y poco vesiculados y fragmentos vesiculados.

El primer grupo son fragmentos angulosos a subangulosos de color gris rojizo a rosado, presentan textura porfídica con cristales anhedrales de feldespato potásico, subhedrales de plagioclasa, subhedrales de anfíboles y a veces cristales subhedrales de biotita insertos en una masa fundamental rojiza. Presenta poca densidad de vesículas subredondeadas.

El segundo grupo son fragmentos escoráceos subredondeados a angulosos de color negro-rojizo, presenta vesículas semiredondeadas a redondeadas. Se observa que presenta alteración blanquecina. La mineralogía es de plagioclasa anhedral a subhedral y anfíboles subhedrales.

Se observa que los fragmentos líticos rojizos, en los puntos MIPA 2, MIPA 3 y MIPA 7 presentan tamaños hasta 4 mm, donde a mayor tamaño del fragmento disminuye el porcentaje en peso. Se tiene que fragmentos de 2 mm representan 1.8-12 wt.%, fragmentos de 4 mm representan 2-4 wt.%. Mientras en el punto MIPA 8 se presenta en tamaños de 2 mm a 8 mm, donde varía entre 6 wt.% y 4 wt.%.

Corresponden a líticos accesorios, ya que las características petrológicas del primer grupo corresponden a una lava más diferenciada. Mientras el segundo grupo son fragmentos escoráceos que están alterados provenientes de erupciones anteriores.

Blanquecinos (*Figura 23.a*): Fragmentos angulosos a subangulosos de color gris claro a negro, presentan textura porfídica con pequeños cristales subhedrales de anfíboles, cristales anhedrales de plagioclasa insertos en una masa fundamental gris claro, presenta bandeamiento de gris claro a blanco.

En el punto MIPA 3 presentan tamaños de hasta 16 mm, mientras en el punto MIPA 2 y MIPA 7 se presentan tamaños de hasta 8 mm. Se agrega que estos líticos se observan mayoritariamente en fragmentos de 2 mm con hasta 11 wt.%, donde se tiene que en fragmentos de 2 mm representa 0.4-11 wt.%, fragmentos de 4 mm representa 1-3 wt.%, mientras en fragmentos de 8 mm representa 0.4-2 wt.%.

Por otra parte, el punto MIPA 8 presenta sólo fragmentos de 2mm y 4mm, donde disminuye su porcentaje de 3 wt.% a 1 wt.%.

Corresponden a fragmentos de dacita, riodacita, por lo tanto, son parte del basamento del volcán (domos), constituyendo fragmentos líticos accidental.

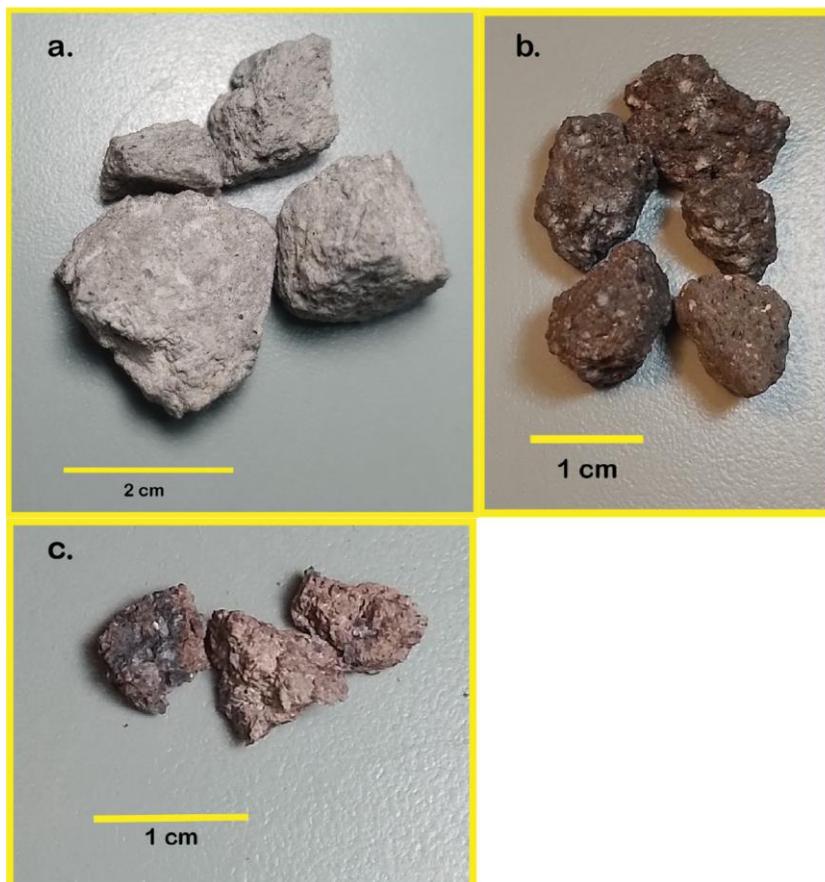


Figura 23: Fragmentos líticos, en a. se observa líticos blanquecinos, en b. se observa líticos negros, en c. líticos rojizos.

Cristales (*Figura 24*): Existen cristales aislados de plagioclasa subhedrales a euhedrales con forma tabular de tamaño hasta 2 mm por lado y anfíboles subhedrales a euhedrales de tamaño hasta 2 mm por lado aproximadamente. Se observa presentes en MIPA 2 y MIPA 7, donde su porcentaje es hasta 0.9 wt.%, y es de 0.3-15 wt.% según tamaño de fragmento.



Figura 24: Cristales libres, se observa Plagioclasa.

4.2.7.1.2. Bandeamiento de fragmentos juveniles

Se contabilizó el material juvenil con bandeamiento de la unidad Chungará, el cual se observó en las muestras M2, M3 y M5 en los fragmentos analizados de tamaño 2 mm a 16 mm (*Figura 25*). La fracción de juveniles con bandeamiento es menor a 18% del total de material juvenil aproximadamente.

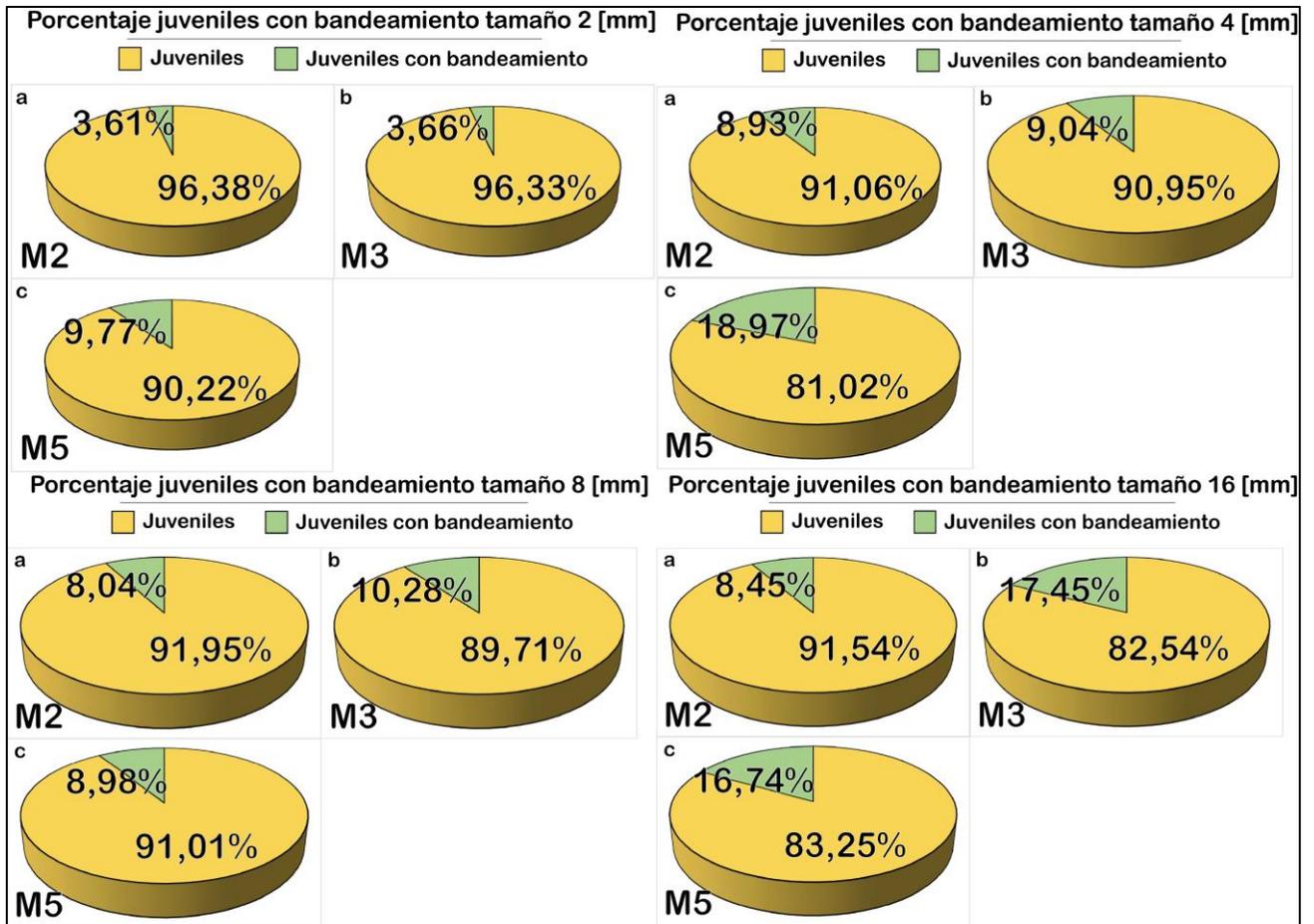


Figura 25: Porcentaje de juveniles con bandeamiento para los tamaños de grano de 2 [mm], 4 [mm], 8 [mm] y 16 [mm] para las muestras M2, M3 y M5 pertenecientes a la unidad Chungará.

4.2.7.1.3. Distribución componentes

Se realizó la separación de los componentes de tamaño 2 mm a 16 mm, donde se observa que los puntos MIPA 2, MIPA 3 y MIPA 7 poseen los mismos componentes que MIPA 8, pero con variación en sus porcentajes.

La unidad Chungará (puntos MIPA 2, MIPA 3 y MIPA 7) corresponde a fragmentos de tipo juveniles de pómez blanquecina, luego le sigue en menor medida pómez parda, escoria negra y fragmentos líticos de diferentes tipos definidos en este trabajo.

Se observa que los fragmentos de mayor tamaño (16 mm) sólo están ubicados en muestras M2, M3 y M5. Además, la pómez blanquecina se encuentra sólo en estos puntos hasta llegar a >98% en la muestra M5, sin encontrarse en M6.

Respecto a los fragmentos líticos se observa que los líticos rojizos disminuyen desde la muestra M2 a la M5 y de la misma forma, los líticos negros tienen una tendencia a disminuir mientras más

alejada la muestra del cono principal, de esta forma tanto los líticos rojizos y negros disminuyen a medida que el punto se aleja del volcán.

Por otra parte, la cantidad de cristales se observan en tamaño de 2 mm con valores cercanos a 0 wt.% en las muestras analizadas, excepto en M5; donde el porcentaje en peso es de aproximadamente 15 wt.%.

Componentes por tamaño de fragmentos

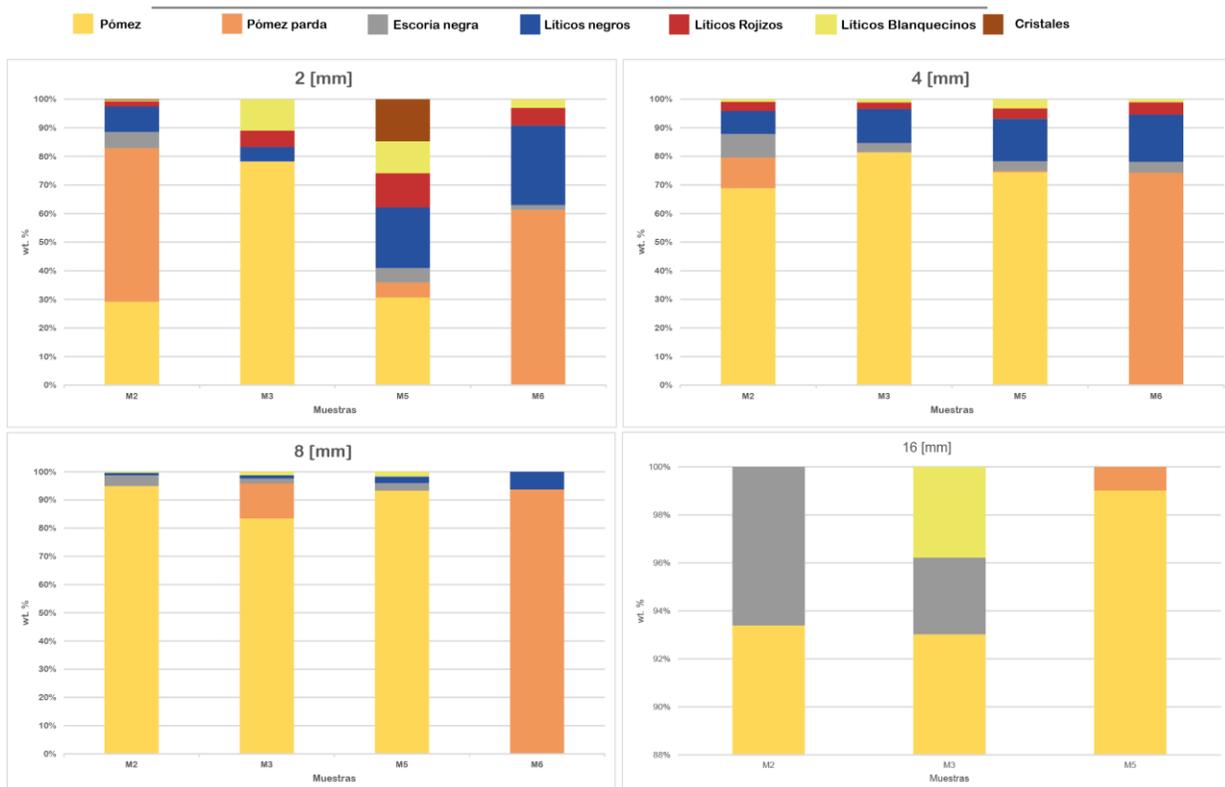


Figura 26: Componentes (fragmentos juveniles, líticos y cristales) por tamaño de fragmentos (de 2 [mm], 4 [mm], 8 [mm] y 16 [mm]) para las muestras M2, M3, M5 y M6.

Líticos por tamaño de fragmentos

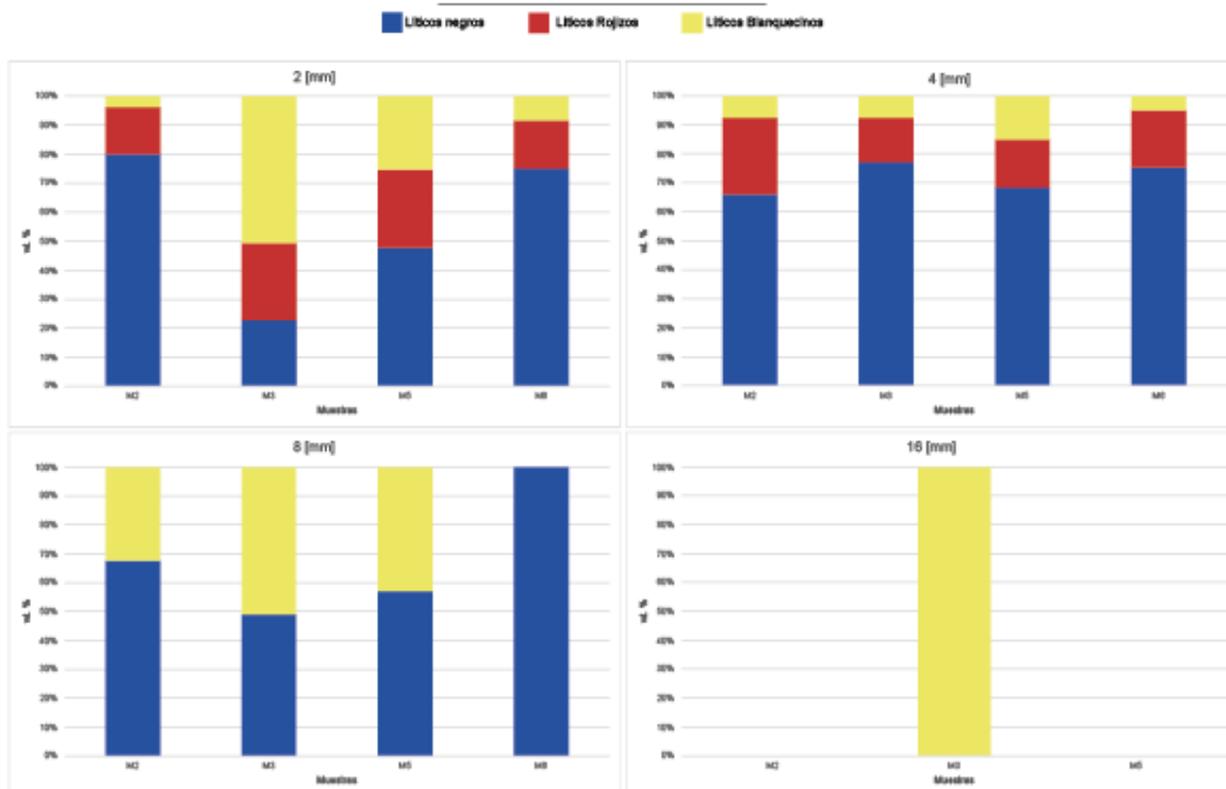


Figura 27: Líticos (líticos negros, líticos rojizos, líticos blanquecinos) por tamaño de fragmentos (de 2 [mm], 4 [mm], 8 [mm] y 16 [mm]) para las muestras M2, M3, M5 y M6.

Muestra	Tamaño Fragmento	Componentes (wt.%)							
		Pómez blanquecina	Pómez parda	Escoria Negra	Líticos negros	Líticos Rojizos	Líticos Blancos	Cristales	Suma
M2	2 [mm]	29.2	53.8	5.6	8.9	1.8	0.4	0.3	100
M2	4 [mm]	68.9	10.7	8.2	8.0	3.2	0.9	0	100
M2	8 [mm]	94.9	0	3.8	0.8	0	0.4	0	100
M2	16 [mm]	93.4	0	6.6	0	0	0	0	100
M3	2 [mm]	78.1	0	0.2	4.9	5.8	10.9	0	100
M3	4 [mm]	81.4	0	3.3	11.8	2.3	1.1	0	100
M3	8 [mm]	83.5	12.4	1.7	1.2	0	1.2	0	100
M3	16 [mm]	93.0	0	3.2	0	0	3.8	0	100
M5	2 [mm]	30.7	5.2	5.1	21.1	12.0	11.2	14.7	100
M5	4 [mm]	74.5	0.4	3.4	14.9	3.6	3.2	0	100
M5	8 [mm]	93.3	0	2.7	2.3	0	1.7	0	100
M5	16 [mm]	99.0	0.9	0	0	0	0	0	100
M6	2 [mm]	0	61.3	1.7	27.8	6.1	3.1	0	100
M6	4 [mm]	0	74.3	3.8	16.5	4.3	1.1	0	100
M6	8 [mm]	0	93.8	0	0	6.2	0	0	100
M6	16 [mm]	NA							

Tabla 8: Porcentaje por cada componente con respecto a tamaño de fragmentos de cada Muestra de unidad Chungará (M2, M3 y M5) y M6 perteneciente a otra unidad posiblemente. Cada fila representa un tamaño de fragmento, donde se obtiene el porcentaje en peso de cada componente de ese tamaño respecto a la suma de peso total entre los componentes de ese tamaño. NA significa No aplica, donde muestra no presentan granos de ese tamaño, en este caso la muestra M6 no presenta granos de tamaño de 15 [mm].

4.2.7.2. Petrología de material juvenil

Se obtuvieron cortes transparentes pulidos de 8 muestras (*Tabla A.F.1*) para realizar la descripción en microscopio de luz transmitida. Se observan fases en común en las muestras (*Tabla A.F.3*); las cuales son masa fundamental (<0.2mm), fenocristales (definidos con largo >5mm), microlitos (definidos con largo entre 0.5 a 0.2mm). Cabe destacar que cuando se mencionan los cristales en su totalidad; se refiere a los fenocristales y microlitos en su conjunto. Por otra parte, el porcentaje de vesículas es el observable a microscopio y se clasifican como vesículas mayores (ver en *Tabla A.F.2.*). El porcentaje de vesículas (en volumen) se describe en la sección 4.2.7.3 de Resultados. Además, se agrega el porcentaje por mineral presente en cada muestra observada en el microscopio óptico (*Tabla A.F.4*).

Las muestras descritas en microscopio pertenecen al material juvenil de la unidad Chungará. Para observar la diferencia con otros piroclastos, se describen: lítico de la unidad Chungará (oscuro, tipo escoria) y escoria proveniente de otra unidad (encontrado en la superficie).

T1.M3.P1: Roca piroclástica con textura eutaxítica y vesicular. Presenta masa fundamental en 95% y 5% de fragmentos piroclásticos.

Los fragmentos piroclásticos se componen de fenocristales (2%) y microlitos (3%). Estos son de plagioclasa (90%), hornblenda (5%), clinopiroxeno (5%).

La plagioclasa posee hábito tabular con estructuralidad alta en general y media integridad.

La masa fundamental es de vidrio pumíceo marrón. Además, presenta vesículas mayores en 33% respecto al total de la roca, de forma alargada principalmente y con dirección preferencial.

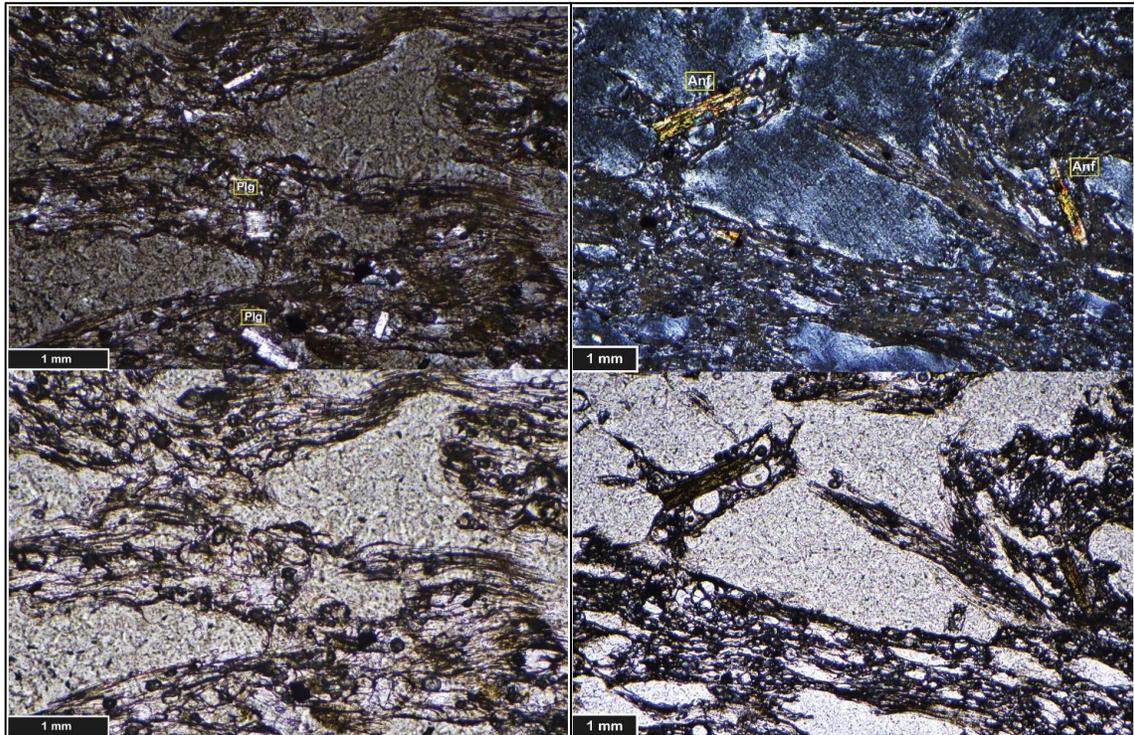


Figura 28: Muestra de pómez T1.M3.P1 a nicoles cruzados (arriba) y nicoles paralelos (abajo). A la izquierda se presenta sección con 10x y a la derecha sección con 5x. Se observa la masa fundamental vítrea marrón de una muestra de pómez con cristales de plagioclasa (Plg), anfíboles (Anf) de tipo hornblenda insertos en ella. Se observa la fábrica con vesículas alargadas que presenta la pómez debido al escape de gases.

T1.M5.P1: Roca piroclástica con textura eutaxítica y vesicular. Presenta masa fundamental en 96% y 4% de fragmentos piroclásticos.

Los fragmentos piroclásticos se componen de fenocristales (1%) y microlitos (3%). Estos fenocristales, microlitos y fragmentos de cristales son de plagioclasa, hornblenda.

La masa fundamental es de vidrio pumíceo marrón. Además, presenta vesículas mayores en 29% aproximadamente respecto al total de la roca, con morfologías alargadas y en su mayoría redondeadas.

T1.M5.P2: Roca piroclástica con textura eutaxítica y vesicular. Presenta masa fundamental en 98% y 2% de fragmentos piroclásticos.

Los fragmentos piroclásticos se componen de fenocristales (0.2%) y microlitos (1.8%). Estos son de plagioclasa (85%) principalmente, y hornblenda (15%), sumado a algunos cristales de óxidos.

Los cristales y microcristales en general son esqueletales.

La masa fundamental es de vidrio pumíceo marrón. Además, presenta vesículas mayores en 42% respecto al total de la roca, con morfología redondeadas, además se observa banda grisácea esco-rácea que presenta mayor cantidad de óxidos, óxidos como magnetita.

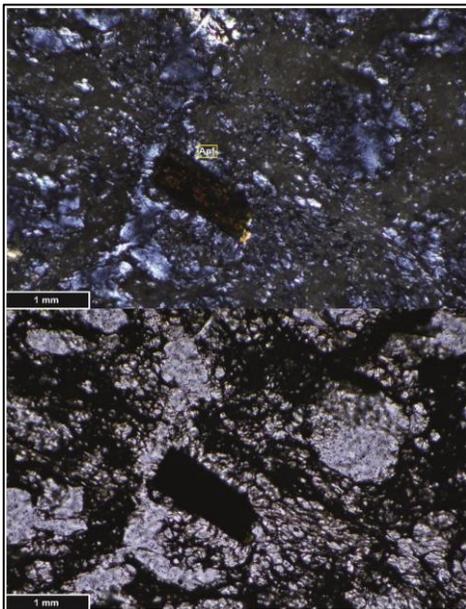


Figura 29: Muestra T1.M5.P2 a nicoles cruzados arriba y nicoles paralelos abajo en microscopio con 10x donde se observan cristales de anfíboles (por ej. Anf) de tipo hornblenda inserto en la masa fundamental vítrea marrón de menor tamaño.

T1.M4.E1: Roca piroclástica con textura eutaxítica y vesicular. Presenta masa fundamental en 97% y fragmentos piroclásticos en 3%.

Los fragmentos piroclásticos se componen de fenocristales (1%) y microlitos (2%). Los cuales son de plagioclasa (97%) principalmente, y hornblenda (3%). Además, se observa notoria cantidad de cristales de óxidos.

Las plagioclasas son de forma euhedrales en general con integridad alta. Se encuentran zonadas en su mayoría. Se observa cristales de clinopiroxeno subhedrales de forma alargada.

La masa fundamental está compuesta de vidrio marrón oscuro. Además, presenta vesículas mayores en 25% respecto al total de la roca.

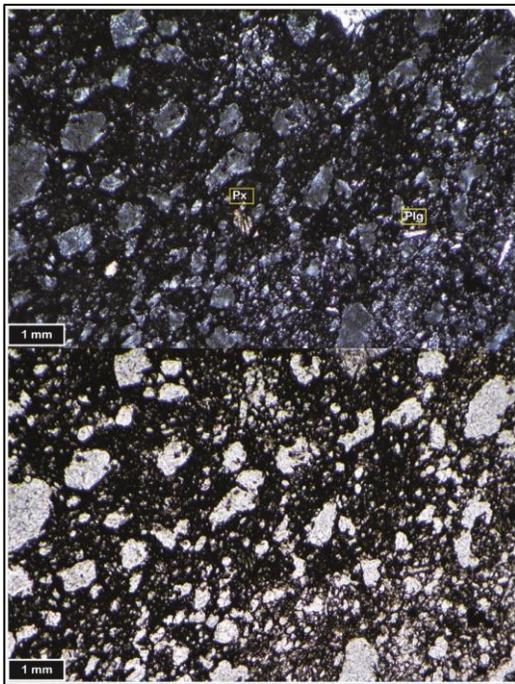


Figura 30: Muestra T1.M4.E1 a nicoles cruzados arriba y nicoles paralelos abajo en microscopio con 10x donde se observan cristales de piroxeno (Px), plagioclasa (Plg) inserto en la masa fundamental ví-trea marrón de menor tamaño.

T1.M4.E2: Roca piroclástica con textura eutaxítica y vesicular. Presenta masa fundamental en 95% y fragmentos piroclásticos en 5%.

Los fragmentos piroclásticos se componen de fenocristales (1%) y microlitos (4%). Los cuales son de plagioclasa (87%), piroxenos (4%), hornblenda (9%).

La masa fundamental está compuesta de vidrio negro grisáceo con tonalidades marrón.

Presenta vesículas en menor porcentaje; es difícil diferenciar vesículas de masa fundamental oscura, sin embargo, se calcula 5% respecto al total de la roca. Además, presenta bandas que son de tonalidades más claras de color marrón, lo que se define como bandas de composición más pumí- cea.

T1.M4.E3: Roca piroclástica con textura eutaxítica y vesicular. Presenta masa fundamental en 96% y fragmentos piroclásticos en 4%.

Los fragmentos piroclásticos se componen de fenocristales (0.4%), microlitos (3%) y fragmentos líticos (0.4%).

Los fenocristales y microlitos son de plagioclasa (91% respecto a los cristales en total), clinopiroxenos (6% respecto a los cristales en total), hornblenda (2% respecto a los cristales en total).

Plagioclasas se presentan aisladas y en cúmulos. Plagioclasas y hornblendas se observan con media estructuralidad y media integridad.

Los fragmentos líticos son de carácter máfico.

La masa fundamental está compuesta de vidrio negro grisáceo. Además, presenta vesículas mayores de 28% respecto al total de la roca.

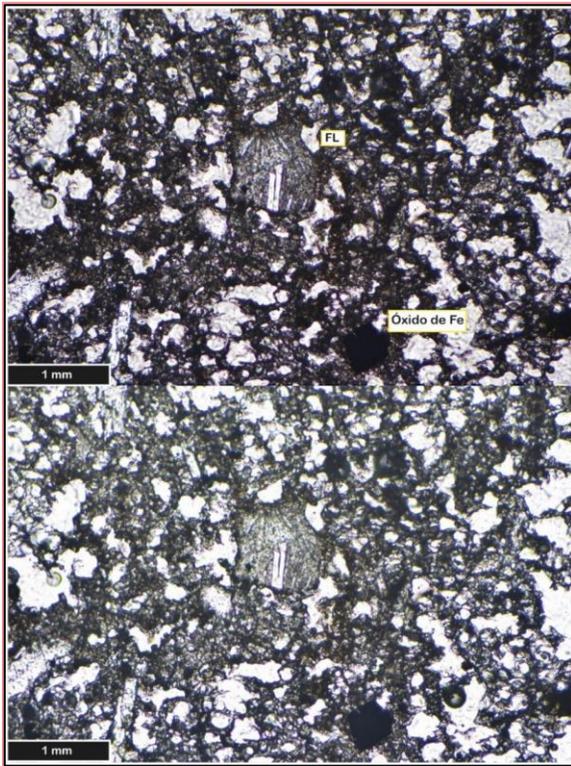


Figura 31: Muestra T1.M4.E3 a nicoles cruzados arriba y a nicoles paralelos abajo en microscopio con 10x donde se observan fragmentos líticos máficos (Por ej. FL), óxidos de hierro (óxido de Fe) insertos en la masa fundamental vítrea grisácea de menor tamaño.

T1.M5.E1: Roca piroclástica con textura eutaxítica y vesicular. Presenta masa fundamental en 89% y fragmentos piroclásticos en 11%.

Los fragmentos piroclásticos están compuestos de fenocristales (2%) y microlitos (8%). Los fenocristales y microlitos son de plagioclasa (73%), piroxeno (clinopiroxeno y ortopiroxeno) (6%) y anfíboles (20%).

Piroxeno se encuentran con alta estructuralidad y alta integridad. Además, se presentan cúmulos de plagioclasas y piroxenos.

La masa fundamental es de vidrio grisáceo, principalmente. Además, presenta vesículas en aproximadamente 7% respecto al total de la roca, sin embargo, conteo no es confiable debido a gran pérdida de roca en la muestra y por consiguiente dificultad para diferenciar vesículas en el proceso de conteo.

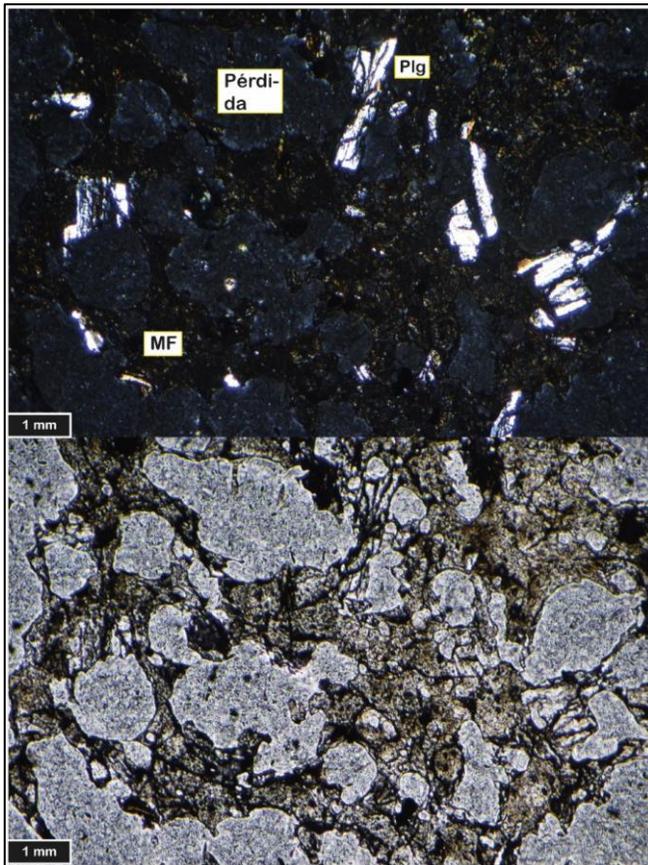


Figura 32: Muestra T1.M5.E1 a nicoles cruzados (arriba) y nicoles paralelos (abajo) en microscopio con 5x se observan cristales de plagioclasa (Plg). Además, se observa la poca cantidad de masa fundamental (MF) con los espacios en azul a NC (Pérdida de material). Las zonas redondeadas de los espacios vacíos evidencian vesículas de la muestra.

T2.M2.E1: Roca piroclástica con textura eutaxítica y vesicular. Presenta masa fundamental en 89% y fragmentos piroclásticos en 11%.

Los fragmentos piroclásticos están compuestos de fenocristales (3%) y microlitos (8%). Los fenocristales y microlitos son de plagioclasa (74%), piroxeno (ortopiroxeno y clinopiroxeno) (10%), hornblenda (16%).

Los cristales y en general se observan de mayor tamaño que todas las otras muestras, al igual que los microcristales.

Plagioclasa se encuentra íntegra en general, ocasionalmente alterada a mica sericita.

Se presentan cúmulos de hornblenda con magnetita y piroxeno con plagioclasas.

La masa fundamental de vidrio escoráceo. Además, presenta vesículas mayores en 20% aproximadamente respecto al total de la roca.

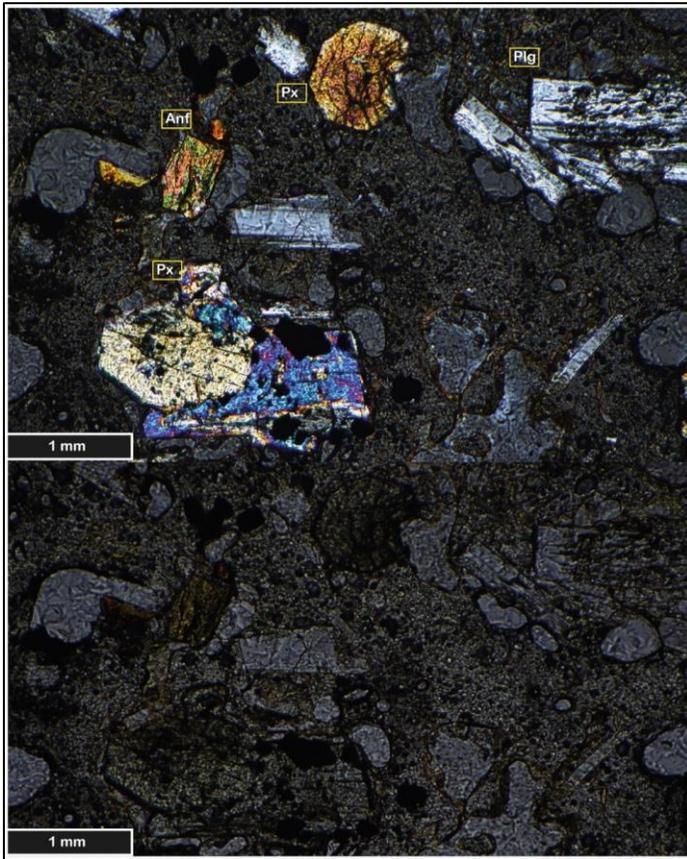


Figura 33: Muestra T2.M2.E1 a nicotinos cruzados en microscopio con 10x donde se observan cristales de plagioclasas (Por ej. Plg), se observan anfíbole (Por ej. Hbl), piroxeno (Px) insertos en la masa fundamental grisácea oscura de menor tamaño. Se observan vesículas muy redondeadas en masa fundamental.

Se observa que las muestras T1.M3.P1, T1.M5.P1 y T1.M5.P2 provenientes de la unidad Chungará son clasificadas como material juvenil pumíceo debido a sus características; como lo son masa fundamental marrón vítrea en conjunto con vesículas alargadas a subalargadas. Poseen cristales de principalmente plagioclasa (llegando hasta el 90%), y posee cristales de hornblenda. La plagioclasa se observa subhedral con media integridad en general, mientras la hornblenda se presenta subhedral. A veces presentan cúmulos de plagioclasas.

Las muestras T1.M4.E1 y T1.M4.E2 provenientes de la unidad Chungará fueron clasificadas como material juvenil escoráceo debido a sus características, como lo son masa fundamental grisáceo vítrea y vesículas más redondeadas a subredondeadas. Poseen cristales de principalmente plagioclasa (llegando hasta el 97%), también posee cristales de hornblenda y piroxeno. Además, presenta notoriamente cristales de óxidos.

Por otra parte, se observa que la muestra T1.M4.E3 pertenece al material lítico de la unidad Chungará, de tipo escoria densa, debido a la cantidad de fragmentos líticos máficos (*Figura 31*).

La muestra T1.M5.E1 pertenece a un fragmento escoráceo encontrado en superficie en una unidad diferente a Chungará, se observa que presenta características similares a la escoria de Chungará (T1.M4.E1, T1.M4.E2), sin embargo, a muestra de mano se presenta más densa que la escoria de Chungará, y, además, a microscopio óptico se observa con cristales de mayor tamaño y vesículas

de mayor tamaño (*Figura 32*). Por lo tanto, se interpreta que la muestra escorácea es perteneciente a otra unidad, posterior a la unidad Chungará.

La muestra T2.M2.E1 encontrada en superficie, es similar a la escoria de Chungará (T1.M4.E1, T1.M4.E2), donde a muestra de mano se observa que son fragmentos de mayor tamaño (hasta 15 cm por lado), es densa, con vesículas bastante redondeadas y presenta patinas de alteración blanquecinas. Por otra parte, a microscopio presenta mayor porcentaje de cristales y de mayor tamaño (*Figura 32*), además presenta vesículas más redondeadas que las muestras escoráceas de la unidad Chungará. Por lo tanto, se interpreta que esta muestra de escoria pertenece a otra unidad.

4.2.7.3. Contenido de vesículas de material juvenil

Para el cálculo de vesículas, se utilizó la fórmula explicitada en la sección 3.2.4 de Metodología. En esta fórmula se ingresa la densidad del piroclasto y la densidad del vidrio para obtener la densidad de vesículas que será aproximadamente 0.

Primero, la densidad de piroclasto se calculó para cada tipo de piroclasto (pómez y escoria), resultados en *Anexo A. Cálculos de densidad*.

Luego, la densidad del vidrio se calculó con el método de Bottinga & Weill (1970), resultando 2.6023×10^3 (kg/m³). Este valor se utilizó para todos los piroclastos individuales.

Para obtener la densidad del vidrio, se ingresan ciertos valores en el código de Matlab, los que fueron explicitados en la sección 3.2.4 de Metodología. El parámetro de porcentaje de elementos mayores en óxidos (*Tabla A.G.2*) se obtuvo realizando un promedio simple de cada elemento de las muestras (escorias, pómez blanquecina y pómez parda) analizadas en el laboratorio. El parámetro de contenido de agua, se asumió muy bajo (0.01 wt.%). El parámetro de la temperatura del magma fue asumido en la superficie (25°C) debido a que se quiere conocer la densidad del vidrio en el piroclasto. El parámetro de la presión a la que se encuentra el magma fue asumido como la presión atmosférica (0.101325 MPa).

Utilizando la metodología descrita para el cálculo de vesículas se obtienen los siguientes valores promediados del material juvenil (*Tabla 9*), (Tablas en detalle en *Anexo A. Cálculos de densidad*):

Método cálculo de densidad	Muestra	Densidad (kg/m³)	Porcentaje de Vesículas
Arquímedes	Escoria	513	80%
Arquímedes	Pómez blanquecina	436	83%
Arquímedes	Pómez parda	606	77%
Manual	Escoria	532	80%
Manual	Pómez blanquecina	494	81%

Tabla 9: Densidad para fragmentos juveniles según cálculo de Ley de Arquímedes y método manual descrito en Metodología. Junto al porcentaje de vesículas calculado para cada caso.

Se observa en la *Tabla 9* que la vesicularidad de los fragmentos juveniles es alrededor de 77-83% tomando en cuenta los tres tipos de juveniles.

La muestra de pómez blanquecina posee menor densidad y mayor vesicularidad que la escoria; presenta aproximadamente 440-500 (kg/m³) de densidad y una vesicularidad de 83%-81%. Mientras la muestra de escoria presenta aproximadamente 530-510 (kg/m³) de densidad y una vesicularidad de 80%.

Además, se observa que la pómez parda presenta 606 (kg/m³) y un contenido de vesículas de 77%, exponiendo una mayor densidad y menor vesicularidad que el resto de los fragmentos juveniles.

Por otra parte, se desprende que la densidad por el método manual es mayor que la densidad calculada por el método de Arquímedes; por ejemplo, en el caso de la pómez blanquecina, se obtiene 494 (kg/m³) de densidad por el método manual y 436 (kg/m³) de densidad por el método de Arquímedes, esto es debido a que el volumen calculado por este método también es mayor. Por lo tanto, la densidad obtenida por Arquímedes puede ser un valor mínimo entre los métodos.

Según la investigación de Pisello et al. (2023), donde midieron 794 piroclastos de pómez tamaño lapilli provenientes de la erupción de Minoan (VEI 7, 1650 A.C.), para calcular la densidad por medio de los métodos descritos en el trabajo presente, se desprende que no hay mayor diferencia entre el método manual y el de Arquímedes, donde se presentó un porcentaje de aproximadamente

13% en volumen de valores más altos para el caso del cálculo manual, lo cual es similar con el resultado obtenido en el estudio presente. Por lo tanto, existe cierta homogeneidad en los datos para obtener la vesicularidad del material juvenil.

4.2.8. Geoquímica

4.2.8.1. Diagrama TAS

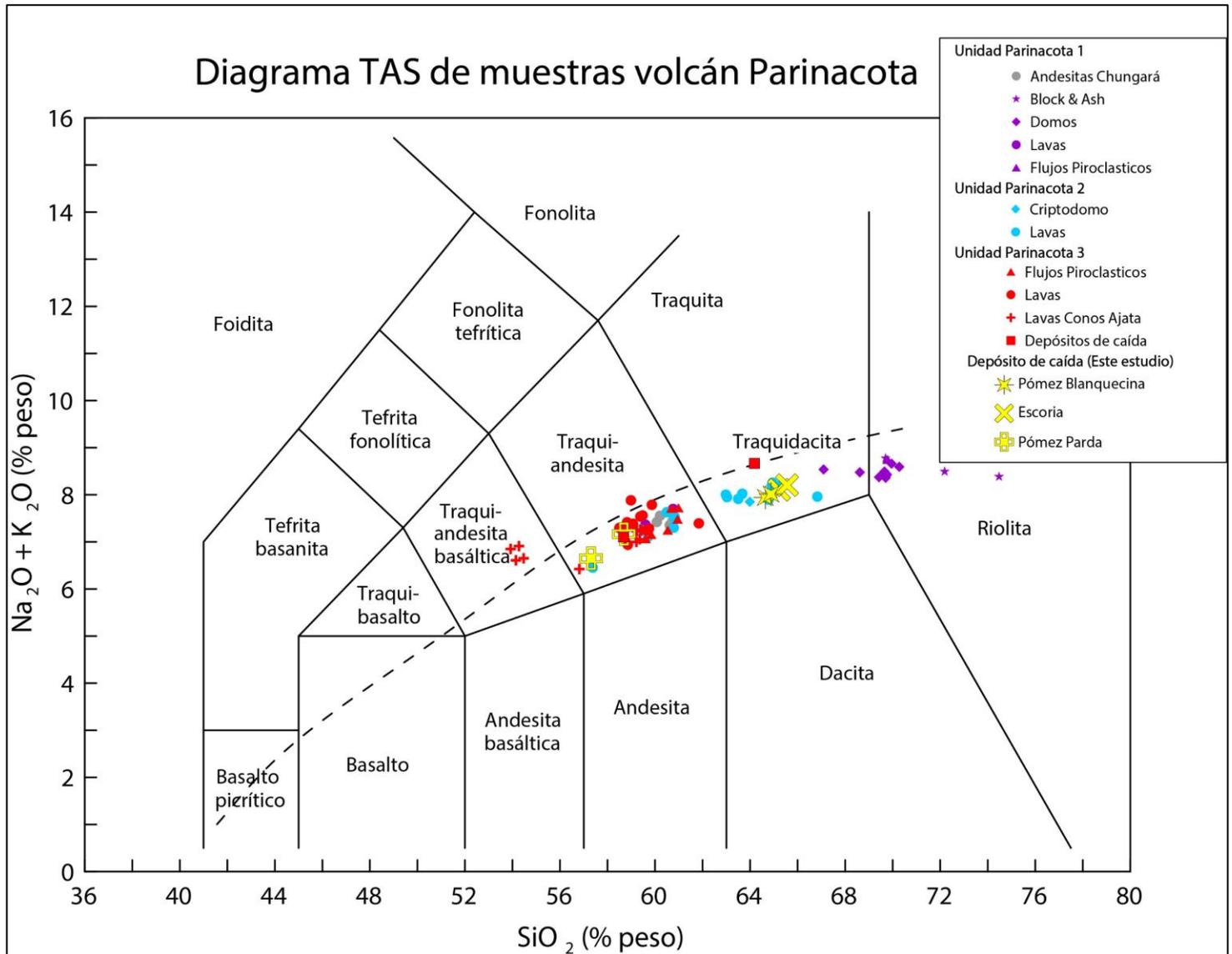


Figura 34: Diagrama TAS (Total Álcalis versus sílice; (Le Bas et al., 1986)), donde se observan las muestras obtenidas de literatura según tipo y unidad evolutiva del volcán (Parinacota 1, en morado, Parinacota 2 en celeste y Parinacota 3 en rojo). Las muestras de depósito de caída de Chungará (pertenecientes a la unidad Parinacota 3) se encuentran en color amarillo donde, con una cruz se observa la pómez parda, con una equis la escoria y con una estrella con ocho puntas

la pómez blanquecina. Cabe destacar que los círculos rojos son lavas provenientes del cono principal pertenecientes a la unidad Parinacota 3.

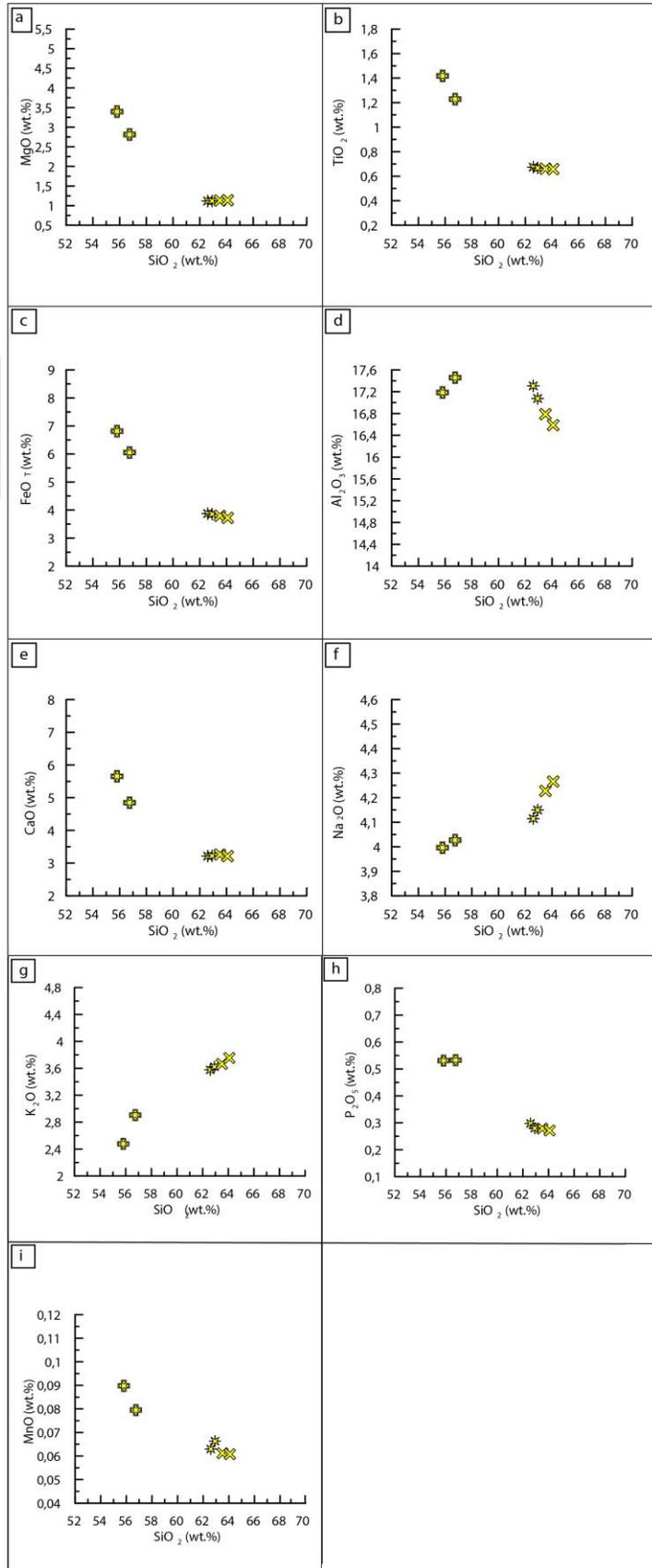
La composición del material juvenil del depósito de caída Chungará se encuentra en el rango de composición traquiandesita a traquidacita (*Figura 34*) de acuerdo con la clasificación TAS (Le Bas et al., 1986). Se observa una composición de SiO_2 entre 57.3 wt.% y 65.5 wt.%.

La pómez blanquecina presenta 64.6 wt.% y 64.8 wt.% de SiO_2 , mientras la escoria presenta 65.2 wt.% y 65.5 wt.% de SiO_2 , perteneciendo ambas a la composición traquidacítica. Por otra parte, la pómez parda presenta 57.3 wt.% y 58.6 wt.% de SiO_2 , perteneciendo a la composición traquiandesítica. Las tres muestras de material juvenil se encuentran bajo la línea punteada que delimita la serie alcalina y subalcalina, perteneciendo a la serie intermedia calcoalcalina.

4.2.8.2. Elementos mayores

Depósito de caída
(Este estudio)

- * Pómez Blanquecina
- × Escoria
- + Pómez Parda



*Figura 35: Diagramas Harker del material juvenil de Chungará para elementos mayores (wt.%) en óxidos no normalizados versus SiO₂ (wt%) (datos geoquímicos ver en Tabla A.G.2); en **a** MgO, en **b** TiO₂, en **c** FeO, en **d** Al₂O₅, en **e** CaO, en **f** Na₂O, en **g** K₂O, en **h** P₂O₅, en **i** MnO; con una cruz se presenta la pómez parda, con una equis la escoria y con una estrella con 8 puntas se presenta la pómez blanquecina.*

Si observamos los diagramas Harker (*Figura 35*) para los tres tipos de fragmentos juveniles, se puede observar que con el aumento de SiO₂, se presenta un decrecimiento de MgO (*F. 35, a*), FeO (*F. 35, c*), CaO (*F. 35, e*), MnO (*F. 35, i*), TiO₂ (*F. 35, b*), P₂O₅ (*F. 35, h*). El Na₂O (*F. 35, f*), y El K₂O (*F. 35, g*), presentan un aumento en su porcentaje con el aumento de SiO₂, mientras Al₂O₅ (*F. 35, d*) no presenta una tendencia clara con respecto al aumento de SiO₂.

En la pómez parda, los elementos de MgO, FeO, CaO, MnO, TiO₂, P₂O₅, MnO presentan un contenido mayor con respecto a los dos otros tipos de fragmentos (pómez blanquecina y escoria). Además, la pómez parda presenta un contenido de SiO₂ menor (56.7 wt.% y 55.8 wt.%) con respecto al contenido de SiO₂ de los otros 2 tipos de fragmentos (62 wt.% y 64 wt.%). Por ejemplo, el contenido de MgO para la pómez parda es de 2.8 wt.% y 3.4 wt.% con un contenido de SiO₂ de 56.7 wt.% y 55.8 wt.%, respectivamente, mientras para la pómez blanquecina y escoria el contenido de MgO ronda en 1.1 wt.% con un contenido de SiO₂ entre 62 y 64 wt.%.

En la pómez parda, el contenido de Na₂O y El K₂O se presenta en menor cantidad con un menor porcentaje de SiO₂, mientras la pómez blanquecina y escoria presenta mayor contenido de estos elementos con un mayor porcentaje de SiO₂.

Se presenta un contenido similar de Al₂O₅ entre los tres tipos de fragmentos, donde se observa que en la pómez parda se presenta alrededor de 17 wt.% de Al₂O₅ con un contenido de SiO₂ menor, mientras los otros dos fragmentos presentan alrededor de 16.5 a 17.3 wt.% de Al₂O₅ con mayor contenido de SiO₂.

- Unidad Parínacota 1
- Andesitas Chungará
 - ★ Block & Ash
 - ◆ Domos
 - Lavas
 - ▲ Flujos Piroclásticos
- Unidad Parínacota 2
- ◆ Criptodomo
 - Lavas
- Unidad Parínacota 3
- ▲ Flujos Piroclásticos
 - Lavas
 - ◆ Lavas Conos Ajata
 - Depósitos de caída
- Depósito de caída (Este estudio)
- ✱ Pómez Blanquecina
 - ✕ Escoria
 - ⊕ Pómez Parda

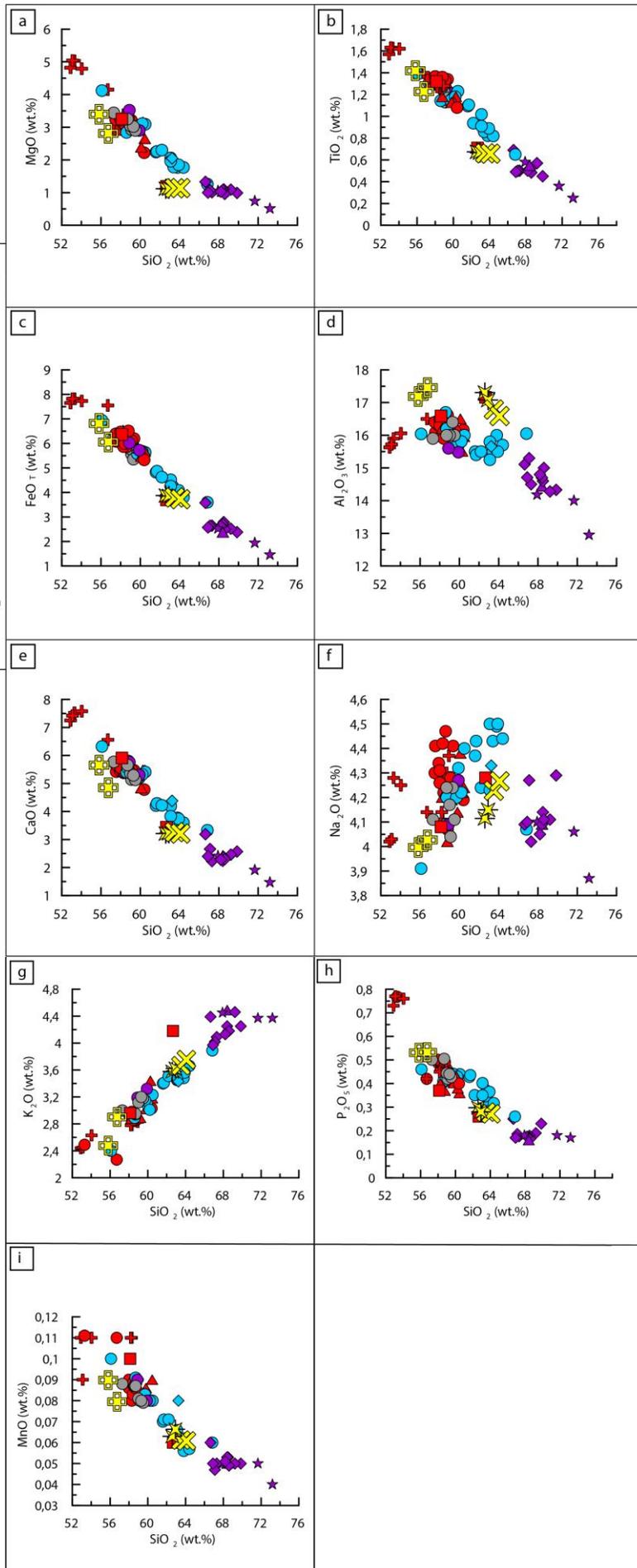


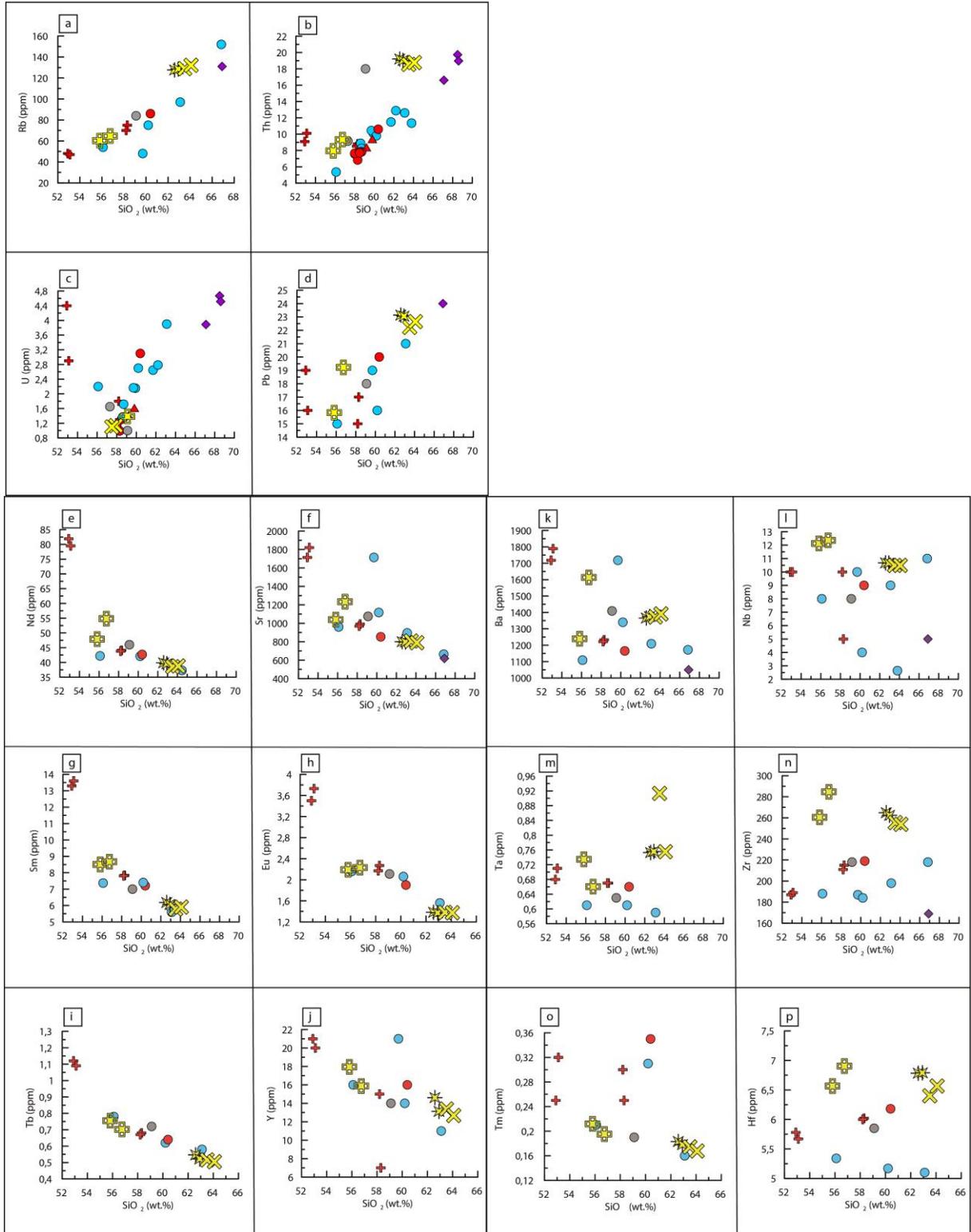
Figura 36: Diagramas Harker para elementos mayores (wt.%) en óxidos no normalizados versus SiO₂ (wt%); en a MgO, en b TiO₂, en c FeO, en d Al₂O₅, en e CaO, en f Na₂O, en g K₂O, en h P₂O₅, en i MnO. Se agregan datos de literatura del volcán (datos geoquímicos ver en Tabla A.G.4). En la figura se observa que los datos de color morado pertenecen a la unidad Parinacota 1, los datos de color celeste pertenecen a la unidad Parinacota 2 y los datos rojos pertenecen a la unidad Parinacota 3. Los datos en amarillo pertenecen al material juvenil Chungará; con una cruz se presenta la pómez parda, con una equis la escoria y con una estrella con 8 puntas se presenta la pómez blanquecina. Cabe destacar que los círculos rojos son lavas provenientes del cono principal pertenecientes a la unidad Parinacota 3 y que, no se grafican los datos pertenecientes a material de la avalancha volcánica de la unidad Parinacota 2, debido a que no se tiene claridad de donde provienen.

Además, a modo de comparación, se realizaron diagramas Harker (*Figura 36*) de los elementos mayores versus SiO₂ wt.% sumando muestras de la unidad Parinacota 1, unidad Parinacota 2, unidad Parinacota 3 obtenidos de la literatura (*Tabla A.G.4*; de Wörner et al. (1988), Davidson et al. (1990), Clavero et al. (2004), Hora et al. (2007, 2009), Ginibre et al. (2002), Ginibre & Wörner (2007)). Se observa que los datos de literatura concuerdan con los datos de la unidad Chungará, donde la variación que presenta Chungará se encuentra dentro de la variación del volcán.

Las muestras de pómez blanquecina y escoria se encuentran cercanas a la composición de lavas de la unidad Parinacota 2, siendo muy similar a una muestra de depósito de caída de la unidad Parinacota 3 (dato obtenido de (Clavero et al., 2004)). Esta observación es para todos los elementos mayores entre 62.5 wt.% a 64 wt.% de SiO₂ (*Figura 36; a, b, c, d, e, g, h, i*), sin considerar el elemento Na₂O (*Figura 36; f*).

Las muestras de pómez parda se encuentran cercanas a la composición de andesitas Chungará y lavas pertenecientes a la unidad Parinacota 1. También se encuentran cercanas a la composición de la unidad Parinacota 3; en particular a lavas provenientes del cono principal y se encuentran cercanas a la composición de lavas con menor contenido de SiO₂ pertenecientes a la unidad Parinacota 2. Esta observación es para todos los elementos mayores entre 55.8 wt.% a 56.7 wt.% de SiO₂ (*Figura 36; a, b, c, d, e, g, h, i*), sin considerar elemento Na₂O (*Figura 36; f*).

4.2.8.3. Elementos traza



*Figura 37: Diagramas bivariantes de elementos traza (ppm) versus SiO₂ wt.% de Chungará (datos geoquímicos ver en Tabla A.G.3). En **a** Rb (Rubidio), en **b** Th (Torio), en **c** U (Uranio), en **d** Pb (Plomo), en **e** Nd (Neodimio), en **f** Sr (Estroncio), en **g** Sm (Samadio), en **h** Eu (Europio), en **i** Tb (Terbio), en **j** Y (Ytrio), en **k** Ba (Bario), en **l** Nb (Niobio), en **m** Ta (Tántalo), en **n** Zr (Circonio), en **o** Tm (Tulio), en **p** Hf (Hafnio). Se agregan datos de literatura del volcán (datos geoquímicos ver en Tabla A.G.5), donde los datos de color morado pertenecen a la unidad Parinacota 1, los datos de color celeste pertenecen a la unidad Parinacota 2 y los datos rojos pertenecen a la unidad Parinacota 3. Los datos de color amarillo pertenecen al material juvenil Chungará; con una cruz se presenta la pómez parda, con una equis la escoria y con una estrella con 8 puntas se presenta la pómez blanquecina. Cabe destacar que los círculos rojos son lavas provenientes del cono principal pertenecientes a la unidad Parinacota 3.*

Se realizaron diagramas (Figura 37) bivariantes de elementos traza (ppm) versus SiO₂ wt.%, su-
mando muestras de la Unidad Parinacota 1, Unidad Parinacota 2, Unidad Parinacota 3 obtenidos
de la literatura (Tabla A.G.5; de Wörner et al. (1988), Davidson et al. (1990), Hora et al. (2007,
2009), Ginibre et al. (2002, 2014)).

Se observa que el Rb (F. 37, **a**), Th (F. 37, **b**), U (F. 37, **c**), Pb (F. 37, **d**) presentan comportamiento
incompatible, aumentando su porcentaje a medida que incrementa el contenido de SiO₂ (wt.%),
donde el Rb pertenece a los elementos incompatibles LILE (*Large Ion Lithophile Elements*; ele-
mentos litófilos de ión grande) y los demás pertenecen a los elementos incompatibles HFSE (*High*
Field Strength Elements; elementos de alta intensidad de campo).

Presentan también una tendencia incompatible, el elemento Cs (perteneciente al grupo de los ele-
mentos LILE), donde el diagrama bivariante de este elemento (F. A.G.1.; **h**), se graficó sólo para
el depósito de Chungará debido a que no se encontraron datos en la literatura para este elemento
traza, por lo tanto, la clasificación de compatibilidad se define a partir de solamente las muestras
analizadas en esta investigación.

Los elementos del grupo de tierras raras (La (F. A.G.1.; **a**), Ce (F. A.G.2.; **c**), Pr (F. A.G.1.; **b**), Nd
(F. 37; **e**), Sm (F. 37; **g**), Eu (F. 37; **h**), Gd, Tb (F. 37; **i**), Dy (F. A.G.1.; **d**), Ho (F. A.G.1.; **e**), Er
(F. A.G.1.; **f**), Yb (F. A.G.2.; **a**), Lu (F. A.G.2.; **b**), Y (F. 37; **j**), Sc (F. A.G.1.; **g**); excepto el Pm y
Tm (F. 37; **o**)) junto al elemento Sr (F. 37; **f**) (perteneciente al grupo LILE), presentan comporta-
miento compatible, disminuyendo su porcentaje a medida que incrementa el contenido de SiO₂
(wt.%). Cabe destacar que los diagramas bivariantes de los elementos de La, Pr, Gd, Dy, Ho, Er,
Sc (F. A.G.1.) se graficaron sólo para el depósito de Chungará por falta de datos de literatura,
además, el La posee una leve tendencia de compatibilidad, no tan marcada como los demás ele-
mentos.

Finalmente, hay elementos que no se observa una tendencia clara de correlación negativa o posi-
tiva, que se denominan variables. Entre estos elementos están elementos pertenecientes al grupo

HFSE como, Nb (*F. 37; l*), Ta (*F. 37; m*), Zr (*F. 37; n*), Hf (*F. 36; p*) y Tm (*F. 37; o*), y el elemento Ba (*F. 37; k*), perteneciente al grupo LILE.

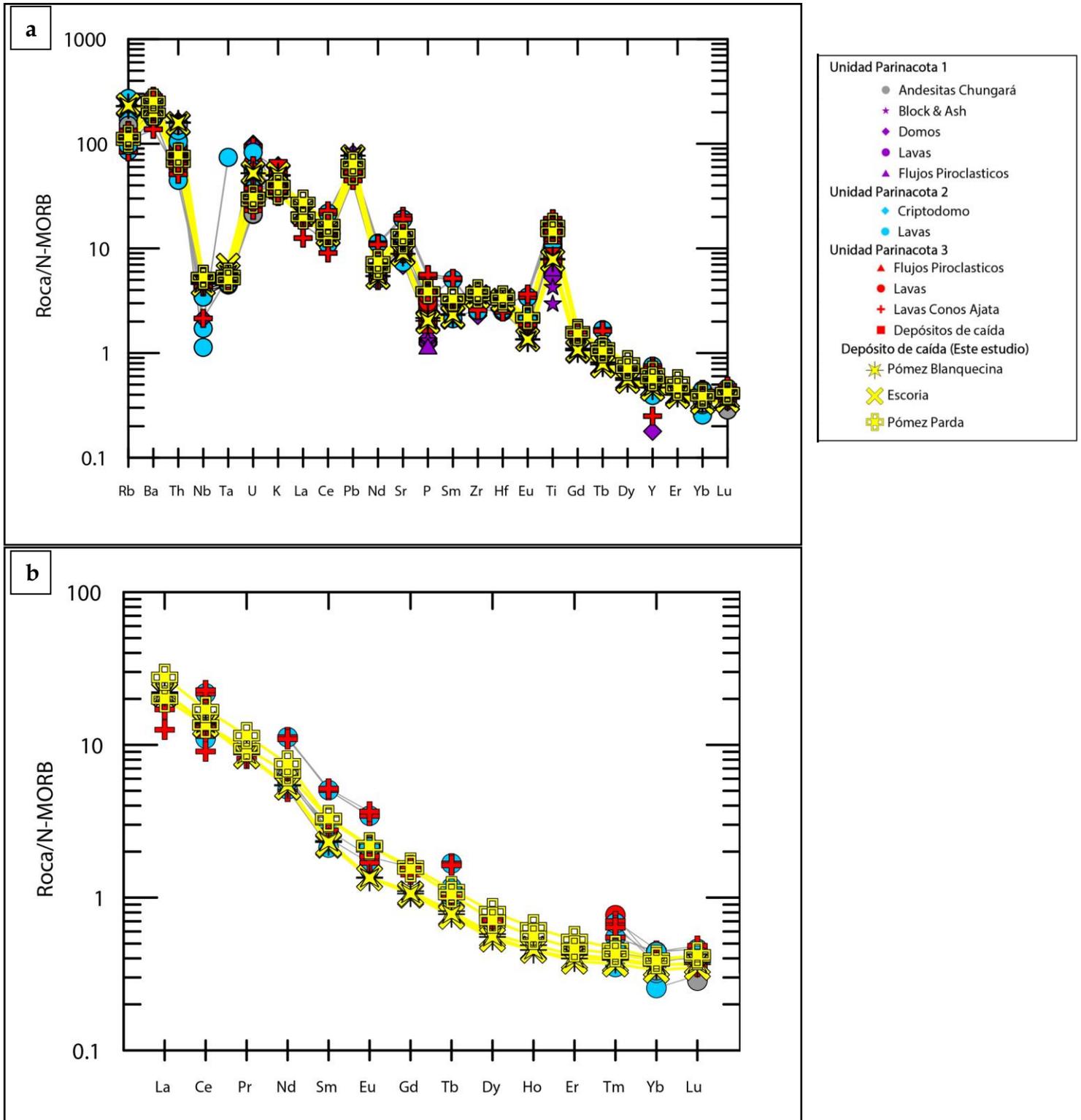


Figura 38: a. Diagrama multielemental de elementos traza con normalización a N-MORB. En b. diagrama de tierras raras con normalización a N-MORB. Diagramas con datos de unidad Chungará (Tabla A.G.3) y datos de literatura (Tabla A.G.5; donde los elementos Ti, K, P son obtenidos a partir de los elementos mayores provenientes de Clavero et al. (2004); ver en Tabla A.G.4).

Se realizaron diagramas multielementales (Spider; *Figura 38*), normalizados a Normal-Mid Ocean Ridge Basalt (N-MORB; Sun & McDonough (1989)). Estos diagramas son de la unidad Chungará con los 3 tipos de fragmentos juveniles; pómez blanquecina, escoria y pómez parda. Y, a modo de comparación se agregan datos de literatura; mencionadas anteriormente.

Para el diagrama multielemental de elementos traza (*Figura 38.a.*) y, para el diagrama de elementos pertenecientes al grupo de tierras raras (*Figura 38.b.*) se observa una similitud en el patrón de aserrado para las muestras de Chungará y los datos de literatura. Por otra parte, por medio de la comparación entre las muestras Chungará, se desprende que poseen patrones similares entre sí, excepto en Rb, Th y U (*Figura 38.a.*), que se presenta en mayor cantidad en la escoria y pómez blanquecina con respecto a la pómez parda, y, en P, Eu, Ti (*Figura 38.a.*), que se presentan menor cantidad en la escoria y pómez blanquecina con respecto a pómez parda.

En el diagrama multielemental de elementos traza (*Figura 38.a.*), se observan anomalías negativas de Nb-Ta, Ce, Nd y P, y anomalías positivas de Ba, U, Pb, Sr y Ti, lo que es similar a un magmatismo de arco que indica contaminación cortical.

En el diagrama de tierras raras (*Figura 38.b.*), se presenta una tendencia clara donde se observa un enriquecimiento de las tierras raras livianas (LREE) (por ejemplo, La) y un empobrecimiento de las tierras raras pesadas (HREE) (por ejemplo, Yb, Lu), lo que genera una figura más plana hacia los elementos más compatibles (derecha del gráfico). Además, los HREE se encuentran cercanos a 1 con la normalización a N-MORB.

Por otra parte, en ambas figuras, se observa un enriquecimiento de los elementos más incompatibles (Rb hasta Sr, por ejemplo) y un empobrecimiento de los elementos más compatibles (Eu hasta Tm, por ejemplo).

Capítulo 5: Discusiones

5.1. Volumen de erupción y comparación con registro volcánico

La unidad Parinacota 3 es la última unidad depositada y posee una edad Holocena (<8 ka). Esta unidad presenta productos volcánicos de tipo flujos piroclásticos, lavas provenientes del cono principal, lavas provenientes de los conos Ajata y depósitos de caída.

La erupción Chungará pertenece a un depósito de caída de edad 2.6-2.4 ka (posterior a 8.8 ka), perteneciente a la unidad Parinacota 3, donde representa parte del registro explosivo contemporáneo. De acuerdo a los resultados obtenidos en este trabajo, la erupción Chungará correspondió a un evento de volumen 0.01- 0.02 km³. Este volumen si se compara con las coladas contemporáneas Ajata; a3 (ubicada al sur del cráter) y a4 (ubicada al suroeste del cráter), se asemejan bastante en volumen; de 0.016 y 0.036 km³, respectivamente, según Cortez (2023), además se asemejan bastante en edad; donde, Ajata a4 posee edad de 2.6 ka, mientras Ajata a3 posee edad de 4.8 ka. Por otra parte, si se compara el volumen de Chungará con lavas seleccionadas que son provenientes del cono principal y son pertenecientes a la unidad Parinacota 3 (sur, lateral, norte del volcán; *Tabla A.B.2, Figura A.B.2*), se obtiene un volumen menor a 0.007 km³, lo cual es menor a Chungará. Por lo tanto, se sugiere que las lavas pertenecientes a la unidad Parinacota 3 son de similar o menor volumen que el depósito de caída Chungará.

En el caso de la comparación del volumen de Chungará y el volumen de las lavas pertenecientes a la unidad Parinacota 1, se observa que el volumen de la mayoría de las lavas (*Tabla A.B.1, Figura A.B.1*) es mayor al volumen de Chungará; llegando hasta 0.8 km³ aproximadamente, lo cual es bastante mayor comparado a la unidad Chungará y a las lavas de la unidad Parinacota 3 anteriormente descritas. Por lo tanto, se sugiere que las lavas pertenecientes a la unidad Parinacota 1 son de mayor volumen que Chungará y a lavas pertenecientes a la unidad Parinacota 3. De esta forma, la erupción Chungará es de menor volumen que las lavas anteriores al colapso (unidad Parinacota 1).

Respecto a la composición química, la unidad Chungará posee una composición traquiandesítica (para su componente juvenil de pómez parda) a traquidacítica (para su componente juvenil de pómez blanquecina y escoria); ver en *TAS; Figura 34*), donde se asemeja en su componente de pómez parda a la composición de las lavas de la unidad Parinacota 1 (andesítica y dacítica (Clavero et al., 2012, Hora et al., 2007) y, traquiandesítica (*TAS; Figura 34*)), y a las lavas provenientes del cono principal pertenecientes a la unidad Parinacota 3 (andesítica a andesita basáltica (Clavero et al., 2012, Hora et al., 2007) y, traquiandesítica (*TAS; Figura 34*)). Por otra parte, llega a ser muy diferente a la composición de las lavas provenientes de Ajata, que poseen una composición más máfica (traquiandesita basáltica a traquiandesítica (*TAS; Figura 34*)). Sin embargo, la componente principal de la unidad Chungará (pómez blanquecina) está bastante alejada del valor de las lavas de la

unidad postcolapso Parinacota 3 y de la unidad Parinacota 1, es más, se asemeja más a la composición de las lavas de la unidad Parinacota 2, por lo tanto, la similitud entre la composición de los productos volcánicos no es concluyente.

De este modo, se concluye que la erupción Chungará en términos de volumen es similar a lavas pertenecientes a la unidad Parinacota 3 y, que se llega a asemejar en su componente juvenil de pómez parda a las lavas provenientes del cono principal y no a las lavas provenientes de los conos Ajata. Así como también, se asemeja en la componente de pómez parda a lavas pertenecientes de la unidad Parinacota 1 y, por otra parte, existe una tendencia en que las lavas de la unidad Parinacota 1 son de mayor volumen que Chungará.

Por otra parte, en este trabajo se describieron depósitos de caída contemporáneos; Chungará, Tambo Quemado y Gran Couleé y el depósito de Block and Ash, estos depósitos se encuentran ubicados hacia el sector sur/sureste del volcán. Luego, al observar la intensidad de los depósitos volcánicos posteriores a 8.8 ka desde la recopilación de Bertin et al. (2022), se tiene que, la unidad Pómez Hito XVII (unidad que se correlaciona con Chungará), es el mayor evento anterior a 1.169 ka con un VEI igual a 3, por lo tanto, se sugiere que la unidad Chungará es uno de los eventos de mayor intensidad de la unidad Parinacota 3. Por otra parte, se observa que el depósito de caída Tambo Quemado, ubicado bajo Chungará posee espesor de hasta 35 cm, y, el depósito de caída Gran Couleé, ubicado bajo Tambo Quemado, posee un espesor observado de hasta 30 cm, según estos datos de espesores se podría sugerir que las erupciones son menos potentes que Chungará; lo que se condice con que la erupción Chungará es uno de los eventos de mayor potencia de la unidad Parinacota 3.

5.2. Clasificación de erupción

A partir de los datos de volumen eruptado y altura de la columna (12 km), se desprende que la erupción es de mediana a gran intensidad con un VEI igual a 3 (*Figura 19*). Por otra parte, a partir del gráfico de Bonadonna & Costa (2013) (*Figura 18*), se observa que la erupción Chungará se ubica en el campo de erupciones pequeña/moderada intensidad y es bastante cercano al límite con las erupciones subplinianas. Mediante los datos de la clasificación para VEI y del gráfico de estilo eruptivo de Bonadonna & Costa (2013), se infiere que la erupción podría ser de intensidad pequeña a moderada (o mediana), donde se descarta que sea de gran intensidad debido a su bajo volumen y a que se obtiene que es de menor intensidad, a través del gráfico de estilo eruptivo (*Figura 18*).

A partir de la intensidad obtenida; pequeña a moderada y las características que se pueden estudiar mediante los depósitos de Chungará, se puede desprender que el estilo eruptivo podría ser de tipo vulcaniana o subpliniana, compartiendo características de ambos estilos.

Se observa que la unidad posee fragmentos pumíceos principalmente de tamaño grueso; de tamaño lapilli grueso a bloques con una moda de $\phi = -3$ correspondiente a 8 [mm] (*Figura 15*), sin embargo, las erupciones del tipo vulcaniano (Bachtell et al., 2015) presentan un promedio de partícula relativamente fino, debido a la rápida descompresión inicial, por lo que difiere en la característica del tamaño de grano del estilo vulcaniano. También difiere del estilo vulcaniano, en que este presenta

mayor cantidad de fragmentos líticos (unidad Chungará presenta hasta 8 wt.% de fragmentos líticos en fragmentos mayores; *Tabla A.E.5*).

Por otra parte, la vesicularidad de Chungará es del rango de 77-83% (presente en *Tabla 9*); sin mucha variabilidad, adecuándose correctamente al estilo pliniano/subpliniano y no al estilo vulcaniano, debido a que los piroclastos en la erupción de estilo vulcaniano presentan poca y variable vesicularidad, mientras en el estilo subpliniano a pliniano presentan una alta y relativamente homogénea vesicularidad; desde 70-80% (Sparks, 1978).

De la misma forma, los fragmentos balísticos son ampliamente vesiculados y se presentan en poca cantidad en la unidad Chungará; lo que es coincidente con un estilo pliniano/subpliniano, y además difiere de erupciones con el estilo vulcaniano; donde se presentan fragmentos balísticos pobremente vesiculados y particularmente en mayor cantidad.

Además, los bloques son formados de ceniza en el caso de la unidad Chungará, indicando un proceso de fragmentación frágil en un magma altamente viscoso; característica de las erupciones vulcanianas, asemejándose a este estilo.

Según Bachtell et al. (2015), se tiene que las erupciones vulcanianas son de un único evento y, tienen un comportamiento transiente, donde la erupción puede durar segundos a minutos, mientras las erupciones del espectro de las casi plinianas, subplinianas y plinianas pueden durar de horas a días. Se observa que Chungará presenta una erupción continua (espesor continuo de tamaño hasta 62 cm) y una duración estipulada de aproximadamente 1 hasta 2 horas; en *Tabla 10*. Por ello se puede asociar a un estilo eruptivo del grupo de las casi plinianas, subplinianas o plinianas.

Modelo (para TE)	Volumen Chungará (m³)	Tasa Eruptiva; (TE) (m³/s)	Duración; (V/TE) (s)	Duración (minutos)	Duración (horas)
Wilson & Walker (2009)	12000000	2551.38	4703.33	78.39	1.31
Mastin et al. (2009)	12000000	1693.7	7085.08	118.08	1.96
Sparks et al. (1997)	12000000	2026.8	5920.66	98.67	1.64

Tabla 10: Cálculos para duración de erupción según tipo de modelo (Wilson & Walker (2009), Mastin et al. (2009), Sparks et al. (1997)). Se observa en la tercera columna la tasa eruptiva (TE) obtenida del modelo respectivo, en la cuarta columna se observa la duración (s) obtenida del volumen dividido en la Tasa Eruptiva, en la quinta y sexta columna se observa la duración convertida a minutos y horas, respectivamente.

Al comparar entre sí el espectro de las erupciones casi Pliniana, Subpliniana y Pliniana; se tiene que por parte de las erupciones subplinianas (Cioni et al., 2015), a menudo presenta la característica de la generación de múltiples pulsos donde cada capa de depósito de caída posee su propio eje de dispersión, en cambio, en la unidad Chungará se observa una unidad de espesor de hasta los 62 cm con un solo pulso eruptivo. Sin embargo, no siempre el estilo subpliniano presenta esta característica de múltiples pulsos. Por otra parte, para pertenecer a una erupción Pliniana debe ser de mayor

intensidad (VEI de 4) y con columna eruptiva de mayor altura (aproximadamente desde 20 km). Por lo tanto, según las características que engloban presencia de múltiples pulsos eruptivos e intensidad mayor, Chungará no es parte de las erupciones plinianas y podría ser parte de las erupciones subplinianas.

Englobando todas las características descritas, se puede desprender que no pertenece al grupo de las erupciones vulcanianas ni plinianas, ya que, si bien posee características del tipo vulcaniana; como ser de menor intensidad, no posee todas las características que definen a este estilo eruptivo, como lo son el registro de un material particularmente fino, si no, más bien, esta unidad está compuesta de tamaño grueso, así como también; los fragmentos piroclásticos son altamente vesiculados y no posee gran cantidad de fragmentos balísticos, siendo todo lo contrario a una erupción vulcaniana. Por estas características particulares, no se clasifica como erupción de tipo vulcaniana. Por otra parte, se desprende que no posee todas las características de tipo subpliniana y, además, no se encuentra en el campo de las subplinianas en el gráfico de Bonnadona & Costa (2013) (*Figura 18*), sin embargo, está en el límite de este estilo eruptivo.

Por lo tanto, se tiene que, como la erupción Chungará presenta características similares a una erupción subpliniana, además se ubica en el límite del diagrama de clasificación de estilo eruptivo (*Figura 18*), siendo menos intensa que una erupción Pliniana (que es de mucho mayor intensidad), y sumado a las características físicas, se puede desprender que el estilo eruptivo de la erupción Chungará podría ser subpliniano.

5.3. Significado químico de juveniles

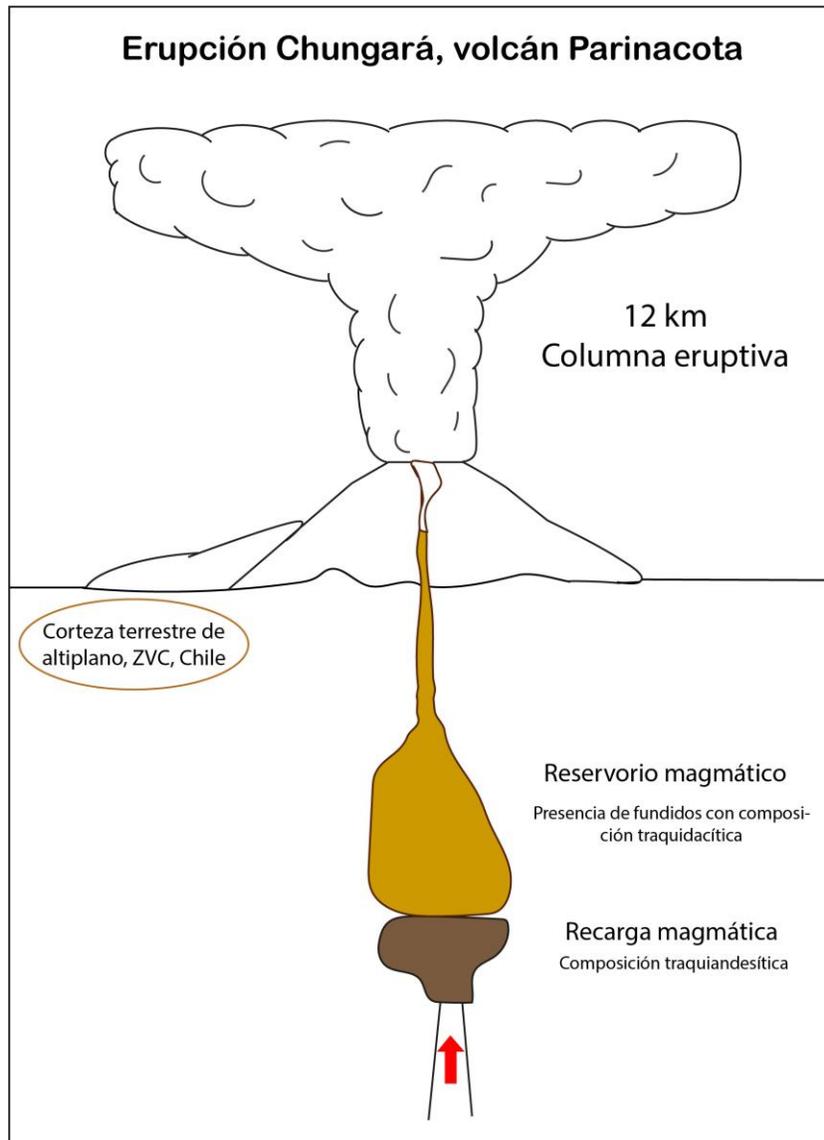


Figura 39: Modelo erupción Chungará, donde se observa el reservorio magmático de Chungará que presenta fundidos con composición traquidacítica (representada por pómez blanquecina y escoria) y una recarga magmática que gatilló la erupción Chungará; la recarga magmática es de composición traquiandesítica (representada por pómez parda). Se observa que subió parte del material del reservorio magmático a través del conducto volcánico, generando un proceso de fragmentación y luego se generó la columna de humo y ceniza en la superficie, que tuvo una altura de 12 km.

Los fragmentos juveniles de la erupción Chungará están dentro de la tendencia composicional del volcán Parinacota tanto de los elementos mayores como de los elementos traza (Figura 36 y 37, respectivamente). Sin embargo, se observa que existe una diferencia composicional entre los diferentes fragmentos juveniles descritos. La pómez blanquecina y escoria tienen una composición

química similar tanto en elementos mayores como en traza (*Figura 35 y 37*, respectivamente), representando las composiciones más evolucionadas que se han descrito en la unidad Parinacota 3, junto a una muestra obtenida por Clavero et al. (2004) (ver *Figura 36*); y, son composiciones similares a las encontradas en la unidad Parinacota 2. En cambio, los fragmentos juveniles de tipo pómez parda, presentan la composición más primitiva de la erupción Chungará y se asemejan a la composición media predominante en la unidad Parinacota 3 (entre 57-59 wt.% de SiO₂ y 2.5-3.5 wt.% de MgO) y se asemejan en particular al grupo de lavas provenientes del cono principal.

Los fragmentos de tipo pómez blanquecina y escoria al ser las composiciones más evolucionadas, presentan diferenciación magmática con respecto a la composición media de la unidad Parinacota 3. Una hipótesis de lo que representan estos fragmentos más evolucionados, se basa en que representan los fundidos del reservorio, donde estos fragmentos juveniles se formaron a partir de los fundidos diferenciados que estaban en el reservorio magmático antes de que llegara la recarga magmática que gatilló la erupción que dio lugar a Chungará. En cambio, la pómez parda (presente en menor cantidad en el depósito; <5 wt%; *Tabla A.E.5*), al ser más primitiva, podría representar parte de la inyección magmática que generó esta erupción (modelo es observable en *Figura 39*).

Por otra parte, no es posible sugerir una pertenencia clara entre la erupción Chungará y alguna lava perteneciente a la unidad Parinacota 3; particularmente del cono principal, lugar desde donde se proyectan los modelos de isópacas e isopletras. Esto debido a que no existe una similitud clara a nivel composicional entre Chungará y alguna lava de la unidad postcolapso Parinacota 3. Esta diferencia es observable en que la componente principal de Chungará; la pómez blanquecina se observa más evolucionada (traquidacítica; ver TAS; *Figura 34*) que la media predominante de la unidad Parinacota 3 (traquiandesítica; *Figura 34*), que se observa más primitiva, por lo tanto, la unidad Chungará no está asociada a alguna lava perteneciente a la unidad Parinacota 3 que esté presente en la literatura recopilada.

5.4. Peligro volcánico

La erupción Chungará posee un VEI de 3 según este trabajo. Este valor se condice con la unidad correlacionada desde Bertin et al. (2022); denominada Pómez Hito XVII.

Se observa que Chungará posee eje de dispersión hacia el sureste, por lo tanto, se desprende que existen períodos en que el viento sopla hacia el sur/sureste, lo cual podría afectar la infraestructura localizada en el eje de dispersión sureste si se produce una erupción explosiva que abarque este sector.

El área de la unidad Chungará (hasta aproximadamente 11 km al SE del cráter del volcán) es observable en el mapa de peligros del Servicio Nacional de Geología y Minería (Bertin et al., 2022). Donde, el área de Chungará es informada como una zona de alto peligro de caída de piroclastos.

Por otra parte, se observa que el peligro de caída de piroclastos es definido como la probabilidad de acumulación de más de 1 cm de caída de piroclastos, dentro de este rango de peligro, se observa que, la zona de la carretera internacional 11-CH que conecta Chile-Bolivia, y la infraestructura ubicada al sur del volcán en la orilla de la misma carretera, oscila entre moderado a bajo peligro de

caída de piroclastos. Sumado a esta información, se tiene que, la estación de verano es la que posiblemente constituye mayor peligro para zonas pobladas (donde el pueblo de Parinacota se presenta con alto peligro), luego, la carretera internacional 11-CH se presenta con moderado peligro y oscila con otros grados de peligro hacia el sur de la misma, luego el pueblo de Caquena se presenta con bajo peligro y, finalmente, el pueblo de Guallatire y ciudad de Putre se presentan con muy bajo peligro. Se agrega que el Parque Nacional Lauca, Reserva Nacional Las Vicuñas, los ríos Lauca y Caquena, el lago Chungará, las lagunas Cotacotani y Cotapampa podrían resultar afectadas por la caída de piroclastos.

Por lo tanto, se observa que en la estación de verano existe un mayor peligro de caída de piroclastos. Cabe destacar, que el mapa de peligro volcánico fue realizado con un VEI de 4, sin embargo, la erupción Chungará presenta un VEI de 3, por lo que, fue realizado con una erupción de mayor intensidad que la presente; por lo tanto, se podría inferir que la erupción Chungará efectivamente podría comprenderse dentro de los resultados del mapa de peligros, pero sólo con una columna eruptiva que presente una dirección de dispersión sólo hacia el sur/sureste.

Capítulo 6: Conclusiones

La unidad Chungará es un depósito de caída de edad 2.6-2.4 ka, perteneciente a la unidad Parinacota 3 (posterior al colapso del volcán), donde su contemporaneidad es observable en el registro volcánico estudiado, correspondiendo a uno de los últimos eventos explosivos de mayor potencia. Otros eventos descritos y observados de menor espesor y probablemente de menor potencia, son los depósitos de caída Tambo Quemado y Gran Couleé y, el depósito de bloque y ceniza; Block & Ash.

Se estudia la erupción Chungará para caracterizar el ciclo explosivo contemporáneo del volcán Parinacota. Esta erupción es de intensidad pequeña a moderada (según tamaño de la columna, 12 km) asociado a un VEI de 3 y tasa eruptada de $(1.62 \text{ a } 2.55) \times 10^3 \text{ (m}^3/\text{s)}$. Se presenta con hasta aproximadamente 60 cm de espesor y se extiende hacia el sureste del volcán. El estilo eruptivo de la erupción Chungará podría ser subpliniano, debido a que posee mayor cantidad de material grueso junto a una alta vesicularidad de los fragmentos juveniles (77-83%), presenta poca intensidad y un comportamiento continuo con una duración que fue estipulada entre 1 a 2 horas aproximadamente.

Se observa que presenta una proporción de 70% en fragmentos mayores, donde se describen 5 componentes: pómez blanquecina (72-43 wt.%), pómez parda (4-0.5 wt.%), escoria (3- 0.8 wt.%) , fragmentos líticos negros (hasta 15% entre fragmentos de 4mm) fragmentos líticos blanquecinos (hasta 3% entre fragmentos de 4mm) y fragmentos líticos rojizos (hasta 4% en fragmentos de 4mm), cristales (menor a 1 wt.%), en proporciones de fragmentos mayores. El material juvenil es de composición traquiandesítica a traquidacítica, estando acorde con la tendencia global del volcán. Comparando los tres tipos de juveniles, se tiene que la pómez parda es más máfica, mientras la pómez blanquecina y escoria se observan evolucionadas. Además, se observa más evolucionada que la media de la unidad Parinacota 3, indicando mayor diferenciación y, por lo tanto, posiblemente indican que pertenecían a los fundidos remanentes del reservorio magmático.

A partir de los resultados se obtuvo que el volumen eruptado de Chungará es de 0.01-0.02 km³, llegando a ser similar en comparación a otras lavas de la unidad Parinacota 3, así como también, es menor al volumen de las lavas de la unidad Parinacota 1, sumado a esto, la composición química de Chungará se asemeja en su componente de pómez parda tanto a las lavas de la unidad Parinacota 1 como a las lavas provenientes del cono principal de la unidad Parinacota 3.

Por otra parte, se desprende que existen períodos en que el viento sopla hacia el sur/sureste, lo cual indica que, si se produjese un futuro evento eruptivo explosivo con un viento de esta característica, podría afectar la infraestructura localizada hacia el sureste del volcán.

Finalmente, se recalca la importancia del estudio científico realizado en este trabajo para caracterizar en términos de volumen e intensidad una erupción contemporánea perteneciente a la unidad postcolapso Parinacota 3, debido a que el régimen explosivo no ha sido estudiado en profundidad de la forma realizada en este trabajo. Por lo tanto, la definición de Chungará podría ayudar a definir posiblemente como sería una erupción explosiva del volcán actualmente. De este modo, se puede aportar al estudio para posibles erupciones futuras con el trabajo de mapa de peligros del SERNA-GEOMIN.

Bibliografía

- Bachtell, A., Esposti, M. & Belousov, A. (2015). Vulcanian Eruptions. En H. Sigurdsson, B. Houghton, S. McNutt, H. Rymer, & J. Stix (Eds.), *The Encyclopedia of Volcanoes* (2 ed., pp. 505-518). Academic Press.
- Bertin B., L., Jara A., G., & Toloza T., V. (2022). Peligros del volcán Parinacota. *Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental No. 40, escala 1:50000, Servicio Nacional de geología y minería.*
- Biass, S., Bagheri, G., & Bonadonna, C. (2015). A Matlab implementation of the Carey and Sparks (1986) model to estimate plume height and wind speed from isopleth maps. Department of Earth Sciences, University of Geneva, Switzerland.
- Boggs, S. (2009). *Petrology of sedimentary rocks* (2 ed.). New York, United States: Cambridge University Press. <https://www.cambridge.org/9780521897167>
- Bonadonna & Costa. (2013). Plume height, volume, and classification of explosive volcanic eruptions based on the Weibull function. *Bulletin of Volcanology*, 75(742). <https://doi.org/10.1007/s00445-013-0742-1>
- Bonadonna, C., & Houghton, B. (2005). Total grain-size distribution and volume of tephra-fall deposits. *Bulletin of Volcanology*, 67, 441-456. <https://doi.org/10.1007/s00445-004-0386-2>
- Bottinga, Y., & Weill, D. (1970). Densities of Liquid Silicate Systems Calculated From Partial Molar Volumes of Oxide Components. *American Journal of Science*, 269(2), 169-182. <https://doi.org/10.2475/ajs.269.2.169>
- Bourdon, B., Wörner, G., & Zindler, A. (2000). U-series evidence for crustal involvement and magma residence times. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 139, 458-469. <https://doi.org/10.1007/s004100000150>
- Brown, R., & Andrews, G. (2015). Deposits of pyroclastic density currents. En H. Sigurdsson, B. Houghton, S. McNutt, H. Rymer, & J. Stix (Eds.), *The Encyclopedia of Volcanoes* (2 ed., pp. 631-648). Academic Press.
- Carey, S., & Bursik, M. (2015). Volcanic Plumes. En H. Sigurdsson, B. Houghton, S. McNutt, H. Rymer, & J. Stix (Eds.), *The Encyclopedia of Volcanoes* (2 ed., pp. 571-585). Academic Press.
- Carey, S., & Sparks, R. (1986). Quantitative models of the fallout and dispersal of tephra from volcanic eruption columns. *Bulletin of Volcanology*, 48(2-3), 109-125. <https://doi.org/10.1007/BF01046546>
- Cashman, K. (2004). Volatile Controls on Magma Ascent and Eruption. En R. Sparks, & C. Hawkesworth (Ed), *The State of the Planet: Frontiers and Challenges in Geophysics* (Vol.

- 150). International Union of Geodesy and Geophysics and the American Geophysical Union. <https://doi.org/10.1029/150GM10>
- Cioni, R., Pistolesi, M & Rosi, M. (2015). Plinian and Subplinian Eruptions. En H. Sigurdsson, B. Houghton, S. McNutt, H. Rymer, & J. Stix (Eds.), *The Encyclopedia of Volcanoes* (2 ed., pp. 519-535). Academic Press.
- Clavero, J., Sparks, R., Huppert, H., & Dade, W. (2002). Geological constraints on the emplacement mechanism of the Parinacota debris avalanche, northern Chile. *Bulletin of Volcanology*. <https://doi.org/10.1007/s00445-001-0183-0>
- Clavero, J., Sparks R., S., Polanco, E., & Pringle, M. (2004). Evolution of Parinacota volcano, Central Andes, Northern Chile. *Andean Geology. Formerly Revista Geológica de Chile*, 31(2), 317-347.
- Clavero, J., Steve, R., Sparks, J., & Polanco, E. (2012). Geología del volcán Parinacota. *Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica No. 132, escala 1:50000, Servicio Nacional de geología y minería*.
- Cortez, S. (2023). Análisis morfológico y parámetros eruptivos de lavas holocenas del volcán Parinacota. [*Memoria para optar al título de geólogo, Universidad de Chile*]. Santiago de Chile, Chile. Repositorio académico de la Universidad de Chile.
- Daggitt, M., Mather, T., Pyle, D., & Page, S. (2014). AshCalc—a new tool for the comparison of the exponential, power-law and Weibull models of tephra deposition. *Journal of Applied Volcanology*, 3(7). <https://doi.org/10.1186/2191-5040-3-7>
- Davidson, J., MacMillan, N., Moorbath, S., Wörner, G., Harmon, R., & Lopez-Escobar, L. (1990). The Nevados de Payachata volcanic region (18°S/69°W, N. Chile) II. Evidence for widespread crustal involvement in Andean magmatism. *Contributions to Mineralogy and Petrology*.
- Folk, R., & Ward, W. (1957). Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27(1), 3-26.
- Ginibre, C., & Davidson, J. (2014). Sr Isotope Zoning in Plagioclase from Parinacota Volcano (Northern Chile): Quantifying Magma Mixing and Crustal Contamination. *Journal of Petrology*, 55(6), 1203-1238. <https://doi.org/10.1093/petrology/egu023>
- Ginibre, C., Davidson, J., & Wörner, G. (2005). Lower crustal influence on CVZ magmas: insights from chemical and isotopic zoning in plagioclase at Parinacota volcano, north Chile. *International Symposium on Andean Geodynamics, 6, 6th International Symposium on Andean Geodynamics, Universitat de Barcelona 12-14 septembre 2005: extended abstracts, 2005* (pp. 323-326). Paris. IRD Éditions.
- Ginibre, C., & Wörner, G. (2007). Variable parent magmas and recharge regimes of the Parinacota magma system (N. Chile) revealed by Fe, Mg and Sr zoning in plagioclase. *Lithos*, 98, 118-140. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.03.004>
- Ginibre, C., Wörner, G., & Kronz, A. (2002). Minor- and trace-element zoning in plagioclase: implications for magma chamber processes at Parinacota volcano, northern Chile.

Contributions to Mineralogy and Petrology, 143, 300-315. <https://doi.org/10.1007/s00410-002-0351-z>

- Hora, J., Singer, B., & Wörner, G. (2007). Volcano evolution and eruptive flux on the thick crust of the Andean Central Volcanic Zone: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ constraints from Volcán Parinacota, Chile. *Geological Society of America Bulletin*, 119(3-4), 343-362. <https://doi.org/10.1130/B25954.1>
- Hora, J., Singer, B., Wörner, G., Beard, B., Jicha, B., & Johnson, C. (2009). Shallow and deep crustal control on differentiation of calc-alkaline and tholeiitic magma. *Earth and Planetary Science Letters*, 285(1-2), 75-86. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.05.042>
- Jicha, B., Laabs, B., Hora, J., Singer, B., & Caffee, M. (2015). Early Holocene collapse of Volcán Parinacota, central Andes, Chile: Volcanological and paleohydrological consequences. *Geological Society of America Bulletin*. <https://doi.org/10.1130/B321247.1>
- Johnson, D., Hooper, P., & Conrey, R. (1999). XRF Analysis of Rocks and Minerals for Major and Trace Elements on a Single Low Dilution Li-tetraborate Fused Bead. *JCPDS-International Centre for Diffraction Data*.
- Kenley, R., & Seppänen, O. (2010). *Location-Based Management for Construction: Planning, Scheduling and Control*. Abingdon, Inglaterra: Spon Press.
- Le Bas, M., Le Maitre, W., Streckeisen, A., & Zanettin, B. (1986). A Chemical Classification of Volcanic Rocks Based on the Total Alkali-Silica Diagram. *Journal of Petrology*, 27(3), 746-750. <https://doi.org/10.1093/petrology/27.3.745>
- Mastin, L., Guffanti, M., Servranckx, R., Webley, P., Barsotti, S., Dean, K., . . . Waythomas, C. (2009). A multidisciplinary effort to assign realistic source parameters to models of volcanic ash-cloud transport and dispersion during eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 186, 10-21. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2009.01.008>
- McDonough, W. F., & Sun, S. -s. (1995). The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120(3-4), 223-253. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4)
- Nakamura, N. (1974). Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 38(5), 757-775. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(74\)90149-5](https://doi.org/10.1016/0016-7037(74)90149-5)
- Newhall, C., & Self, S. (1982). The Volcanic Explosivity Index (VEI): An Estimate of Explosive Magnitude for Historical Volcanism. *Journal of geophysical research*, 87, 1231-1238. <https://doi.org/10.1029/JC087iC02p01231>
- Pering, T. D. (2013). *Matlab Codes for Volcanology-Magma Density* [código de informático] . <https://thegithub.org/resources/2790>
- Pisello, A., Kueppers, U., Düffels, K., Nomikou, P., Dingwell, D., & Perugini, D. (2023). The porosity of felsic pyroclasts: laboratory validation of field-based approaches. *Bulletin of Volcanology*, 85(69). <https://doi.org/10.1007/s00445-023-01679-4>

- Rea, H., Swindles, G., & Roe, H. (2012). The Hekla 1947 tephra in the north of Ireland: regional distribution, concentration and geochemistry. *Journal of Quaternary Science*, 27(4), 425-431. <https://doi.org/10.1002/jqs.1566>
- Sparks, R. (1978). The dynamics of bubble formation and growth in magmas: a review and analysis. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*(3), 1-37.
- Sparks, R., Bursik, M., Carey, S., Gilbert, J., Glaze, L., Siggurdsson, H., & Woods, A. (1997). *Volcanic Plumes*. John Wiley & Sons, Inc.
- Stern, C. R. (2004). Active Andean volcanism: its geologic and tectonic setting. *Revista Geológica de Chile*, 31(2), 161-206. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4067/S0716-02082004000200001>
- Sun, S. -s., & McDonough, W. F. (1989). Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geological Society London Special Publications* , 42, 313-345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
- USGS-United States Geological Survey (2022.a). Reference Material Information Sheet, BHVO-2 (Hawaiian Volcano Observatory Basalt) [conjunto de datos] https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/s3fs-public/media/files/USGS-BHVO-2-IS_2022-508.pdf
- USGS-United States Geological Survey (2022.b). Reference Material Information Sheet, AGV-2 (Guano Valley Andesite) [conjunto de datos]. https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/s3fs-public/media/files/USGS-AGV-2-IS_2022-508_4.pdf
- USGS-United States Geological Survey (2022.c.). Reference Material Information Sheet, BCR-2 (Columbia River Basalt) [conjunto de datos]. https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/s3fs-public/media/files/USGS%20BCR-2%20IS_2022.pdf
- USGS-United States Geological Survey (2022.d.). Reference Material Information Sheet, GSP-2 (Granodiorite, Silver Plume, Colorado) [conjunto de datos]. https://emrlibrary.gov.yk.ca/ygs/open_files/2019/2019-1/Appendix%20C/C4_QAQC/GSP-2_StandardInformation_USGS.pdf
- Wilson , L., & Walker, G. (2009). Patterns of explosive activity deduced from fall deposits in frequently active volcanic regions. En T. Thordarson, S. Self, G. Larsen, S. Rowland, A. Hoskuldsson, & A. o. (IAVCEI) (Ed.), *Studies in Volcanology: The Legacy of George Walker. Special Publications of IAVCEI* (Vol. 2, pp. 167-180). Londres, Inglaterra: The Geological Society London.
- Wörner, G., Harmon, R., Davidson, J., Moorbath, S., Turner, D., McMillan, N., & Moreno, H. (1988). The Nevados de Payachata volcanic region (18°S/69°W, N. Chile) I. Geological, geochemical, and isotopic observations. *Bulletin of Volcanology*.

WSU GeoAnalytical Lab. *Peter Hooper GeoAnalytical Lab.* Washington State University.
<https://environment.wsu.edu/facilities/geoanalytical-lab>

Anexos

Anexo A. Cálculos de densidad

A.1. Cálculo de densidad mediante método manual

Pómez blanquecina:

Muestra	Código	Lugar	Medidas (mm)			Peso (gr)	Volumen (mm ³)	Densidad (gr/mm ³)	Densidad (kg/m ³)	Densidad vidrio (kg/m ³)	Vesículas	% Vesículas
			a	b	c							
Pómez	Bomba		73.7	63	55.2	46.6	134197.9054	0.000347248	347.2483408	2602.3	0.866560988	86.6560988
Pómez	Bomba		43.4	42.1	35.6	11.3	34058.1023	0.000331786	331.7859551	2602.3	0.872502803	87.2502803
Pómez	Bomba		66.6	48.6	40.2	18.3	68129.49563	0.000268606	268.6061276	2602.3	0.89678126	89.678126
Pómez	Bomba		43.9	42.9	41.8	14.3	41218.93026	0.000346928	346.9279748	2602.3	0.866684097	86.6684097
Pómez	PARI.T3.M3.M (BOMBA), (M3)		71	58.3	52.8	68.3	114435.1513	0.000596845	596.8445814	2602.3	0.770647281	77.0647281
Pómez			72.4	55.9	50.3	70.7	106590.1274	0.000663288	663.2884461	2602.3	0.745114535	74.5114535
Pómez	M3 (en letras negras)		64.2	53.9	29.6	17.3	53630.78164	0.000322576	322.5759437	2602.3	0.876041985	87.6041985
Pómez	s/nombre (ziploc)		71.3	53.2	36.7	28.5	72889.64729	0.000391002	391.0020292	2602.3	0.84974752	84.974752
Pómez	s/nombre (ziploc)		52	34.9	25.1	6.6	23850.69915	0.000276721	276.7214478	2602.3	0.893662742	89.3662742
Pómez	s/nombre (ziploc)		65.9	57.4	43	18.8	85165.63421	0.000220746	220.746316	2602.3	0.91517261	91.517261
Pómez	M5		69	58.7	52	38.9	110278.0703	0.000352745	352.7446563	2602.3	0.864448889	86.4448889
Pómez	M5		64.6	36.5	34.9	20.8	43087.3156	0.000482741	482.740686	2602.3	0.814494606	81.4494606
Pómez	M4	CE	52.4	41.5	28.6	9.3	32390.76274	0.000287119	287.1188948	2602.3	0.889667258	88.9667258
Pómez	M4	CE	41.4	38.7	34.3	16.8	28683.19803	0.000585709	585.7087478	2602.3	0.774926508	77.4926508
Pómez		CE	61.2	42.6	29	8.8	39752.66624	0.000221369	221.3687994	2602.3	0.914933405	91.4933405
Pómez			60.3	47.2	30.7	13.6	45750.54886	0.000297264	297.2641933	2602.3	0.885768669	88.5768669
Pómez			59.5	34.5	24	9.1	25795.61728	0.000352773	352.7731049	2602.3	0.864437957	86.4437957

Pómez		52.	31.	29.	15.4	25928.091	0.0005939	593.95037	2602.3	0.7717594	77.17594
Pómez		8	9	4		96	5	73		52	52
Pómez		34.	24.	28.	2.8	12627.026	0.0002217	221.74657	2602.3	0.9147882	91.47882
Pómez		5	7	3		91	47	73		35	35
Pómez		57.	45.	34.	13.9	47547.772	0.0002923	292.33756	2602.3	0.8876618	88.76618
Pómez		1	7	8		33	38	53		51	51
Pómez	CE	62.	43.	40.	21.3	57114.154	0.0003729	372.93732	2602.3	0.8566893	85.66893
Pómez	2	5	2	4		44	37	54		42	42
Pómez		57.	39.	36.	12.7	42884.264	0.0002961	296.14592	2602.3	0.8861983	88.61983
Pómez		4	2	4		44	46	12		93	93
Pómez		50.	39	37.	13.8	38693.300	0.0003566	356.65089	2602.3	0.8629478	86.29478
Pómez		8	39	3		25	51	07		19	19
Pómez		69	49.	37.	11.6	67605.110	0.0001715	171.58466	2602.3	0.9340642	93.40642
Pómez		9	9	5		41	85	17		27	27
Pómez		19.	16.	10.	0.5	1740.5585	0.0002872	287.26410	2602.3	0.8896114	88.96114
Pómez		8	3	3		69	64	53		57	57
Pómez		33.	27.	23.	3.2	11064.533	0.0002892	289.21237	2602.3	0.8888627	88.88627
Pómez		1	4	3		29	12	93		83	83
Pómez		45.	30.	18.	3.4	13913.304	0.0002443	244.37040	2602.3	0.9060944	90.60944
Pómez		5	9	9		9	7	83		52	52
Pómez		52.	40.	35	12	38721.281	0.0003099	309.90709	2602.3	0.8809103	88.09103
Pómez		3	4			37	07	95		1	1
Pómez	PARI.T1.M5.M	55.	23	21.	5.8	14558.266	0.0003983	398.39909	2602.3	0.8469050	84.69050
Pómez	.U5	2		9		02	99	45		09	09
Pómez	PARI.T1.M2.M	47.	38.	26.	12.4	25297.209	0.0004901	490.17263	2602.3	0.8116386	81.16386
Pómez	.U5, phi=-5	3	4	6		89	73	39		91	91
Pómez		57.	51.	40.	24.4	62442.876	0.0003907	390.75714	2602.3	0.8498416	84.98416
Pómez		4	3	5		78	57	09		24	24
Pómez		36.	36.	28.	6.9	19848.800	0.0003476	347.62806	2602.3	0.8664150	86.64150
Pómez		8	4	3		2	28	46		69	69
Pómez	PARI.T1.M5.M	21.	18.	17.	1.14	3756.7248	0.0003050	305.05294	2602.3	0.8827756	88.27756
Pómez	.U5	8	7	6		6	73	53		41	41
Pómez	phi=-4	28	22.	18.	4.74	6151.3640	0.0007715	771.53618	2602.3	0.7035175	70.35175
Pómez		2	9			6	79	36		85	85
Pómez		39.	22.	20	4.46	9407.1850	0.0004743	474.31829	2602.3	0.8177311	81.77311
Pómez		4	8			2	42	18		23	23
Pómez		20.	18.	11.	0.99	2277.1687	0.0004387	438.70266	2602.3	0.8314173	83.14173
Pómez		6	2	6		9	74	03		38	38
Pómez		30.	24	13.	1.93	5199.2101	0.0003725	372.55658	2602.3	0.8568356	85.68356
Pómez		2	7	7		78	57	72		5	5
Pómez		36.	30	19.	4.17	11114.326	0.0003753	375.37137	2602.3	0.8557539	85.57539
Pómez		1	6			2	49	71		97	97
Pómez		22.	15.	14.	1.65	2497.1389	0.0006627	662.75848	2602.3	0.7453181	74.53181
Pómez		4	1	1		5	03	58		85	85
Pómez		19	16	8.9	0.59	1416.6488	0.0004164	416.47582	2602.3	0.8399585	83.99585
Pómez		47				47	76	68		65	65
Pómez		27.	13.	12	2.13	2280.7962	0.0009355	935.59430	2602.3	0.6404740	64.04740
Pómez		5	2			39	67	94		78	78
Pómez		27.	25.	14	1.99	5101.6532	0.0003914	391.44173	2602.3	0.8495785	84.95785
Pómez		4	4			7	54	42		52	52
Pómez		32.	29.	18	3.14	9097.2669	0.0003453	345.37845	2602.3	0.8672795	86.72795
Pómez		5	7			2	27	78		39	39

Pómez		27.	27.	18.	1.71	7458.5205	0.0002302	230.20651	2602.3	0.9115372	91.15372
Pómez		7	5	7	7	69	07	14		9	9
Pómez		24.	21	14.	2.08	3960.0560	0.0005252	525.24508	2602.3	0.7981612	79.81612
Pómez		5	21	7		8	45	7		09	09
Pómez		35.	26.	20.	3.26	10202.667	0.0003202	320.21036	2602.3	0.8769510	87.69510
Pómez		6	7	5	7	72	1	95		17	17
Pómez		23.	17.	12.	2.05	2699.0689	0.0007613	761.37365	2602.3	0.7074227	70.74227
Pómez		8	9	1	5	6	74	54		97	97
Pómez		27	17	15.	2.58	3821.2762	0.0006772	677.26064	2602.3	0.7397453	73.97453
Pómez				9	8	24	61	49		62	62
Pómez		24.	16.	12.	1.11	2571.7705	0.0004342	434.21447	2602.3	0.8331420	83.31420
Pómez		4	5	2	67	78	14	06		4	4
Pómez		32.	28.	13.	2.82	6558.2882	0.0004309	430.90511	2602.3	0.8344137	83.44137
Pómez		7	8	3	6	93	05	94		42	42
Pómez		17.	16.	15.	1.05	2272.3684	0.0004642	464.27330	2602.3	0.8215911	82.15911
Pómez		2	6	2	5	21	73	64		67	67
Pómez		30.	17	15.	3.41	4045.6749	0.0008438	843.86413	2602.3	0.6757237	67.57237
Pómez		1		1	4	51	64	66		3	3
Pómez		24.	18	13.	1.32	3140.3360	0.0004209	420.97405	2602.3	0.8382300	83.82300
Pómez		5		6	2	17	74	92		05	05
Pómez		22	16.	15.	2.00	3040.3705	0.0006581	658.14346	2602.3	0.7470916	74.70916
Pómez			6	9	1	38	43	47		25	25
Pómez		26	22.	17.	2.52	5237.8203	0.0004826	482.64351	2602.3	0.8145319	81.45319
Pómez			5	1	8	52	44	01		49	49
Pómez	PARI.T1.M3.M	36.	35.	23.	4.64	16234.041	0.0002860	286.00394	2602.3	0.8900957	89.00957
Pómez	.U5	8	7	6	3	81	04	5		06	06
Pómez	phi=-4	35.	22.	19.	4.18	8281.0581	0.0005053	505.37020	2602.3	0.8057986	80.57986
Pómez		6	9	4	5	17	7	04		4	4
Pómez		29.	21	18	3.17	5759.4818	0.0005505	550.57036	2602.3	0.7884293	78.84293
Pómez		1			1	12	7	44		26	26
Pómez		21.	19	17.	1.88	3725.5676	0.0005067	506.76841	2602.3	0.8052613	80.52613
Pómez		9		1	8	04	68	78		39	39
Pómez		30.	27.	27.	5	12159.829	0.0004111	411.18997	2602.3	0.8419897	84.19897
Pómez		6	3	8		68	9			9	9
Pómez		22.	16.	14.	1.34	2780.5828	0.0004829	482.99226	2602.3	0.8143979	81.43979
Pómez		3	2	7	3	17	92	76		3	3
Pómez		35.	24.	14.	4.31	6520.3818	0.0006623	662.38452	2602.3	0.7454618	74.54618
Pómez		4	6	3	9	36	85	12		91	91
Pómez		30.	24.	24	6.05	9474.0381	0.0006386	638.69280	2602.3	0.7545660	75.45660
Pómez		4	8		1	34	93	6		35	35
Pómez		18.	16.	13.	0.99	2204.8042	0.0004531	453.10144	2602.3	0.8258842	82.58842
Pómez		7	2	9	9	82	01	23		4	4
Pómez		28.	25	11.	1.51	4230.4163	0.0003569	356.93886	2602.3	0.8628371	86.28371
Pómez		6		3		07	39	61		57	57
Pómez	PARI.T1.M2.M	16	12.	8.7	0.34	881.90788	0.0003877	387.79560	2602.3	0.8509796	85.09796
Pómez	.U5		1		2	97	96	09		71	71
Pómez	phi=-3	23.	18.	10.	1.04	2354.2906	0.0004417	441.74664	2602.3	0.8302476	83.02476
Pómez		7	6	2		85	47	01		12	12
Pómez		20.	16.	10.	0.68	1923.2212	0.0003556	355.65331	2602.3	0.8633311	86.33311
Pómez		3	6	9	4	38	53	05		65	65
Pómez		12.	10	8.3	0.28	547.57959	0.0005186	518.64605	2602.3	0.8006970	80.06970
Pómez		6			4	95	46	67		54	54

Pómez		13.	11.	9.3	0.28	763.43528	0.0003706	370.69284	2602.3	0.8575518	85.75518
Pómez		4	7		3	92	93	59		4	4
Pómez		17	14.	9.7	0.68	1269.2191	0.0005397	539.70191	2602.3	0.7926058	79.26058
Pómez			7		5	4	02	47		05	05
Pómez		14.	12.	11.	0.55	1035.2238	0.0005361	536.11590	2602.3	0.7939838	79.39838
Pómez		6	2	1	5	94	16	98		18	18
Pómez		18.	13.	10.	0.44	1422.4691	0.0003149	314.94531	2602.3	0.8789742	87.89742
Pómez		6	4	9	8	71	45	41		48	48
Pómez		12.	10.	6.1	0.18	422.55991	0.0004425	442.54078	2602.3	0.8299424	82.99424
Pómez		6	5		7	99	41	82		4	4
Pómez		18.	11.	9	0.44	1034.2751	0.0004331	433.15360	2602.3	0.8335497	83.35497
Pómez		6	8		8	33	54	25		05	05
Pómez		17	13.	7.5	0.30	874.54085	0.0003464	346.46751	2602.3	0.8668610	86.68610
Pómez			1		3	49	68	87		39	39
Pómez		17.	13.	7.6	0.46	955.52168	0.0004855	485.59860	2602.3	0.8133963	81.33963
Pómez		4	8		4	88	99	59		78	78
Pómez		17.	15.	7.8	0.60	1079.2156	0.0005624	562.44553	2602.3	0.7838659	78.38659
Pómez		5	1		7	16	46	06		91	91
Pómez		17.	15	11.	0.92	1575.8228	0.0005876	587.62949	2602.3	0.7741884	77.41884
Pómez		6	4		6	75	29	48		12	12
Pómez	PARI.T1.M5.M	5.5	5	4.2	0.03	60.475658	0.0006118	611.81640	2602.3	0.7648939	76.48939
Pómez	.U5				7	58	16	46		77	77
Pómez	phi=-2	6.3	5.7	5.1	0.04	95.892403	0.0004797	479.70431	2602.3	0.8156614	81.56614
Pómez					6	36	04	85		08	08
Pómez		9.8	8.1	6.1	0.11	253.53595	0.0004338	433.86351	2602.3	0.8332769	83.32769
Pómez						19	64	78		02	02
Pómez		17.	8.6	6.4	0.28	515.85789	0.0005505	550.53921	2602.3	0.7884412	78.84412
Pómez		9			4	13	39	79		95	95
Pómez		6.8	5.3	5.2	0.06	98.126599	0.0006827	682.79141	2602.3	0.7376200	73.76200
Pómez					7	34	91	9		21	21
Pómez		10.	7.7	5.5	0.12	230.61384	0.0005507	550.70414	2602.3	0.7883779	78.83779
Pómez		4			7	47	04	42		18	18
Pómez		7.4	5.4	4.3	0.02	89.968930	0.0002334	233.41391	2602.3	0.9103047	91.03047
Pómez					1	41	14	19		64	64
Pómez		7.5	6.5	5.3	0.06	135.28483	0.0005100	510.03499	2602.3	0.8040060	80.40060
Pómez					9	36	35	91		72	72
Pómez		10.	9.2	6.2	0.17	316.58038	0.0005622	562.25845	2602.3	0.7839378	78.39378
Pómez		6			8	61	58	89		78	78
Pómez		6.2	5.8	3.9	0.04	73.431586	0.0006128	612.81530	2602.3	0.7645101	76.45101
Pómez					5	69	15	24		25	25
Pómez		9.5	5.5	4.4	0.06	120.37535	0.0005316	531.67027	2602.3	0.7956921	79.56921
Pómez					4	85	7	53		66	66
Pómez		8.4	6.5	6.3	0.10	180.10750	0.0005718	571.88066	2602.3	0.7802403	78.02403
Pómez					3	68	81	07		03	03
Pómez		9.2	6.8	4	0.05	131.02535	0.0004197	419.76607	2602.3	0.8386942	83.86942
Pómez					5	76	66	43		03	03
Pómez		7.3	5.9	3.4	0.05	76.674757	0.0007042	704.27350	2602.3	0.7293649	72.93649
Pómez					4	5	74	23		84	84
Pómez		11.	7.2	6.3	0.21	268.37997	0.0007824	782.47267	2602.3	0.6993149	69.93149
Pómez		3				72	73	99		6	6
Pómez		8.4	5.5	3.9	0.07	94.342027	0.0007737	773.78027	2602.3	0.7026552	70.26552
Pómez					3	39	8	61		37	37

Pó- mez		12.	6.8	6.6	0.23	296.08882	0.0007936	793.68074	2602.3	0.6950079	69.50079
Pó- mez		6			5	44	81	92		74	74
Pó- mez		8.4	4.5	4.2	0.03	83.126541	0.0004571	457.13437	2602.3	0.8243344	82.43344
					8	61	34	93		81	81
Pó- mez	PARI.T1.M3.M	4.4	4.1	3.3	0.02	31.170882	0.0007057	705.78688	2602.3	0.7287834	72.87834
Pó- mez	.U5				2	31	87	73		27	27
Pó- mez	phi=-1	5.7	4.4	2.6	0.02	34.142828	0.0006443	644.35199	2602.3	0.7523913	75.23913
Pó- mez					2	96	52	63		48	48
Pó- mez	2 mm	4.7	4	2.8	0.01	27.562239	0.0006167	616.78587	2602.3	0.7629843	76.29843
Pó- mez					7	55	86	37		32	32
Pó- mez		7.2	4.3	4.1	0.03	66.463534	0.0005416	541.65040	2602.3	0.7918570	79.18570
Pó- mez					6	18	5	19		49	49
Pó- mez		5.7	4.2	2.5	0.02	31.337386	0.0007658	765.85837	2602.3	0.7056994	70.56994
Pó- mez					4	72	58	28		3	3
Pó- mez		5.6	2.7	2.5	0.02	19.792033	0.0010105	1010.5075	2602.3	0.6116867	61.16867
Pó- mez						72	08	75		48	48
Pó- mez		4.3	3.1	2.8	0.01	19.542800	0.0008698	869.88555	2602.3	0.6657243	66.57243
Pó- mez					7	7	86	33		39	39
Pó- mez		7.6	4.3	2.5	0.02	42.778019	0.0005844	584.41227	2602.3	0.7754247	77.54247
Pó- mez					5	97	12	57		11	11
Pó- mez		7.6	4.5	3.5	0.03	62.674773	0.0005105	510.57224	2602.3	0.8037996	80.37996
Pó- mez					2	44	72	85		2	2
Pó- mez		6.1	4.2	3.1	0.03	41.585261	0.0007935	793.55036	2602.3	0.6950580	69.50580
Pó- mez					3	96	5	97		76	76
Pó- mez		6.5	4.5	2.9	0.03	44.414266	0.0008105	810.55037	2602.3	0.6885253	68.85253
Pó- mez					6	14	5	33		92	92
Pó- mez		4.5	4	3.3	0.01	31.101767	0.0005144	514.44022	2602.3	0.8023132	80.23132
					6	27	4	01		54	54
Pó- mez	PARI.T1.M3.M	18.	10.	7.6	0.46	819.78603	0.0005684	568.44100	2602.3	0.7815620	78.15620
Pó- mez	.U5	9	9		6	66	41	68		77	77
Pó- mez	phi=-2	12.	7.6	6.6	0.18	323.04368	0.0005572	557.20017	2602.3	0.7858816	78.58816
Pó- mez		3				94		42		53	53
Pó- mez	4 mm	11.	9.1	6.4	0.13	350.68551	0.0003963	396.36652	2602.3	0.8476860	84.76860
Pó- mez		5			9	59	67	69		75	75
Pó- mez		10.	7.4	6.4	0.19	257.89543	0.0007677	767.75302	2602.3	0.7049713	70.49713
Pó- mez		4			8	53	53	26		63	63
Pó- mez		16.	8.6	6.8	0.17	502.16892	0.0003484	348.48831	2602.3	0.8660844	86.60844
Pó- mez		4			5	49	88			98	98
Pó- mez		9.9	7.4	6.5	0.17	249.33250	0.0007058	705.88470	2602.3	0.7287458	72.87458
Pó- mez					6	1	85	95		37	37
Pó- mez		10.	7.4	5.6	0.12	221.31891	0.0005693	569.31418	2602.3	0.7812265	78.12265
Pó- mez		2			6	93	14	44		36	36
Pó- mez		9.6	9.3	6.5	0.15	303.85484	0.0005035	503.52990	2602.3	0.8065058	80.65058
Pó- mez					3	15	3	68		19	19
Pó- mez		11.	5.8	5.3	0.16	186.70694	0.0008783	878.38189	2602.3	0.6624594	66.24594
Pó- mez		6			4	58	82	04		05	05
Pó- mez		9.1	7.7	3.7	0.05	135.74769	0.0003977	397.79680	2602.3	0.8471364	84.71364
Pó- mez					4	5	97	98		52	52
Pó- mez		5.6	4.8	4.1	0.03	57.704773	0.0006758	675.85396	2602.3	0.7402859	74.02859
					9	86	54	13		16	16
PRO ME- DIO							0.0004943	494.36783		0.8100265	81.00265
							68	81		77	77

Tabla A.A.1.: Tabla de pómez blanquecina con las mediciones de densidad mediante método manual.

Escorias:

Muestra	Código	Lugar	Medidas (mm)			Peso (gr)	Volumen(mm ³)	Densidad(gr/mm ³)	Densidad (kg/m ³)	Densidad vidrio (kg/m ³)	Vesículas	% Vesículas
			a	b	c							
Escoria	CE4	CE4	27.3	13.7	10.2	1.588	1997.478016	0.000795002	795.0024917	2602.3	0.694500061	69.4500061
Escoria	CE4	CE4	28.2	24.2	12.5	2.2	4466.559355	0.000492549	492.5491469	2602.3	0.810725456	81.0725456
Escoria	CE4	CE4	23.3	23.1	10.3	1.151	2902.710661	0.000396526	396.5259148	2602.3	0.847624826	84.7624826
Escoria	CE4	CE4	21.4	19.6	9.2	1.606	2020.488088	0.000794857	794.8574453	2602.3	0.694555799	69.4555799
Escoria	CE4	CE4	17	13.9	11.7	1.004	1447.598771	0.000693562	693.5623463	2602.3	0.733481018	73.3481018
Escoria	CE4	CE4	20.8	15.3	7.9	0.741	1316.377587	0.000562908	562.9083989	2602.3	0.783688122	78.3688122
Escoria	CE4	CE4	25.9	13.5	11.7	0.997	2141.992849	0.000465454	465.4544017	2602.3	0.821137301	82.1137301
Escoria	CE4	CE4	22.4	15.7	15.5	0.931	2854.15787	0.000326191	326.1907864	2602.3	0.874652889	87.4652889
Escoria	CE4	CE4	21	15.6	15.1	1.272	2590.117479	0.000491097	491.0974156	2602.3	0.81128332	81.128332
Escoria	CE4	CE4	14.4	9.4	7.1	0.131	503.2077449	0.00026033	260.3298565	2602.3	0.899961628	89.9961628
Escoria	CE4	CE4	14.5	10.1	9.8	0.389	751.4741987	0.000517649	517.6491763	2602.3	0.801080131	80.1080131
Escoria	CE4	CE4	10.7	9.2	8.7	0.266	448.4246522	0.000593188	593.1877266	2602.3	0.77205252	77.205252
Escoria	CE4	CE4	12.3	11.4	10.2	0.33	748.8740072	0.000440662	440.6615757	2602.3	0.830664575	83.0664575
Escoria	CE4	CE4	14.4	8.3	5.8	0.285	362.9670488	0.000785195	785.1952427	2602.3	0.698268746	69.8268746

Es-coria	CE4	CE 4	10.1	8	7.6	0.282	321.5315361	0.000877052	877.0523831	2602.3	0.662970302	66.2970302
Es-coria	CE4	CE 4	30.1	15.8	14.2	1.687	3535.986101	0.000477095	477.0946355	2602.3	0.816664245	81.6664245
Es-coria	CE4	CE 4	20.9	14.8	11.6	1.215	1878.73105	0.000646713	646.7131099	2602.3	0.75148403	75.148403
Es-coria	CE4	CE 4	18.6	15.3	14.6	0.778	2175.483798	0.000357622	357.6216016	2602.3	0.862574799	86.2574799
Es-coria	CE4	CE 4	24.9	20.5	10.3	1.148	2752.891249	0.000417016	417.0161101	2602.3	0.839750947	83.9750947
Es-coria	Bolsa ziploc sola		30.8	17.8	14.6	1.721	4191.043774	0.000410638	410.6375626	2602.3	0.842202066	84.2202066
Es-coria	Bolsa ziploc sola		34.7	17	15.6	2.27	4818.386317	0.000471112	471.11208	2602.3	0.818963194	81.8963194
Es-coria	Bolsa ziploc sola		33.9	14.3	12	1.537	3045.899741	0.000504613	504.612801	2602.3	0.80608969	80.608969
Es-coria	Bolsa ziploc sola		40.2	19	14.9	3.194	5958.878698	0.000536007	536.0068835	2602.3	0.794025714	79.4025714
Es-coria	T1.M4.E1		20.2	19.3	12.1	1.144	2469.975646	0.000463162	463.1624615	2602.3	0.822018037	82.2018037
PR								0,00053	532.3417		0.795434	79.54341
OM								2342	314		142	42
EDI												
O												

Tabla A.A.2.: Tabla de escorias con las mediciones de densidad mediante método manual.

A.2. Cálculo de densidad mediante método Arquímedes

Código Muestra (Lab. Experimento)	TIPO	Densidad (gr/cm ³)	Promedio Densidad (gr/cm ³)	Promedio Densidad (kg/m ³)	Densidad vidrio (kg/m ³)	Vesículas	% Vesículas
5	Pómez parda	0.83764706	0.60610152	606.101522	2602.3	0.76709007	76.7090066
6	Póm parda peq	0.37455598					
10	Pómez Blanca	0.40991359	0.4361215	436.121496	2602.3	0.83240922	83.2409216
12	Póm blanq. peq	0.55076233					

16	Pómez blanq. Grande	0.26563728						
24	Pómez blanq. Grande	0.51817279						
Escoria								
1	Esc pequeña	0.32484924	0.5133933	513.393305	2602.3	0.80271556	80.2715557	
2	Esc pequeña	0.52737662						
3	Esc pequeña	1.00995032						
4	Esc pequeña	0.47530466						
22	Esc pequeña	0.22948568						
Líticos Negros								
19	Lit N (Escoria densa)	0.96574468	0.96574468	965.744681	2602.3	0.62888803	62.8888029	
20	Lit Negro	1.76758656	1.76758656	1767.58656	2602.3	0.32075988	32.0759881	

Tabla A.A.3.: Tabla de pómez blanquecina, pómez parda, escoria y líticos negros con las mediciones de densidad mediante método de Arquímedes.

TIPO	Código muestra (Lab. Experimento)	MUESTRA (código microscopio)	Densidad (gr/cm ³)	Promedio Densidad (gr/cm ³)	Promedio Densidad (kg/m ³)	Densidad vidrio (kg/m ³)	Vesículas	% Vesículas
Escoria superficial	13	T1.M5.E1	1.09987713	1.09987713	1099.87713	2602.3	0.57734422	57.7344223
Escoria superficial	23	T2.M2.E1	1.65843315	1.65843315	1658.43315	2602.3	0.36270486	36.2704858

Tabla A.A.4.: Tabla de escoria (muestras T2.M2.E1, T3.M1.M, T1.M5.1) con las mediciones de densidad mediante método de Arquímedes.

Anexo B. Cálculo de volumen lavas

B.1. Lavas unidad Parinacota 1

Lava	Área (km ²)- QGIS**	Espesor (m)-GE*	Espesor (km)	Volumen (km ³)
oclb -1	0.308	87.5	0.0875	0.02695
oclb -2	0.358	130	0.13	0.04654
ocb -1	6.592	119.666667	0.11966667	0.78884267
ocb -2	0.422	120	0.12	0.05064

ocb -3	0.32	136	0.136	0.04352
ocb -4	0.057	83	0.083	0.004731
ocl1 -1	0.409	141	0.141	0.057669
ocl1 -2	0.122	48	0.048	0.005856
ocl1 -3	0.21	42	0.042	0.00882
ocl2 -1	2.263	90	0,09	0.20367

Tabla A.B.1.: Se observa el volumen en km^3 para cada flujo de lava pertenecientes a la unidad Parinacota 1. Estas son obtenidas de Clavero et al. (2012) y Hora et al. (2007), donde notación es de Hora et al. (2007); oclb es andesita-dacita intermedia, ocb es Couleés dacíticos, ocl1 son dacitas del flanco norte y ocl2 son andesitas del flanco oeste. Se observa que lavas oclb-1, oclb-2, ocb-1, ocb-2, ocb-3, ocl1-1, ocl2-1 poseen mayor volumen que unidad Chungará ($0.01\text{-}0.02 \text{ km}^3$).

*GE= obtenido con plataforma Google Earth Pro.

**QGIS= Obtenido con software Qgis versión 3.10.6-A Coruña.

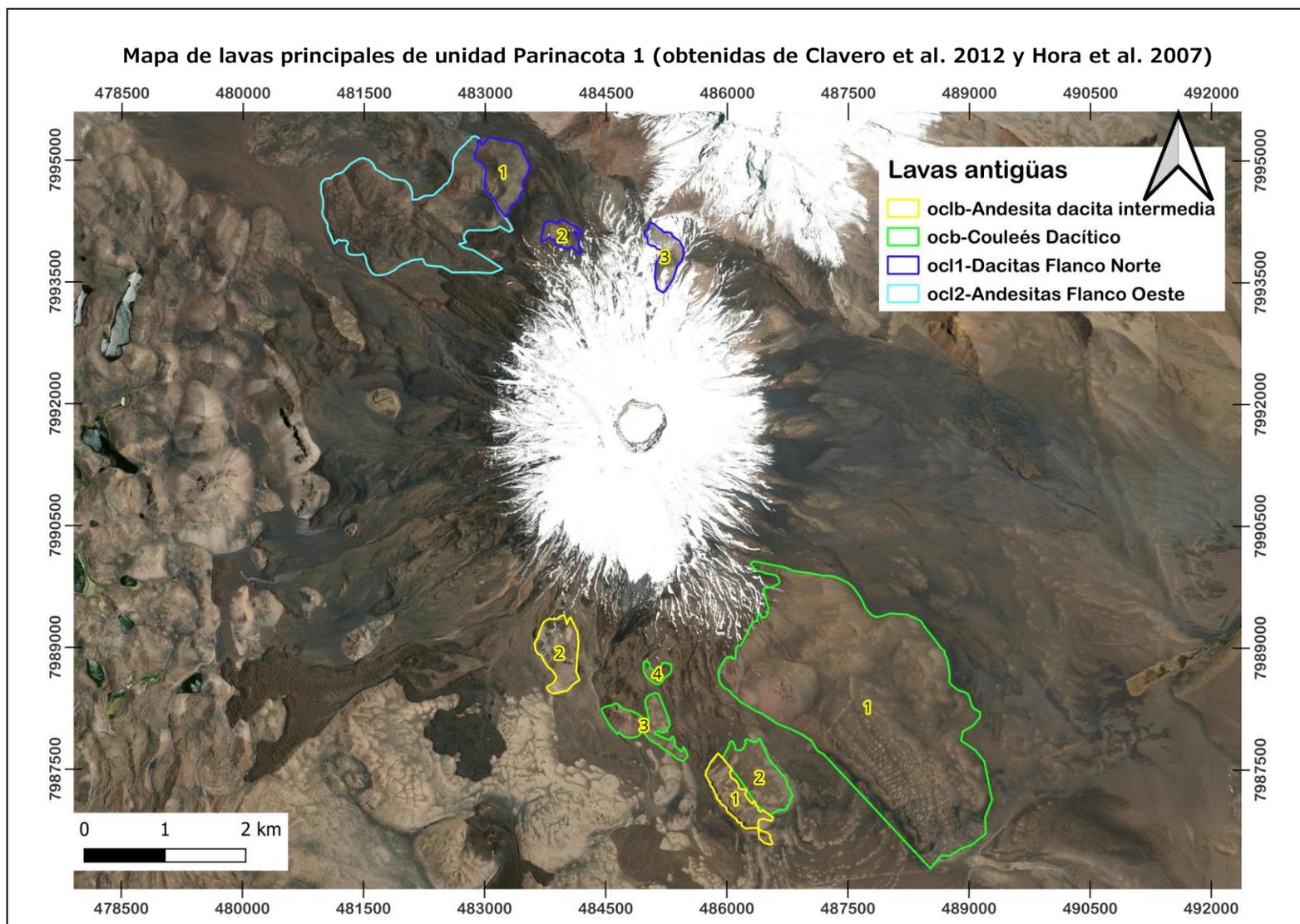


Figura A.B.1.: Mapa de lavas principales pertenecientes a la unidad Parinacota 1. Lavas están indicadas con diferentes líneas de color según a la litología que pertenecen de Hora et al. (2007).

B.2. Lavas unidad Parinacota 3

Lava	Espesor (m) GE*	Espesor (km)	Área (m ²) GE*	Área (km ²)	Volumen (km ³)
Sur	15.5	0.0155	259142	0.259142	0.004016701
Lateral	18	0.018	203040	0.20304	0.00365472
Norte	13.3333333	0.01333333	534503	0.534503	0.007126707

Tabla A.B.2.: Se obtiene un ejemplar de lava sur, lava lateral y lava del norte pertenecientes a la unidad Parinacota 3. Columna sexta "Volumen (km³)" es el volumen de la lava correspondiente, calculado como área (km²) por espesor (km). El espesor se obtiene a partir de perfiles de elevación en 3 puntos de la lava de la sección frontal y lateral de la colada de lava.

*GE= obtenido con plataforma Google Earth Pro.

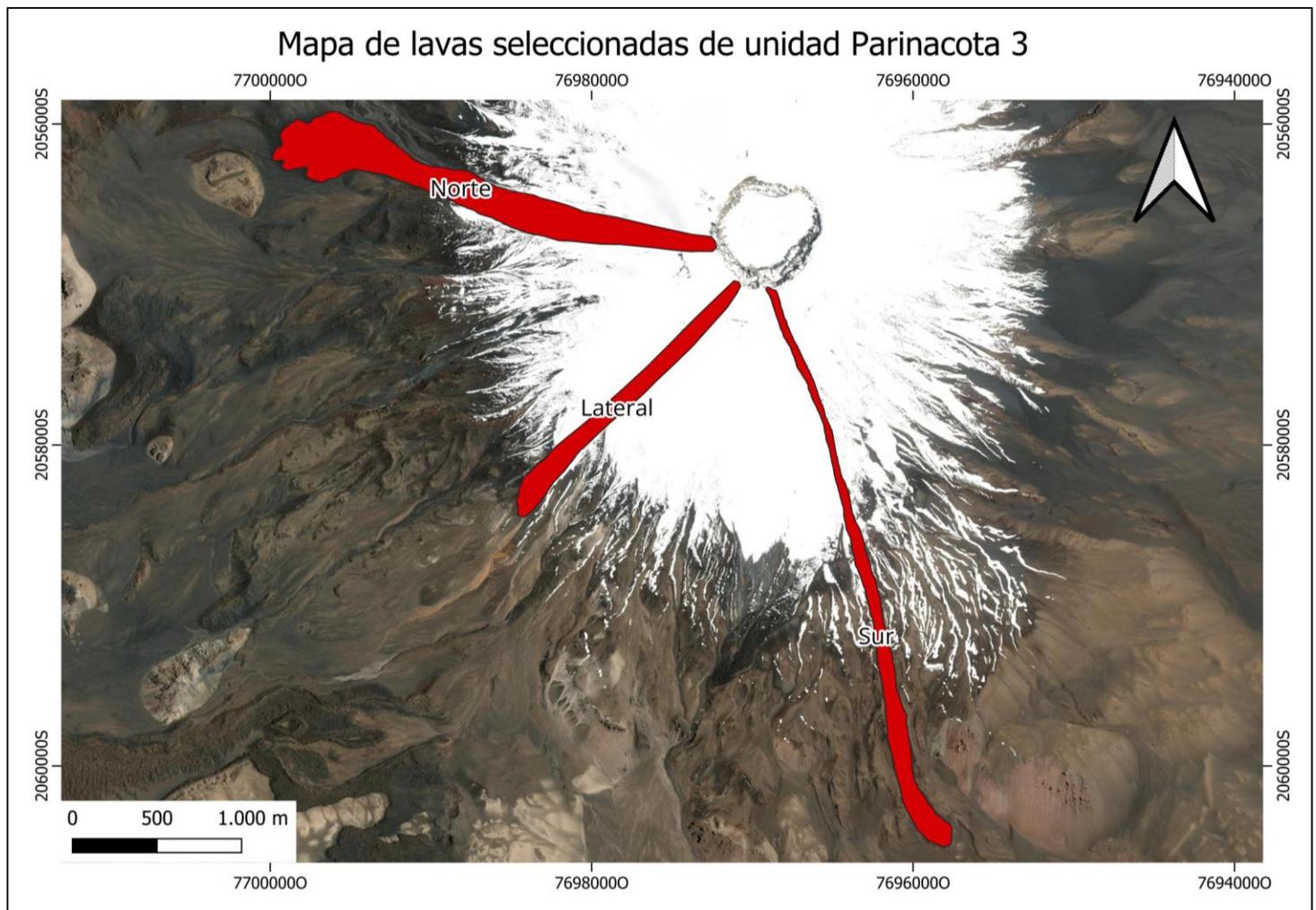


Figura A.B.2.: Mapa de lavas seleccionadas pertenecientes a unidad Parinacota 3. Se observa la lava sur, lateral y norte.

Anexo C. Columnas estratigráficas y edad de Chungará

Unidades Presentes	Punto de estudio	Columna estratigráfica	Coor- nada E	Coor- nada S	Atura(msnm)
Chungará, Tambo Quemado, Block & Ash	MIPA 2	CE2	483872	7986205	4667
Chungará, Tambo Quemado, Block & Ash	MIPA 3	CE3	485505	7986290	4612
Chungará, Tambo Quemado	MIPA 4	CE4	488196	7986275	4570
Chungará, Tambo Quemado, Gran Cou- leé	MIPA 7	CE5	488706	7986234	4594
Gran Cou- leé	MIPA 9	CE6	486002	7982778	4579

Tabla A.C.1: Tabla con puntos de columnas estratigráficas levantadas.

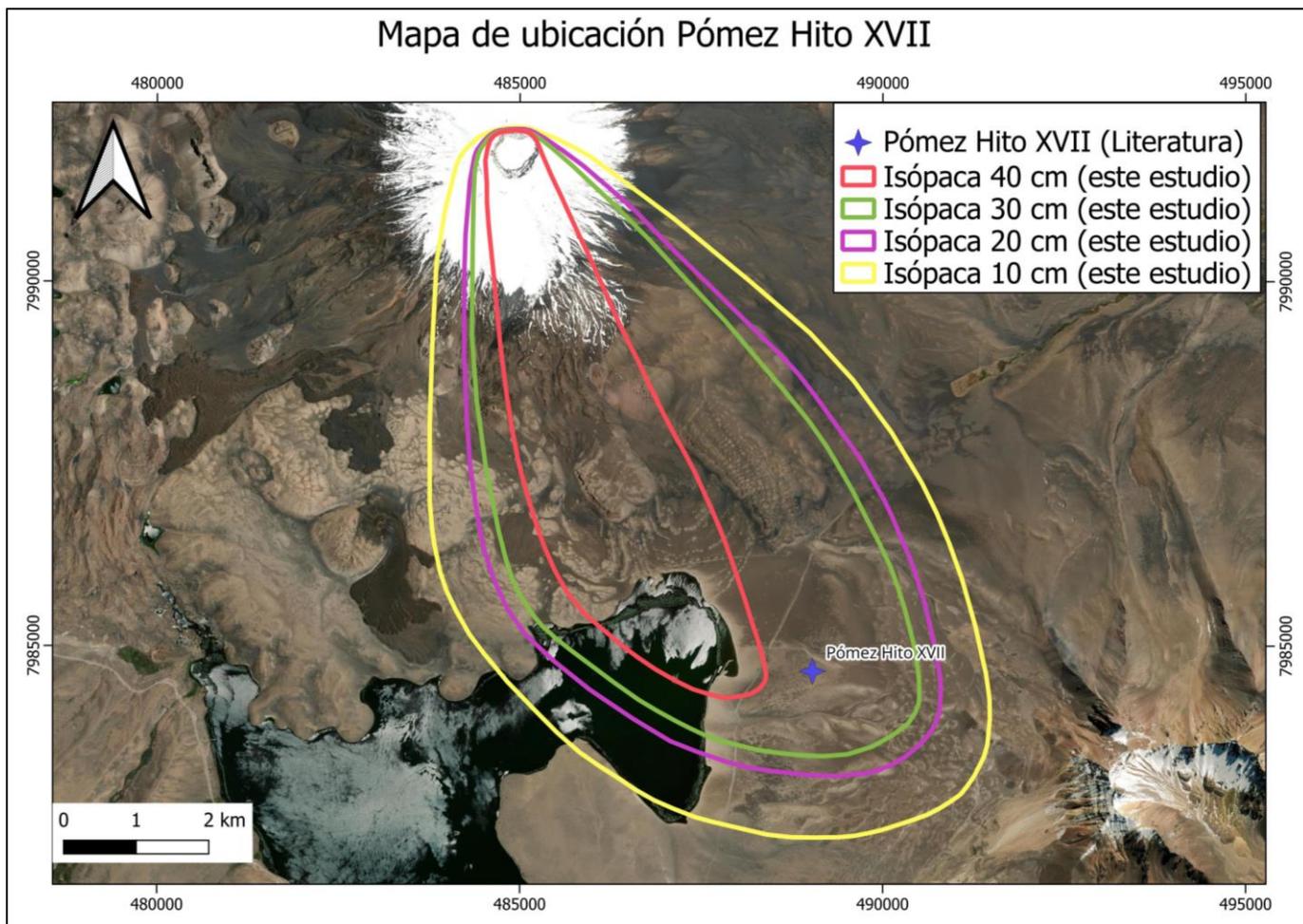


Figura A.C.1.: Mapa donde se presenta el punto Pómez Hito XVII obtenido de Bertin et al. (2022). Este punto es obtenido de la columna estratigráfica Hito XVII; este punto es definido con aproximadamente 0.36 cm de espesor. Cabe destacar que este punto está contenido en la isópaca de 30 cm de la unidad Chungará.

Anexo D. Columna estratigráfica 1

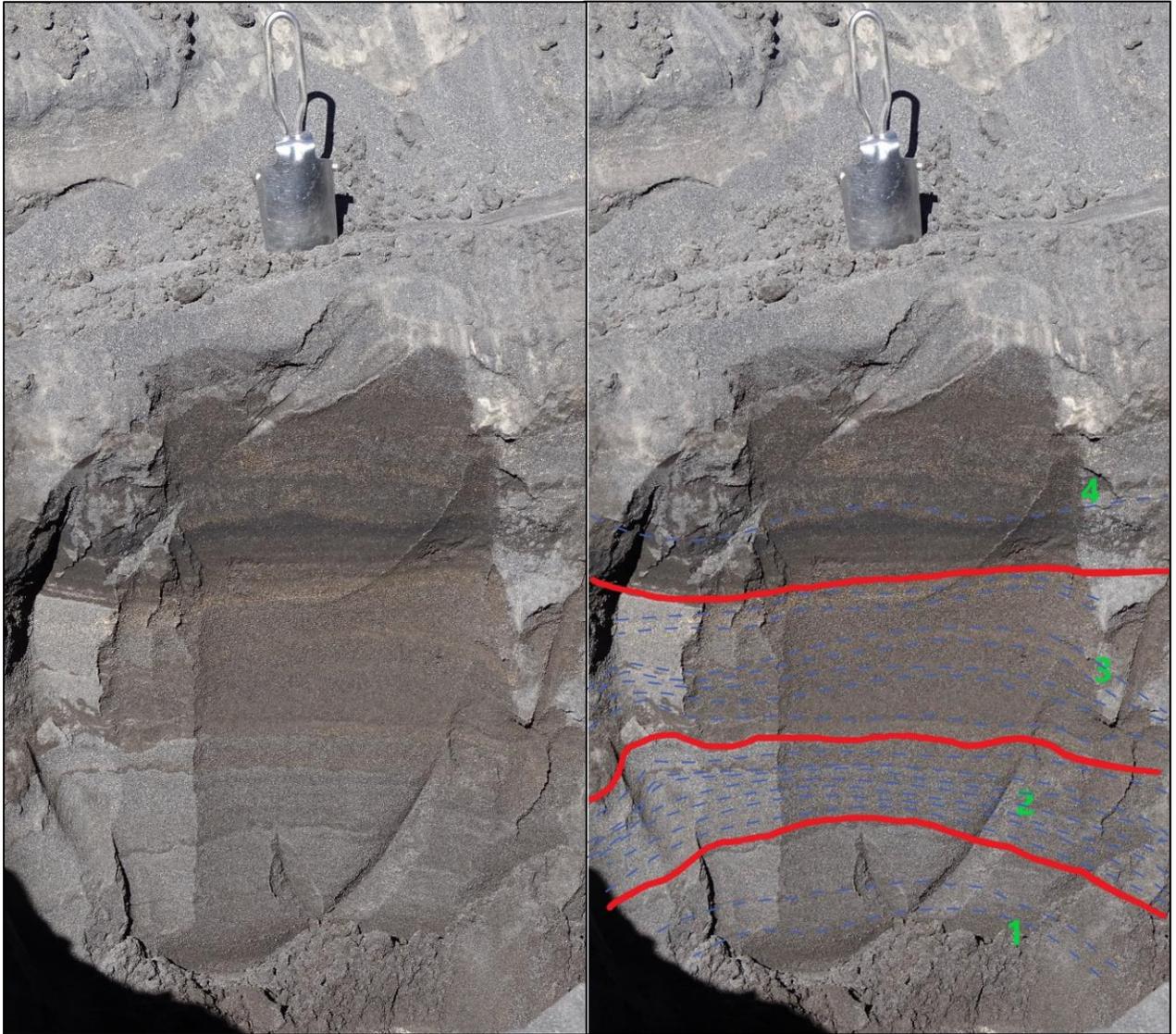


Figura A.D.1.: Se observa la calicata realizada en MIPA 1. A la derecha se observa las unidades y subunidades descritas, en la figura siguiente (Figura A.D.2) se encuentra la columna estratigráfica levantada.

COLUMNA ESTRATIGRÁFICA CE1 (Coord.: 480095, 7987401). Ref.: Sup. lava Ajata Sup.

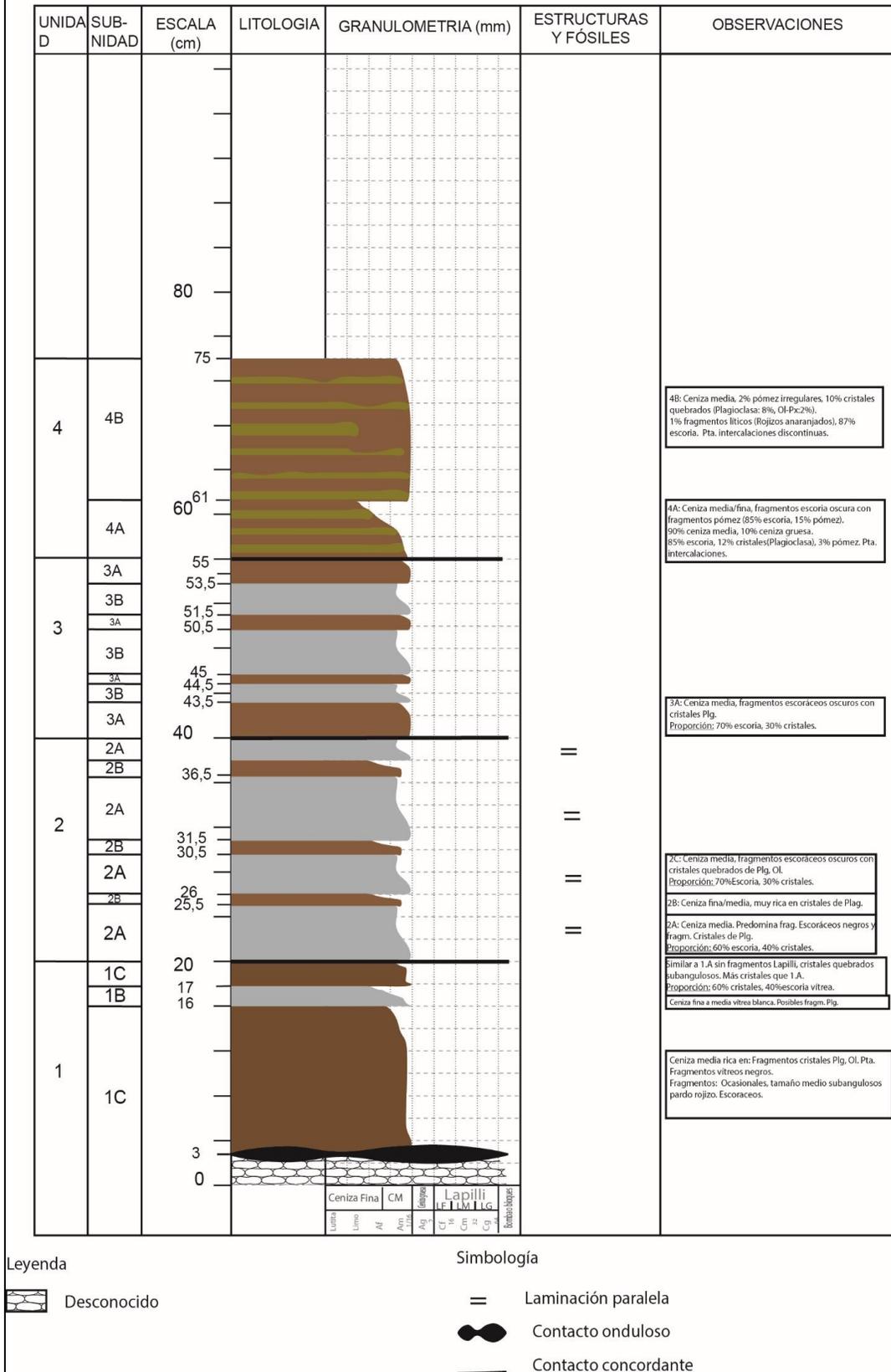


Figura A.D.2.: Se observa columna estratigráfica en MIPA 1. Con el detalle de las unidades y subunidades, elaboración propia.

Anexo E. Granulometría y categorización de componentes

Para las muestras obtenidas en diferentes puntos (*Figura 5*) del volcán, se observa la siguiente distribución:

Unidad	Punto de estudio	Muestra (código de análisis granulométrico y categorización muestras)	Columna estratigráfica	Coordenada E	Coordenada S	Atura(msnm)
Chungará	MIPA 2	M2	CE2	483872	7986205	4667
Chungará	MIPA 3	M3	CE3	485505	7986290	4612
Chungará	MIPA 7	M5	CE5	488706	7986234	4594
(Otra Unidad)	MIPA 8	M6	S/CE	486857	7982025	4594
Gran Couleé	MIPA 7	M5	CE5	488706	7986234	4594
Gran Couleé	MIPA 9	M7.U2.A	CE6	486002	7982778	4579
Gran Couleé	MIPA 9	M7.U2.B	CE6	486002	7982778	4579
Gran Couleé	MIPA 9	M7.U2.C	CE6	486002	7982778	4579
Tambo Quemado	MIPA 2	M2	CE2	483872	7986205	4667
Tambo Quemado	MIPA 4	M4	CE4	488196	7986275	4570
Tambo Quemado	MIPA 7	M5	CE5	488706	7986234	4594
Block & Ash	MIPA 2	M2	CE2	483872	7986205	4667
Block & Ash	MIPA 3	M3	CE3	485505	7986290	4612

Tabla A.E.1.: Nombre de muestras utilizadas para el análisis granulométrico y categorización de componentes (columna 3) asociadas con su respectiva unidad (columna 1). Además, se agrega el punto de estudio (columna 2), la columna estratigráfica en la cual se encuentra la muestra (columna 4), coordenadas Este y Sur y, altura del punto (columna 5, 6 y 7, respectivamente).

A continuación, se muestran las siguientes figuras con la distribución modal de las muestras, donde se define que la matriz del depósito son fragmentos < 2 [mm] ($\Phi < -1$, tamaño menor a lapilli fino) y los fragmentos mayores son > 2 [mm] (tamaño mayor a ceniza gruesa).

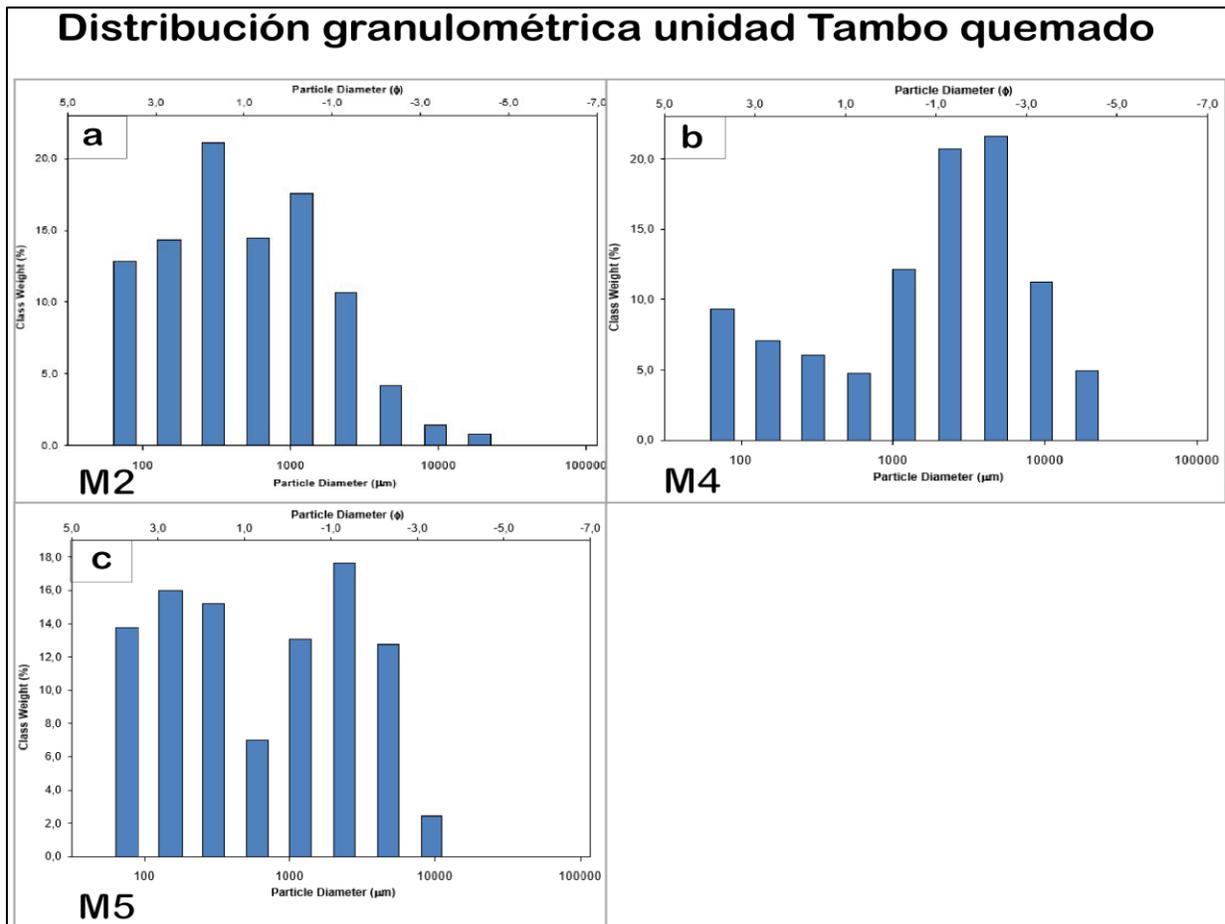


Figura A.E.1.: Distribución granulométrica unidad Tambo Quemado para muestras M2 (a), M4 (b) y M5 (c).

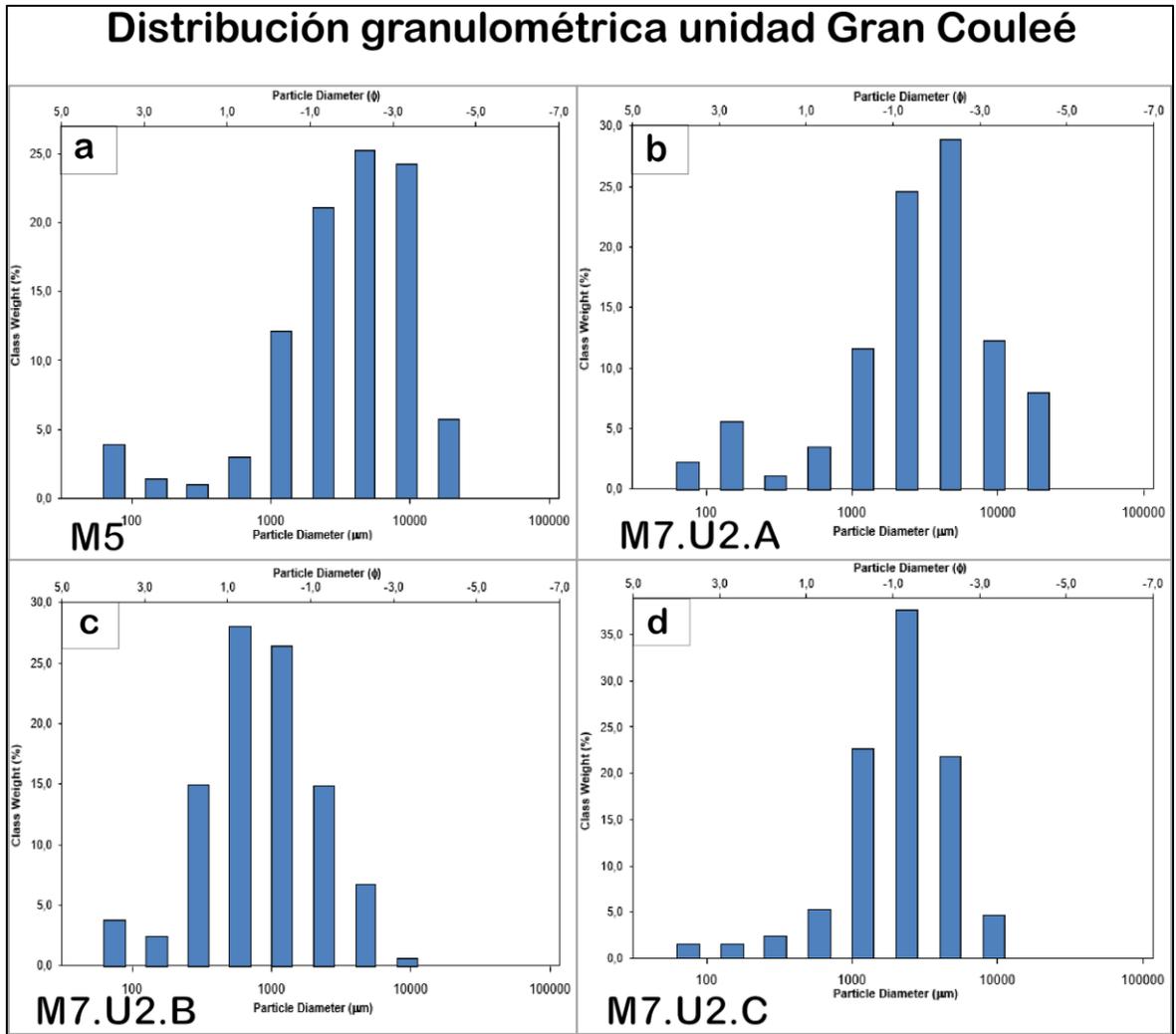


Figura A.E.2.: Distribución granulométrica unidad Gran Couleé para muestras M5 (a), M7. subunidad A (b), M7. subunidad B (c) y M7. subunidad C (d).

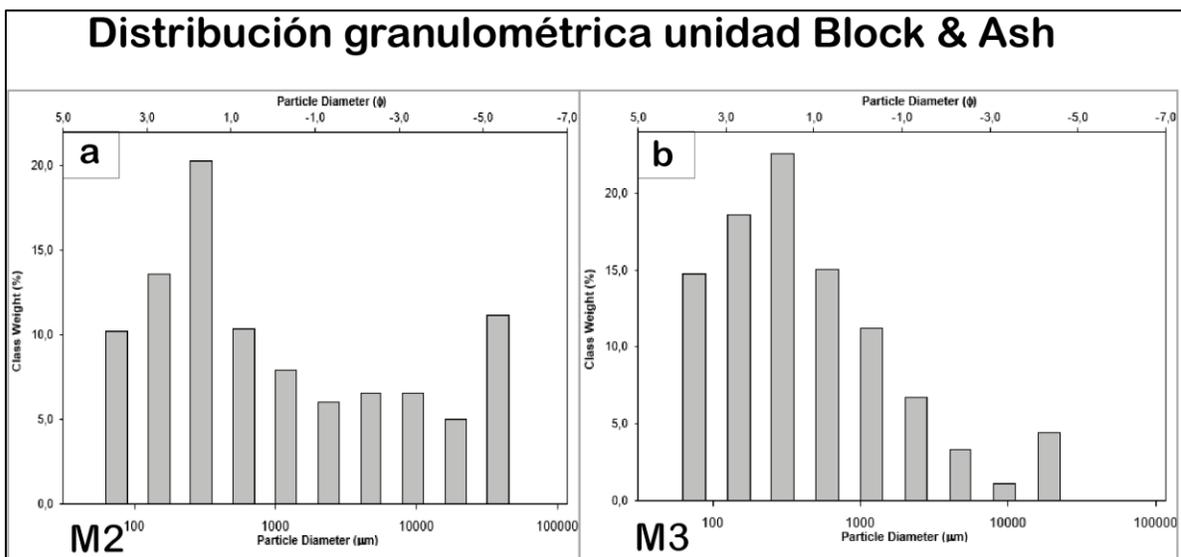


Figura A.E.3.: Distribución granulométrica unidad Block & Ash para muestras M2 (a) y M3 (b).

En los gráficos adjuntos se presentan los resultados del análisis granulométrico realizado, donde se observa la mayor distribución de grano por unidad (moda). Para la unidad de Block and Ash (Figura A.E.), la moda es en $\phi=2$ de 0.25 [mm], lo cual tiene sentido debido a que es granulometría de ceniza media principalmente. Luego, la unidad Gran Couleé (Figura A.E.2) presenta una moda de $\phi=-2$ de 4[mm], que se condice con la matriz de tamaño ceniza gruesa-lapilli fino a medio y fragmentos mayores de tamaño lapilli medio de las muestras. Además, en las muestras M7.U2.A, M7.U2.B, M7.U2.C, que son las subunidades A, B y C, una diferencia de tamaños mayor, debido a que va cambiando el tamaño entre las subunidades (ver en descripción de unidad Gran Couleé de la sección de resultados). Por otra parte, se observa que Tambo Quemado no presenta una moda clara, esto puede deberse al nivel de retrabajo observado en diferentes puntos.

Muestra	Mediana (M ϕ)	Desviación ($\delta\phi$)
M2	-0.9	2.9
M3	-2.9	1.8
M5	-1.7	2.6

Tabla A.E.2.: Valores de parámetros granulométricos; Mediana y desviación estándar para muestras M2, M3 y M5 de unidad Chungará, obtenidos con Gradistat 9.1.

En las siguientes tablas (A.E.3. y A.E.4.) se presenta la distribución granulométrica clasificada según tamaño de grano (bloque, lapilli grueso, lapilli medio, lapilli fino, ceniza gruesa, ceniza fina. Y, porcentaje de fragmentos mayores y matriz para cada muestra. Esta información se agrega a la descripción de las unidades de la sección de resultados.

Depósito	Muestra (código terreno)	Muestra (Código granulometría y categorización)	Tamaño de grano (wt.%)					
			Bloque	Lapilli g	Lapilli m	Lapilli f	Ceniza g	Ceniza f
			(>64 mm)	(64-32 mm)	(32-16 mm)	(16-2 mm)	(2-0.125mm)	(0.125- <0.0625mm)
Gran Couleé	PARI.T1.M5.M.U1	M5		0	5.9	71.7	18.2	4.3
Gran Couleé	PARI.T1.M7.M.U2.A	M7		0	8.1	66.4	22.9	2.5
Gran Couleé	PARI.T1.M7.M.U2.B	M7		0	0	22.4	73.7	4.1
Gran Couleé	PARI.T1.M7.M.U2.C	M7		0	0	65.3	33	1.7
Tambo Quemado	PARI.T1.M2.M.U3	M2		0	0.8	16.2	69.5	13.5
Tambo Quemado	PARI.T1.M4.M.U3	M4		0	5	53.8	31.2	10
Tambo Quemado	PARI.T1.M5.M.U3	M5		0	0	32.6	53.1	14.5
Chungará	PARI.T1.M2.M.U5	M2		3.3	15	34.2	35.2	12.2
Chungará	PARI.T1.M3.M.U5	M3		4.9	23.7	60.7	7.1	3.6

Chungará	PARI.T1.M5.M.U5	M5		0.4	22.1	52	19.3	6.1
Posiblemente otra Unidad	PARI.T1.M6.M.U	M6		0	0	24.6	70.9	4.5

Tabla A.E.3.: Porcentaje por tamaño de grano en porcentaje en peso para cada muestra analizada granulométricamente (M2, M3, M4, M5 y M7).

Depósito	Muestra (Código terreno)	Muestra (Código granulometría y categorización)	Muestra	
			M (wt.%)	FM (wt.%)
Gran Couleé	PARI.T1.M5.M.U1	M5	22.5	77.6
Gran Couleé	PARI.T1.M7.M.U2.A	M7	25.4	74.5
Gran Couleé	PARI.T1.M7.M.U2.B	M7	77.8	22.4
Gran Couleé	PARI.T1.M7.M.U2.C	M7	34.7	65.3
Tambo Quemado	PARI.T1.M2.M.U3	M2	83	17
Tambo Quemado	PARI.T1.M4.M.U3	M4	41.2	58.8
Tambo Quemado	PARI.T1.M5.M.U3	M5	67.6	32.6
Chungará	PARI.T1.M2.M.U5	M2	47.4	52.5
Chungará	PARI.T1.M3.M.U5	M3	10.7	89.3
Chungará	PARI.T1.M5.M.U5	M5	25.4	74.5
Posiblemente otra unidad	PARI.T1.M6.M.U	M6	4.5	95.5

Tabla A.E.4.: Porcentaje de matriz (M) y fragmentos mayores (FM) en porcentaje en peso para cada muestra de unidad Gran Couleé, Tambo Quemado y Chungará. Donde se considera matriz como fragmentos <2 [mm], excepto en muestra PARI.T1.M6.M.U; proveniente de otra unidad, donde se considera como matriz los fragmentos <0.0625 [mm].

Unidad		Código Muestra Terreno	Muestra (Código granulometría y Categorización)	Chungará	Chungará	Chungará	Wt. % del total
Chungará	Chungará						
PARI.TI. M5.M.U5	PARI.TI. M3.M.U5	PARI.TI. M2.M.U5	Pómez blanquecina	M2	M3	M5	
1.8727	5.1546	0.9052					
12.516	15.3846	4.5474	Pómez Parda	M2	M3	M5	
27.1503	29.392	23.177					
21.879	22.041	14.01	Escoria	M2	M3	M5	
63.418	71.9722	42.6396					
0.3172	0	1.6678	Fragmentos Líticos	M2	M3	M5	
0.0672	0	0.7062					
0	4.3648	0	Cristales	M2	M3	M5	
0.1989	0	0					
0.5833	4.3648	2.374					
0.3111	0.0132	0.1736					
0.5712	0.6237	0.5412					
0.7857	0.5984	0.931					
0	0.7584	0.99					
1.668	1.9937	2.6358					
2.7023	1.4256	0.3441					
3.6456	2.8728	0.7986					
1.164	0.8448	0.294					
7.5119	5.1432	1.4367					
0.8967	0	0.0093					

Tabla A.E.5.: Porcentaje de fragmentos categorizados por tamaño y muestra (M2, M3 y M5) de la Unidad Chungará, todos los valores en porcentaje en peso.



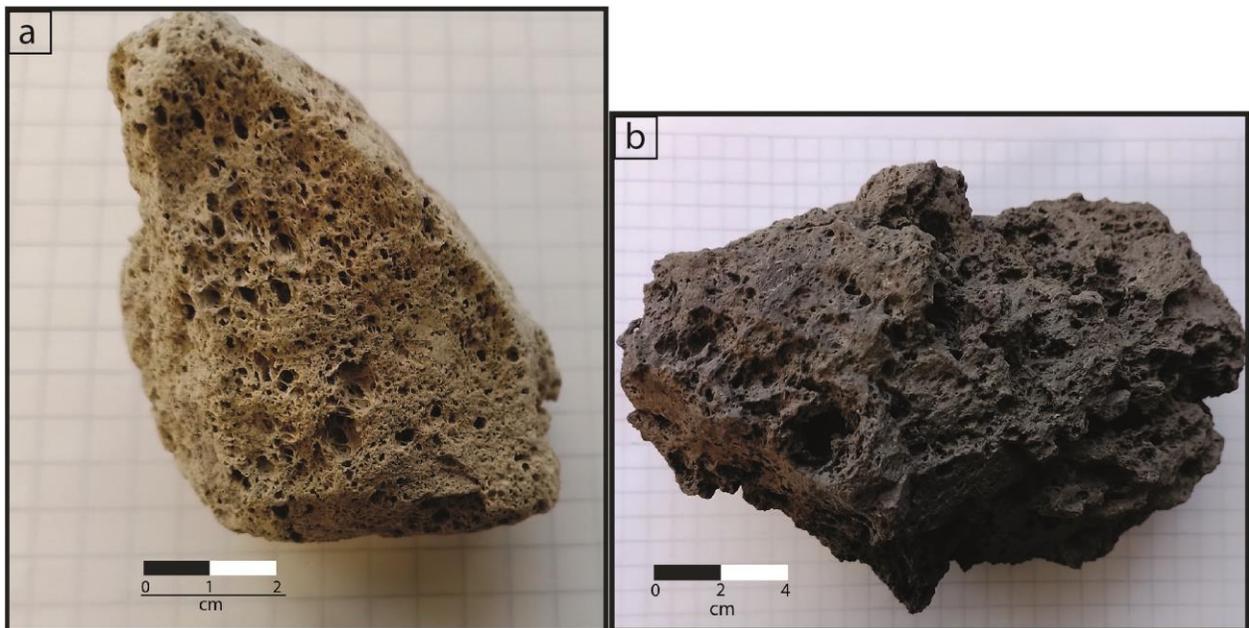
Figura A.E.4.: Distribución granulométrica componentes unidad Chungará para fragmentos mayores, basado en *Tabla A.E.5.*

Anexo F. Análisis de cortes transparentes

Código (Muestra corte)	Tipo	Punto	Descripción muestra de mano
T1.M3.P1	Pómez proveniente de Chungará	MIPA 3	Fragmento juvenil de pómez tamaño bloque (7x5.5x4 cm). Presenta fenocristales oscuros de anfíboles. Posee vesículas redondeadas a subangulosas. Alargadas a semialargadas. Poseen orientación preferencial de alargamiento. Las vesículas son de 2 cm hasta 1 mm de diámetro.
T1.M5.P1	Pómez proveniente de Chungará	MIPA 7	Fragmento juvenil de pómez tamaño bloque (7x5.5x4 cm). Presenta fenocristales oscuros de anfíboles. Posee vesículas redondeadas a subangulosas. Alargadas a semialargadas. Poseen orientación preferencial de alargamiento. Vesículas de 2 cm hasta 1 mm de diámetro.
T1.M5.P2	Pómez proveniente de Chungará	MIPA 7	Fragmento juvenil de pómez tamaño lapilli grueso. Presenta fenocristales oscuros de anfíboles, biotita. Posee vesículas redondeadas a subangulosas. Alargadas a semialargadas. Vesículas de hasta 0.3 cm de diámetro.
T1.M4.E1	Escoria proveniente de Chungará	MIPA 4	Fragmentos juveniles escoráceos tamaño lapilli grueso hasta 3 cm de largo. Se observan fenocristales de anfíboles. Posee vesículas redondeadas a subredondeadas de hasta 5 mm de diámetro. En muestra se observa alta densidad de vesículas.

T1.M4.E2	Escoria proveniente de Chungará	MIPA 4	Fragmentos juveniles escoráceos tamaño lapilli grueso hasta 3 cm de largo. Presentan bandeamiento de pómez. Se observan fenocristales de anfíboles. Posee vesículas redondeadas a subredondeadas de hasta 5 mm de diámetro.
T1.M4.E3	Lítico negro proveniente de Chungará	MIPA 4	Fragmentos escoráceos tamaño lapilli grueso hasta 3 cm de largo. Se observan fenocristales de biotita. Posee vesículas redondeadas a subredondeadas de hasta 0.3 mm de diámetro. Expone mayor densidad. Se observa amígdala de mineral blanco, pareciera calcita.
T1.M5.E1	Escoria densa superficial	MIPA 7	Fragmento de escoria tamaño bloque (14x8x6 cm), es de color gris negro. Posee vesículas redondeadas a semiredondeadas. Las vesículas son de hasta 1 cm de diámetro. Presenta patinas blanquecinas de alteración. Expone alta densidad. Se observan pocos minerales de tipo anfíboles euhedrales.
T2.M2.E1	Escoria densa superficial	MIPA 9	Fragmento de escoria probablemente. Posee vesículas redondeadas a semiredondeadas y poca frecuencia de vesículas semialargadas.

Tabla A.F.1.: Muestras (en columna 1) de las cuales se obtuvieron láminas delgadas transparentes pulidas para analizar. Se observa el tipo (columna 2), punto donde se obtiene muestra (columna 3), descripción de la muestra de mano (columna 4).



*Figura A.F.1: Fotos de dos fragmentos piroclásticos a partir de los cuales se prepararon las láminas transparentes pulidas. En **a**, pómez blanquecina; T1.M5.P1 y, en **b**, se observa escoria superficial; T1.M5.E1. Ambas poseen su respectiva descripción en Tabla A.F.1.*

Código de muestra (microscopio)	Fases obtenidas (%)						
	Sin muestra	Vesículas	Masa Fundamental	Fenocristales (>5mm)	Microlitos (0.5-0.2 mm)	Fragmentos líticos	TOTAL
T1.M3.P1		32.67	63.74	1.4	2.2	0	100.01
T1.M5.P1		29.26	68.1	0.38	2.27	0	100.01
T1.M5.P2		42.08	56.78	0.09	1.04	0	99.99
T1.M4.E1		24.86	72.95	0.68	1.5	0	99.99
T1.M4.E2		4.89	90.48	0.9	3.73	0	100
T1.M4.E3		27.63	69.47	0.3	2.3	0.3	100
T1.M5.E1	38,94	4.52	50.44	1.38	4.72	0	100
T2.M2.E1		20.84	70.34	2.54	6.28	0	100

Tabla A.F.2.: Porcentaje de fases obtenidas en el análisis de imágenes de los cortes transparentes pulidos de las muestras. Se realiza a través del programa JMicrovision. Se indica de color rosado el porcentaje de “sin muestra” y “vesículas”; estos porcentajes serán eliminados en el recálculo de las fases de “masa fundamental”, “fenocristales”, “microlitos”, “fragmentos líticos”.

Código de muestra (microscopio)	Recálculo (Sin % 'vesículas' y sin % 'sin muestra')					
	Masa Fundamental	Fenocristales (>5mm)	Microlitos (0.5-0.2 mm)	Fragmentos líticos	TOTAL	Fragmentos piroclásticos
T1.M3.P1	94.65399465	2.079002079	3.267003267	0	100	5.346005346
T1.M5.P1	96.25441696	0.537102473	3.208480565	0	100	3.745583039
T1.M5.P2	98.04869625	0.155413573	1.795890174	0	100	1.951303747
T1.M4.E1	97.09836284	0.90509783	1.996539332	0	100	2.901637162
T1.M4.E2	95.13195248	0.946272737	3.921774787	0	100	4.868047524
T1.M4.E3	95.9928147	0.41453641	3.178112478	0.41453641	100	4.007185298
T1.M5.E1	89.21117793	2.440749912	8.348072161	0	100	10.78882207
T2.M2.E1	88.8580091	3.208691258	7.933299646	0	100	11.1419909

Tabla A.F.3.: Porcentaje de fases obtenidas en el análisis de imágenes de los cortes transparentes pulidos de las muestras con el recálculo de fases, eliminando “vesículas” y “sin muestra” indicado en rosado en la Tabla A.F.2. Se indica de color verde el porcentaje de masa fundamental y fragmentos piroclásticos; donde los fragmentos piroclásticos engloban a las fases de “fenocristales”, “microlitos” y “fragmentos líticos”.

Código de muestra (microscopio)	Plg (Plagioclasa)	Px (Piroxeno)	Hbl (Hornblenda)	Total
T1.M3.P1	90.90909091	4.54545455	4.54545455	100
T1.M5.P2	84.61538462	0	15.38461538	100
T1.M4.E1	97.05882353	0	2.941176471	100
T1.M4.E2	86.66666667	4.44444444	8.88888889	100
T1.M4.E3	91.11111111	6.66666667	2.22222222	100
T1.M5.E1	73.4375	6.25	20.3125	100
T2.M2.E1	74.19354839	9.67741935	16.12903226	100

Tabla A.F.4.: Porcentaje por mineral observado en microscopio óptico de los cortes transparentes pulidos de las muestras T1.M3.P1, T1.M3.P2, T1.M4.E1, T1.M4.E2, T1.M4.E3, T1.M5.E1, T2.M2.E1.

Anexo G. Análisis geoquímico

Código de muestra (Geoquímica)	Tipo	Coordenada S	Coordenada E
M2.PB.CH.	Pómez Blanquecina	7986205	483872
M5.PB.CH.	Pómez Blanquecina	7986234	488706
M2.PP.CH.	Pómez Parda	7986205	483872
M6.PP.CH.	Pómez parda	7986234	488706
M2.ES.CH.	Escoria	7986205	483872
M5.ES.CH.	Escoria	7986234	488706

Tabla A.G.1.: Muestras de fragmentos juveniles tipo pómez blanquecina, pómez parda y escoria enviadas provenientes de la unidad Chungará y enviadas a laboratorio para análisis geoquímico.

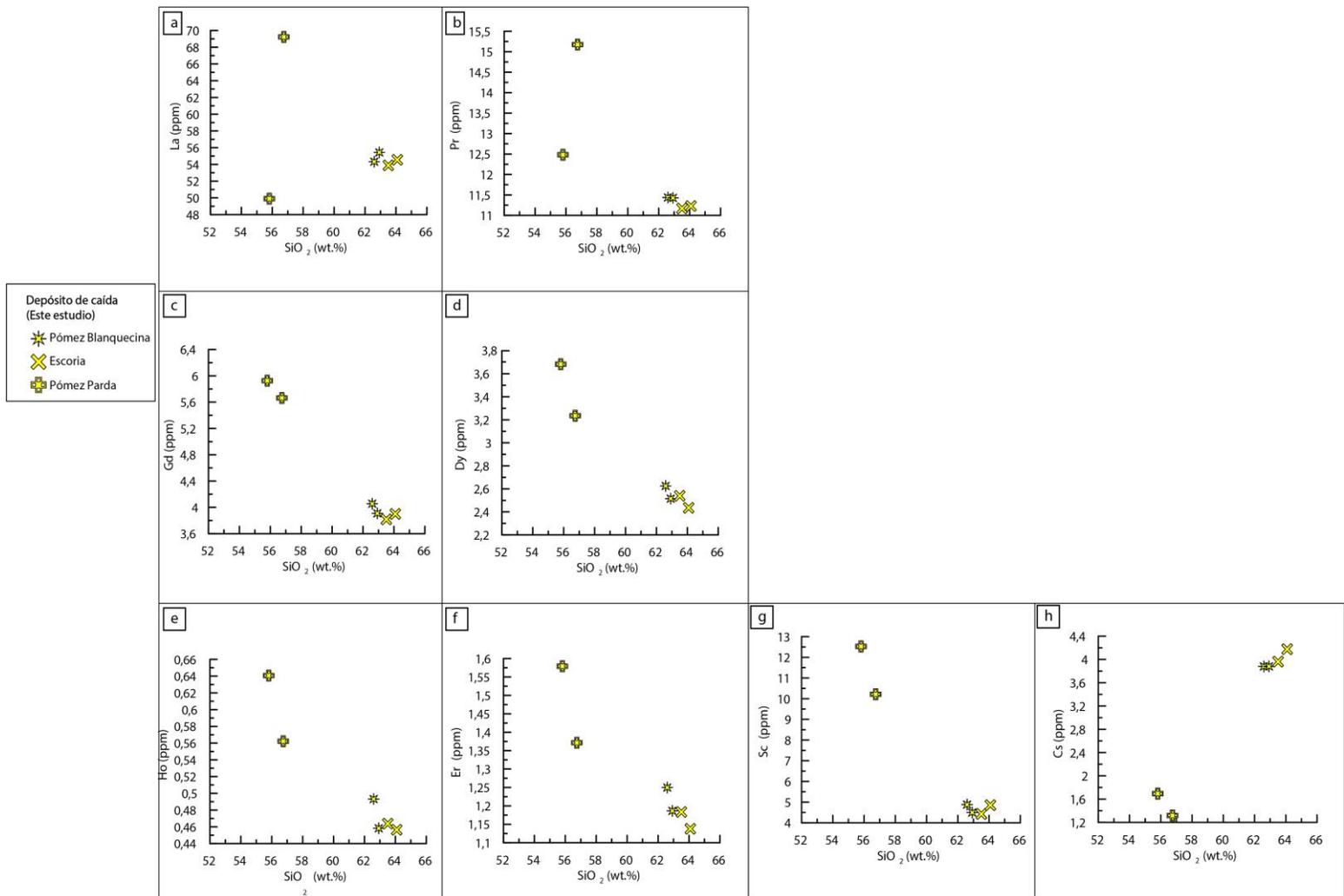


Figura A.G.1.: Diagramas bivalentes para los tres tipos de juveniles (cruz amarilla; pómez parda, equis amarilla; escoria, estrella amarilla; pómez blanquecina) de elementos traza (ppm) versus SiO₂ (wt.%). En **a** La (Lantano), en **b** Pr (Praseodimio), en **c** Gb (Gadolinio), en **d** Dy (Disproso), en **e** Ho (Homio), en **f** Er (Erbio), en **g** Sc (Escandio), en **h** Cs (Cesio).

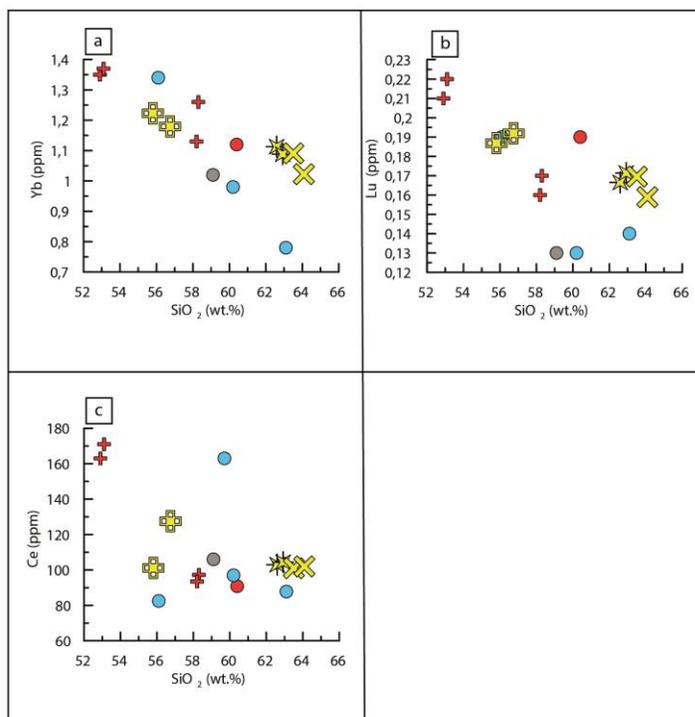


Figura A.G.2.: Diagramas bivariantes de elementos traza (ppm) versus SiO_2 wt.%. En **a** Yb (Yterbio), en **b** Lu (Lutecio), en **c** Ce (Cesio). Se agregan datos de literatura del volcán, donde los datos de color morado pertenecen a la unidad Parinacota 1, los datos de color celeste pertenecen a la unidad Parinacota 2 y los datos rojos pertenecen a la unidad Parinacota 3. Los datos en amarillo pertenecen al material juvenil Chungará; con una cruz se presenta la pómez parda, con una equis la escoria y con una estrella con 8 puntas se presenta la pómez blanquecina.

Muestras	Elementos mayores No Normalizados										Total	LOI %
	SiO ₂ (%)	TiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	FeOt* (%)	MnO (%)	MgO (%)	CaO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	P ₂ O ₅ (%)		
M2.PB.CH.	62.59	0.674	17.31	3.87	0.063	1.12	3.21	4.11	3.58	0.298	96.83	2.96
M2.ES.CH.	63.51	0.661	16.79	3.80	0.061	1.13	3.26	4.23	3.66	0.279	97.38	2.31
M2.PP.CH.	55.80	1.418	17.19	6.82	0.090	3.40	5.65	4.00	2.48	0.531	97.37	2.19
M6.PP.CH.	56.75	1.228	17.46	6.06	0.080	2.81	4.85	4.03	2.90	0.533	96.69	2.99
M5.PB.CH.	62.92	0.667	17.08	3.86	0.066	1.12	3.22	4.15	3.62	0.280	96.99	2.46
M5.ES.CH.	64.09	0.657	16.59	3.72	0.061	1.14	3.21	4.27	3.75	0.271	97.76	1.70

Tabla A.G.2.: Resultados geoquímicos de muestras de unidad Chungará. Se observan elementos mayores en porcentaje en peso de los óxidos (%). Obtenido a partir de método XRF.

*FeOt es calculado con Fe+2.

M5.ES.C	M5.PB.C	M6.PP.C	M2.PP.C	M2.ES.C	M2.PB.C	Muestras
54.55311	55.43289	69.23397	49.90204	53.88755	54.32578	La ppm
101.9867	104.3863	127.5288	101.1769	100.9896	102.9846	Ce ppm
11.22899	11.42799	15.17581	12.48190	11.16976	11.43791	Pr ppm
38.80539	39.53576	54.83255	47.88454	38.55252	39.87152	Nd ppm
5.904922	6.066613	8.671828	8.506071	5.784145	6.183804	Sm ppm
1.374078	1.371452	2.231279	2.190931	1.380625	1.382711	Eu ppm
3.899835	3.908887	5.663511	5.926311	3.817661	4.055865	Gd ppm
0.504936	0.521722	0.702280	0.755373	0.516000	0.546735	Tb ppm
2.435131	2.514971	3.235763	3.683296	2.539455	2.625155	Dy ppm
0.456489	0.458249	0.562261	0.640722	0.463819	0.493158	Ho ppm
1.137733	1.186434	1.371460	1.579227	1.183323	1.249683	Er ppm
0.167762	0.178109	0.193326	0.211882	0.174351	0.183160	Tm ppm
1.022319	1.088174	1.179454	1.222752	1.090994	1.112887	Yb ppm
0.158926	0.171403	0.191939	0.186875	0.169550	0.166532	Lu ppm
1391.070	1374.453	1613.625	1239.427	1372.278	1365.585	Ba ppm
18.77202	19.03941	9.336766	7.959215	18.54241	19.21043	Th ppm
10.49113	10.66507	12.36058	12.12541	10.48918	10.68066	Nb ppm
12.67955	13.12817	15.87684	17.95213	13.39108	14.61936	Y ppm
6.566467	6.790295	6.904732	6.566406	6.401621	6.783801	Hf ppm
0.755162	0.755723	0.660509	0.734554	0.913233	0.752865	Ta ppm
2.503764	2.453287	1.455138	1.326790	2.448808	2.458275	U ppm
22.65063	23.05405	19.22461	15.83720	22.21898	23.13960	Pb ppm
132.0999	128.6180	64.72050	60.30710	128.8713	127.6675	Rb ppm
4.177957	3.881687	1.317309	1.695127	3.963423	3.880669	Cs ppm
789.0803	797.2533	1233.640	1039.784	807.8003	800.4222	Sr ppm
4.852236	4.496569	10.21343	12.52656	4.425960	4.879897	Sc ppm
253.8472	262.4220	284.7239	260.5306	255.5316	264.8964	Zr ppm
31228.78	30141.23	24154.32	20615.84	30486	29757.46	K** ppm
1184.582	1220.971	2325.308	2317.407	1216.663	1298.739	P** ppm
3940.596	4000.302	7359.397	8500.880	3959.721	4040.055	Ti** ppm

Tabla A.G.3.: Resultados geoquímicos de muestras de unidad Chungará. Se observan elementos traza en unidad de ppm. Obtenido a partir de método ICP-MS.

**Elemento calculado a partir de elemento en porcentaje en peso del óxido, obtenido a partir de método XRF.

PAR 048	PAR-03-26	PAR-04-04	PAR-04-01	PAR-03-18	PAR-04-06	PAR-04-02	CAL-74	CAL-55	CAL-10	Muestra
U1 (Fase 1b)	U1	U1	U1	U1	U1	U1	U1	U1	U1	Unidad
Rhyolite dome	Dome SW of Ajata flow	Plateau-forming dome complex	Plateau-forming dome complex	Plateau-forming dome complex	Dome NE of Ajata Flow	Dome NE of Ajata Flow	Dome	Dome	Dome	Tipo
Wörner et al (1988)	Hora et al.(2007,2009)	Hora et al.(2007)	Hora et al.(2007)	Hora et al.(2007,2009)	Hora et al.(2007)	Hora et al.(2007,2009)	Clavero et al. (2004)	Clavero et al. (2004)	Clavero et al. (2004)	Referencia
							7995300	7987150	7990755	Coordenada S
							484600	482250	481490	Coordenada E
66.900	67.100	68.200	67.300	68.600	68.400	68.500	66.640	69.220	69.850	SiO2
0.490	0.500	0.502	0.501	0.484	0.505	0.525	0.690	0.570	0.450	TiO2
14.710	15.300	14.800	14.500	15.000	14.700	14.600	15.110	14.280	14.330	Al2O3
2.86	2.930	2.920	2.940	2.770	3.010	3.100	2.01	2.56	1.88	Fe2O3
2.86	2.93	2.92	2.94	2.77	3.01	3.10	1.77	0.22	0.69	FeO
2.574	2.637	2.628	2.646	2.493	2.709	2.790	3.98	2.80	2.65	Fe2O3T*
0.050	0.047	0.051	0.050	0.049	0.053	0.053	0.060	0.050	2.382	FeOT**(re-calc)
1.000	1.070	1.030	1.010	0.960	1.080	1.100	1.330	1.090	0.050	MnO
2.400	2.660	2.280	2.230	2.300	2.240	2.370	3.190	2.460	2.570	MgO
4.100	4.270	4.050	4.020	4.110	4.090	4.140	4.090	4.110	4.290	CaO
3.970	4.020	4.130	4.090	4.180	4.250	4.180	4.390	4.460	4.250	Na2O
0.170	0.186	0.175	0.176	0.166	0.173	0.179	0.250	0.190	0.230	K2O
										P2O5
										LOI
1.22							0.31	1.74	0.15	H2O
									0.05	C
							0.02			S
96.364	97.790	97.846	96.523	98.342	98.200	98.437	99.329	98.954	99.392	TOTAL

PAR-03-06	PAR-03-09	PAR-04-11	PAR-03-36	PAR-04-07	PAR-03-05	PAR-03-28	PAR-04-13	PAR-082	CAL-7	DBF-03-07
U2	U2	U2	U2	U2	U2	U2	U2	U2	U2	Uo/U2
Border Dacite Couleés	West Flank Andesites	Border Dacite Couleés	Intermediate Andesite-Da- cite	Intermediate Andesite-Da- cite	Border Dacite Couleés	West Flank Andesites	West Flank Andesites	West Flank Andesites	Cryptodome PJB	Chungará Andesi- tes/Isola- ted&Conti- nuous hum- mocks
Hora et al.(2007)	Hora et al.(2007,2009)	Hora et al.(2007)	Hora et al.(2007,2009)	Hora et al.(2007)	Hora et al.(2007,2009)	Hora et al.(2007,2009)	Hora et al.(2007,2009)	Hora et al.(2007)	Clavero et al. (2004)	Hora et al.(2007)
64.4	58.7	63.4	61.700	61.600	63.800	59.900	58.600	60.500	63.240	58.700
0.82	1.259	0.858	1.105	1.094	0.822	1.165	1.143	1.230	0.910	1.323
15.7	16.2	15.5	15.40	15.50	16.00	15.70	16.70	16.000	15.660	16.000
4.23	6.95	4.37	5.41	5.36	4.21	6.14	6.64	6.26	2.44	6.870
4.23	6.9500001	4.37	5.410	5.360	4.210	6.140	6.640	6.260	4.851	6.87
3.806443755	6.254086075	3.932425345	4.868	4.823	3.788	5.525	5.975	5.633	4.366	6.182
0.057	0.091	0.06	0.071	0.070	0.056	0.081	0.087	0.080	0.080	0.087
1.77	3.21	1.78	2.260	2.240	1.770	3.060	2.840	3.090	2.050	3.250
3.6	5.56	3.68	4.290	4.210	3.770	5.200	5.400	5.410	4.380	5.660
4.44	4.2	4.43	4.430	4.370	4.490	4.320	4.090	4.400	4.330	4.240
3.66	2.94	3.63	3.41	3.40	3.48	3.10	2.89	3.23	3.43	2.950
0.317	0.461	0.346	0.44	0.43	0.32	0.44	0.41	0.44	0.39	0.505
									0.5	
									0.03	
									0.0	
98.570444	98.875086	97.616425	97.970289	97.735295	98.298446	98.487193	98.134127	100.01318	98.835679	98.897

PAR-03-02	PAR-03-03	DBF-03-05	PAR 130	PAR 165	PAR 082	PAR 016	PAR-03-10	PAR-03-11	PAR-03-16	PAR-03-07
U1/U2	U1/U2	U1/U2	U2 (Fase 2a)(53000-100000)	U2	U2 (Fase 2)	U2 (Fase 2)	U2	U2	U2	U2
Intermediate Andesite-Dacite/Toreva Blocks	Intermediate Andesite-Dacite/Toreva Blocks	Intermediate Andesite-Dacite/Toreva Blocks	Dacite from "old cone"(Dacite)	Basaltic andesite from "old cone"	Wall dacite	Border dacite	North Flank Dacites	West Flank Andesites	Border Dacite Couleés	Border Dacite Couleés
Hora et al.(2007)	Hora et al.(2007)	Hora et al.(2007,2009)	Gimibre et al. (2002b)	Davidson et al (1990)	Wörmer et al (1988), Davidson et al	Wörmer et al (1988), Davidson et al	Hora et al.(2007,2009)	Hora et al.(2007,2009)	Hora et al.(2007)	Hora et al.(2007)
61	61.2	61.8	66.83	56.1	60.2	63.1	62.2	59.7	63.9	63.1
1.107	1.109	1.059	0.65	1.39	1.18	0.91	0.937	1.147	0.889	1.018
15.7	15.8	15.7	16.05	16.04	15.81	15.25	15.5	15.7	15.5	15.8
5.73	5.79	5.55	7.71	7.71	6.31	4.73	5.14	6.2	4.54	5.02
5.73	5.79	5.55	3.6	7.7100001	6.3100001	4.73	5.14	6.2000001	4.54	5.02
5.156246505	5.210238615	4.994270175	3.6	6.937986135	5.678170235	4.256378005	4.62532409	5.5791847	4.08540299	4.51733987
0.077	0.075	0.074	0.06	0.1	0.08	0.06	0.071	0.083	0.062	0.066
2.73	2.72	2.58	1.26	4.12	3.11	1.96	2.3	2.95	1.85	2.06
4.83	4.82	4.63	3.33	6.32	5.32	3.83	4.22	5.17	3.74	4.19
4.26	4.23	4.38	4.07	3.91	4.22	4.23	4.24	4.2	4.5	4.5
3.19	3.23	3.35	3.89	2.4	3.01	3.46	3.51	3.15	3.56	3.45
0.41	0.425	0.397	0.26	0.46	0.43	0.35	0.351	0.442	0.365	0.402
						0.75				
98.460247	98.819239	98.96427	100	97.777986	99.03817	97.406378	97.954324	98.121185	98.451403	99.10334

DBF-03-02	DBF-03-09	DBF-03-06	DBF-03-08	DBF-03-10	DBF-03-03	DBF-04-03	PAR-03-17	DBF-03-04	PAR-03-04	PAR-03-23
U1/U2	U1/U2	U1/U2	U1/U2	U1/U2	U1/U2	U1/U2	U1/U2	U1/U2	U1/U2	U1/U2
Undifferentiated Dome Plateau/Iso-lated&continuous hum-mocks	North Flank Dacites/Iso-lated&continuous hum-mocks	Undifferentiated Dome Plateau/Iso-lated&continuous hum-mocks	Undifferentiated Dome Plateau/Iso-lated&continuous hum-mocks	North Flank Dacites/Iso-lated&continuous hum-mocks	West Flank Andesites/Iso-lated&continuous hum-mocks	Border Dacite Couleés/Iso-lated&continuous hum-mocks	Undifferentiated Dome Plateau/Iso-lated&continuous hum-mocks	West Flank Andesites/Iso-lated&continuous hum-mocks	Undifferentiated Dome Plateau/Iso-lated&continuous hum-mocks	Undifferentiated Dome Plateau/Iso-lated&continuous hum-mocks
Hora et al.(2007)	Hora et al.(2007,2009)	Hora et al.(2007)	Hora et al.(2007)	Hora et al.(2007)	Hora et al.(2007,2009)	Hora et al.(2007)	Hora et al.(2007,2009)	Hora et al.(2007,2009)	Hora et al.(2007)	Hora et al.(2007)
66.9	63.6	72.2	67.3	64.2	57.9	63.5	73.6	58.1	67.9	68.5
0.54	0.835	0.266	0.522	0.842	1.288	0.871	0.252	1.272	0.501	0.444
15	15.7	13.3	15.1	15.7	16	15.8	13.3	15.9	15	15.2
3.05	4.67	1.7	2.99	4.65	6.97	4.83	1.62	6.86	2.88	2.58
3.05	4.67	1.7	2.99	4.65	6.97	4.83	1.62	6.86	2.88	2.58
2.744598925	4.202385895	1.52977645	2.690606815	4.184388525	6.272083445	4.346364855	1.45778697	6.17309791	2.59162128	2.32166073
0.054	0.069	0.042	0.052	0.069	0.093	0.071	0.041	0.089	0.051	0.045
1.09	1.84	0.45	1.05	1.85	3.57	1.93	0.44	3.47	0.97	0.87
2.5	3.78	1.27	2.46	3.73	5.84	3.88	1.29	5.76	2.36	2.38
4.02	4.19	3.89	3.99	4.3	4.16	4.31	3.83	4.2	4.07	4.23
3.98	3.54	4.51	4.04	3.54	2.8	3.5	4.37	2.85	4.07	4.19
0.195	0.319	0.086	0.184	0.321	0.472	0.34	0.085	0.461	0.185	0.161
97.023599	98.075386	97.543776	97.388607	98.736389	98.395083	98.548365	98.665787	98.275098	97.698621	98.341661

PAR-04-12	PAR-129c	PAR-03-39	CAL-86	CAL-44	CAL-41B	CAL-41	CAL-4A	CAL-134	DBF-03-11	DBF-03-01
U3	U3	U3	U3	U3	U3	U3	U2	U2	U1/U2	U1/U2
Pyroclastic flow, scoria&Lahars	Pyroclastic flow, scoria&Lahars	Pyroclastic flow, scoria&Lahars	Pyroclastic flow	Pyroclastic flow	Pyroclastic flow	Pyroclastic flow	Lava flow/PDA	Lava flow/PDA	North Flank Dacites/Iso-Related&Continuous hummocks	North Flank Dacites/Iso-Related&Continuous hummocks
Hora et al.(2007,2009)	Hora et al.(2007)	Hora et al.(2007,2009)	Clavero et al. (2004)	Hora et al.(2007)	Hora et al.(2007)					
59.800	60.100	59.200	7987350	7995500	7992300	7992300	7986252	7988419	64.3	62.3
1.127	1.130	1.312	485400	484200	481650	481650	471291	473020	0.737	0.888
16.200	16.500	16.100	16.290	15.510	16.210	15.960	15.7	15.54	15.7	15.8
6.450	6.080	6.750	3.00	2.67	3.21	3.18	4.09	3.51	4.15	4.92
6.45	6.08	6.75	3.45	3.19	3.65	2.81	2.52	1.84	4.15	4.92
5.804	5.471	6.074	6.150	5.593	7.27	6.30	6.8904092	5.5547433	4.15	4.92
0.086	0.080	0.085	0.090	0.080	0.090	0.090	0.09	0.08	0.063	0.071
2.920	2.390	3.140	3.100	3.160	3.360	2.650	3.67	2.73	1.69	2.04
5.290	4.840	5.470	5.690	5.480	5.930	5.480	6.12	4.65	3.48	4.09
4.140	4.380	4.190	4.020	4.220	4.200	4.240	4.09	4.25	4.2	4.23
3.020	3.230	2.890	2.950	3.440	2.880	3.180	2.79	3.57	3.65	3.38
0.402	0.430	0.474	0.370	0.380	0.400	0.360	0.46	0.33	0.267	0.343
98.789	98.551	98.935	98.620	99.313	99.169	99.202	98.800462	98.668538	97.821454	97.569353

PAR-03-12	PAR-03-34	PAR-03-38	PAR-03-15	PAR-04-09	PAR-03-14	PAR-03-43	CAL-59	CAL-57	CAL-164B	CAL-164A
U3	U3	U3	U3	U3	U3	U3	U3	U3	U3	U3
Lava flow	Lava flow	Lava flow	Lava flow	Lava flow	Lava flow	Lava flow	Lava flow	Lava flow	Fallout depo- sit	Fallout depo- sit
Hora et al.(2007)	Hora et al.(2007,2009)	Clavero et al. (2004)								
58.400	58.300	58.000	57.500	57.900	59.100	58.600	7990300	7989800	7984547	7984547
1.288	1.285	1.324	1.347	1.353	1.326	1.284	482050	481750	487815	487815
15.900	16.300	16.500	16.400	16.300	16.100	16.300	59.360	57.550	58.130	62.660
6.660	6.520	6.860	7.100	7.050	6.790	6.51	1.340	1.300	1.320	0.710
6.66	6.52	6.86	7.10	7.05	6.79	6.51	15.620	16.080	16.590	17.160
5.993	5.867	6.173	6.389	6.344	6.110	5.858	3.03	3.00	3.06	1.74
0.083	0.080	0.086	0.089	0.088	0.085	0.079	3.47	3.38	3.61	2.13
3.100	3.080	2.930	3.230	3.140	3.210	3.060	6.89	6.76	7.07	4.11
5.400	5.380	5.440	5.680	5.510	5.510	5.410	6.197	6.080	6.364	3.696
4.220	4.420	4.310	4.300	4.340	4.280	4.470	0.080	0.080	0.100	0.060
2.900	2.980	2.940	2.870	2.960	2.900	2.980	2.950	2.940	3.250	1.190
0.463	0.487	0.488	0.488	0.501	0.484	0.488	5.470	5.420	5.910	3.440
							4.410	4.410	4.080	4.280
							3.310	3.280	2.960	4.180
							0.420	0.430	0.370	0.260
							0.39	1.96	0.35	2.05
									0.08	
									0.03	0.01
97.747	98.179	98.191	98.293	98.436	99.105	98.529	99.157	97.570	99.074	97.636

PAR 072	PAR 068	PAR 011	PAR-03-19	PAR-219	PAR-03-20	PAR-222	PAR-03-25	PAR 84	PAR 162	PAR-04-10
U3 (Fase 5)	U3 (Fase 5)	U3 (Fase 5)	U3	U3	U3	U3	U3	U3 (Fase 4)	U3 (Fase 4)	U3
Ajata Cones	Ajata Cones, High Ajata	youngest Ajata flow, Upper Ajata(Basaltic Andesite)	Middle Ajata Flow	Lower Ajata Flow (Ajata Inf)	Middle Ajata Flow	Upper Ajata Flow (Ajata Inf)	High Ajata Flow	healing flow(Ande-site)	healing flow	Lava flow
Davidson et al (1990)	Davidson et al (1990)	Wörner et al (1988), Davidson et al	Hora et al.(2007)	Hora et al.(2007)	Hora et al.(2007)	Hora et al.(2007)	Hora et al.(2007)	Wörner et al. (1988), Gini-hre et al	Wörner et al (1988), Davidson et al	Hora et al.(2007,2009)
7989526	7992658	7989526		7988009	7988650	7988009	7988782			
482371	483605	482371		479891	483141	479891	479907			
53.100	58.300	52.900	58.500	56.700	58.500	53.300	58.700	58.790	60.400	58.000
1.630	1.290	1.570	1.287	1.400	1.266	1.627	1.255	1.360	1.080	1.366
15.720	16.100	15.630	16.200	16.500	16.200	15.900	16.400	16.620	16.160	16.300
8.69	7.03	8.50	6.950	8.390	6.820	8.690	6.77		5.92	7.190
8.69	7.03	8.50	6.95	8.39	6.82	8.69	6.77	6.51	5.92	7.19
7.820	6.326	7.649	6.254	7.550	6.137	7.820	6.092	6.510	5.327	6.470
0.090	0.110	0.110	0.088	0.110	0.087	0.111	0.086	0.090	0.080	0.090
5.040	3.380	4.820	3.260	4.150	3.200	5.030	3.180	3.300	2.220	3.220
7.420	5.600	7.250	5.590	6.560	5.460	7.520	5.470	5.800	4.780	5.560
4.030	4.110	4.020	4.280	4.140	4.280	4.280	4.300	4.070	4.190	4.260
2.450	2.780	2.440	2.860	2.270	2.860	2.490	2.860	2.860	3.030	2.950
0.770	0.460	0.730	0.462	0.420	0.459	0.768	0.458	0.490	0.400	0.501
		0.41								
98.070	98.456	97.119	98.781	99.800	98.449	98.846	98.801	99.890	97.667	98.717

PAR 068	PAR 011	PAR 086
U3 (Fase 5)	U3	U3 (Fase 5)
Ajata Cones, High Ajata	youngest Ajata flow, Upper Ajata(Basaltic Andesite)	Ajata Cones (Fase más antigua)
Gimibre et al (2007)	Gimibre et al. (2007)	Davidson et al (1990)
7992658	7989526	7989526
483605	482371	482371
58.930	54.040	58.200
1.280	1.620	1.270
16.230	16.060	16.060
2.93	8.59	6.92
3.56		
6.89	8.59	6.92
6.197	7.730	6.227
0.090	0.110	0.110
3.270	4.790	3.270
5.570	7.580	5.550
4.370	4.250	4.140
2.830	2.630	2.780
0.460	0.760	0.450
0.84	0.01	
99.227	99.570	98.057

Tabla A.G.4.: Recopilación geoquímica de volcán Parinacota. Elementos mayores en porcentaje en peso de óxidos.

*Fe total expresado con Fe+3, recalculado respecto a Fe obtenido de literatura.

**Fe total expresado con Fe+2, recalculado respecto a Fe obtenido de literatura.

Referencia	Hora et al.(2007)	Hora et al.(2007, 2009)	Hora et al.(2007, 2009)	Hora et al.(2007, 2009)	Hora et al.(2007, 2009)	Hora et al.(2007, 2009)	Hora et al.(2007, 2009)	Hora et al.(2007, 2009)	Hora et al.(2007, 2009)	Hora et al.(2007, 2009)	Hora et al.(2007, 2009)	Hora et al.(2007, 2009)
Tipo	High Ajata Flow	Pyroclastic flow,scoria&Lahars	Lava flow	Lava flow	Lava flow	Pyroclastic flow,scoria&Lahars	Middle Ajata Flow	Lava flow	Lava flow	Lava flow	Middle Ajata Flow	
Unidad	U3	U3	U3	U3	U3	U3	U3	U3	U3	U3	U3	U2
Muestra	PAR-03-25	PAR-03-39	PAR-03-14	PAR-04-09	PAR-03-15	PAR-04-12	PAR-03-20	PAR-03-38	PAR-03-34	PAR-04-10	PAR-03-19	PAR-04-13
Rb												
Ba												
Th	7.83	8.39	8.30	7.60	7.40	9.40	7.81	8	6.833	7.655	7.702	8.879
Nb												
Ta												
U	1.35	1.41	1.39	1.14	1.10	1.62	1.31	1.13	0.99	1.146	1.308	1.368
La												
Ce												
Pb												
Nd												
Sr												
Sm												
Zr												
Hf												
Eu												
Gd												
Tb												

Dy
Y
Er
Yb
Lu
Pr
Tm
V
Cr
Co
Ni
Cu
Zn
Sc
Ga
Li
Be
B
Sb
Cs
Mo
Cd
Tl
Bi

Tabla A.G.5. Parte 1.: Recopilación geoquímica de volcán Parinacota. Elementos traza en unidad de ppm.

Referencia	Hora et al.(2007, 2009)	Hora et al.(2007, 2009)	Hora et al.(2007, 2009)	Hora et al.(2007, 2009)	Hora et al.(2007, 2009)	Hora et al.(2007, 2009)	Hora et al.(2007, 2009)	Hora et al.(2007, 2009)	Hora et al.(2007, 2009)	Hora et al.(2007, 2009)	Hora et al.(2007, 2009)	Hora et al.(2007, 2009)
Tip o	West Flank Andesites	Border Dacite Couleés	Intermediate Andesite-Dacite	West Flank Andesites	West Flank Andesites	Dome NE of Ajata Flow	Plateau-forming dome complex	North Flank Dacites	Dome SW of Ajata flow	Chungará Andesites	High Ajata Flow (Ajata Superior)	Upper Ajata Flow (Ajata Inf)
Unidad	U2	U2	U2	U2	U2	U1	U1	U2	U1	U1	U3	U3
Muestra	PAR-03-28	PAR-03-05	PAR-03-36	PAR-03-09	PAR-03-11	PAR-04-02	PAR-03-18	PAR-03-10	PAR-03-26	PAR-03-31	PAR-201	PAR-03-21
Rb					48.0							
Ba					1718							
Th	10.106	11.349	11.49	8.262	10.442	19.734	18.975	12.879	16.609	9.146	7.867	8.389
Nb		2.64			10							
Ta					0.68							
U	2.154		2.644	1.718	2.164	4.668	4.514	2.785	3.888	1.651	1.342	1.195
La												
Ce					163							
Pb					19							
Nd					81.9							

Sr	1714
Sm	13.3
Zr	187
Hf	5.78
Eu	3.5
Gd	
Tb	1.12
Dy	
Y	21.00
Er	
Yb	1.35
Lu	0.21
Pr	
Tm	0.25
V	199
Cr	54
Co	
Ni	70
Cu	71
Zn	138.00
Sc	
Ga	
Li	
Be	
B	
Sb	
Cs	
Mo	
Cd	
Tl	
Bi	

Tabla A.G.5. Parte 2.: Recopilación geoquímica de volcán Parinacota. Elementos traza en unidad de ppm.

Referencia	Hora et al.(2009)	Wörner et al (1988), Davidson et al (1990)	Wörner et al (1988), Davidson et al (1990)	Wörner et al (1988), Davidson et al (1990)	Hora et al.(2007)	Wörner et al (1988)	Wörner et al (1988), Davidson et al (1990)	Davidson et al (1990)	Davidson et al (1990)	Davidson et al (1990)	Davidson et al (1990)	Ginibre et al. (2002b)
Tipo	Lower Ajata Flow (Ajata Inf)	youngest Ajata flow, Upper Ajata(Basaltic Andesite)	healing flow	Border dacite	West Flank Andesites	Rhyolite dome	Chungará Andesite	Ajata Cones, High Ajata	Ajata Cones	Ajata Cones (Fase más anti-güa)	Basaltic andesite from "old cone"	Dacite from "old cone"(Dacite)

Unidad	U3	U3	U3	U2	U2	U1	U1	U3	U3	U3	U2	U2
Muestra	PAR-220	PAR 011	PAR 162	PAR 016	PAR 082	PAR 048	PAR 118	PAR 068	PAR 072	PAR 086	PAR 165	PAR 130
Rb		48.0	86.0	97.0	75.0	131.0	84.0	75.0	47.0	70.0	54.0	152.0
Ba		1718	1165	1209	1340	1050	1409	1233	1789	1222	1109	1172
Th	6.129	9.09	10.6	12.6	16		18	8.81	10.1	8.52	5.36	
Nb		10	9	9	4	5	8	5	10	10	8	11
Ta		0.68	0.66	0.59	9.79		0.63	0.67	0.71	0.67	0.61	
U	1.701	4.4	3.1	3.9	2.7		1	1.3	2.9	1.8	2.2	
La												
Ce		163	90.8	87.8	97		106	97.2	171	93.5	82.5	
Pb		19	20	21	16	24	18	17	16	15	15	
Nd		81.9	42.7	37.3	42.1		46	44.1	79.5	43.8	42.2	
Sr		1714	853	895	1117	619	1075	991	1821	969	960	664
Sm		13.3	7.21	5.59	7.4		7	7.84	13.6	7.81	7.37	
Zr		187	219	198	184	169	218	215	189	211	188	218
Hf		5.78	6.18	5.10	5.17		5.85	6.02	5.67	6.00	5.34	
Eu		3.5	1.9	1.56	2.06		2.11	2.27	3.73	2.17	2.16	
Gd												
Tb		1.12	0.64	0.58	0.62		0.72	0.68	1.09	0.67	0.78	
Dy												
Y		21.00	16.00	11.00	14.00	5.00	14.00	7.00	20.00	15.00	16.00	15.00
Er												
Yb		1.35	1.12	0.78	0.98		1.02	1.26	1.37	1.13	1.34	
Lu		0.21	0.19	0.14	0.13		0.13	0.17	0.22	0.16	0.19	
Pr												
Tm		0.25	0.35	0.16	0.31		0.19	0.25	0.32	0.3	0.21	
V		199	124	92	141	46	135	149	206	149	181	61
Cr		54	17	37	43	13	44	53	55	49	61	8
Co		35	43	25	28	27	23					30
Ni		70	29	33	43	19	44	43	73	44	59	16
Cu		71	54	37	48	21	47	59	77	57	49	27
Zn		138.00	112.00	102.00	98.00	72.00	106.00	118.00	129.00	113.00	115.00	83.00
Sc												
Ga												
Li												
Be												
B												
Sb												
Cs												
Mo												
Cd												
Tl												
Bi												

Tabla A.G.5. Parte 3.: Recopilación geoquímica de volcán Parinacota. Elementos traza en unidad de ppm.

Referencia	Ginibre et al. (2014)	Ginibre et al (2014)	Hora et al.(2009)	Hora et al.(2009)
Tipo	youngest Ajata flow, Upper Ajata(Basaltic Andesite)	Ajata Cones, High Ajata	High Ajata Flow	NEVADOS DE PA-YACHATA, AJATA
Unidad	U3	U3	U3	U3
Muestra	PAR 011	PAR 068	PAR-03-25	PAR-219
Rb			74.0	60.0
Ba			1240	867
Th			7.19	6.14
Nb			11	10
Ta			0.7	0.6
U			1.09	1.76
La			42.7	31.4
Ce			85.7	67.9
Pb			13.4	16
Nd			42.6	36
Sr	1714	991	981	802
Sm			7.23	6.39
Zr			236	191
Hf			6.05	5.07
Eu			1.9	1.72
Gd			5.83	5.2
Tb			0.66	0.68
Dy			3.21	3.01
Y			16.00	20.00
Er			1.46	
Yb			1.2	1.24
Lu			0.18	0.18
Pr			10.7	
Tm			0.2	0.29
V			147	176
Cr			52	96
Co			22	26
Ni			29	45
Cu			44	77
Zn			106.00	110.00
Sc			12.00	13.00
Ga			20.00	25.00
Li			15.00	
Be			1.55	

B		
Sb	0.16	
Cs	0.16	2.80
Mo		
Cd	0.07	
Tl	0.20	
Bi	0.03	

Tabla A.G.5. Parte 4.: Recopilación geoquímica de volcán Parinacota. Elementos traza en unidad de ppm.