



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
GEOLOGÍA**

**EVOLUCIÓN GEOQUÍMICA DE LOS PRODUCTOS
EMITIDOS POR EL VOLCÁN VILLARRICA (39°25'S -
71°55'W), REGIONES DE LA ARAUCANÍA Y LOS RÍOS,
CHILE**

Memoria para optar al Título de Geóloga

Camila Fernanda Leopold Mora

Profesor Guía: Dr. José Luis Palma Lizana
Profesor Co-Guía: Sr. Franco Elias Vera Rivadeneira
Profesor Comisión: Dr. Osvaldo Patricio González Maurel

Concepción, 2024

*Montañas blancas
bajo el sol invernal,
una gata duerme*

AGRADECIMIENTOS

En primera instancia, quiero agradecer a mi profesor guía, Dr. José Luis Palma por darme la oportunidad en desarrollar este tema de memoria en un área que es aún inexplorada y desafiante. También agradecer a mi profesor Co-guía, el Sr. Franco Vera por los buenos consejos, y al profesor Dr. Osvaldo González, quien se mostró dispuesto a compartir sus conocimientos.

Agradecerle al Departamento Ciencias de la Tierra, a los docentes y funcionarios por las enseñanzas, las ayudas en terrenos y también por los cálidos saludos de cada día. A la profesora Liubow por permitirme ser ayudante en dos asignaturas, las cuales disfruté mucho participar.

A mis amistades que hice durante esta etapa universitaria, que siempre me llenaron los días de momentos gratos, compartieron conmigo, me ayudaron y que también hicieron que diera lo mejor de mí. A Marcela, Ignacia, Carla, Karina y Danitza, muchas gracias por las risas y la confianza y a G3, que buen equipo de trabajo lleno de anécdotas en terreno.

Especialmente a mi familia, mis padres Jeannette y Boris, gracias por su amor incondicional, por su apoyo ante cada adversidad que se me ha presentado, por sus incontables consejos, por ayudarme a creer en mí y a seguir mis sueños. A mi hermana Constanza, por tus interminables chistes e historias, tu cariño y por compartir el mismo sentido de humor. A mi abuela Rosalía por estar presente en mi vida y a Georgia por acompañarme en largas noches de estudio.

Muchas gracias a todas aquellas personas que me acompañaron durante este camino hacia un sueño que poseo desde la infancia.

ÍNDICE

RESUMEN

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Planteamiento del problema	1
1.2 Objetivos.....	2
1.2.1 Objetivo General.....	2
1.2.2 Objetivos Específicos	2
1.3 Ubicación y accesos del área de estudio.....	3
1.4 Trabajos anteriores	4
2. MARCO GEOLÓGICO Y TEÓRICO	6
2.1 Geología Estructural	7
2.2 Rocas del basamento	9
2.3 Rocas Plutónicas.....	10
2.4 Rocas y depósitos volcánicos	11
2.4.1 Unidad Villarrica 1, Plv1	11
2.4.2 Unidad Villarrica 2, PIH2v.....	12
2.4.3 Unidad Villarrica 3, Hv3	12
2.4.3.1 Subunidad prehistórica	13
2.4.3.2 Subunidad histórica	13
2.5 Análisis composicional estadístico: <i>Simplex</i> y método de Aitchison.....	15
2.6 Métodos de análisis de clústeres o agrupaciones: El dendograma	16
3. METODOLOGÍA	18
3.1 Confección de la base de datos.....	18
3.2 Confección de diagramas.....	20
4. RESULTADOS.....	22
4.1 Clasificación geoquímica de unidades geológicas	22

4.1.1	Clasificación Total Alkalis vs Silica (TAS).....	22
4.1.2	Diagrama AFM.....	23
4.2	Geoquímica diferenciada por erupción.....	24
4.2.1	Clasificación TAS	24
4.2.2	Elementos mayores.....	27
4.2.3	Elementos traza.....	31
4.2.4	Tierras raras	34
4.2.5	Multielementos	35
4.3	Análisis composicional estadístico.....	37
4.4	Análisis de agrupamiento	39
5.	DISCUSIÓN.....	42
5.1	Comparación geoquímica de las erupciones	42
5.2	Factores determinantes del comportamiento geoquímico	45
6.	CONCLUSIÓN.....	47
7.	REFERENCIAS	48
8.	ANEXOS	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Mapa de ubicación y accesos al volcán Villarrica.....	3
Figura 2.1: Tectónica de placas de los Andes Chilenos entre los 33°S y 47°S. Obtenido de Cembrano y Lara (2009).....	6
Figura 2.2: Mapa geológico estructural de la ZVS. Modificado de Cembrano y Lara (2009). Obtenido de Pavez <i>et al.</i> (2023).	7
Figura 2.3: Modelo de elevación digital mostrando las principales estructuras geológicas: Cadena volcánica Villarrica – Lanín y Sistema de Fallas Liquiñe-Ofqui (SFLO). Modificado de Silva (2008).	8
Figura 2.4: Mapa geológico simplificado del Volcán Villarrica. Modificado de Bono (2014).	14
Figura 4.1: Diagrama TAS (Le Maitre <i>et al.</i> , 1989) para las Unidades Villarrica 1, 2 y 3 en colores azul, verde y rojo respectivamente. Cruces negras representan a muestras no asociadas a ninguna unidad geológica del Villarrica.	22
Figura 4.2: Triángulos AFM que representa a las Unidades Villarrica 1, 2 y 3 y a muestras no asociadas a ninguna unidad geológica. Valores normalizados expresados en wt%.	24
Figura 4.3: Diagrama TAS (Le Maitre <i>et al.</i> , 1989). Se muestra la clasificación de los productos emitidos por el volcán Villarrica. Valores normalizados expresados en wt%.	25
Figura 4.4: Diagrama de álcalis vs SiO ₂ de erupciones pertenecientes a la Unidad Villarrica 3. La línea negra punteada indica la separación entre basalto y andesita basáltica según Le Maitre <i>et al.</i> (1989).	25
Figura 4.5: Diagrama de álcalis vs SiO ₂ de erupciones pertenecientes a la Unidad Villarrica 1 y 2. Las líneas negras punteadas indican la separación entre basalto, andesita basáltica, andesita y dacita según Le Maitre <i>et al.</i> (1989).	26
Figura 4.6: Diagramas Harker de elementos mayores respecto al SiO ₂ (Harker, 1909). Valores normalizados al 100 % en wt%.	28
Figura 4.7: MgO vs SiO. Valores normalizados y expresados en wt%. Se incluyen 70 muestras pertenecientes a la Unidad Villarrica 3 y 4 muestras de erupción no identificada.....	30
Figura 4.8: Diagramas bivariantes de elementos traza (ppm) vs MgO wt%.	33
Figura 4.9: Diagrama de REE normalizado al condrito (Sun y McDonough, 1989) para muestras pertenecientes a la Unidad Villarrica 3 y no identificadas.	34

Figura 4.10: Diagrama de REE normalizado al condrito (Sun y McDonough, 1989) para muestras de la Unidad Villarrica 1, 2 y no identificadas.	35
Figura 4.11: Diagrama multielemental normalizado al manto primitivo (Sun y McDonough, 1989) para muestras históricas de la Unidad Villarrica 3.	36
Figura 4.12: Diagrama multielemental normalizado al manto primitivo (Sun y McDonough, 1989) para muestras de la Unidad Villarrica 1 y 2.	36
Figura 4.13: Variable explicativa acumulada y valores propios de 10 componentes principales.	37
Figura 4.14: <i>Biplot</i> de los componentes transformados en un espacio logcociente centrado (clr).	38
Figura 4.15: <i>Biplot</i> de los componentes principales y 212 muestras en el espacio logcociente centrado (clr).....	39
Figura 4.16: Dendrograma de elementos mayores para 212 muestras. Las líneas negras punteadas indican las divisiones que determinan el número de clúster según la distancia (2.0, 1.25 y 1.0 de forma descendente).....	40

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Número de muestras analizadas en roca total y número de datos geoquímicos recopilados según autor. UV1, UV2, UV3 corresponden a las Unidades Villarrica 1, 2 y 3, respectivamente.	19
Tabla 3.2: Número de muestras analizadas en vidrio y número de datos geoquímicos recopilados según autor. UV1, UV2, UV3 corresponden a las Unidades Villarrica 1, 2 y 3, respectivamente.	19
Tabla 3.3: Técnicas analíticas empleadas para las composiciones de roca total y vidrio según autor.	20
Tabla 4.1: Número de muestras presentes en los clústeres o grupos reconocidos en el dendograma, según erupción y unidad a la que pertenecen.	41

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Base de datos (roca total).....	53
Anexo 2: Base de datos (vidrio).....	55
Anexo 3: Elementos mayores en roca total	57
Anexo 4: Elementos traza en roca total	59
Anexo 5: Tierras raras en roca total	61
Anexo 6: Multielementales en roca total	63

RESUMEN

El volcán Villarrica ($39^{\circ}25'S$ - $71^{\circ}55'W$) es uno de los volcanes con mayor actividad eruptiva en Chile, ocupando el primer lugar del Ranking de riesgo específico del Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin, 2023). Los productos eruptivos de este macizo han sido clasificados y agrupados por los autores Moreno y Clavero (2006) en tres unidades geológicas enumeradas sucesivamente Unidad Villarrica 1, 2 y 3.

Si bien existe un amplio registro eruptivo del volcán, no se cuenta con un estudio que relacione dichos registros en términos de caracterización geoquímica de los productos emitidos por el volcán Villarrica, con el fin de determinar variaciones en las diferentes erupciones, establecer similitudes entre ellas y efectuar un seguimiento evolutivo. Para ello se elabora una base de datos que reúne información geoquímica de elementos mayores, traza y tierras raras de muestras obtenidas desde bibliografía y muestras analizadas por Sernageomin. El programa de *Jupyter Lab (Python 3.9)*, junto con librerías de *Geochem*, *Matplotlib*, *Seaborn*, *Pandas* y *Scikit-learn*, permiten la elaboración de distintos diagramas empleados en la geoquímica para clasificar las muestras de la base de datos generada y también, el procesamiento de datos composicionales mediante el empleo de técnicas analíticas composicionales establecidas por Aitchison (2003). Los resultados geoquímicos son presentados en relación con las unidades geológicas de interés, con un enfoque en las Ignimbritas Licán y Pucón, así como en las lavas históricas.

Los resultados obtenidos muestran que los productos del volcán Villarrica se han mantenido en un rango composicional de basaltos a andesitas basálticas pertenecientes a la serie calcoalcalina para sus tres unidades geológicas. Sin embargo, elementos como el MgO han presentado variaciones, las cuales permiten diferenciar pequeñas variabilidades entre sus erupciones más recientes y sugieren la existencia de mezcla de magmas dentro del sistema magmático, controlado por el Sistema de Fallas Liquiñe – Ofqui y las Fallas Transversas Andinas, en un contexto de subducción. Lo anterior puede determinar los diferentes estilos eruptivos que ha presentado este macizo a lo largo de su historia.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

El volcán Villarrica es uno de los centros eruptivos más activos de la Zona Volcánica Sur de los Andes, el cual se ubica entre la región de La Araucanía y la región de Los Ríos, Chile ($39^{\circ}25'S$ - $71^{\circ}55'W$). Este estratovolcán forma parte de una cadena volcánica junto a los volcanes Quetrupillán y Lanín, la cual está dispuesta de forma oblicua al Sistema de Fallas Liquiñe – Ofqui (SFLO) y posee 60 km de longitud, con una orientación NW-SE (Hickey-Vargas *et al.*, 1989; López-Escobar *et al.*, 1995). Este volcán, tiene su origen en el Pleistoceno Medio, cuya actividad volcánica inició hace al menos 600.000 años según los autores Moreno y Clavero (2006) y sus productos emitidos son en su mayoría de composiciones basálticas a andesítica basálticas, asociados a erupciones efusivas y explosivas, tal como consta la publicación de Costantini *et al.* (2011). Se caracteriza por su forma cónica, cuya cima se eleva 2.847 m s.n.m. y por poseer un cráter de 200 m de diámetro con actividad fumarólica continua y un lago de lava en el fondo. Alrededor de este edificio volcánico se reconocen unos 30 centros eruptivos adventicios (Lara y Clavero, 2004; Moreno y Clavero, 2006).

La actividad del volcán Villarrica ha tenido estilos eruptivos que van desde el hawaiano hasta el estromboliano, con productos basálticos a basálticos-andesíticos (Pizarro *et al.*, 2019). Sin embargo, este macizo también ha presentado episodios explosivos, como los registros de las erupciones de las Ignimbritas Licán y Pucón, las cuales presentaron un estilo eruptivo tipo subpliniano a pliniano (Silva, 2008; Lohmar *et al.*, 2007). La última erupción ocurrió el 3 de marzo del año 2015, la cual estuvo caracterizada por ser de tipo estromboliana intensa y de corta duración (16 minutos en su paroxismo) que dio lugar a la formación de una fuente de lava de 1.500 m de altura sobre el nivel cráter (Vera, 2018). El material emitido durante esta erupción es de una composición de andesita basáltica (Romero *et al.*, 2018).

El amplio registro histórico que este volcán posee y su continua actividad volcánica, lo ha convertido en sujeto de múltiples estudios geológicos, pero no se cuenta con un estudio que relacione e integre los registros históricos en cuanto a su evolución geoquímica, para poder establecer similitudes o diferencias entre las diversas erupciones del volcán Villarrica y así

realizar su seguimiento evolutivo. El área de la geoquímica se encarga de estudiar el origen y la distribución de los elementos químicos en diferentes ambientes geológicos, así como, determinar las causas que controlan dicha distribución. La geoquímica a través de técnicas analíticas, tales como Fluorescencia de Rayos X (XRF) y Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS), obtiene datos geoquímicos de los elementos químicos presentes en los productos emitidos por el macizo, y estos ayudan a caracterizar la composición de dichas erupciones, lo que convierte a esta disciplina en una herramienta importante para la comprensión e interpretación del comportamiento de los magmas dentro del sistema magmático.

El presente trabajo integra los análisis geoquímicos de los productos del volcán Villarrica y correlaciona la información obtenida con descripciones estratigráficas, con el fin de evaluar cómo han variado las erupciones a través del tiempo y comprender de forma estructurada cómo han sido los cambios en el sistema magmático del volcán en los últimos miles de años. Esta información resulta útil para su posterior evaluación de peligros al considerar que el Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin) ubica a este edificio volcánico en primer lugar del Ranking de riesgo específico.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Caracterizar la evolución geoquímica de los productos emitidos por el volcán Villarrica mediante la integración de análisis geoquímicos y descripciones estratigráficas.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Generar una base de datos ordenada que recopile datos geoquímicos de elementos mayores, menores, elementos traza y tierras raras.
- Caracterizar los productos volcánicos en a base a su geoquímica, con énfasis en la agrupación y varianza de vectores composicionales.
- Determinar patrones de disimilitud o heterogeneidad composicional de las diferentes unidades estratigráficas.
- Interpretar la evolución del sistema magmático del volcán Villarrica.

1.3 Ubicación y accesos del área de estudio

El volcán Villarrica ($39^{\circ}25'S$ - $71^{\circ}55'W$) se encuentra ubicado entre el límite de las regiones de la Araucanía y de Los Ríos, Chile (Figura 1.1). Forma parte de las comunas de Villarrica y Pucón (provincia de Cautín) y de Panguipulli (provincia de Valdivia). Se sitúa en el sector precordillerano de la Cordillera de los Andes a 120 km de la ciudad de Temuco y a 802 km de la ciudad de Santiago. El principal acceso es por vía terrestre desde la ruta 5 Sur hacia la ruta 199 con dirección SE en Freire, pasando por las localidades de Villarrica y continuando por el camino que bordea el lago Villarrica hasta la localidad de Pucón, en donde se ingresa al Parque Nacional Villarrica.

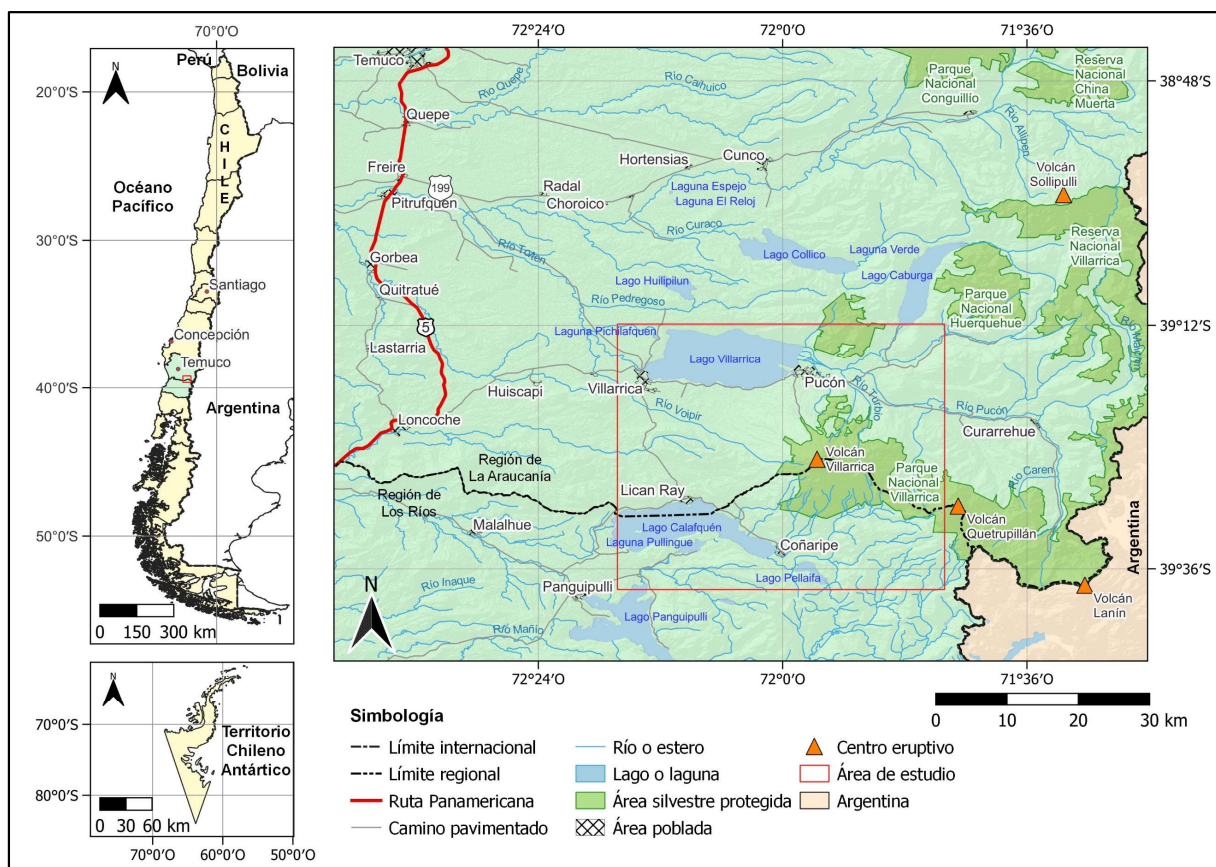


Figura 1.1: Mapa de ubicación y accesos al volcán Villarrica.

1.4 Trabajos anteriores

López-Escobar *et al.*, (1977) realizan un estudio general de nueve estratovolcanes de la zona centro sur de Chile, aportando con análisis geoquímicos de los depósitos volcánicos, además de analizar la relación entre el volcanismo y los procesos de subducción.

Hickey-Vargas *et al.*, (1989) proporcionan información geoquímica de las lavas de los volcanes pertenecientes a la cadena volcánica Villarrica-Lanín, con el fin de evaluar la heterogeneidad entre las fuentes magmáticas, procesos de cristalización fraccionada y asimilación cortical.

Clavero y Moreno (1994) aportan con la caracterización petrográfica y estructural de las Ignimbritas Licán y Pucón, determinando que corresponden a dos eventos eruptivos explosivos del volcán Villarrica.

Witter *et al.*, (2004) realizaron un estudio en torno a las características de desgasificación de los magmas del volcán Villarrica, analizando elementos mayores y trazas de sus magmas, tanto en roca total como en vidrio, determinando que este ha presentado una desgasificación continua.

Moreno y Clavero (2006) elaboran la carta geológica del volcán Villarrica, estableciendo tres unidades principales de este, las cuales son agrupadas según la evolución morfológica, criterios estratigráficos, estructurales y geocronológicos.

Cembrano y Lara (2009) hacen una revisión del vínculo entre la tectónica y el volcanismo en la Zona Volcánica Sur, estableciendo que el grosor cortical y la presencia de sistemas de fallas en el intra-arco inciden en los procesos de diferenciación magmática.

Silva *et al.*, (2010) presentan una caracterización petrográfica y estratigráfica del depósito de la Ignimbrita Pucón, además de realizar una reconstrucción de los eventos eruptivos ocurridos a partir de análisis geoquímicos.

Costantini *et al.*, (2011) estudian y describen petrográficamente y estratigráficamente el depósito Chaimilla, empleando la geoquímica determinan la edad y la composición química de este depósito y establecen factores que inciden en su nivel de explosividad.

Lohmar *et al.*, (2012) a través de análisis geoquímicos, tanto en roca total como en vidrio, y mineralógicos establecen condiciones pre-eruptivas de la Ignimbrita Licán, creando un modelo de la cámara magmática y analizando la influencia del retroceso glacial durante la erupción.

Morgado *et al.*, (2015) sugieren la existencia de una cámara magmática intermedia entre una a mayores profundidades y la superficie, a partir de análisis geoquímicos de los productos del Villarrica emitidos en el año 1971.

Pizarro *et al.*, (2019) presentan un estudio de las lavas emitidas por el volcán Villarrica de los años 1921, 1948 y 1971, con el fin de evaluar comparativamente las condiciones eruptivas de estas. Establecen que estas erupciones poseen condiciones pre-eruptivas similares.

Boschetty *et al.*, (2022) analizan composiciones minerales de productos del volcán Villarrica y ocupan métodos de análisis estadístico composicional, transformaciones logarítmicas y análisis de agrupación de clústers para poder agrupar sus resultados y compararlos.

Romero *et al.*, (2023) establecen las condiciones pre-eruptivas de la actividad eruptiva ocurrida en 2015, empleando análisis geoquímicos en vidrio y análisis termodinámicos, con el fin de determinar diferencias con erupciones históricas anteriores.

Urra-Tapia *et al.*, (2023) construyen un modelo 3D de la estructura del volcán Villarrica ocupando el método de *Ambient Noise Tomography* (ANT), con el cual determinan la existencia de dos reservorios magmáticos debajo de la superficie del volcán.

Pavez *et al.*, (2023) usan el método magnetoteléurico (MT) en el volcán Villarrica para caracterizar la distribución de fluidos y fundidos bajo la corteza y determinar las posibles ubicaciones de los reservorios magmáticos.

2. MARCO GEOLÓGICO Y TEÓRICO

La zona por estudiar se sitúa en un margen continental activo caracterizado por la subducción de la placa Nazca bajo la placa Sudamericana. Esta convergencia es ligeramente dextral-oblicua, en dirección N78°E a una tasa de 6,6 cm/año (Cembrano y Lara, 2009). La Zona Volcánica Sur (ZVS) está definida entre los 33°S y 46°S, en el margen occidental de la placa Sudamericana y esta además se divide en cuatro provincias: norte (ZVSN), transicional (ZVST), centro (ZVSC) y sur (ZVSS) (Figura 2.1) (López-Escobar *et al.*, 1995). El espesor cortical presenta una variación a medida que aumenta la latitud, vale decir que, desde los 33°S posee un espesor de 50 km y hacia los 46°S el espesor de la corteza disminuye a 35 km (Tassara y Yañez, 2003).

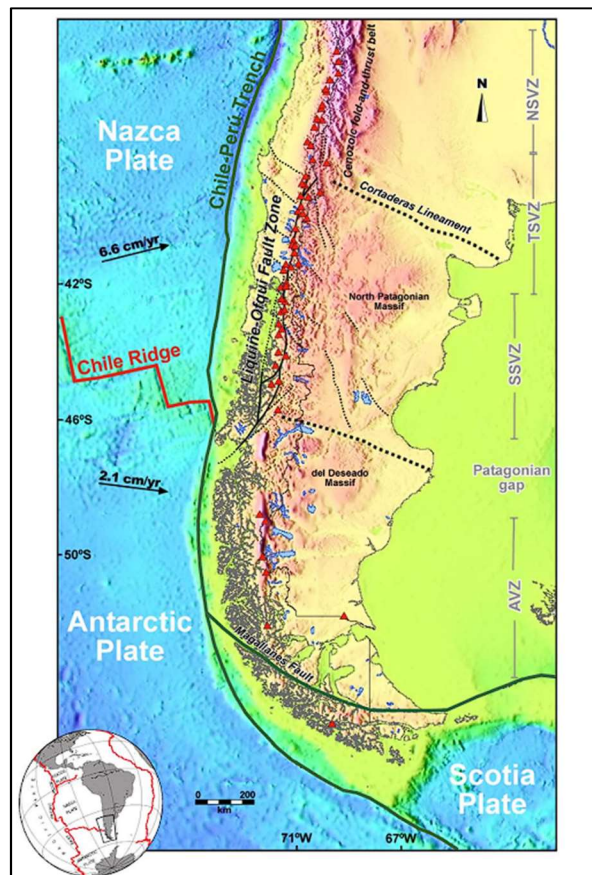


Figura 2.1: Tectónica de placas de los Andes Chilenos entre los 33°S y 47°S. Obtenido de Cembrano y Lara (2009).

2.1 Geología Estructural

La Zona Volcánica Sur (SVZ) posee dos grupos de estructuras, responsables de la deformación en la corteza. El primero corresponde al Sistema de Fallas Liquiñe-Ofqui (SLOF), la cual domina gran parte de la ZVS entre los 38°S y los 47°S, extendiéndose por 1.200 km en dirección N10°E. El SLOF corresponde a un sistema de fallas de intra-arco transpresional con orientación preferente NNE con deslizamiento dextral. Esta zona de cizalle dúctil-frágil ha estado activa al menos durante los últimos 6 Ma y que a medida que el SLOF se extiende hacia el sur, aumenta el componente de acortamiento del Plioceno a la actualidad (Cembrano y Lara, 2009).

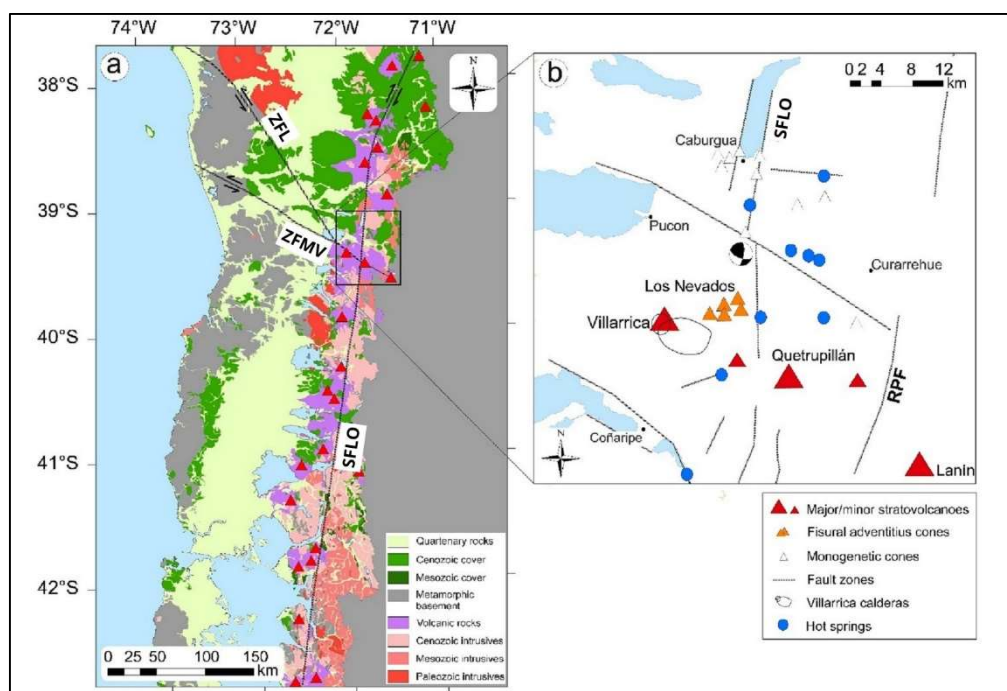


Figura 2.2: Mapa geológico estructural de la ZVS. Modificado de Cembrano y Lara (2009). Obtenido de Pavez *et al.* (2023).

Las Fallas Transversas Andinas (FTA) corresponden al segundo grupo y son fallas sinestrales e inversas sinestrales oblicuas al orógeno Andino y poseen una orientación preferente NW. Estas estructuras son heredadas de procesos geológicos pre-andinos (Pérez-Flores *et al.*, 2016). Este grupo de fallas serían responsables de la segmentación en la tectónica de los Andes y entre ellas se destacan la Zona de Falla Lanalhue (ZFL) y la Zona de Falla Mocha-Villarrica (ZFMV) (Figura 2.2) (Pavez *et al.*, 2023).

El volcán Villarrica se ubica en la zona norte del Sistema de Fallas Liquiñe-Ofqui, la cual es interrumpida por la Zona de Falla Mocha-Villarrica (Pavez *et al.*, 2023). Esta estructura de orientación N°50W da lugar a la formación de un lineamiento oblicuo al SFLO; la cadena volcánica Villarrica-Quetrupillán-Lanín y sería la responsable del desplazamiento del SFLO (Figura 2.3) (Lara *et al.*, 2004; Cembrano y Lara, 2009). Hacia el este del volcán Villarrica, se emplaza la Falla Reigolil-Pirihueico (RPF), la cual corresponde a una falla de segundo orden que va paralela al SFLO y que ocasiona una discontinuidad geológica y morfológica, es decir, el basamento es más alto hacia el este (Lara, 2004).

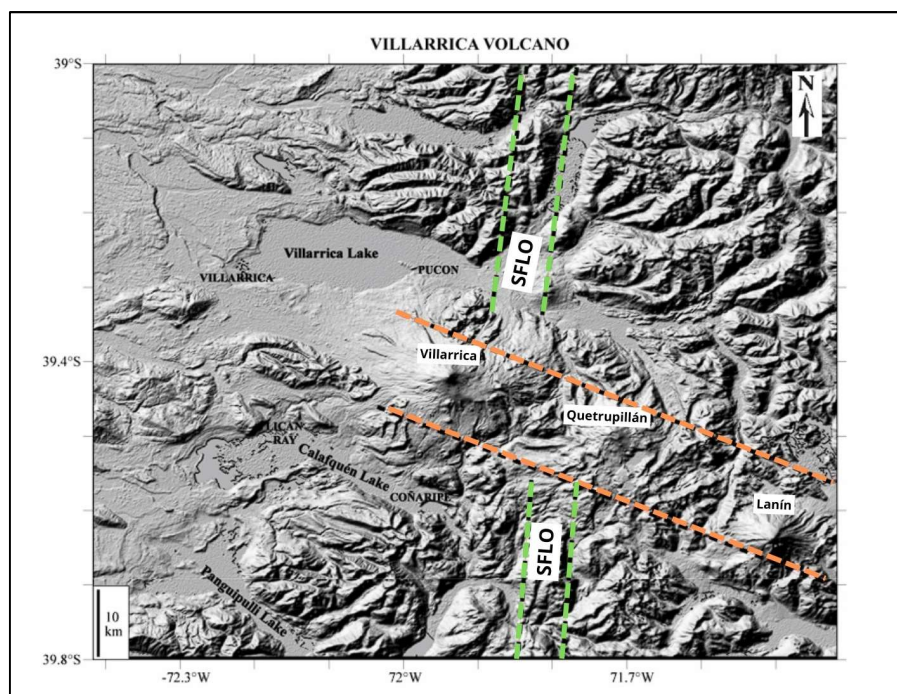


Figura 2.3: Modelo de elevación digital mostrando las principales estructuras geológicas: Cadena volcánica Villarrica – Lanín y Sistema de Fallas Liquiñe-Ofqui (SFLO). Modificado de Silva (2008).

El SFLO controla parcialmente la ocurrencia y la distribución espacial de los principales estratovolcanes, coincidiendo con el arco magmático actual (Morgado *et al.*, 2015). La ZFMV facilita el ascenso de magmas a través de fracturas y planos de debilidad en la roca (Urta-Tapia *et al.*, 2023) y está íntimamente relacionada al volcanismo cuaternario en los Andes Centrales y Sur (López-Escobar *et al.*, 1995; Cembrano y Lara, 2009; Hickey-Vargas *et al.*, 2016).

2.2 Rocas del basamento

Complejo Metamórfico Trafún

Unidad metamórfica definida por Campos *et al.* (1998) que aflora al suroeste del volcán Villarrica y cubre un área de 7 km hacia el noroeste de Lican Ray. Las rocas corresponden a filitas, gneises y cuarcitas, cubiertas por depósitos glaciales y/o piroclásticos formados por erupciones del volcán Villarrica. Poseen una edad Devónico – Carbonífero y están localmente afectadas por una fuerte deformación. Los gneises poseen porfiroblastos de quistolita y de cordierita, que podrían estar asociados a un metamorfismo de contacto originado por la intrusión de plutones de edad Carbonífera – Pérmico (Munizaga *et al.*, 1988).

Formación Panguipulli

Definida por Aguirre y Levi (1964) como una secuencia sedimentaria distribuida en el sector suroeste del área de estudio y ubicada a 2 km al oeste de Lican Ray. Es una secuencia de capas de lutitas alternadas con capas de areniscas cuarcífera finas a medias e intercalaciones de conglomerados cuarcíferos. La formación se dispone de forma homoclinal con rumbo y manteo de 5-20°W/50°E. La secuencia está afectada por metamorfismo de contacto causado por intrusivos del Jurásico (Parada, 1975; Parada y Munizaga, 1978; Rodríguez *et al.*, 1999; Martín *et al.*, 1999). Herbst *et al.* (2005) le asigna su edad al Triásico Superior.

Estratos de Pino Huacho

Unidad informal definida por Moreno y Clavero (2006), que consiste en una secuencia volcanoclástica estratificada. Esta aflora en el sector oeste del volcán, principalmente entre las localidades de Villarrica y Lican Ray, así como también, en los sectores norte y sur del edificio volcánico. Se compone por secuencias de lavas, tobas brechosas y de lapilli de composición andesíticas y con alteraciones de clorita y epidota. A esta unidad se adicionan cuerpos subvolcánicos, como diques y filones de igual composición. Se le otorga una edad tentativa de Oligoceno – Mioceno (Moreno y Clavero, 2006).

Estratos de Península Pucón

Definida informalmente por Moreno y Clavero (2006), es un afloramiento ubicado en la península de Pucón, al oeste de la localidad homónima. La litología se describe como una

secuencia de lavas amigdaloidales bien conservadas, brechas piroclásticas y tobas líticas de lapilli, todas son de composición andesítica. La secuencia está dispuesta de forma subhorizontal a levemente plegada, la cual está cubierta por depósitos piroclásticos y laháricos originados por el volcán Villarrica. Se le asigna una edad tentativa Mioceno Medio a Superior, debido a que la secuencia no presenta metamorfismo de contacto, el cual se asocia a los plutones del Mioceno Superior.

Estratos de Huincacara

Secuencia volcanoclástica definida informalmente por Moreno y Clavero (2006). Se distribuyen al oeste del volcán Villarrica, entre Villarrica y Lican Ray, formando cordones de cerros en conjunto con los Estratos de Pino Huacho. La conforman brechas piroclásticas, areniscas y conglomerados epiclásticas con fragmentos de lavas andesíticas. Por similitud petrográfica con la Formación Malleco, posee una edad del Plioceno Superior – Pleistoceno (Suárez *et al.*, 1997).

2.3 Rocas Plutónicas

Intrusivos del Paleozoico

En la zona SW del área de estudio afloran cuerpos de granitos, granodioritas y tonalitas de grano grueso, de edad $304,7 \pm 2,1$ Ma por dataciones de U-Pb (Campos *et al.*, 1998 en Moreno y Clavero, 2006). No obstante, en la península de Lican Ray, estos cuerpos generan un leve metamorfismo de contacto en rocas de la Formación Panguipulli, lo que correlaciona estos intrusivos con el Batolito Panguipulli del Jurásico (Parada, 1975).

Intrusivos del Cretácico

Ubicados al SW del área de estudio, predominan las composiciones tonalíticas, con cuerpos subordinados de granodioritas y dioritas cuarcíferas. Corresponden a miembros occidentales de la franja de granitoides cretácicos reconocidos al E y al SE de Liquiñe (Moreno y Clavero, 2006). Lara y Moreno (2004) le otorgan una edad de 97 ± 3 Ma por datación de K-Ar.

Intrusivos del Mioceno

Cuerpos distribuidos en la parte oriental del volcán Villarrica, que forman parcialmente el basamento oriental, afloran en el sector N y S de este y lo conforman dioritas, tonalitas y

granodioritas, que poseen estructuras de *roof-pendants* en rocas cenozoicas y texturas de migmatitas (Moreno y Clavero, 2006). Munizaga *et al.* (1988) obtiene edades cercanas a 8 Ma (K–Ar), en tanto, Lara y Moreno (2004) obtienen dataciones de $6,4 \pm 0,3$ Ma (K–Ar en biotita) y $5,77 \pm 0,15$ Ma ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en biotita). Son la extensión de una franja de granitoides ubicada al W del SFLO, denominados como Granitoides Pellaifa–Neltume (Lara y Moreno, 2004).

2.4 Rocas y depósitos volcánicos

Según la carta geológica “Geología del volcán Villarrica” del Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin), publicada por Moreno y Clavero en el año 2006, se han identificado tres unidades geológicas, que han sido agrupadas según criterios estratigráficos, geomorfológicos, estructurales y geocronológicos, correspondientes a las Unidades Villarrica 1, 2 y 3 que serán descritas en esta sección.

2.4.1 Unidad Villarrica 1, Plv1

Unidad más antigua del volcán Villarrica, de edad Pleistoceno Medio – Superior, la cual se separa en dos etapas, divididas por el colapso de un edificio volcánico (Moreno y Clavero, 2006).

La primera etapa comenzó hace 600.000 años con la construcción del edificio volcánico, a partir de emisiones de lavas de composición basáltica a andesítico basáltica, depósitos piroclásticos y laháricos. Estas son de tipo Aa a Pahoehoe, con texturas porfíricas con fenocristales de plagioclasa, clinopiroxeno y olivino dispuestos en una masa fundamental vítrea. Los depósitos se distribuyen alrededor de todos los flancos del volcán, principalmente en el flanco oriental y se encuentran altamente afectados por erosión glacial y cubiertos por unidades más jóvenes del Villarrica. Este estadio termina con la formación de la Caldera 1 (Figura 2.4) entre los 170.000 y 95.000 años antes del presente (AP) (Moreno y Clavero, 2006).

Luego del colapso de la Caldera 1, comenzó una segunda etapa de construcción de domos exógenos y endógenos, junto con filones y diques de composición dacítica (65,4 wt% SiO₂) (Clavero y Moreno, 2004). Estos productos poseen texturas porfíricas con fenocristales de plagioclasa, clinopiroxeno y ortopiroxeno en masas fundamentales afaníticas a microcristalinas

de texturas fluidales. Se distribuyen en el flanco oriental (Figura 2.4), cubriendo la secuencia anterior y cubiertos por depósitos piroclásticos de la Unidad Villarrica 2, además de hallarse meteorizados (Moreno y Clavero, 2006). Gaytán *et al.* (2005) estima que esta etapa tuvo una duración entre los 95.000 a los 13.900 años AP, durante la Glaciación Llanquihue.

2.4.2 Unidad Villarrica 2, PIH2v

Unidad caracterizada por ser la más explosiva en la historia postglacial del volcán Villarrica, conformada por secuencias de lavas andesítico-basálticas (52-55 wt% SiO₂), depósitos piroclásticos de flujo, caída y oleada, de composiciones andesítico-basálticas hasta dacíticas y depósitos laháricos, que se distribuyen por todos los flancos del volcán. La base y el techo están definidas por la Ignimbrita Licán (13.700 años AP) y la Ignimbrita Pucón (3.700 años AP), respectivamente (Moreno y Clavero, 2006).

Ignimbrita Licán: Depósitos piroclásticos de caída, flujo y oleada, originados por un gran evento eruptivo hace 13.700 años AP, el cual generó el colapso parcial del edificio ancestral y la formación de la Caldera 2, la cual se anida en la Caldera 1 (Figura 2.4). Estos depósitos cubren más de 1.000 km² y se estima un volumen de 10 km³ (Lohmar *et al.*, 2012). Los afloramientos más distales se ubican a más de 40 km hacia el W del volcán (Moreno y Clavero, 2006).

Ignimbrita Pucón: Secuencia de depósitos piroclásticos de flujo, oleada y caída, causados por un segundo gran evento eruptivo hace 3.700 años AP, el cual generó la destrucción superior del edificio actual y la formación de la Caldera 3 (Figura 2.4). Posee un volumen mínimo de 5 km³ y alcanzó distancias de más de 20 km desde su fuente, cubriendo más de 500 km² (Moreno y Clavero, 2006). Silva *et al.* (2010) establece que las composiciones de estos depósitos son andesítico-basáltico y divide a la ignimbrita en una Subunidad Inferior (P1) y Superior (P2). Ambas contienen ceniza, lapilli y lavas con clastos líticos, pero P2 contiene además clastos de granitoides tanto libres, como en inclusiones en escorias.

2.4.3 Unidad Villarrica 3, Hv3

Esta unidad comprende a los depósitos más actuales de productos emitidos por el volcán Villarrica, forman parte del cono actual, el cual se edifica dentro de la depresión ocasionada por

la erupción de la Ignimbrita Licán. Moreno y Clavero (2006) dividen esta unidad en dos subunidades; prehistórica e histórica.

2.4.3.1 Subunidad prehistórica

Corresponden lavas bien conservadas de composición andesítico-basáltica de tipo Aa y Pahoehoe, con espesores entre 1 a 15 m de espesor. Poseen textura porfídica y minerales de plagioclasa, olivino y clinopiroxeno dispuestos en masas fundamentales de texturas variadas. Incluye una secuencia piroclástica de 15 m de espesor que aflora por todos los flancos de volcán (Moreno y Clavero, 2006). Esta secuencia inicia con depósitos piroclásticos de caída pertenecientes a la erupción Chaimilla, que alcanzan hasta 1,7 m de espesor, compuesta principalmente por fragmentos juveniles escoráceos bien seleccionados, distribuidos en un área de 250 km² en el flanco N del macizo (Costantini *et al.*, 2011). Sobre ello le sigue una secuencia de depósitos de flujo y de oleada piroclástica, con intercalaciones de depósitos de caída y algunas lavas de composición andesítico-basáltica (Moreno y Clavero, 2006).

2.4.3.2 Subunidad histórica

Consisten en lavas bien preservadas de tipo Aa y Pahoehoe, son de composición andesítico-basáltica y poseen espesores entre 1 a 8 m. Se caracterizan por tener textura porfídica, fenocristales de plagioclasa, olivino y clinopiroxeno en una masa fundamental de texturas afaníticas, traquíticas e intersectales. Estas se distribuyen principalmente en el flanco oriental del volcán (Figura 2.4) y se destacan las lavas de los años 1921, 1948, 1971 y 1984. Se incluyen depósitos piroclásticos de caída, conformado por fragmentos de escoria tamaño ceniza a lapilli grueso y secuencias de depósitos laháricos asociadas a las erupciones anteriormente mencionadas, las cuales alcanzan espesores sobre 6 m y alcanzan extensiones de más de 30 km, llegando incluso hasta los lagos Villarrica y Calafquén (Figura 2.4) (Moreno y Clavero, 2006).

El 3 de marzo del año 2015 se registró una erupción de corta duración y de tipo estromboliana que dio lugar a una fuente de lava de 1500 m de altura. Este evento dio lugar a productos de composición andesita basáltica, correspondientes a depósitos de caída de tefra hacia el este del volcán y flujos de escoria clastogénica en los flancos norte y este del macizo (Romero *et al.*, 2018).

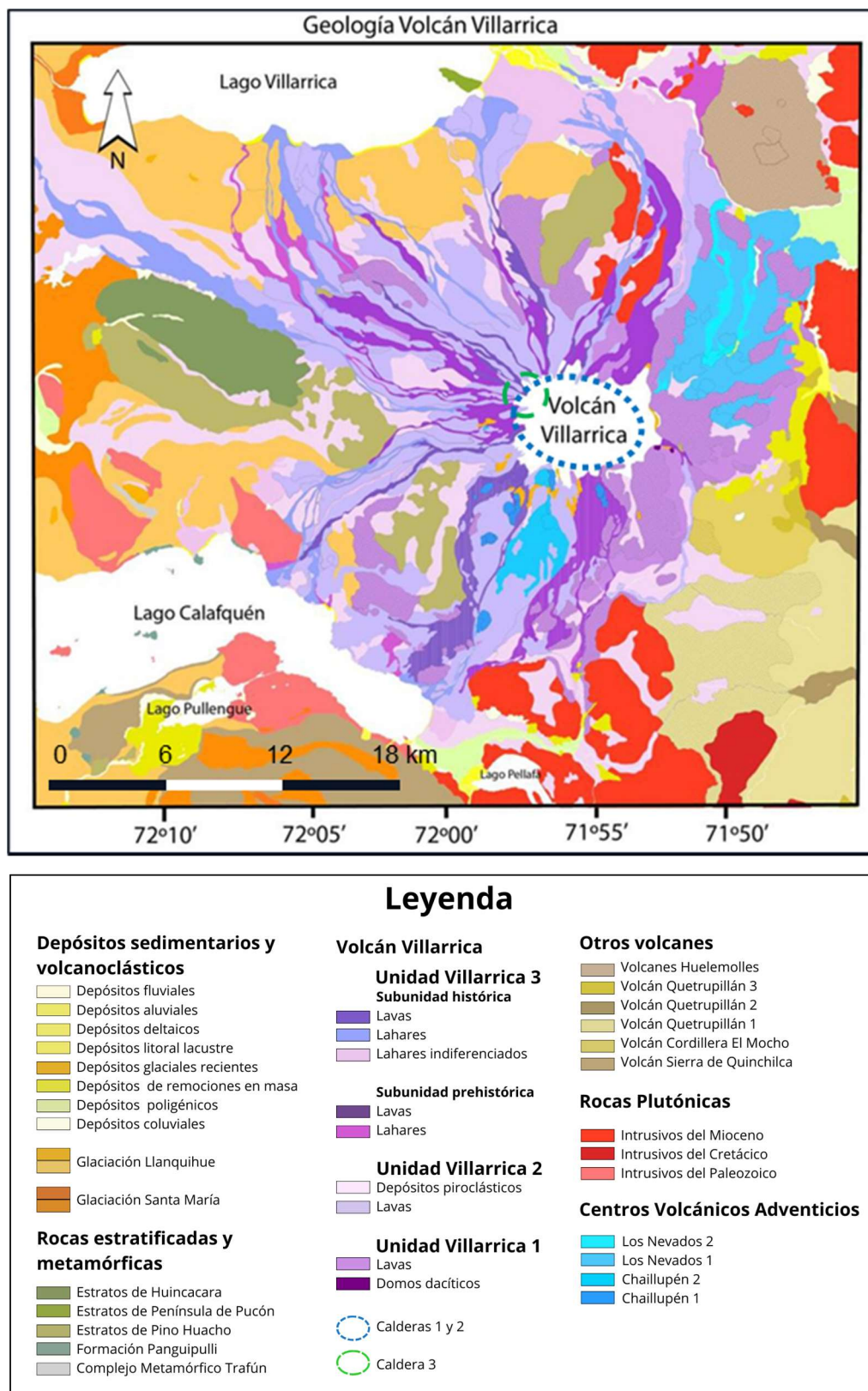


Figura 2.4: Mapa geológico simplificado del Volcán Villarrica. Modificado de Bono (2014).

2.5 Análisis composicional estadístico: *Simplex* y método de Aitchison

El siguiente subcapítulo es elaborado en base al libro “*Compositional data analysis*”, publicado por Pawlowsky-Glahn y Buccianti en el año 2011, dicho texto contiene definiciones teóricas y aplicaciones prácticas en las geociencias.

Los datos composicionales, en este caso datos composicionales de elementos químicos presentes en las rocas y depósitos, son considerados como elementos no negativos y que suman una unidad constante o bien 100 wt%. Geométricamente, estos elementos forman parte de un espacio denominado *Simplex* de D componentes (S^D), que suman una constante (k), definido como:

$$S^D : \{\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_D]; x_i > 0; \sum_{i=1}^D x_i = k\}$$

El problema de los datos composicionales al ser normalizados a una constante, al 100 wt% en el caso de composiciones geoquímicas, es que pueden generar consecuencias al momento de emplear herramientas matemáticas y generar correlaciones espurias e interpretaciones incorrectas (Cortés *et al.*, 2007). Vale decir, cuando las concentraciones de los elementos son normalizadas, las variables de estos pueden incrementar o disminuir por efectos de la normalización y no por una correlación entre variables, es decir, estas variables son dependientes entre sí.

Para poder evitar el problema anterior, Aitchison en el año 1986, introdujo un método de transformaciones logcocientes, para crear un espacio muestral (espacio Euclidiano) real dimensional de D componentes (R^D), con el cual se pueda trabajar con grandes cantidades de datos composicionales dentro de un *Simplex* (Cortés *et al.*, 2007). Existen diversas transformaciones: transformación logcociente aditiva (alr), transformación logcociente centrada (clr) y transformación logcociente isométrica. En este estudio, los datos son transformados usando el logcociente centrado, el cual se define como:

$$clr(\mathbf{x}) = \left(\ln \frac{x_1}{g(\mathbf{x})}, \ln \frac{x_2}{g(\mathbf{x})}, \dots, \ln \frac{x_D}{g(\mathbf{x})} \right)$$

Esta transformación consiste en dividir cada componente (x) de los datos composicionales por su media geométrica ($g(x)$). Lo anterior da como resultado un espacio real dimensional de D componentes, el cual se puede representar en diagramas binarios en forma de vectores composicionales (Martín-Fernández *et al.*, 2005). Según los autores Aitchison y Greenacre (2002), estos diagramas binarios o *biplots*, también conocidos como análisis de componentes principales (PCA), describen gráficamente patrones de variabilidad entre los componentes con respecto a dos componentes principales. En estos diagramas, la longitud de cada vector es proporcional a la varianza del componente transformado, es decir, a mayor magnitud, mayor varianza. En el caso de que tres vectores describan un patrón linear similar, podría indicar una variabilidad de una dimensión entre esos componentes y conformar un diagrama ternario (Aitchison y Greenacre, 2002).

2.6 Métodos de análisis de clústeres o agrupaciones: El dendograma

Los análisis de clústeres son una herramienta para poder clasificar un grupo de datos que posee similitudes entre ellos, el cual depende del parámetro que se quiera usar para efectuar una agrupación (Cortés *et al.*, 2007). Lo anterior resulta útil para poder establecer similitudes o diferencias en datos de composiciones geoquímicas, determinando cuan cerca o lejos se encuentran dos objetos en un espacio determinado. Es decir, los diferentes puntos o clústeres son agrupados iterativamente hasta quedar con un solo clúster que reúna toda la información de datos composicionales (Boschetti *et al.*, 2022).

Según Cortés *et al.* (2007), una forma de medir la distancia entre vectores composicionales en un *simplex* es ocupando la distancia de Aitchison, la cual equivale a la distancia Euclidiana, y es definida como:

$$d(\vec{\mathbf{x}}, \vec{\mathbf{y}}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\ln \frac{x_i}{g(\vec{\mathbf{x}})} - \ln \frac{y_i}{g(\vec{\mathbf{y}})} \right]^2}$$

Donde d es la matriz de distancia, i es el número de componentes, x e y son los puntos considerados para medir la distancia y g la media geométrica.

Existen distintos métodos jerárquicos para poder efectuar una agrupación: *Single linkage*, *Complete linkage*, *Centroid linkage*, *Averages linkage* y *Ward linkage*. En esta ocasión, se utilizó *Complete linkage* o enlace completo, el cual agrupa los datos según el clúster vecino más alejado. La ventaja de este método es que tiende a identificar clústeres equi-dimensionales y además que la distancia entre clústeres corresponde a la máxima distancia del nuevo clúster que se forma luego de cada partición. Una de las formas de representar estas distancias visualmente es a través de un dendograma. Un dendograma es un diagrama que muestra la distribución de los distintitos clústeres unidos a través de líneas en foma de “U”, los largos de dichas líneas son proporcionales a la distancia entre los datos composicionales (Cortés *et al.*, 2007; Boschetty *et al.*, 2022).

3. METODOLOGÍA

3.1 Confección de la base de datos

La primera etapa del trabajo consistió en una revisión bibliográfica de estudios y artículos con información relevante del volcán Villarrica, referente a sus características geológicas, comportamiento y productos emitidos, además de información geoquímica de estos. Lo anterior se resume en las tablas 3.1 y 3.2, que indican el número de muestras obtenidas de bibliografía según autor y cuantas de ellas se asocian a las Unidades Villarrica 1, 2 y 3 (UV1, UV2 y UV3, respectivamente). Además, se incluyen muestras analizadas por el Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin), las cuales comprenden análisis de elementos mayores y elementos traza en roca total.

Los datos recopilados fueron ordenados en una base de datos, la cual se realizó ocupando una planilla Excel. Esta planilla reúne datos de elementos mayores expresados en wt% (SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , FeO , Fe_2O_3 , FeOT , CaO , MgO , MnO , Na_2O , K_2O y P_2O_5), elementos traza en ppm (Cu, V, Cr, Co, Ni, Zn, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Ba, Pb, Sc, Ga, Cs, Hf, Ta, Th y U) y tierras raras en ppm (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu). Es así como se recopilaron en total 460 muestras, de las cuales 218 muestras se analizaron en roca total (Tabla 3.2) y 242 de ellas en vidrio (Tabla 3.2). Estas muestras fueron categorizadas según su unidad geológica establecidas por Moreno y Clavero (2006) y también por evento eruptivo.

Las técnicas analíticas empleadas para la obtención de las composiciones en roca total (elementos mayores, traza y tierras raras) incluyen técnicas de Fluorescencia de Rayos X (XRF), Espectrometría de Emisión Atómica de Plasma Acoplado por Inducción (ICP-AES), Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS), Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente por Ablación Láser (LA-ICP-MS) y Análisis por Activación de Neutrones (INAA). Por otro lado, las composiciones de vidrio (elementos mayores) se obtuvieron a partir de la herramienta analítica de microsonda electrónica (*Electron microprobe*). La tabla 3.3 entrega información con respecto a los tipos de análisis empleados por los diferentes autores.

Autor	N° muestras analizadas en roca total				N° de datos geoquímicos obtenidos		
	UV1	UV2	UV3	No asociada	Elementos mayores	Elementos traza	Tierras raras
Hickey-Vargas et al., 1989	3	9	8	0	160	256	128
López-Escobar et al., 1977	0	0	1	0	10	9	9
Witter et al., 2004	0	0	6	0	60	88	12
Silva, 2008	0	87	0	0	870	1044	783
Costantini et al., 2011	0	6	0	0	60	72	18
Lohmar et al., 2012	0	22	0	0	220	240	180
Wehrmann et al., 2014	0	0	0	4	40	80	56
Pioli et al., 2015	0	6	0	0	60	96	18
Morgado et al., 2015	0	0	27	0	297	513	378
Pizarro et al., 2019	0	0	19	0	209	361	266
Romero et al., 2023	0	0	1	0	10	20	14
Sernageomin	0	11	8	0	190	266	0
Total	3	141	70	4	2186	3045	1862
Total muestras	218						

Tabla 3.1: Número de muestras analizadas en roca total y número de datos geoquímicos recopilados según autor. UV1, UV2, UV3 corresponden a las Unidades Villarrica 1, 2 y 3, respectivamente.

Autor	N° de muestras analizadas en vidrio				N° de datos geoquímicos obtenidos		
	UV1	UV2	UV3	No asociada	Elementos mayores	Elementos traza	Tierras raras
Silva, 2008	0	154	0	0	1540	0	0
Wehrmann et al., 2014	0	0	0	29	290	0	0
Pioli et al., 2015	0	53	0	0	530	0	0
Romero et al., 2023	0	0	6	0	60	0	0
Total	0	207	6	29	2420	0	0
Total muestras	242						

Tabla 3.2: Número de muestras analizadas en vidrio y número de datos geoquímicos recopilados según autor. UV1, UV2, UV3 corresponden a las Unidades Villarrica 1, 2 y 3, respectivamente.

	Técnica analítica en roca total			Técnica analítica en vidrio
Autor	Elementos mayores	Elementos traza	Tierras raras	Elementos mayores
Hickey-Vargas et al., 1989	XRF	XRF, INAA	INAA	No presenta
López-Escobar et al., 1977	XRF	XRF, INAA	INAA	No presenta
Witter et al., 2004	XRF	XRF	XRF	No presenta
Silva, 2008	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	Microsonda electrónica
Costantini et al., 2011	XRF	XRF	XRF	No presenta
Lohmar et al., 2012	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	No presenta
Wehrmann et al., 2014	XRF	ICP-MS	ICP-MS	Microsonda electrónica
Pioli et al., 2015	XRF	LA-ICP-MS	LA-ICP-MS	Microsonda electrónica
Morgado et al., 2015	XRF	ICP-MS	ICP-MS	No presenta
Pizarro et al., 2019	ICP	ICP-MS	ICP-MS	No presenta
Romero et al., 2023	ICP	ICP-MS	ICP-MS	Microsonda electrónica

Tabla 3.3: Técnicas analíticas empleadas para las composiciones de roca total y vidrio según autor.

Para efectos de este trabajo, se usarán las muestras que han sido analizadas en roca total, ya que, estas presentan un mayor número de datos geoquímicos y abarcan las Unidades Villarrica 1, 2 y 3 (Anexo 1).

3.2 Confección de diagramas

Como se indicó en la sección anterior, se seleccionaron 218 muestras correspondientes a aquellas analizadas en roca total, de las cuales 6 muestras se descartaron porque presentaban un PPC (Porcentaje de Pérdida por Calcinación) mayor al 6%, lo que al ser muestras muy meteorizadas puede ocasionar una alteración en los datos (Rollinson, 1993), por lo tanto, se utilizaron 212 muestras en total para la confección de diagramas.

Los datos geoquímicos fueron procesados mediante el uso del programa *Jupyter Lab (Python 3,9)*, junto con el uso de las librerías *Geochem*, *Pandas*, *Matplotlib* y *Seaborn*. Las librerías de *Geochem* y *Pandas* permiten normalizar los datos geoquímicos y la lectura de estos. Con las librerías de *Matplotlib* y *Seaborn* se confeccionaron gráficos de clasificación TAS (Le Maitre et al., 1989), diagramas AFM (Irvine y Baragar, 1971), diagramas bivariantes multielementales

(Harker, 1909), diagramas multielementales y de tierras raras (REE) normalizados al manto primitivo y condrito, respectivamente (Sun y McDonough, 1989).

Ocupando los datos geoquímicos de elementos mayores normalizados al 100 wt% se elaboraron diagramas *biplot* para analizar estadísticamente las composiciones de las muestras, ocupando los métodos de Aitchison (2003) en el programa *Jupyter Lab (Python 3,9)*, junto con las librerías mencionadas y la librería *Scikit-learn*, la cual permite la obtención de vectores composicionales en un diagrama *biplot* o PCA (análisis de componentes principales), previa transformación logcociente centrada (clr) de los datos composicionales y cálculo de la matriz de varianza.

Luego los datos composicionales transformados (clr) fueron agrupados de forma jerárquica para poder medir la distancia y analizar la similitud o disimilitud entre ellos. De esta forma se ocupó el método de agrupamiento de *linkage complete* o enlace completo, para construir clústeres o agrupaciones representados en un dendograma que midiera las distancias entre las muestras (Cortés *et al.*, 2007; Boschetty *et al.*, 2022). Los dendogramas también fueron realizados en *Jupyter Lab (Python 3,9)* ocupando la documentación de la librería *Scipy*.

Los resultados obtenidos permiten describir los productos emitidos por el volcán Villarrica, caracterizándolos desde un punto de vista geoquímico, de tal modo se analizan los resultados de forma comparativa, evaluando la disimilitud entre ellos.

4. RESULTADOS

4.1 Clasificación geoquímica de unidades geológicas

4.1.1 Clasificación Total Alkalis vs Silica (TAS)

El diagrama TAS (Le Maitre *et al.*, 1986) (Figura 4.1) muestra la clasificación de los productos emitidos por el volcán Villarrica agrupados según su unidad geológica. El conjunto de datos empleado incluye 212 muestras analizadas en roca total, previamente normalizados (Anexo 3).

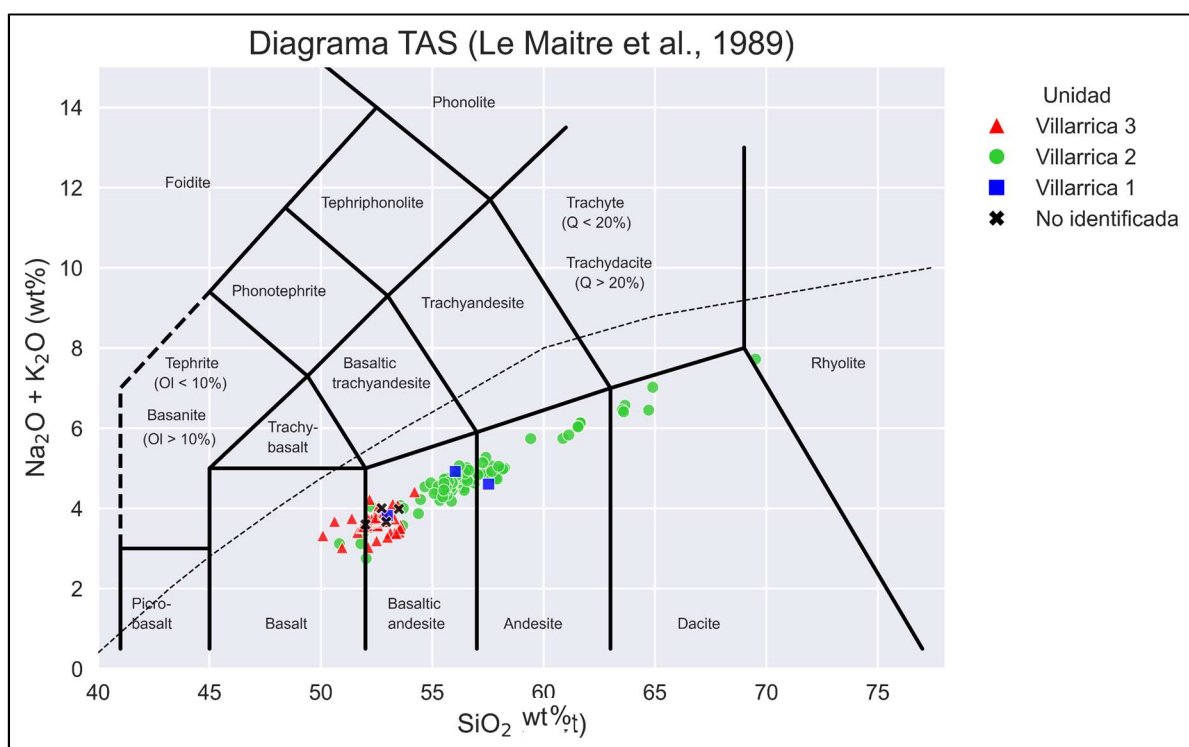


Figura 4.1: Diagrama TAS (Le Maitre *et al.*, 1989) para las Unidades Villarrica 1, 2 y 3 en colores azul, verde y rojo respectivamente. Cruces negras representan a muestras no asociadas a ninguna unidad geológica del Villarrica.

Se observa que todas las muestras se ubican por debajo de la línea punteada, dentro del área de series de rocas subcalinas. Para las Unidades Villarrica 1 y 2, los productos poseen una composición de andesitas basálticas a andesitas. Por lo tanto, según la clasificación de Le Maitre *et al.* (1989) son productos de composiciones intermedias (52-63 wt% SiO₂). La Unidad Villarrica 3 se concentran en el campo de basaltos y andesitas basálticas, por lo que son productos de una composición básica (45-52 wt% SiO₂) a intermedia (52-63 wt% SiO₂). Las

muestras no identificadas (cruces negras en la Figura 4.1) son depósitos de tefra tomados por Wehrmann *et al.* (2014) y se clasifican como andesitas basálticas dentro del rango de una composición intermedia.

En el caso de la Unidad Villarrica 2, existen muestras en el área de dacitas y riolitas. Estas composiciones más diferenciadas son posiblemente causadas por inyecciones de magma enriquecidos en incompatibles, seguidos de una diferenciación magmática ocurrido en un largo intervalo de tiempo, el cual pudo generar contaminación por granitoides del basamento, entre las Subunidades Inferior (P1) y Superior (P2), representados por material juvenil (DPJ) perteneciente a P2 de la Ignimbrita Pucón (Silva, 2008).

4.1.2 Diagrama AFM

El diagrama triangular AFM (álcalis, FeO total, MgO) es utilizado para diferenciar las series calcoalcalinas de las toleíticas dentro de la serie subalcalina, según la línea de Irvine y Baragar (1971). Para facilitar la visualización de los datos, se confeccionaron los diagramas AFM por separado según unidad geológica (Figura 4.2), representados por un total de 212 muestras (Anexo 3).

En general, los diagramas AFM de la Figura 4.2 ilustran que la mayoría de las muestras se encuentran por debajo de la línea de Irvine y Baragar (1971), lo que significa que pertenecen a la serie calcoalcalina. Sin embargo, algunas muestras pertenecientes a la Unidad Villarrica 2 y 3 presentan una tendencia toleítica, es decir, muestran un enriquecimiento en Fe.

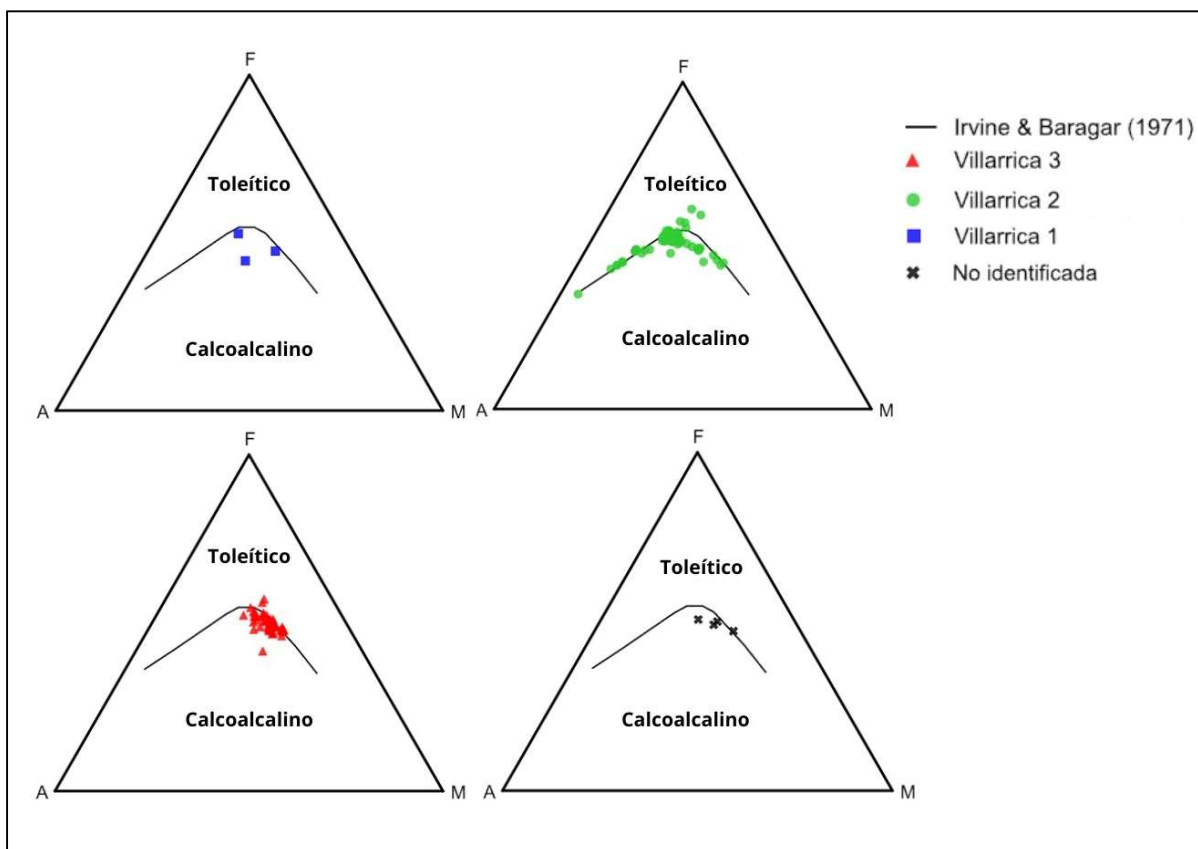


Figura 4.2: Triángulos AFM que representa a las Unidades Villarrica 1, 2 y 3 y a muestras no asociadas a ninguna unidad geológica. Valores normalizados expresados en wt%.

4.2 Geoquímica diferenciada por erupción

Los resultados a continuación están enfocados en mostrar las relaciones composicionales de forma comparativa entre las distintas erupciones del volcán Villarrica durante su historia eruptiva.

4.2.1 Clasificación TAS

La Figura 4.3 ilustra el diagrama TAS (Total Alkalís vs Silica (Le Maitre *et al.*, 1989)), el cual entrega la distribución de todas las erupciones representadas por 212 muestras (Anexo 3). Para poder visualizar de mejor manera, se elaboraron dos diagramas de álcalis vs SiO₂, uno de la Unidad Villarrica 3 (Figura 4.4) y otro de las Unidades Villarrica 1 y 2 (Figura 4.5). Ambos incluyen muestras no identificadas o asociadas a una unidad formal.

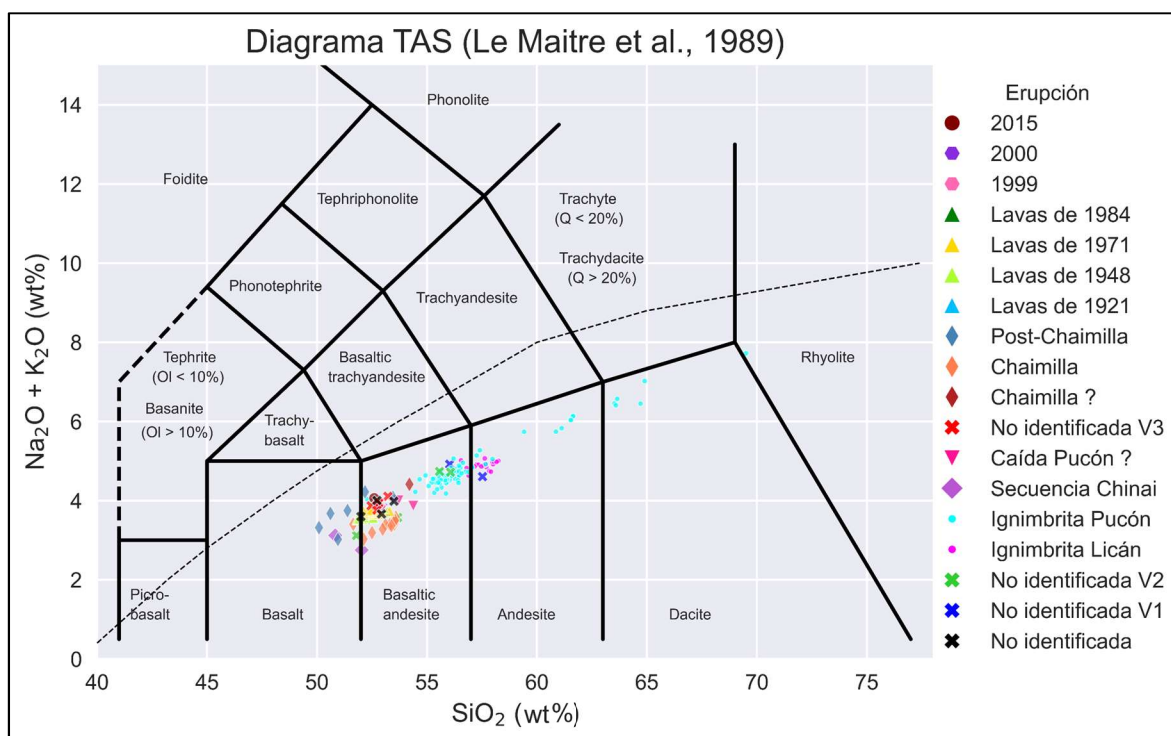


Figura 4.3: Diagrama TAS (Le Maitre *et al.*, 1989). Se muestra la clasificación de los productos emitidos por el volcán Villarrica. Valores normalizados expresados en wt%.

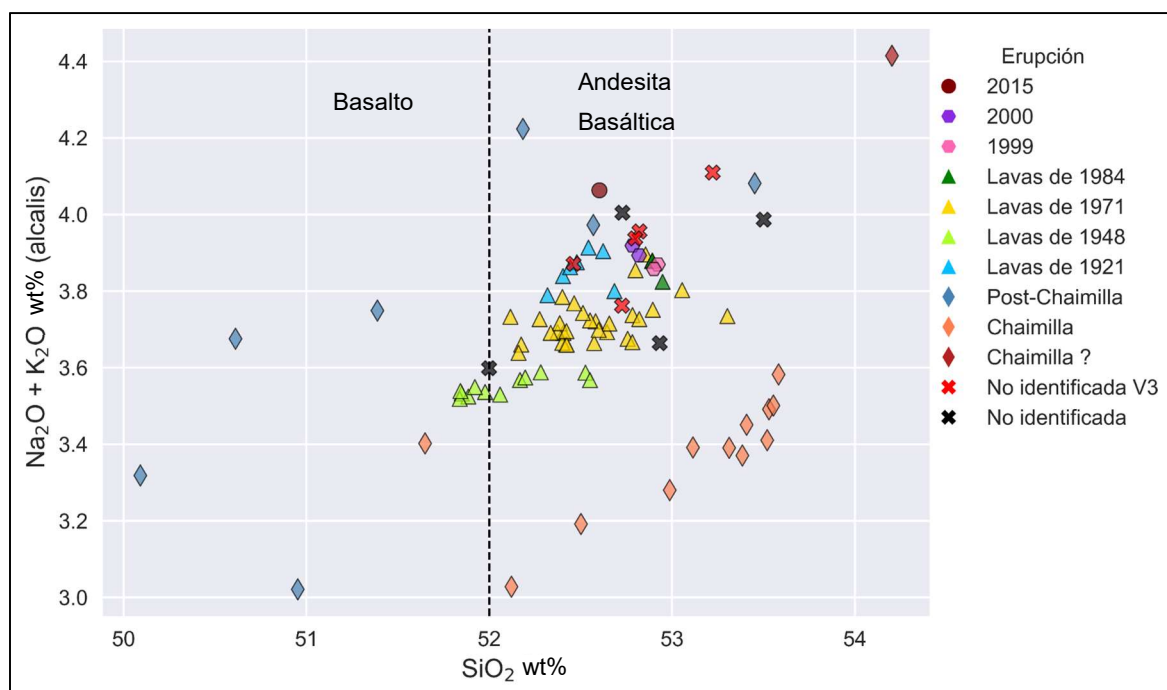


Figura 4.4: Diagrama de álcalis vs SiO_2 de erupciones pertenecientes a la Unidad Villarrica 3. La línea negra punteada indica la separación entre basalto y andesita basáltica según Le Maitre *et al.* (1989).

En la Figura 4.4 se evidencia que los productos históricos se concentran principalmente entre valores de $\sim 51,8$ - $53,4$ wt% SiO_2 , las cuales corresponden a composiciones de andesitas basálticas, y para el caso de las lavas de 1948, incluyen también basaltos. Esto indica que estas erupciones son similares en cuanto al contenido de sílice (Pizarro *et al.*, 2019). Los productos del depósito Chaimilla, si bien presenta contenidos semejantes de SiO_2 (51,6-53,6 wt%) con respecto a los productos históricos, presenta menores cantidades de álcalis, describiendo una tendencia aparte de los productos históricos. La muestra “Chaimilla?”, es analizada por Sernageomin, la cual no se sabe si esta pertenece o no al depósito Chaimilla y que posee un contenido >54 wt% SiO_2 y también mayor contenido de álcalis. Por otro lado, las muestras pertenecientes al depósito post-Chaimilla se encuentran dispersas entre sí, abarcando composiciones de basaltos a andesitas basálticas. Finalmente, las muestras pertenecientes a la Unidad Villarrica 3 (cruces rojas en la Figura 4.4) que no están asociadas a una erupción o depósito, corresponden a andesitas basálticas y poseen composiciones similares a los productos de erupciones históricas.

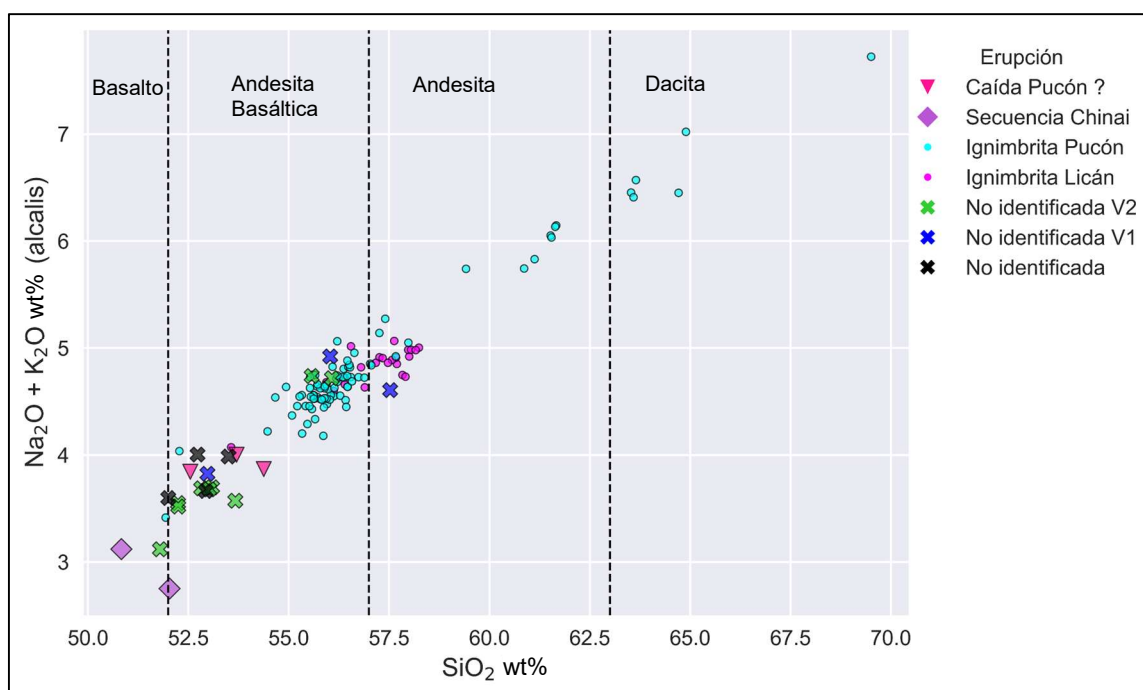


Figura 4.5: Diagrama de álcalis vs SiO_2 de erupciones pertenecientes a la Unidad Villarrica 1 y 2. Las líneas negras punteadas indican la separación entre basalto, andesita basáltica, andesita y dacita según Le Maitre *et al.* (1989).

La Figura 4.5 refleja que las muestras de la Ignimbrita Licán se concentran entre el campo de andesitas basáltica y andesitas entre los valores de 56-58 wt% SiO₂. En cambio, aquellas pertenecientes a la Ignimbrita Pucón, describen una amplia tendencia que abarca desde una composición de andesitas basálticas a dacitas, y la mayoría de ellas se ubican en un rango de 54-58 wt% SiO₂. La amplia variabilidad se debe a la diversidad composicional de las muestras tomadas por Silva (2008), quien describe que el material juvenil (DPJ) posee un amplio rango para las Subunidades Inferior (P1) y Superior (P2) de la Ignimbrita Pucón. Por su parte, la secuencia Chinai presenta una composición de basalto. La “Caída Pucón?” son andesitas basálticas y son asociadas por Sernageomin a muestras de tefra previamente depositadas a la Ignimbrita Pucón. Las muestras no identificadas de la Unidad Villarrica 2 corresponden a basaltos y andesitas basálticas y las pertenecientes a la Unidad Villarrica 1 son de composición andesitas basálticas y andesitas (cruces verdes y azules respectivamente en la figura 4.5).

4.2.2 Elementos mayores

Los diagramas Harker fueron construidos con el mismo *set* de datos empleados para los diagramas anteriores (Anexo 3), es decir, 212 muestras analizadas en roca total.

En general los contenidos de Al₂O₃, FeOT, MgO y CaO presentan una relación decreciente a medida que aumenta el contenido en sílice, los contenidos de Na₂O y K₂O presentan una tendencia positiva en cuanto al aumento de sílice, comportándose como elementos incompatibles a medida que la evolución magmática aumenta. Para los contenidos de MnO, TiO₂ y P₂O₅ no se logra distinguir una tendencia significativa con respecto al contenido en sílice debido a que los valores son bastantes cercanos entre ellos.

Durante los procesos de cristalización fraccionada, elementos como el MgO y FeOT son incorporados de forma temprana en minerales ferromagnesianos como olivino, piroxeno y anfíboles, siendo más abundantes en los productos históricos, lo que se refleja en los diagramas como un cambio abrupto entre los productos históricos y los pertenecientes a las Ignimbritas Licán y Pucón (Figura 4.6). Este cambio no lineal entre las ignimbritas y los productos históricos, podría reflejar cambios dentro de la cámara magmática, tales como mezcla de magmas por inyecciones de magmas primitivos dentro del reservorio magmático.

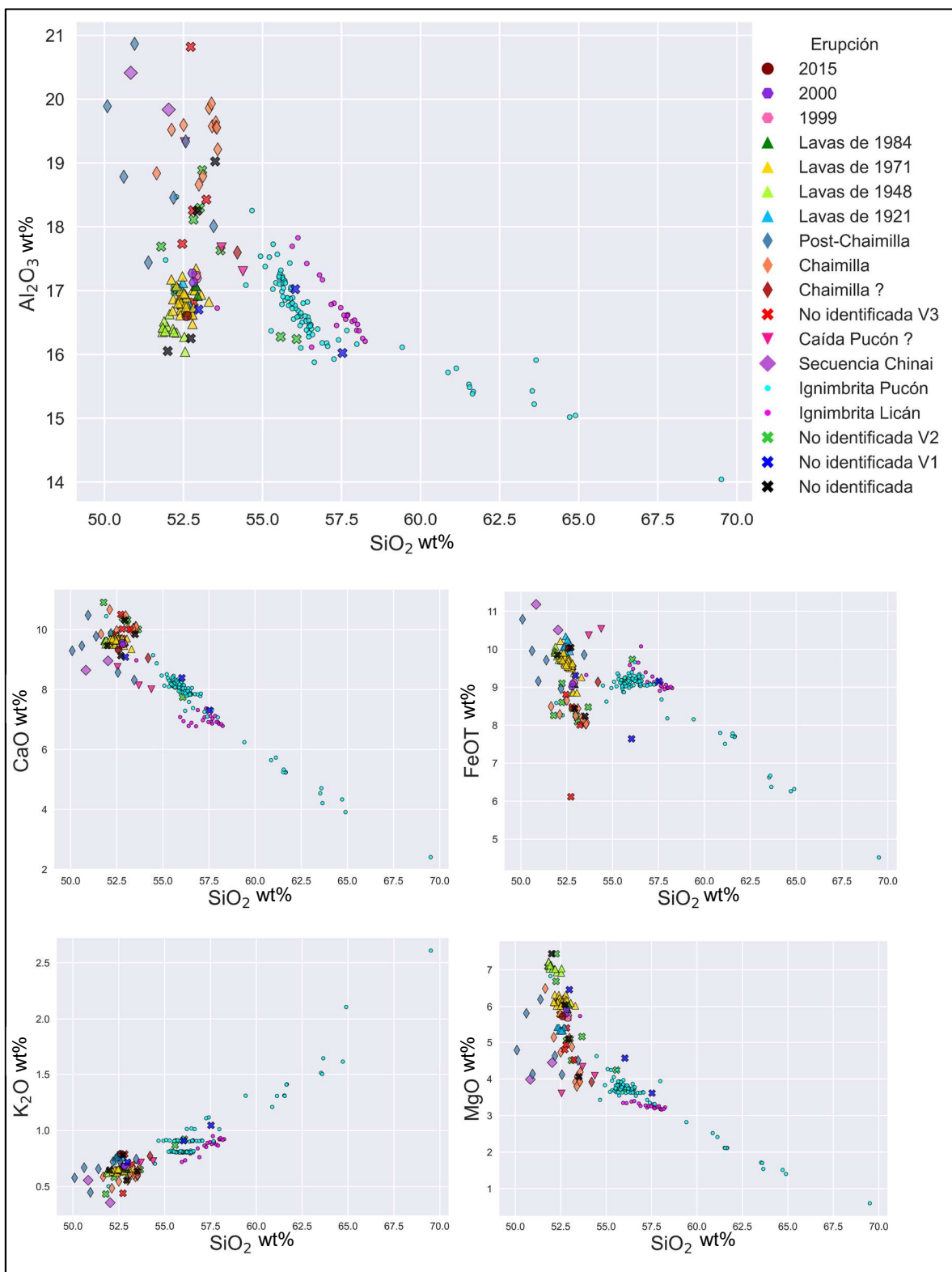


Figura 4.6: Diagramas Harker de elementos mayores respecto al SiO_2 (Harker, 1909). Valores normalizados al 100 % en wt%.

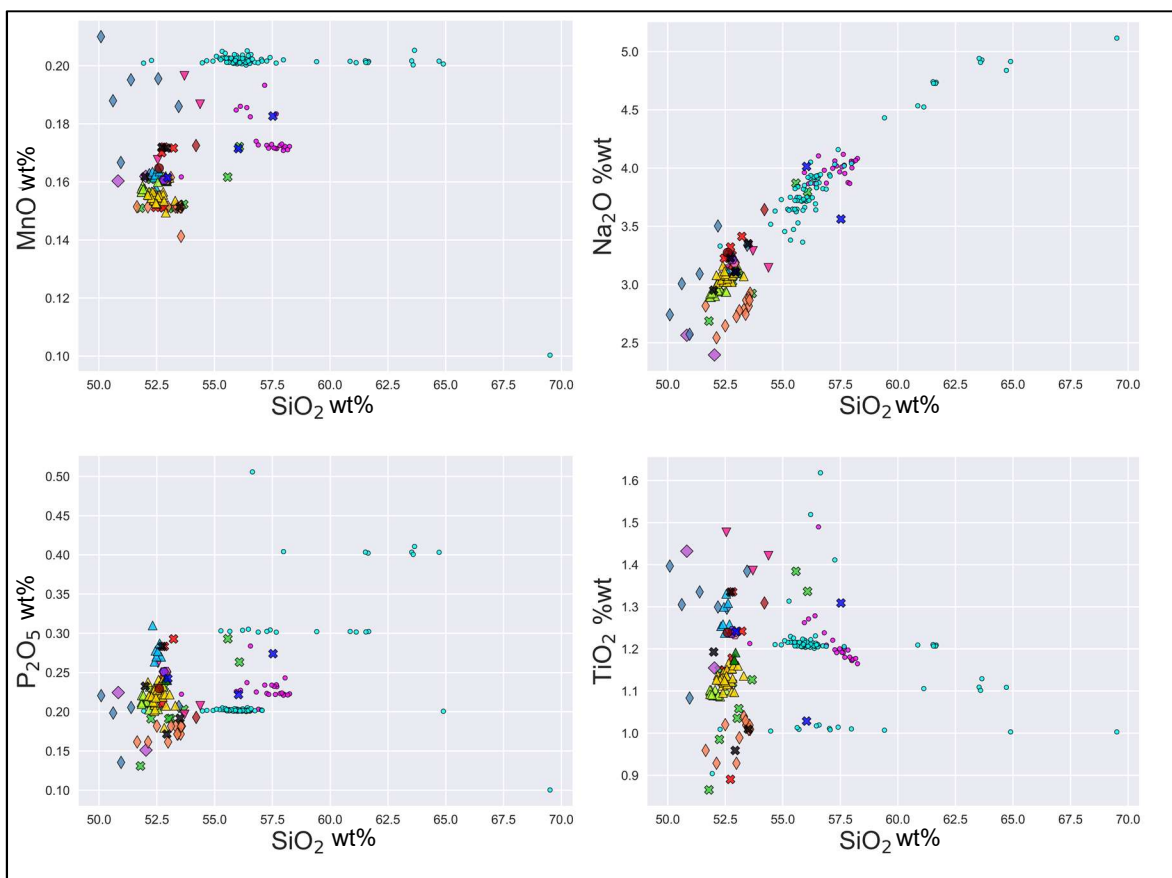


Figura 4.6. (continuación)

De manera similar, el CaO se concentra principalmente en erupciones históricas, incorporándose en etapas tempranas de la formación de plagioclasas cálcicas y también en piroxenos, disminuyendo de forma lineal hacia los productos más diferenciados correspondientes a las Ignimbritas y a productos de la Unidad Villarrica 1. El Al_2O_3 por su parte, muestra una mayor abundancia en productos del depósito de la Secuencia Chinai y no identificados de la Unidad Villarrica 2 y también el depósito Chaimilla y post-Chaimilla, lo cual puede deberse a la incorporación de este elemento a plagioclasas. Para los demás productos, los contenidos disminuyen. En el caso de los elementos Na_2O y K_2O (que conforman los álcalis) son elementos incompatibles, es decir, se incorporan a fases minerales más tardías durante la cristalización fraccionada, tales como feldespatos potásicos, biotitas y plagioclasas sódicas, mostrado como una tendencia lineal que aumenta hacia las Ignimbritas Licán y Pucón.

Cabe mencionar que la falta de tendencia para los elementos de MnO , TiO_2 y P_2O_5 puede deberse a que existan otros procesos que influyen a la cristalización fraccionada, tales como mezcla de magma y procesos de contaminación cortical. El MnO posee concentraciones un poco más altas en la Ignimbrita Pucón con respecto a los productos pertenecientes a la Unidad Villarrica 3. Este elemento podría encontrarse reemplazando al Mg en fases minerales. El TiO_2 se incorpora a fases minerales de titanita e ilmenita, siendo más alto su contenido en depósitos post-Chaimilla, “Caída Pucón?”, lavas de 1921 y en la muestra de spatter de 2015, mostrando una disminución no lineal hacia aquellos productos históricos. El P_2O_5 , presente en el apatito, se muestra sin una tendencia clara de enriquecimiento de este elemento.

Lo anterior mencionado con respecto a los diagramas Harker (Figura 4.6), indica que en general los depósitos de las Ignimbritas Licán y Pucón son más diferenciados con respecto a las erupciones más recientes y a los demás productos pertenecientes a las Unidades Villarrica 3 y 2.

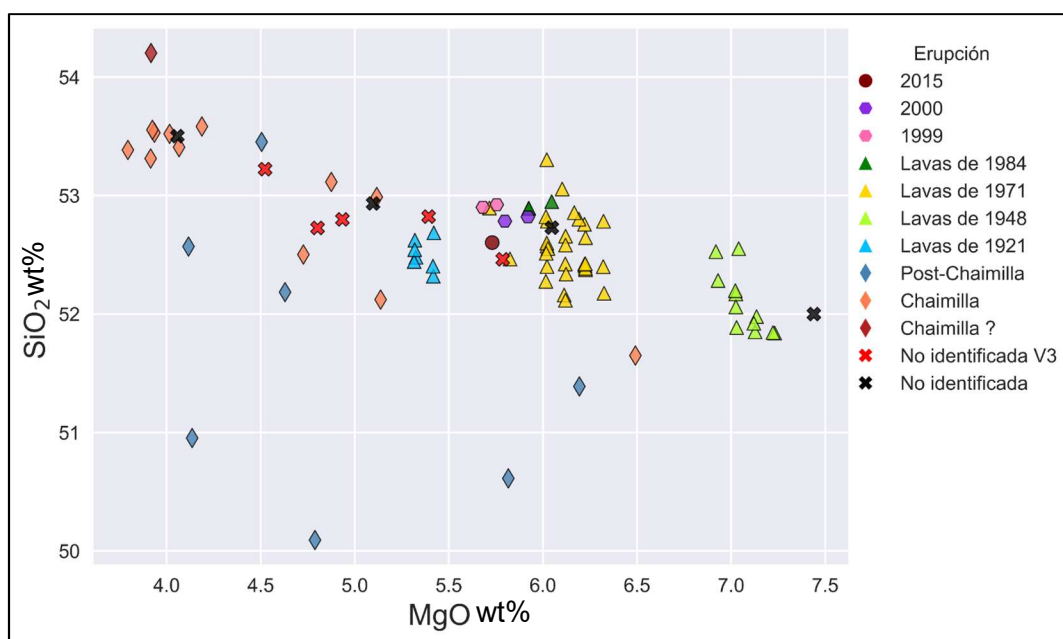


Figura 4.7: MgO vs SiO. Valores normalizados y expresados en wt%. Se incluyen 70 muestras pertenecientes a la Unidad Villarrica 3 y 4 muestras de erupción no identificada.

Bajo el hecho de que los productos históricos se concentran en rangos acotados de SiO_2 , se puede utilizar el MgO para mostrar pequeñas variaciones entre ellos (Rollinson, 1993). En este

sentido se puede establecer que a mayor contenido de MgO wt% y menor contenido de SiO₂ wt%, los productos históricos son más máficos o provienen de magmas más primitivos (Figura 4.7). Se puede observar entonces que las lavas de 1948 son menos evolucionadas que las de 1971 y estas son similares a las del año 1984. Luego, los productos de las erupciones de los años 1999, 2000 y 2015 son similares en cuanto a composición y menos evolucionados que las lavas de 1921. Por otra parte, el depósito Chaimilla y post-Chaimilla se concentran en un amplio rango similar de MgO (~4-6,5 wt%), al igual que las muestras no identificadas de la Unidad Villarrica 3. La muestra Chaimilla en cuestión posee un contenido de 3,8 wt% MgO, por lo que podría ser asociada a ella. Si bien el gráfico de la Figura 4.7 no muestra una tendencia lineal clara, si refleja que hay una buena asociación entre las distintas erupciones históricas (Lavas de 1921, 1948, 1971, 1984 y productos de 1999, 2000 y 2015) y sus diferencias composicionales indican que pueden existir una heterogeneidad en la composición de la fuente del magma o bien que existan otros procesos que influyan durante la diferenciación del magma.

4.2.3 Elementos traza

Los diagramas bivariantes de elementos trazas (ppm) vs el contenido de MgO wt% (Figura 4.8) permiten identificar la participación de minerales durante los procesos de cristalización fraccionada, permitiendo conocer la evolución de los magmas (Winter, 2014). Se ocupa el MgO wt% para poder visualizar de mejor manera los rangos acotados de las muestras históricas, de modo similar a la Figura 4.6 realizada. Se ocupa un *set* de datos de 212 muestras en roca total (Anexo 4)

Los elementos de Co, Cr y Ni son elementos siderófilos que se asocian a minerales máficos. Estos elementos presentan una tendencia positiva a mayores contenidos de MgO (Figura 4.8), lo cual es un comportamiento compatible típico en rocas menos evolucionadas, como lo son los productos de las erupciones históricas. El Co y el Ni se incorporan a fases tempranas de olivino y el Cr a clinopiroxeno y espinela, además de indicar que, a altas concentraciones, la fuente del magma tiene un origen mantélico (Green, 1980). Las muestras con mayor contenido en estos elementos, de forma decreciente, son las lavas de 1948, lavas de 1971, lavas de 1984 y lavas de 1921. Los productos de 1999, 2000 y 2015 presentan contenidos similares a las lavas, situándose entre las lavas de 1984 y 1921. Algunas muestras de la Unidad Villarrica 2 presentan un

comportamiento similar a las lavas de 1948 y otras a muestras del depósito Chaimilla. Las ignimbritas Licán y Pucón están empobrecidas en estos elementos, esto por ser productos con mayor evolución magmática. Los depósitos post-Chaimilla, “Chaimilla?”, “Caída Pucón?” y la Secuencia Chinai no siguen la tendencia lineal descrita, presentando bajos contenidos de Co, lo que puede indicar un cambio en la fuente del magma, posiblemente por la fusión de material, lo que hace que sean pobres en este elemento.

Por otro lado, los elementos de Ba y Rb describen una tendencia negativa (Figura 4.8) a mayores contenidos de MgO, comportándose como elementos incompatibles y que se concentran en fases minerales tardías de la cristalización fraccionada, reemplazando al K en feldespatos potásicos y en micas (biotita) (Green, 1980). Estos elementos están mayormente presentes las Ignimbritas Licán y Pucón y en algunas muestras de la Unidad Villarrica 1 y luego el contenido de estos disminuyen sin una variación significativa para los demás productos, porque son productos menos evolucionados. El Zr es un elemento altamente incompatible, el cual indica una alta evolución en el fundido durante la cristalización fraccionada (Rollinson, 1993). Este elemento se concentra para muestras más evolucionadas pertenecientes a la Ignimbrita Pucón y disminuye a medida que aumenta el MgO (Figura 4.8) sin presentar una variación importante para los demás productos, a excepción de 2 muestras del depósito post-Chaimilla, que poseen un alto contenido de Zr, indicando que se incorpora a minerales máficos de titanomagnetita o ilmenita (Green, 1980) y se correlaciona a lo observado en el diagrama Harker de TiO_2 vs SiO_2 (Figura 4.6). El Sr puede encontrarse sustituyendo al Ca en plagioclasas, pero su variación no es tan notoria debido a que su grado de compatibilidad puede variar, siendo más incompatible en zonas con altas presiones (Green, 1980). En general, las muestras del depósito post-Chaimilla, “Chaimilla?”, “Caída Pucón?” y Secuencia Chinai presentan contenidos más bajos de este elemento, junto con las muestras más evolucionadas de la Ignimbrita Pucón, lo que indicaría que este elemento es sensible frente a cambios de diferenciación (Figura 4.8).

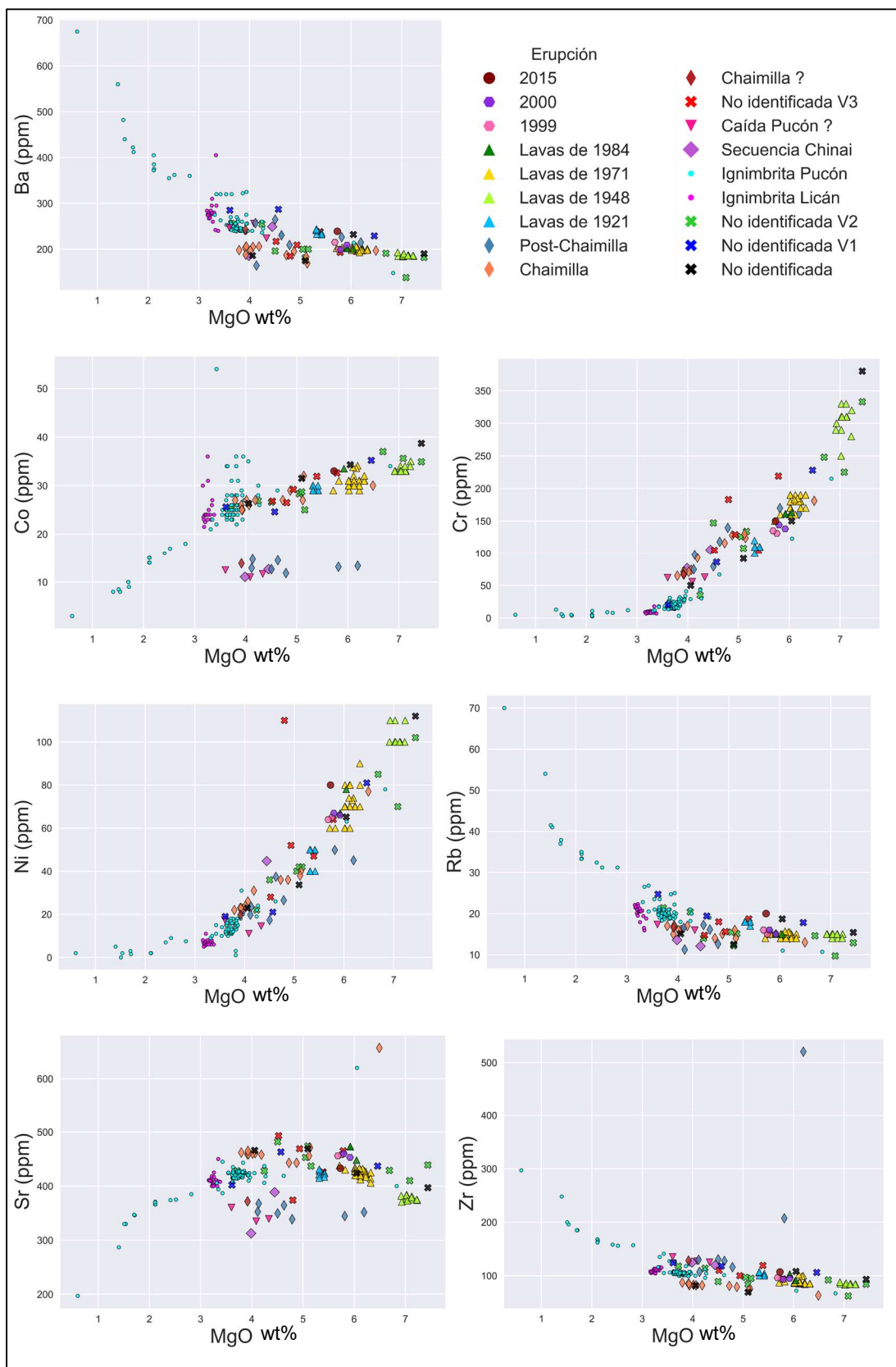


Figura 4.8: Diagramas bivalentes de elementos traza (ppm) vs MgO wt%.

4.2.4 Tierras raras

Los diagramas de tierras raras (REE) normalizados al condrito (Sun y McDonough, 1989) fueron realizados para 181 muestras, se excluyen las muestras de Sernageomin y las del depósito Chaimilla por ausencia e insuficiencia de datos (Anexo 5). La ausencia de puntos y líneas indica que no hay datos de esos elementos para determinadas muestras.

Se observa que en general, las muestras presentan mayor contenido de LREE (*light rare elements*) con respecto a HREE (*high rare elements*), además de presentar la anomalía de Eu (Figuras 4.9 y 4.10). Dentro de los productos históricos, la muestra del 2015 se encuentra levemente más enriquecida en REE con respecto a las lavas históricas (Figura 4.9). En cuanto a estas últimas, las lavas más enriquecidas son las de 1921 y las más empobrecidas en REE son las del año 1948. Las lavas de 1971 y 1984 se sitúan en valores intermedios. Las muestras no identificadas de la Unidad Villarrica 3 siguen una tendencia similar a las lavas de 1921, a excepción de una que presenta valores más bajos de REE (Figura 4.9).

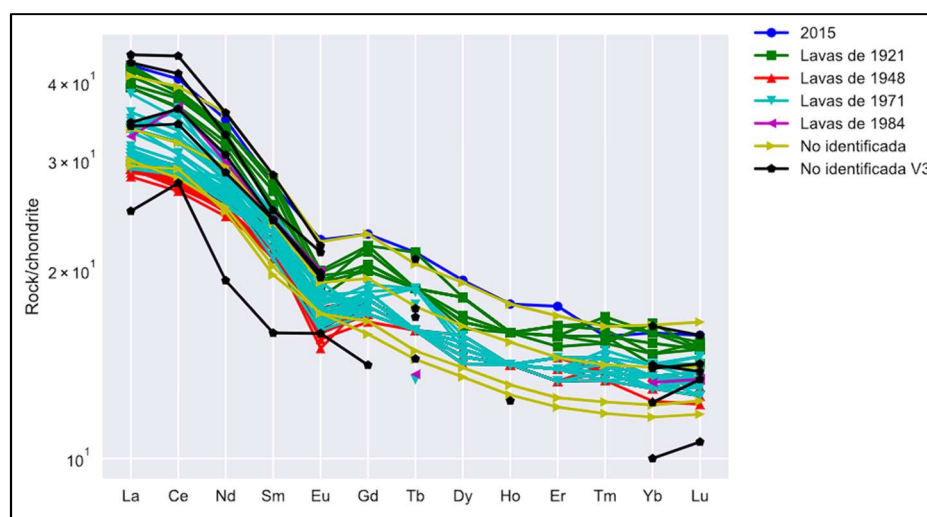


Figura 4.9: Diagrama de REE normalizado al condrito (Sun y McDonough, 1989) para muestras pertenecientes a la Unidad Villarrica 3 y no identificadas.

En cuanto a las Ignimbritas, estas poseen valores más altos de REE con respecto a los demás productos del Villarrica, sobre todo aquellas muestras de la Ignimbrita Pucón, interpretado como una mayor evolución de este depósito (Figura 4.10). Los productos de erupciones no identificadas de las Unidades Villarrica 1 y 2, junto con aquellas no identificadas, presentan

comportamientos similares entre ellas, siendo las del Villarrica 1 las más enriquecidas en LREE con respecto a las del Villarrica 2 (Figura 4.10). Debido a que todas las muestras presentan un patrón similar de REE, se interpreta que esta tendencia es propia de procesos de cristalización fraccionada. Por lo anterior, los REE aumentan su compatibilidad en magmas más diferenciados o evolucionados. Además, la anomalía de Eu está controlada por la compatibilidad de este elemento en minerales de plagioclasa (Rollinson, 1993).

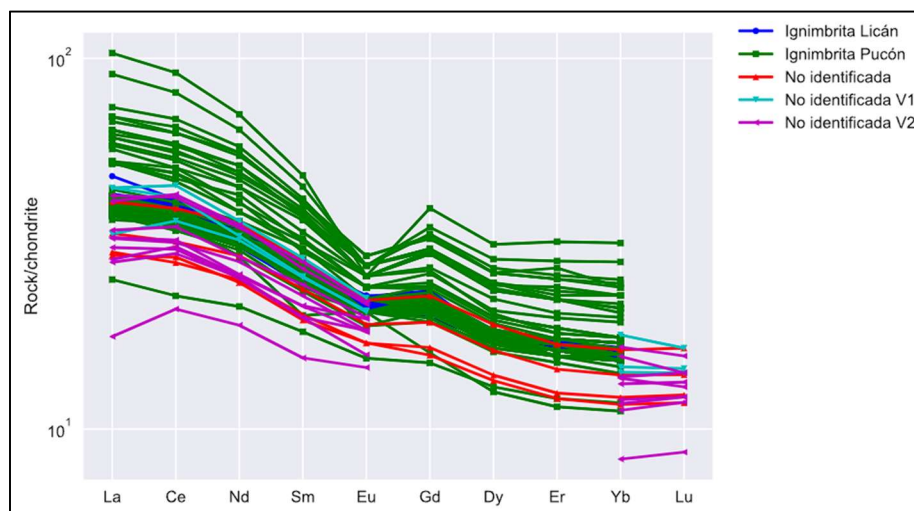


Figura 4.10: Diagrama de REE normalizado al condrito (Sun y McDonough, 1989) para muestras de la Unidad Villarrica 1, 2 y no identificadas.

4.2.5 Multielementos

Los diagramas multielementales normalizados al manto primitivo (Sun y McDonough, 1989), fueron realizados con 199 muestras, excluyendo a aquellas de Sernageomin (Anexo 6).

Se evidencia en los diagramas (Figuras 4.11 y 4.121) que las Unidades Villarrica poseen una tendencia típica de magmatismo de arco en zonas de subducción, mostrando valores negativos en contenido de HFSE (Nb) con respecto a las REE y positivos en Sr. Además, se encuentran enriquecidos en elementos LILE (Cs, Rb, Ba) con respecto a las REE. Este enriquecimiento en LILE, se debe a que son elementos móviles en fases fluidas y son incorporados en zonas de subducción por la fusión de la placa subductada y transportados al manto (Winter, 2014). Los productos históricos (Figura 4.11) están más empobrecidos en Nb con respecto a las demás Unidades del Villarrica, lo que puede indicar que puede existir una mayor interacción del manto

con los procesos magmáticos relacionados a la subducción (Rollinson, 1993). Las variaciones en el aumento de Sr, está controlado por el ingreso de este elemento a minerales de plagioclasa bajo condiciones de baja presión en etapas tempranas de la cristalización (Winter, 2014), el cual es mayor en los productos históricos. Este elemento disminuye en muestras más evolucionadas de la Ignimbrita Pucón, al volverse incompatible (Figura 4.12).

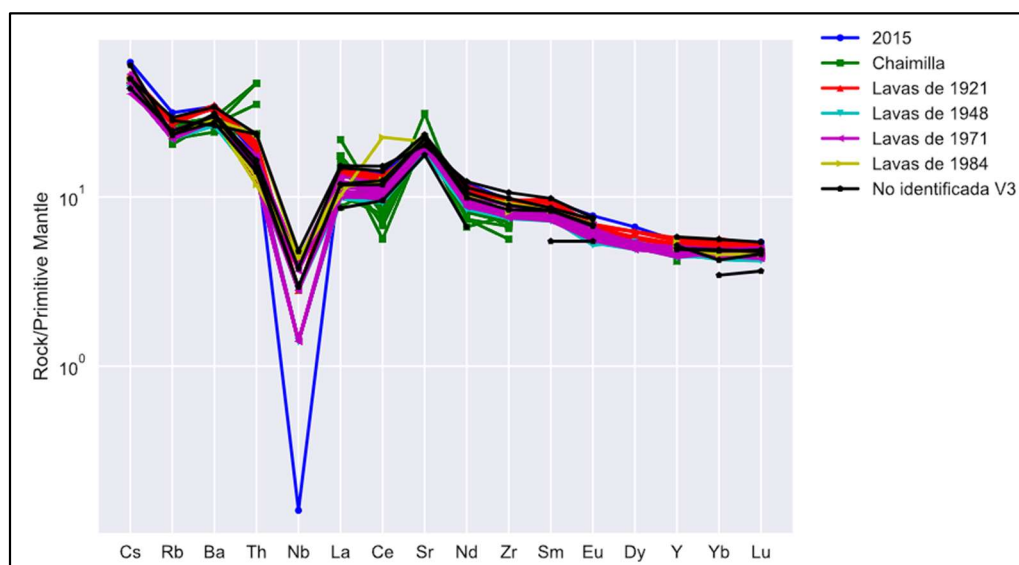


Figura 4.11: Diagrama multielemental normalizado al manto primitivo (Sun y McDonough, 1989) para muestras históricas de la Unidad Villarrica 3.

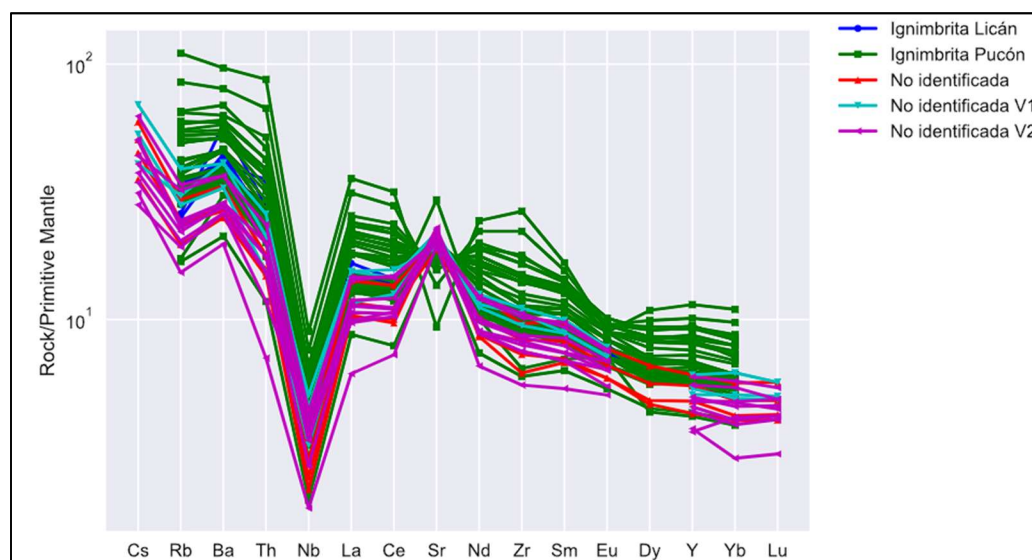


Figura 4.12: Diagrama multielemental normalizado al manto primitivo (Sun y McDonough, 1989) para muestras de la Unidad Villarrica 1 y 2.

4.3 Análisis composicional estadístico

Para analizar el grado de correlación con respecto a las composiciones geoquímicas de elementos mayores, se ocupó el método de Aitchison (2003) para reducir el número de dimensiones, lo que permite la construcción de *biplots* composicionales, en este caso, de 10 componentes (SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , FeOT , CaO , MgO , MnO , Na_2O , K_2O y P_2O_5), que forman parte de un espacio muestral denominado *Simplex* de D componentes (S^D). Este espacio muestral es transformado a un espacio real dimensional de D componentes (R^D) por medio de la transformación logcociente centrada (clr) y permite visualizar las composiciones de cada componente como un vector composicional (Figura 4.10) (Martín-Fernández *et al.*, 2005). El diagrama *biplot* (Figura 4.15) describe gráficamente patrones de variabilidad entre los componentes con respecto a dos componentes principales (Aitchison y Greenacre, 2002; von Eynatten *et al.*, 2003). Los datos empleados, corresponden a 212 muestras de roca total, las cuales fueron previamente normalizadas al 100 wt% (Anexo 3).

La variable explicativa acumulada de elementos mayores (Figura 4.13) muestra que, la suma entre los dos primeros componentes principales es de un 87%. Lo anterior quiere decir que gran parte de la varianza es explicada por estos dos componentes y que se pueden emplear para elaborar un diagrama *biplot*.

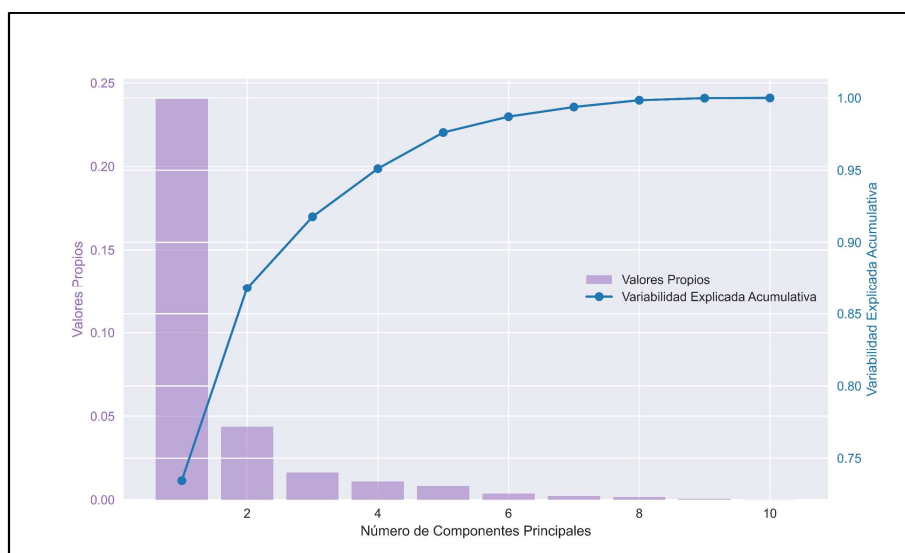


Figura 4.13: Variable explicativa acumulada y valores propios de 10 componentes principales.

Los vectores composicionales (Figura 4.14) muestran la varianza de cada componente. Los vectores de los componentes de SiO_2 , Na_2O y K_2O se encuentran más cercanos al eje horizontal (CP1) y los vectores de MgO , P_2O_5 , TiO_2 y Al_2O_3 están más cercanos al eje vertical (CP2). Los componentes que muestran una mayor varianza corresponden a los vectores de mayor magnitud, es decir, P_2O_5 , K_2O y MgO están más alejados. Los vectores más pequeños o más cerca al centro del *biplot*, son SiO_2 , FeOT , MnO y TiO_2 . El Na_2O , K_2O y MnO forman un grupo muy correlacionado entre sí, debido a que sus vectores son cercanos entre sí y algo similar ocurre con TiO_2 y P_2O_5 .

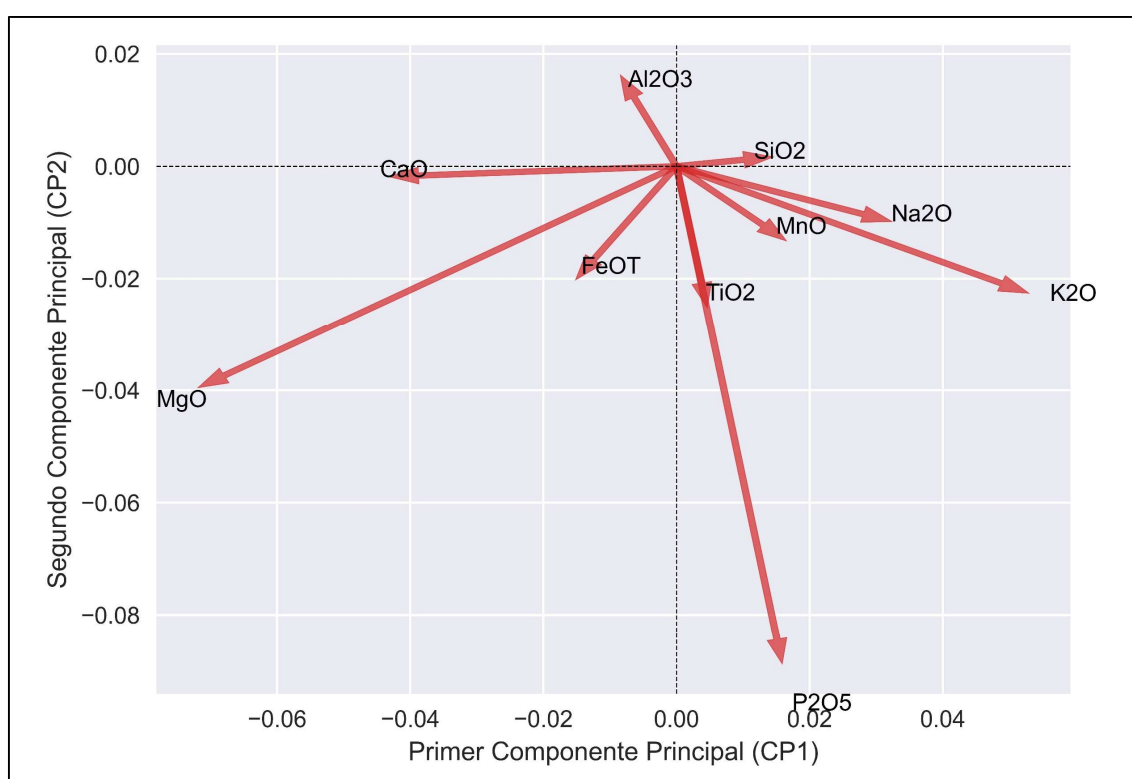


Figura 4.14: *Biplot* de los componentes transformados en un espacio logcociente centrado (clr).

Las 212 muestras son proyectadas en el espacio del *biplot* en conjunto con los vectores de los componentes (Figura 4.15). En él se pueden distinguir que las muestras se ordenan en torno al CP1 desde menos a más diferenciadas, por lo que se pueden distinguir dos grupos; el semieje negativo agrupa productos históricos, productos pertenecientes a la Unidad Villarrica 2 y muestras no identificadas del Villarrica, mostrando un mayor contenido de MgO , CaO y FeOT , y el semieje positivo agrupa las Ignimbritas Licán y Pucón junto a muestras no identificadas de

las Unidades Villarrica 1 y 2, que poseen un mayor contenido de SiO_2 , Na_2O , K_2O y MnO . Según el CP2 se puede establecer una segunda división de grupos. El primero comprende las muestras del depósito Chaimilla, la Secuencia Chinai, “Caída Pucón?” y muestras no identificadas del Villarrica 2, las cuales poseen mayor contenido en Al_2O_3 . El segundo grupo lo conforman las lavas históricas de los años 1921, 1948, 1971, 1984, los productos de los años 1999, 2000 y 2015 y muestras no identificadas de la Unidad Villarrica 3. Estos presentan mayores contenidos de MgO y FeOT .

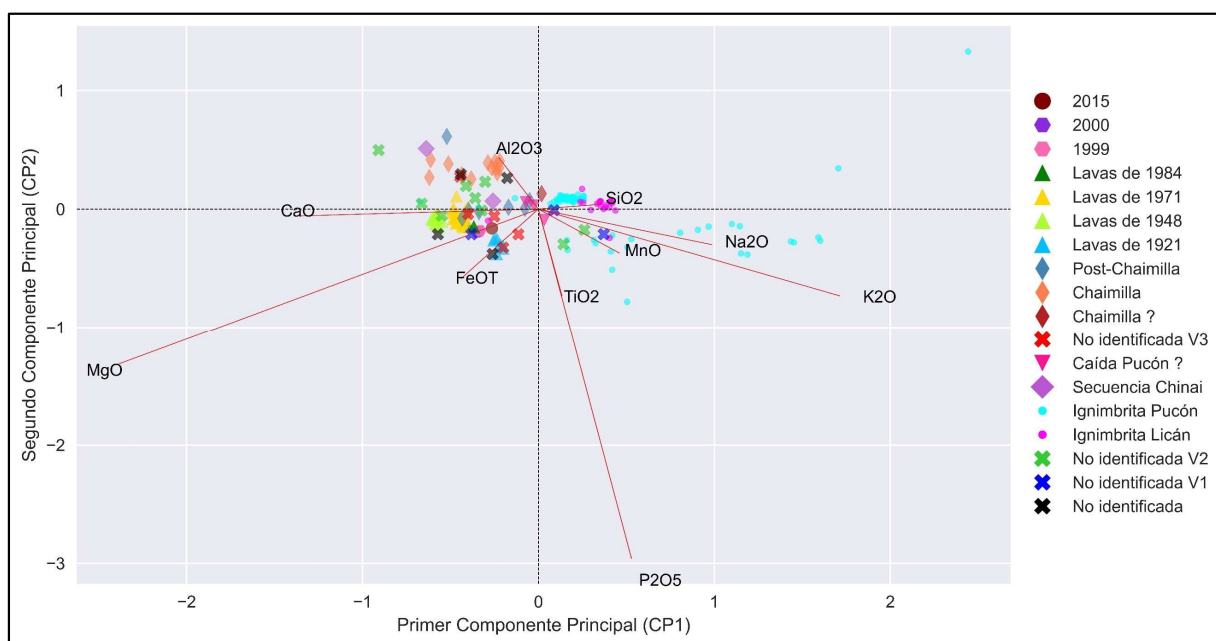


Figura 4.15: *Biplot* de los componentes principales y 212 muestras en el espacio logcociente centrado (clr).

4.4 Análisis de agrupamiento

Debido a que existen agrupaciones observadas en los diagramas *biplot* entre los diferentes productos (Figura 4.15), se elabora un dendograma a partir de los datos logcociente centrados (clr) obtenidos, el cual muestra las distancias de Aitchison (2003), las cuales son equivalentes a las distancias Euclidianas. El dendograma ocupa el método de agrupación jerárquica *Complete linkage* o enlace completo (Cortés *et al.*, 2007), el cual mide la máxima distancia entre las 212 muestras representadas.

El dendrograma de elementos mayores (Figura 4.16) ilustra la existencia de clústeres según la distancia de agrupamiento. Se puede observar que, a menores distancias, el nivel de agrupamiento es mayor, es decir, la similaridad entre los datos es más cercana. En general los datos se describen en dos clústeres o dos grupos principales, el primero de ellos comprende 26 muestras pertenecientes a la Ignimbrita Licán y a no identificados de las Unidades Villarrica 1 y 2 (G1 en la Tabla 4.1) y el segundo grupo reúne 185 muestras. Este segundo grupo se puede subdividir en tres grupos principales a menores distancias, con el fin de detectar asociaciones según su composición de forma más detallada. Un grupo (G2, líneas celestes en Figura 4.16) reúne 20 muestras que comprenden los depósitos Chaimilla, Secuencia Chinai, Ignimbrita Pucón y muestras no identificadas de las Unidades Villarrica 1, 2 y 3. El grupo G3 (líneas verdes en la Figura 4.16) reúne 82 muestras de las Ignimbritas Licán y Pucón y el grupo G4 (líneas amarillas) asocia 83 muestras, las cuales 67 de ellas corresponden a la Unidad Villarrica 3 y 16 de ellas a las Unidades Villarrica 1 y 2. Existe una muestra (Silva, 2008) que no se asocia a ningún clúster, debido a sus diferencias composicionales con el *set* de datos.

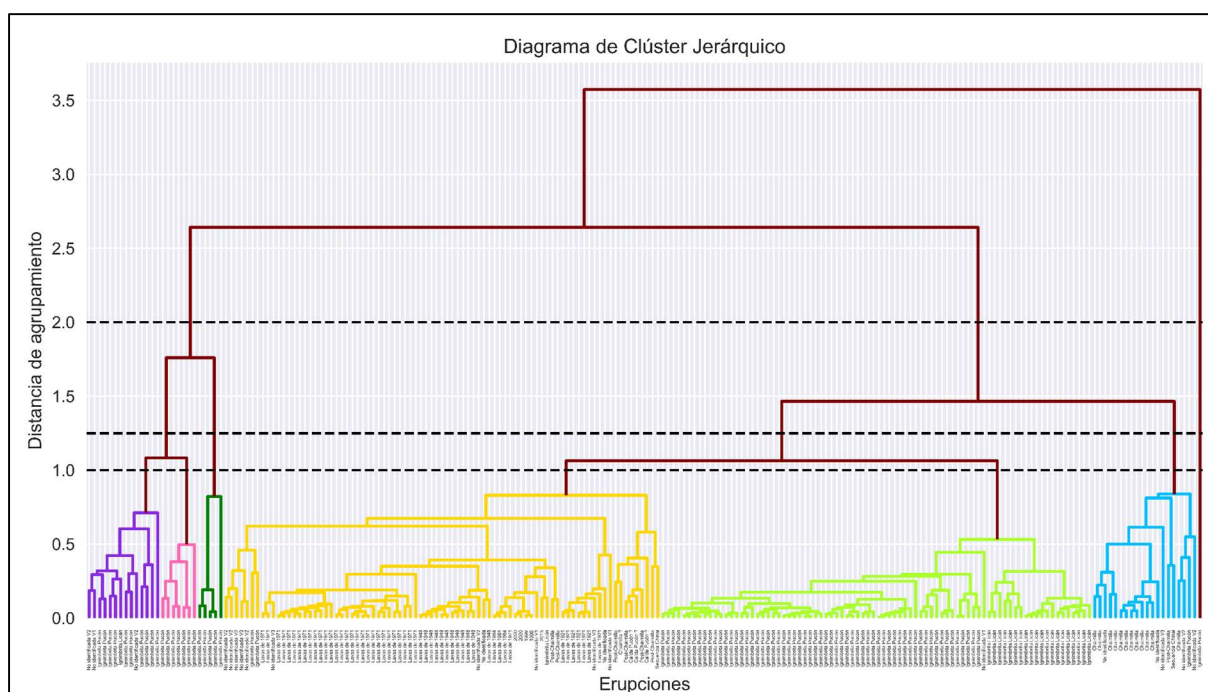


Figura 4.16: Dendrograma de elementos mayores para 212 muestras. Las líneas negras punteadas indican las divisiones que determinan el número de clúster según la distancia (2.0, 1.25 y 1.0 de forma descendente).

Las agrupaciones del dendograma son resumidas en la Tabla 4.1. De ella se puede afirmar entonces que por la similitud composicional de las muestras en G1, 2 muestras no identificadas de la Unidad Villarrica guardan una estrecha relación con la Ignimbrita Licán. En G2, 2 muestras no identificadas del Villarrica se relacionan con el depósito Chaimilla y 2 muestras de la Unidad Villarrica 2 se relacionan con la Ignimbrita Pucón. En el caso de G3, las muestras de las Ignimbritas Licán y Pucón se relacionan composicionalmente junto una muestra de la Unidad Villarrica 1. El grupo G4 es conformado principalmente por los productos históricos de las lavas. Además, en el dendograma (Figura 4.16) es posible notar que de las 4 muestras pertenecientes a las no identificadas de la Unidad Villarrica 3, 2 de ellas se correlacionan con las lavas de 1921 y las otras 2 con las lavas de 1971. Las muestras del depósito post-Chaimilla, “Chaimilla?” y “Caída Pucón?” también se correlacionan entre sí.

		Número de muestras por grupo				
Unidad	Erupción	G1	G2	G3	G4	N/a
Villarrica 3	2015	0	0	0	1	0
Villarrica 3	2000	0	0	0	2	0
Villarrica 3	1999	0	0	0	2	0
Villarrica 3	Lavas de 1984	0	0	0	3	0
Villarrica 3	Lavas de 1971	0	0	0	30	0
Villarrica 3	Lavas de 1948	0	0	0	12	0
Villarrica 3	Lavas de 1921	0	0	0	7	0
Villarrica 3	Post-Chaimilla	0	1	0	6	0
Villarrica 3	Chaimilla	0	12	0	0	0
Villarrica 3	Chaimilla ?	0	0	0	1	0
Villarrica 3	No identificada V3	0	1	0	4	0
Villarrica 2	Caída Pucón ?	0	0	0	3	0
Villarrica 2	Secuencia Chinai	0	1	0	1	0
Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	22	1	61	2	1
Villarrica 2	Ignimbrita Licán	1	0	20	1	0
Villarrica 2	No identificada V2	2	2	0	5	0
Villarrica 1	No identificada V1	1	0	1	1	0
Villarrica	No identificada	0	2	0	2	0
	Total	26	20	82	83	1
	Total muestras	212				

Tabla 4.1: Número de muestras presentes en los clústeres o grupos reconocidos en el dendograma, según erupción y unidad a la que pertenecen.

5. DISCUSIÓN

5.1 Comparación geoquímica de las erupciones

En la presente sección se comparan los resultados geoquímicos obtenidos de las muestras adquiridas de bibliografía (Tabla 3.1), con un enfoque en las ignimbritas y erupciones históricas.

En cuanto a la clasificación geoquímica reflejada en los diagramas TAS y AFM (Figura 4.1 y 4.2), esta ha mantenido su tendencia de basaltos y andesitas basálticas, pertenecientes a la serie calcoalcalina, lo cual coincide con las tendencias descritas por los autores Witter *et al.* (2004), Morgado *et al.* (2015) y Pizarro *et al.* (2019). Estos últimos dos autores, indican que, para las lavas de 1921, 1948 y 1971, los rangos de contenido en sílice varían entre un 51,7-52,4 wt% SiO₂, lo cual coincide cercanamente con los resultados obtenidos (Figura 4.4) en un rango de 51,7-53,4 wt% SiO₂, dentro del cual se pueden asemejar en contenido a lavas de 1984 y depósitos de 1999, 2000 y de la erupción del año 2015. De igual modo el depósito Chaimilla posee un contenido de 52-53 wt% SiO₂ según Costantini *et al.* (2011) y un contenido de 51-53 wt% SiO₂ según Pioli *et al.* (2006), lo cual es similar a los resultados obtenidos (51,7-53,6 wt% SiO₂) y similar a las erupciones anteriores, tal como indican ambos autores, quienes además determinan que el principal factor que controla la explosividad de esta erupción es la cantidad de volátiles presentes en el magma.

Sin embargo, esta tendencia difiere con los resultados obtenidos de las ignimbritas, ya que, estas poseen una distribución más dispersa, abarcando campos más evolucionados (Figura 4.5). Por una parte, Lohmar *et al.* (2012) menciona que la Ignimbrita Licán representa una de las erupciones más explosivas en la historia eruptiva del volcán Villarrica y cuyos productos son de composición andesita basáltica a andesita en un rango de 55-58 wt% SiO₂, reflejado en los resultados logrados. Además, indica que estos depósitos al encontrarse sobre depósitos morrénicos de la última glaciación, el derretimiento glacial pudo contribuir al desarrollo explosivo de esta erupción. Por otro lado, Silva *et al.* (2010) describe que la Ignimbrita Pucón es un depósito bien preservado y que se divide en dos fases eruptivas; P1 y P2. Estas dos fases eruptivas no se muestran como tal en los resultados, pero la autora explica que existen depósitos juveniles que presentan variaciones de composición desde basalto a riolita en la segunda fase

eruptiva (P2), atribuido a la mezcla de magma con granitoides presentes en la zona, al evidenciar la abundante presencia de inclusiones de granitoides en muestras de P2.

Por su parte, los diagramas Harker con respecto al contenido de SiO_2 (Figura 4.6) permiten visualizar el proceso de cristalización fraccionada a escala global de las muestras y, además, permiten discernir que aquellas muestras pertenecientes a la Unidad Villarrica 3 (lavas históricas) son mucho menos diferenciadas y están controladas por una abundancia en máficos de olivino y piroxenos, debido al gran contenido de MgO y FeO en un rango acotado de SiO_2 , tal como indica Pizarro *et al.* (2019). Por lo anterior, resulta interesante evaluar el contenido de MgO con respecto a elementos traza (Figura 4.8), ya que muestra de mejor manera las muestras de origen más primitivo, correspondiente a las lavas emitidas en los años 1948 y 1971, resultado similar al obtenido por Pizarro *et al.* (2019), quien afirma que un aumento en el contenido de MgO coincide con magmas más primitivos desde las lavas de 1921 (~5,3 wt% MgO), seguida por las del año 1971 (~6 wt% MgO) y la erupción de 1948 (~7 wt% MgO). A lo anterior se asemejan los productos pertenecientes a la erupción del año 2015, y depósitos de los años 2000 y 1999 que poseen un contenido entre 5,6-5,9 wt% MgO . En adición a lo anterior Romero *et al.* (2023) afirma que la erupción ocurrida durante el año 2015 es más evolucionada con respecto a las erupciones históricas, lo que no se refleja en los resultados al evaluar el contenido de MgO con respecto a la erupción de 1921. Estos diagramas permiten interpretar que existen inyecciones de magmas máficos dentro de la cámara magmática durante la cristalización fraccionada, las cuales generan cambios en el comportamiento de las erupciones más recientes, evidenciado principalmente en el alto contenido de MgO , FeO y en elementos traza tales como Co , Cr y Ni , así como también en el bajo contenido de elementos incompatibles de K_2O , Na_2O y Ba . Lo anterior coincide con estudios realizados por Pizarro *et al.* (2019), Morgado *et al.* (2015) y Romero *et al.* (2023), quienes evalúan que los productos históricos poseen altos contenidos de minerales de alta temperatura de olivino y clinopiroxeno.

En cuanto a los diagramas REE (Figura 4.9 y 4.10) permiten caracterizar que las erupciones del Villarrica presentan un mayor contenido de LREE con respecto a los HREE y que estas concentraciones disminuyen en los productos históricos, indicando que son menos diferenciados y coincidiendo con lo obtenido en diagramas anteriores, al igual que con los autores Morgado

et al. (2015) y Pizarro *et al.* (2019). A su vez, los diagramas multielementales (Figura 4.11 y 4.12) normalizados al manto primitivo (Sun y McDonough, 1989) ilustra la tendencia típica de magmas provenientes de una zona de subducción, correspondiente a la anomalía negativa de Nb-Ta. Sin embargo, en los resultados el elemento de Ta no se ve reflejado debido a la escasa información obtenida, pero Morgado *et al.* (2015) ilustra contenidos similares de Nb y también mostrar un patrón similar al obtenido de un enriquecimiento en elementos LILE y un bajo contenido de HFSE, además de una anomalía negativa de Eu. Lo anterior indica que existen fases fluidas que movilizan los elementos LILE por medio de la fusión de la placa subductada y los transportan hasta el manto donde interactúan con este (Winter, 2014), siendo reflejado el alto contenido de LILE, tales como Cs, Rb y Ba. Las muestras históricas son las que tienen una mayor anomalía negativa de Nb, por lo cual estarían más relacionadas a el proceso de subducción que afecta el manto, debido a que es un elemento altamente inmóvil que además indica la deshidratación de la placa subductada y su posterior fusión parcial (Rollinson, 1993), destacando la muestra de spatter del 2015 y las muestras de lava de 1971.

Por último, el diagrama *biplo*t (Figura 4.15) junto con el dendograma (Figura 4.16) son capaces de agrupar las muestras estudiadas en grupos que poseen similitud entre ellos, resumido en la Tabla 4.1. Un grupo (G3 y G1) estaría principalmente conformado por productos de las erupciones de ignimbritas, los cuales guardan relación en torno a su composición geoquímica en roca total, tal como se ve reflejado en diagramas Harker y en conjunto con las observaciones realizadas por los autores Lohmar *et al.* (2012) y Silva (2008). Diferente a ellos, el grupo G2 compuesto principalmente por el depósito Chaimilla, indica que esta es una erupción de características únicas según lo estudiado por Costantini *et al.* (2011) y que difiere composicionalmente de las muestras pertenecientes a la Unidad Villarrica 3 (G4), a pesar de presentar contenidos similares de SiO₂, difiere en cuanto al contenido de los demás elementos mayores, como lo es por ejemplo el contenido de álcalis (Figura 4.4). Finalmente, el grupo G4 asocia muestras que guardan una estrecha relación composicional, tal como se ha visto por los autores Pizarro *et al.* (2019) y Romero *et al.* (2023), quienes han relacionado las lavas emitidas en el último tiempo en cuanto a su comportamiento geoquímico.

5.2 Factores determinantes del comportamiento geoquímico

Es importante destacar que en la zona existe una importante influencia de la tectónica, ya que esta contribuye al emplazamiento de intrusiones magmáticas por medio de fallas y planos de debilidad en la roca, destacando a la Zona de Falla Liquiñe – Ofqui y las Fallas Transversas Andinas (Urrea-Tapia *et al.*, 2023). También, la existencia de una amplia variedad en el estilo eruptivo del postglacial, desde las dos grandes erupciones que formaron las Ignimbritas Licán y Pucón, hasta las erupciones históricas que varían su estilo entre hawaiano a estromboliano, predominando las emisiones de lavas efusivas (Pizarro *et al.*, 2019), ha conducido a varios autores a pensar que la cristalización fraccionada no es el único factor que influye en el comportamiento geoquímico. Lo anterior mencionado se refleja en los diagramas Harker obtenidos (Figura 4.6) en conjunto con el dendograma (Figura 4.16), los cuales en su conjunto logran dilucidar que, existen conjuntos de muestras agrupadas entre sí con composiciones químicas similares, las cuales forman 4 principales grupos (Tabla 4.1). Del mismo modo, el diagrama de REE (Figura 4.9) ilustra la similaridad de contenido de LREE y HREE entre productos de una misma unidad.

Boschetti *et al.* (2022) plantea que existe un importante rol de mezcla de magmas, a partir de la observación de zonaciones minerales de olivinos, plagioclasas y clinopiroxenos, que presentan zonaciones inversas desde sus centros, situación que coincide con los altos contenidos obtenidos de elementos con tendencia a formar parte de minerales máficos de altas temperaturas tales como el Cr, Co y Ni (Figura 4.8). A su vez, Pizarro *et al.* (2019) contribuye con que no solo la interacción de magmas es un factor determinante en su evolución, si no también, cuanto tiempo estos interactúan entre sí, aumentando su intensidad, presencia de volátiles y cantidad de máficos presentes, esto último reflejado en las variaciones obtenidas en los contenidos de MgO y FeOT, observables en los diagramas Harker (Figura 4.6). Morgado *et al.* (2015) y Lohmar *et al.* (2012) postulan un mecanismo detonante similar para la erupción de 1971 e Ignimbrita Licán, respectivamente, quienes asocian las intrusiones de magma a altas temperaturas como las responsables de generar exsolución de volátiles, los cuales detonarían la erupción.

Por último, estudios recientes de Pavez *et al.* (2023) han confirmado la existencia de dos reservorios magmáticos por debajo del volcán Villarrica, controlados por la tectónica local. Estos reservorios se sitúan en el borde E, coincidiendo con la actividad sísmica en la zona y apoyando la hipótesis postulada por Morgado *et al.* (2015) sobre la existencia de un reservorio a bajas profundidades que es alimentado por fluidos profundos y generaría la actividad eruptiva actual. Nuevamente, esta información puede ser analizada con respecto a los resultados obtenidos, tanto en los diagramas Harker de elementos mayores y trazas, así como en los diagramas multielementales (Figuras 4.11 y 4.12) los que reflejan la influencia de los procesos de subducción presentes en la zona al presentar el comportamiento típico antes descrito de la anomalía negativa del Nb, la cual se ha ido acentuando en las erupciones históricas y coinciden además con las observaciones realizadas en los diagramas Harker (Figuras 4.6 y 4.8). Es decir, las diferentes composiciones que se dan durante la cristalización fraccionada estarían íntimamente relacionadas con las variaciones en el recorrido de ascenso del magma, así como también con inyecciones máficas que se puedan dar en los reservorios.

6. CONCLUSIÓN

Con respecto a lo obtenido en el análisis de resultados, las características geoquímicas del volcán Villarrica ha mantenido su comportamiento composicional de andesita basáltica, pertenecientes a la serie calcoalcalina para sus tres unidades geológicas. Sin embargo, la mayor variabilidad composicional es identificada en la Unidad Villarrica 2, destacando a las Ignimbrita Licán y Pucón, generadoras de la actividad más explosiva en la historia postglacial.

Se destaca la utilidad de los diagramas Harker para determinar las principales características geoquímicas del volcán, lo cual junto con el análisis de elementos traza y tierras raras, ayudan a inferir posibles procesos, tal como la influencia de inyecciones de magma primitivo en reservorios y mezcla de magmas, la cual afecta los procesos de cristalización fraccionada. En conjunto con lo anterior, realizar un análisis estadístico composicional por medio del método de Aitchison, permite visualizar la variabilidad composicional de las muestras a través de un diagrama de PCA y además, correlacionar las muestras entre ellas en agrupaciones jerárquicas, las cuales se expresan visualmente en un dendograma, para así finalmente definir cuatro grupos que presentan características similares.

Para productos más recientes, los rangos de contenido en sílice son acotados, por lo que evaluar estos productos en base al contenido de MgO es relevante para mostrar pequeñas variabilidades entre las erupciones históricas, las cuales se han ido enriqueciendo en este elemento en el siguiente orden: 1921, 1999, 2000, 2015, 1984, 1971, 1948. El hecho de que no exista un enriquecimiento lineal conforme pasa el tiempo, sugiere que esto se deba a un rejuvenecimiento de magmas, es decir, la mezcla de magmas causado por inyecciones de magmas más primitivos y en distintas proporciones, controlado por la tectónica local en un contexto de subducción. Lo mencionado anteriormente en conjunto con la existencia de dos reservorios por debajo del volcán Villarrica, cumpliría un rol fundamental en el emplazamiento y mezcla de magmas, determinando el estilo eruptivo.

7. REFERENCIAS

- Aguirre, L. y Levi, B. (1964). Geología de la Cordillera de los Andes de las provincias de Cautín, Valdivia, Osorno y Llanquihue. Instituto de Investigaciones Geológicas, Boletín. N° 17: 37 pp. Santiago.
- Aitchison, J. (2003). The statistical analysis of compositional data: (Reprint) The Blackburn Press, Caldwell, NJ, 416 p
- Aitchison, J. y Greenacre, M. (2002). Biplots of compositional data. *Journal of the Royal Statistical Society Series C: Applied Statistics*, 51(4), 375-392.
- Bono, L. (2014). Modelación de los lahares del Volcán Villarrica en el sector de Pucón, Región de la Araucanía. Memoria para optar al título de Geóloga. Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito): 126 pp. Santiago.
- Boschetti, F. O., Ferguson, D. J., Cortés, J. A., Morgado, E., Ebmeier, S. K., Morgan, D. J. y Silva Parejas, C. (2022). Insights into magma storage beneath a frequently erupting arc volcano (Villarrica, Chile) from unsupervised machine learning analysis of mineral compositions. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*.
- Campos, A., Moreno, H., Muñoz, J., Antinao, J.L., Clayton, J. y Martin, M. (1998). Mapa geológico del área de Futrono–Lago Ranco, Región de Los Lagos. Servicio Nacional de Geología y Minería, Serie Mapas Geológicos. N° 8. Santiago.
- Cembrano, J. y Lara, L. (2009). The link between volcanism and tectonics in the southern volcanic zone of the Chilean Andes: a review. *Tectonophysics*, 471(1-2), 96-113.
- Clavero, J. y Moreno, H. (1994). Ignimbritas Licán y Pucón: Evidencias de erupciones explosivas andesítico-basálticas postglaciales del Volcán Villarrica, Andes del Sur, 39 25'S. In *Congreso Geológico Chileno* (Vol. 7, pp. 250-254).
- Clavero, J. y Moreno, H. (2004). Evolution of Villarrica volcano. Villarrica volcano (39.5°S), Southern Andes, Chile (Lara, L. y Clavero, J. editores). *Boletín Servicio Nacional de Geología y Minería*. N° 61: 17-27. Santiago.
- Cortés, J. A., Palma, J. L. y Wilson, M. (2007). Deciphering magma mixing: the application of cluster analysis to the mineral chemistry of crystal populations. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 165(3-4), 163-188.
- Costantini, L., Pioli, L., Bonadonna, C., Clavero, J. y Longchamp, C. (2011). A late Holocene explosive mafic eruption of Villarrica volcano, Southern Andes: the Chaimilla deposit. *Journal of volcanology and geothermal research*, 200(3-4), 143-158.
- Green, T. H. (1980). Island arc and continent-building magmatism—A review of petrogenic models based on experimental petrology and geochemistry. *Tectonophysics*, 63(1-4), 367-385.

- Harker, A. (1909). *The natural history of igneous rocks*. Methuen & Company.
- Herbst, R.; Troncoso, A. y Muñoz, J. (2005). Las tafofloras triásicas de la región de los Lagos, X Región, Chile. *Ameghiniana*. Vol. 42, (2): 377 – 394. Buenos Aires.
- Hickey-Vargas, R., Roa, H. M., Escobar, L. L. y Frey, F. A. (1989). Geochemical variations in Andean basaltic and silicic lavas from the Villarrica-Lanin volcanic chain (39.5 S): an evaluation of source heterogeneity, fractional crystallization and crustal assimilation. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 103(3), 361-386.
- Hickey-Vargas, R.; López-Escobar, L.; Moreno, H. (1997). Isotopic characteristics of volcanic rocks from minor eruptive centers (MEC) in the area of Villarrica volcano (39°-39°30'S). In Congreso Geológico Chileno, No. 8, Actas, Vol. 1, p. 337-341. Antofagasta.
- Hickey-Vargas, R., Holbik, S., Tormey, D., Frey, F. A. y Roa, H. M. (2016). Basaltic rocks from the Andean Southern Volcanic Zone: Insights from the comparison of along-strike and small-scale geochemical variations and their sources. *Lithos*, 258, 115-132.
- Irvine, T. N. y Baragar, W. R. A. (1971). A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian journal of earth sciences*, 8(5), 523-548.
- Lara, L. (2004). Villarrica-Lanín chain: Tectonic constraints for volcanism in a transversal alignment. *Villarrica Volcano (39.5 S), Southern Andes, Chile (Lara, L)*, 13-16.
- Lara, L. E. y Clavero, J. (2004). Villarrica Volcano (39.5 S), Southern Andes, Chile (pp. 13-16). Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín, N°61, 73 p.
- Lara, L. y Moreno, H. (2004). Geología del área Liquiñe–Neltume, regiones de los Lagos y de la Araucanía. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica. N° 83: 19 pp. Santiago.
- Lara, L. E., Naranjo, J. A. y Moreno, H. (2004). Lanín volcano (39.5 S), Southern Andes: geology and morphostructural evolution. *Revista geológica de Chile*, 31(2), 241-257.
- Le Bas, M., Maitre, R. L., Streckeisen, A., Zanettin, B. y IUGS Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks. (1986). A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of petrology*, 27(3), 745-750.
- Lohmar, S. (2008). Petrología de las ignimbritas Licán y Pucón (Volcán Villarrica) y Curacautín (Volcán Llaima) en los Andes del sur de Chile.
- Lohmar, S., Parada, M., Gutiérrez, F., Robin, C. y Gerbe, M. C. (2012). Mineralogical and numerical approaches to establish the pre-eruptive conditions of the mafic Lican Ignimbrite, Villarrica Volcano (Chilean Southern Andes). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 235, 55-69.

- Lopez-Escobar, L., Cembrano, J. y Moreno, H. (1995). Geochemistry and tectonics of the Chilean Southern Andes basaltic Quaternary volcanism (37-46°S). *Revista Geológica de Chile* 22 (2): 219-234.
- Lopez-Escobar, L., Frey, F. A. y Vergara, M. (1977). Andesites and high-alumina basalts from the central-south Chile High Andes: geochemical evidence bearing on their petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 63(3), 199-228.
- Martín-Fernández, J. A., Barceló-Vidal, C., Pawlowsky-Glahn, V., Kovács, L. Ó. y Kovács, G. P. (2005). Subcompositional patterns in Cenozoic volcanic rocks of Hungary. *Mathematical geology*, 37, 729-752.
- Martin, M., Kato, T., Rodríguez, C., Godoy, E., Duhart, P., McDonough, M. y Campos, A. (1999). Evolution of late Paleozoic accretionary complex and overlying forearc – magmatic arc, south – central Chile (38° – 41°S): Constraints for the tectonic setting along the southwestern margin of Gondwana. *Tectonics*. Vol. 18, (4): 582 – 605.
- McGee, L. E., Brahm, R., Rowe, M. C., Handley, H. K., Morgado, E., Lara, L. E. y Valdivia, P. (2017). A geochemical approach to distinguishing competing tectono-magmatic processes preserved in small eruptive centres. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 172, 1-26.
- Moreno, H. y Clavero, J. (2006). Geología del área del Volcán Villarrica. Servicio Nacional de Geología y Minería, Serie Geología Básica, Carta Geológica de Chile, (98).
- Morgado, E., Parada, M. A., Contreras, C., Castruccio, A., Gutiérrez, F. y McGee, L. E. (2015). Contrasting records from mantle to surface of Holocene lavas of two nearby arc volcanic complexes: Caburgua-Huelemolle Small Eruptive Centers and Villarrica Volcano, Southern Chile. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 306, 1-16.
- Munizaga, F., Hervé, F., Drake, R., Pankhurst, R., Brook, M. y Snelling, I. (1988). Geochronology of the lake region of southcentral Chile (39°-42°S): Preliminary results. *Journal of South American Earth Sciences*, Vol. 1, N° 3: 309-316.
- Palma, J. L., Calder, E. S., Basualto, D., Blake, S. y Rothery, D. A. (2008). Correlations between SO₂ flux, seismicity, and outgassing activity at the open vent of Villarrica volcano, Chile. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113(B10).
- Parada, M. (1975). Geología de la región de los Lagos Calafquén, Panguipulli y Riñihue. Memoria de Título (Inédito). Departamento de Geología, Universidad de Chile: 106 pp. Santiago.
- Parada, M. y Munizaga, F. (1978). El Batolito de Panguipulli: Caracterización del plutonismo jurásico en la Cordillera de Los Andes de la Provincia de Valdivia, X Región (39°30' – 40°15'S). Departamento de Geología, Universidad de Chile. Comunicaciones. N° 30: 15 – 31. Santiago.

- Pavez, M., Brasse, H., Kapinos, G., Díaz, D., Lara, L. E. y Schill, E. (2023). Magma storage and transfer in the Villarrica volcanic chain, South Chile: MT insights into volcano-tectonic interactions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 439, 107832.
- Pawlowsky-Glahn, V. y Buccianti, A. (2011). *Compositional data analysis*. Chichester: Wiley.
- Pérez-Flores, P., Cembrano, J., Sánchez-Alfaro, P., Veloso, E., Arancibia, G. y Roquer, T. (2016). Tectonics, magmatism and paleo-fluid distribution in a strike-slip setting: Insights from the northern termination of the Liquiñe–Ofqui fault System, Chile. *Tectonophysics*, 680, 192-210.
- Pioli, L., Scalisi, L., Costantini, L., Di Muro, A., Bonadonna, C. y Clavero, J. (2015). Explosive style, magma degassing and evolution in the Chaimilla eruption, Villarrica volcano, Southern Andes. *Bulletin of Volcanology*, 77, 1-14.
- Pizarro, C., Parada, M. A., Contreras, C. y Morgado, E. (2019). Cryptic magma recharge associated with the most voluminous 20th century eruptions (1921, 1948 and 1971) at Villarrica Volcano. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 384, 48-63.
- Rodríguez, C., Pérez, Y., Moreno, H., Clayton, J., Antinao, J.L., Duhart, P. y Martin, M. (1999). Área de Panguipulli – Riñihue, Región de Los Lagos. Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapas Geológicos. N° 10. Santiago.
- Romero, J. E., Vera, F., Polacci, M., Morgavi, D., Arzilli, F., Alam, M. A. y Keller, W. (2018). Tephra from the 3 March 2015 sustained column related to explosive lava fountain activity at Volcán Villarrica (Chile). *Frontiers in Earth Science*, 6, 98.
- Romero, J. E., Morgado, E., Pisello, A., Boschetty, F., Petrelli, M., Cáceres, F., Alam, M. A., Polacci, M., Palma, J. L., Arzilli, F., Vera, F., Gutiérrez, R. y Morgavi, D. (2023). Pre-eruptive Conditions of the 3 March 2015 Lava Fountain of Villarrica Volcano (Southern Andes). *Bulletin of Volcanology*, 85(1), [2].
- Rollinson, H. R. (1993). *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*. Longman Scientific & Technical.
- Servicio Nacional de Minería y Geología (Sernageomin). (2023). Ranking de Riesgo Específico de Volcanes Activos de Chile 2023. https://rnvv.sernageomin.cl/wp-content/uploads/sites/2/2023/10/Ranking-2023_tabloide_20231012.pdf
- Silva Parejas, C. A. (2008). Evolution and Dynamics of the 3.6 ka bp Pucón Eruption of Villarrica Volcano, Chile.
- Silva, C., Druitt, T. H., Robin, C., Moreno, H. y Naranjo, J. A. (2010). The Holocene Pucón eruption of Volcán Villarrica, Chile: Deposit architecture and eruption chronology. *Bulletin of Volcanology*, 72(6), 677–692.

- Suárez, M. y Emparán, C. (1997). *Hoja Curacautín, Regiones de la Araucanía y del Biobío*. Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile. N° 71: 105 pp. Santiago.
- Tassara, A. y Yáñez, G. (2003). Relación entre el espesor elástico de la litosfera y la segmentación tectónica del margen andino (15-47 S). *Revista geológica de Chile*, 30(2), 159-186.
- Urra-Tapia, P., González-Vidal, D., Miller, M. y Palma, J. L. (2023). The seismic structure of Villarrica Volcano revealed by ambient noise tomography. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 107829.
- Vera Rivadeneira, F. E. (2018). Origen, transporte y emplazamiento de lahares y avalanchas mixtas generadas en la erupción del 03 de marzo de 2015 en el Volcán Villarrica, regiones de la Araucanía y los Ríos, Chile.
- von Eynatten, H., Barceló-Vidal, C. y Pawlowsky-Glahn, V. (2003). Modelling compositional change: the example of chemical weathering of granitoid rocks. *Mathematical Geology*, 35, 231-251.
- Wehrmann, H., Hoernle, K., Jacques, G., Garbe-Schönberg, D., Schumann, K., Mahlke, J. y Lara, L. E. (2014). Volatile (sulphur and chlorine), major, and trace element geochemistry of mafic to intermediate tephras from the Chilean Southern Volcanic Zone (33–43 S). *International Journal of Earth Sciences*, 103, 1945-1962.
- White, W. M. (2020). *Geochemistry*. John Wiley & Sons.
- Winter, J. D. (2014). *Principles of igneous and metamorphic petrology* (Vol. 2). Harlow, UK: Pearson education.
- Witter, J. B., Kress, V. C., Delmelle, P. y Stix, J. (2004). Volatile degassing, petrology, and magma dynamics of the Villarrica Lava Lake, Southern Chile. *Journal of volcanology and geothermal research*, 134(4), 303-337.

Anexo 2: Base de datos (vidrio)

Muestra	Tipo de depósito	Referencia	Provincia	Unidad	Eruptión	Tipo de análisis	SiO2	Al2O3	TiO2	FeO	Fe2O3	FeOT	CaO	MgO	MnO	Na2O	K2O	P2O5	PRC	Suma
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	58.1	16.4	1.2	8.8	NaN	NaN	7.2	3.4	0.2	4.1	1	0.2	NaN	100.6
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	57.4	16	1.4	9.6	NaN	NaN	7.5	3.7	0.2	3.6	0.9	0.3	NaN	100.6
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	57.8	16	1.4	9.6	NaN	NaN	7.5	3.7	0.2	3.6	0.9	0.3	NaN	100.6
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	57.9	16.2	1.4	9	NaN	NaN	7.4	3.6	0.2	3.5	1	0.3	NaN	100.5
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	57.6	16.1	1.4	9.1	NaN	NaN	7.5	3.6	0.2	3.7	0.9	0.2	NaN	100.4
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	57.4	15.6	1.5	9.3	NaN	NaN	7.6	3.7	0.2	3.6	0.9	0.3	NaN	100.4
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	58.1	16.1	1.3	9.6	NaN	NaN	7.6	3.7	0.2	3.7	0.9	0	NaN	101.2
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	57.6	15.8	1.4	9.6	NaN	NaN	7.6	3.6	0.2	3.6	0.9	0.3	NaN	100.6
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	57.6	15.5	1.4	9.9	NaN	NaN	7.5	3.5	0.2	3.8	0.9	0.3	NaN	100.7
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	57.6	16.1	1.2	10.3	NaN	NaN	7.5	3.8	0.1	3.6	0.9	0.3	NaN	101.4
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	57.6	16.1	1.4	9.5	NaN	NaN	7.6	3.6	0.2	3.7	0.9	0.3	NaN	100.3
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	57.7	15.8	1.3	9.5	NaN	NaN	7.6	3.7	0.1	3.5	0.9	0.2	NaN	99.2
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	57.3	15.9	1.5	9.9	NaN	NaN	7.5	3.6	0.2	3.6	0.8	0.1	NaN	100.4
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	56.8	15.8	1.3	9.9	NaN	NaN	7.5	3.7	0.2	3.4	0.7	0.2	NaN	98.7
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	59.4	11.9	2.3	15.3	NaN	NaN	6.1	3.3	0.3	2.9	0.4	0.4	NaN	99.4
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	55.8	11.5	1.9	15.7	NaN	NaN	6	2.3	0.3	2.2	1.5	0.4	NaN	97.6
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	57.7	15.5	1.3	9.5	NaN	NaN	7.6	3.7	0.2	3.7	0.9	0.3	NaN	98.7
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	58.8	13.2	1.9	13.6	NaN	NaN	6.2	2.3	0.2	2.1	1.5	0.2	NaN	98.3
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	58	12.8	2	14.5	NaN	NaN	6.1	2.6	0.2	2.5	1.5	0.5	NaN	98.7
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	57.6	15.6	1.3	9.6	NaN	NaN	7.6	3.6	0.2	3.2	1.2	0.3	NaN	101.2
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	56.5	15.5	1.4	9.6	NaN	NaN	7.5	3.7	0.2	3.4	1.2	0.3	NaN	99.1
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	56.6	16	1.3	9.8	NaN	NaN	7.7	3.7	0.2	3.4	1	0.2	NaN	99.9
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	57.4	16	1.3	9.3	NaN	NaN	7.8	3.7	0.2	3.6	1.1	0.2	NaN	99.8
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	57.8	15.8	1.4	9.6	NaN	NaN	7.5	3.8	0.2	3.3	1	0.2	NaN	100.4
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	55.8	15.8	1.3	9.3	NaN	NaN	7.2	3.7	0.1	3.6	1	0.2	NaN	98.1
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	55.8	15.8	1.4	9.5	NaN	NaN	7.4	3.7	0.2	3.8	1	0.2	NaN	98.7
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	55.8	15.8	1.4	10	NaN	NaN	7.7	3.7	0.2	3.9	0.9	0.3	NaN	98.7
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	56.4	16.2	1.3	9.8	NaN	NaN	7.6	3.7	0.2	3.9	0.9	0.2	NaN	100.2
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	55.8	15.8	1.3	9.1	NaN	NaN	7.6	3.7	0.2	3.9	0.9	0.2	NaN	99.2
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	55.7	15.3	1.3	9.9	NaN	NaN	7.2	3.9	0.2	3.5	1.1	0	NaN	98.1
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	56.7	15.5	1.3	9.5	NaN	NaN	7.1	3.7	0.2	3.5	1.1	0.3	NaN	98.9
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	56.5	15.5	1.3	9.5	NaN	NaN	7.1	3.6	0.2	3.4	1.1	0.2	NaN	98.1
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	56	15.4	1.5	10.2	NaN	NaN	7.1	3.6	0.2	3.4	1.1	0.2	NaN	98.7
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	54.9	15.1	1.3	10.1	NaN	NaN	7.1	3.6	0.2	3.3	1.2	0.3	NaN	97.3
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	56.9	15.9	1.3	9.3	NaN	NaN	7.6	3.7	0.2	3.6	1.2	0.3	NaN	98.9
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	57.4	14.7	1.7	11.4	NaN	NaN	4.7	2.1	0.2	3.8	1.8	0.4	NaN	98.2
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	63.1	10.3	1.2	6.8	NaN	NaN	4.1	1.5	0.1	4	2.5	0.3	NaN	98.7
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	60.5	14.2	1.7	12.2	NaN	NaN	4.7	1.2	0.1	4.9	1.9	0.3	NaN	98.0
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	60.8	14.8	1.7	9.1	NaN	NaN	5	1.7	0.2	3.5	1.6	0.4	NaN	98.8
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	61.1	14.2	1.5	9.8	NaN	NaN	4.8	1.5	0.2	3	1.6	0	NaN	82.3
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	59.7	15.3	1.3	9.6	NaN	NaN	4.8	1.6	0.2	3.2	1.7	0.1	NaN	98.3
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	58.8	12.5	1.9	13.7	NaN	NaN	5	0.6	0.2	2.6	2.5	0.7	NaN	95.4
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	57.5	12.7	2.4	13.2	NaN	NaN	4.9	0.2	0.2	2.6	2.5	0.4	NaN	97.4
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	56.2	12.9	2.5	15.5	NaN	NaN	5	0.6	0.2	2.6	2.5	0.4	NaN	98.9
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	58.2	13	2.9	12.9	NaN	NaN	4.7	0.9	0.2	2.7	2.3	0.5	NaN	98.3
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	56.8	12	3.2	13.1	NaN	NaN	4.8	0.6	0.2	2.9	2.3	0.5	NaN	98.6
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	56.8	12.4	1.6	10.3	NaN	NaN	4.8	0.6	0.2	2.9	2.3	0.5	NaN	98.4
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	55.7	15.4	1.5	10.7	NaN	NaN	4.8	3.2	0.2	3.1	1.5	0.3	NaN	98.4
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	56.4	15.7	1.5	9.9	NaN	NaN	4.8	3.2	0.2	3.1	1.5	0.3	NaN	98.4
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	57.8	15.4	1.4	9.7	NaN	NaN	4.8	3.2	0.2	3.6	1.2	0.2	NaN	99.2
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	55.9	15.2	1.5	11.1	NaN	NaN	4.8	3.2	0.2	3.1	1.7	0.2	NaN	98.1
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	55.6	15.6	1.6	11.8	NaN	NaN	4.7	3.2	0.2	3.6	1.3	0.2	NaN	98.6
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	56.3	15.3	1.6	11.8	NaN	NaN	4.7	3.2	0.2	3.6	1.3	0.2	NaN	98.6
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	56.8	15.8	1.6	10.7	NaN	NaN	4.7	3.2	0.2	3.7	1.1	0.3	NaN	100.5
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	56.2	15.8	1.6	10.7	NaN	NaN	4.7	3.2	0.2	3.7	1.1	0.3	NaN	100.5
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	57.3	15.5	1.5	10.4	NaN	NaN	4.8	3.2	0.2	3.5	1.5	0.4	NaN	100
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	56.7	15	1.7	12	NaN	NaN	4.7	3.2	0.2	3.3	1.4	0.3	NaN	100
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	56.8	15.5	1.7	12	NaN	NaN	4.7	3.2	0.2	3.3	1.4	0.3	NaN	100
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vilariça 2	Ignimbrita Pucón	Vidrio	55.8	13.9	1.7	9.9	NaN	NaN	4.7	3.2	0.2	3.3	1.4	0.3	NaN	98.3
VR734.6	Escoria	Silva, 2008	Vilariça	Vil																

(Continuación Anexo 2)

Muestra	Tipo de depósito	Referencia	Proveniencia	Unidad	Erupción	Tipo de análisis	SiO2	Al2O3	TiO2	FeO	Fe2O3	FeOY	CaO	MgO	MnO	Na2O	K2O	P2O5	PPC	Suma	
camp_V17241	Lapilli	Pioli et al., 2015	Vilancica	Vilancica 2	Chamilla	Vidrio	55.71	13.53	1.55	NaH	NaN	NaN	10.27	8.17	4.44	0.22	3.24	0.97	0.26	NaN	98.36
camp_V17241	Lapilli	Pioli et al., 2015	Vilancica	Vilancica 2	Chamilla	Vidrio	57.19	13.77	1.56	NaN	NaN	NaN	10.24	8.46	4.57	0.18	2.48	1.01	0.22	NaN	99.88
camp_V17241	Lapilli	Pioli et al., 2015	Vilancica	Vilancica 2	Chamilla	Vidrio	56.99	13.84	1.45	NaN	NaN	NaN	10.57	8.53	4.40	0.18	2.72	0.92	0.25	NaN	99.85
camp_V17241	Lapilli	Pioli et al., 2015	Vilancica	Vilancica 2	Chamilla	Vidrio	57.01	13.95	1.57	NaN	NaN	NaN	10.63	8.53	4.45	0.21	2.57	0.94	0.25	NaN	100.11
camp_V17241	Lapilli	Pioli et al., 2015	Vilancica	Vilancica 2	Chamilla	Vidrio	56.50	13.87	1.52	NaN	NaN	NaN	10.60	8.25	4.79	0.18	2.76	0.96	0.20	NaN	100.09
camp_V17241	Lapilli	Pioli et al., 2015	Vilancica	Vilancica 2	Chamilla	Vidrio	57.08	13.88	1.51	NaN	NaN	NaN	10.67	8.49	4.37	0.20	2.15	0.95	0.22	NaN	99.52
camp_V17241	Lapilli	Pioli et al., 2015	Vilancica	Vilancica 2	Chamilla	Vidrio	57.26	13.72	1.57	NaN	NaN	NaN	10.58	8.36	4.50	0.24	2.27	0.99	0.27	NaN	99.56
camp_V17241	Lapilli	Pioli et al., 2015	Vilancica	Vilancica 2	Chamilla	Vidrio	56.82	13.77	1.46	NaN	NaN	NaN	10.56	8.37	4.46	0.23	2.77	0.97	0.24	NaN	100.05
camp_V17241	Lapilli	Pioli et al., 2015	Vilancica	Vilancica 2	Chamilla	Vidrio	57.05	14.10	1.44	NaN	NaN	NaN	10.68	8.54	4.53	0.20	2.47	0.97	0.31	NaN	100.59
camp_V17241	Lapilli	Pioli et al., 2015	Vilancica	Vilancica 2	Chamilla	Vidrio	57.57	14.09	1.52	NaN	NaN	NaN	10.45	8.38	4.31	0.20	2.03	0.99	0.25	NaN	99.79
camp_V17241	Lapilli	Pioli et al., 2015	Vilancica	Vilancica 2	Chamilla	Vidrio	56.41	13.60	1.55	NaN	NaN	NaN	10.53	8.31	4.25	0.22	2.17	0.97	0.24	NaN	98.2
camp_V17241	Lapilli	Pioli et al., 2015	Vilancica	Vilancica 2	Chamilla	Vidrio	57.06	13.64	1.56	NaN	NaN	NaN	10.68	8.58	4.42	0.24	2.11	0.94	0.28	NaN	99.52
camp_V17241	Lapilli	Pioli et al., 2015	Vilancica	Vilancica 2	Chamilla	Vidrio	57.09	13.99	1.50	NaN	NaN	NaN	10.32	8.49	4.33	0.21	2.71	0.96	0.24	NaN	99.91
camp_V17241	Lapilli	Pioli et al., 2015	Vilancica	Vilancica 2	Chamilla	Vidrio	56.27	13.75	1.50	NaN	NaN	NaN	10.38	8.29	4.40	0.24	3.47	0.93	0.28	NaN	99.51
camp_V17241	Lapilli	Pioli et al., 2015	Vilancica	Vilancica 2	Chamilla	Vidrio	56.63	16.05	1.28	NaN	NaN	NaN	8.49	9.20	3.59	0.17	3.55	0.68	0.22	NaN	99.89
camp_V17241	Lapilli	Pioli et al., 2015	Vilancica	Vilancica 2	Chamilla	Vidrio	57.53	14.12	1.57	NaN	NaN	NaN	10.66	8.38	4.45	0.16	2.50	1.01	0.23	NaN	100.61
camp_V17241	Lapilli	Pioli et al., 2015	Vilancica	Vilancica 2	Chamilla	Vidrio	54.80	12.68	1.61	NaN	NaN	NaN	11.39	8.19	4.17	0.21	3.64	1.01	0.21	NaN	98.11
camp_V17241	Lapilli	Pioli et al., 2015	Vilancica	Vilancica 2	Chamilla	Vidrio	55.88	13.00	1.51	NaN	NaN	NaN	11.15	8.19	4.21	0.18	3.78	0.96	0.27	NaN	98.64
camp_V17241	Lapilli	Pioli et al., 2015	Vilancica	Vilancica 2	Chamilla	Vidrio	55.84	13.24	1.57	NaN	NaN	NaN	11.36	8.11	4.35	0.25	3.71	0.92	0.31	NaN	99.66
camp_V17241	Lapilli	Pioli et al., 2015	Vilancica	Vilancica 2	Chamilla	Vidrio	56.03	13.30	1.58	NaN	NaN	NaN	11.25	8.09	4.24	0.21	3.41	0.98	0.30	NaN	99.39
camp_V17241	Lapilli	Pioli et al., 2015	Vilancica	Vilancica 2	Chamilla	Vidrio	56.17	13.13	1.62	NaN	NaN	NaN	11.49	8.21	4.30	0.23	3.32	1.03	0.37	NaN	99.67
camp_V17241	Lapilli	Pioli et al., 2015	Vilancica	Vilancica 2	Chamilla	Vidrio	55.93	13.24	1.55	NaN	NaN	NaN	11.31	8.18	4.35	0.15	3.62	0.98	0.28	NaN	99.65
camp_V17241	Lapilli	Pioli et al., 2015	Vilancica	Vilancica 2	Chamilla	Vidrio	56.26	13.48	1.51	NaN	NaN	NaN	10.55	7.89	4.25	0.18	3.60	0.92	0.27	NaN	98.91
camp_V17241	Lapilli	Pioli et al., 2015	Vilancica	Vilancica 2	Chamilla	Vidrio	55.94	13.04	1.56	NaN	NaN	NaN	11.57	8.14	4.25	0.20	3.58	0.99	0.32	NaN	99.59
camp_V17241	Lapilli	Pioli et al., 2015	Vilancica	Vilancica 2	Chamilla	Vidrio	56.38	13.56	1.62	NaN	NaN	NaN	11.50	8.37	4.25	0.22	3.89	0.97	0.28	NaN	100.88
camp_V17241	Lapilli	Pioli et al., 2015	Vilancica	Vilancica 2	Chamilla	Vidrio	55.93	13.34	1.49	NaN	NaN	NaN	11.39	8.38	4.27	0.22	3.68	0.94	0.27	NaN	99.91
camp_V17241	Lapilli	Pioli et al., 2015	Vilancica	Vilancica 2	Chamilla	Vidrio	55.91	12.64	1.76	NaN	NaN	NaN	12.03	8.07	4.40	0.22	3.42	1.04	0.30	NaN	99.79
camp_V17241	Lapilli	Pioli et al., 2015	Vilancica	Vilancica 2	Chamilla	Vidrio	55.86	12.95	1.68	NaN	NaN	NaN	11.30	8.07	4.35	0.17	3.91	1.04	0.31	NaN	99.66
camp_V17241	Lapilli	Pioli et al., 2015	Vilancica	Vilancica 2	Chamilla	Vidrio	55.81	13.02	1.71	NaN	NaN	NaN	11.36	8.13	4.17	0.21	4.02	0.97	0.31	NaN	99.63
camp_V17241	Lapilli	Pioli et al., 2015	Vilancica	Vilancica 2	Chamilla	Vidrio	56.25	12.82	1.61	NaN	NaN	NaN	11.83	8.33	4.43	0.19	3.41	0.99	0.32	NaN	100.18
camp_V17241	Lapilli	Pioli et al., 2015	Vilancica	Vilancica 2	Chamilla	Vidrio	56.57	12.98	1.51	NaN	NaN	NaN	10.70	7.87	4.31	0.14	3.44	0.97	0.37	NaN	99.66
camp_V18751	Lapilli	Pioli et al., 2015	Vilancica	Vilancica 2	Chamilla	Vidrio	57.59	12.91	1.62	NaN	NaN	NaN	10.37	8.97	5.00	0.20	3.10	1.13	0.31	NaN	99.75
camp_V18751	Lapilli	Pioli et al., 2015	Vilancica	Vilancica 2	Chamilla	Vidrio	56.00	13.41	1.70	NaN	NaN	NaN	10.88	7.61	3.98	0.21	3.57	1.05	0.24	NaN	98.65
camp_V18751	Lapilli	Pioli et al., 2015	Vilancica	Vilancica 2	Chamilla	Vidrio	56.84	14.10	1.62	NaN	NaN	NaN	9.93	7.61	3.83	0.17	3.49	0.96	0.28	NaN	98.61
camp_V18751	Lapilli	Pioli et al., 2015	Vilancica	Vilancica 2	Chamilla	Vidrio	56.47	13.73	1.63	NaN	NaN	NaN	10.88	7.57	3.88	0.22	3.38	0.97	0.32	NaN	99.22
camp_V18751	Lapilli	Pioli et al., 2015	Vilancica	Vilancica 2	Chamilla	Vidrio	57.13	13.96	1.61	NaN	NaN	NaN	10.20	7.52	3.90	0.20	2.92	1.08	0.25	NaN	98.77
camp_V18751	Lapilli	Pioli et al., 2015	Vilancica	Vilancica 2	Chamilla	Vidrio	56.29	13.74	1.61	NaN	NaN	NaN	10.90	7.76	3.88	0.20	3.30	0.98	0.29	NaN	98.85
camp_V18751	Lapilli	Pioli et al., 2015	Vilancica	Vilancica 2	Chamilla	Vidrio	57.28	13.82	1.55	NaN	NaN	NaN	10.72	8.22	4.52	0.21	4.52	0.72	0.25	NaN	100.38
camp_16781	Lapilli	Pioli et al., 2015	Vilancica	Vilancica 2	Chamilla	Vidrio	56.33	13.73	1.54	NaN	NaN	NaN	10.73	8.36	4.45	0.25	3.68	0.90	0.24	NaN	100.21
camp_16781	Lapilli	Pioli et al., 2015	Vilancica	Vilancica 2	Chamilla	Vidrio	55.65	13.85	1.43	NaN	NaN	NaN	10.36	8.38	4.30	0.19	3.34	0.96	0.28	NaN	98.58
camp_16781	Lapilli	Pioli et al., 2015	Vilancica	Vilancica 2	Chamilla	Vidrio	56.95	12.95	1.49	NaN	NaN	NaN	10.64	8.50	4.31	0.24	3.49	0.92	0.17	NaN	99.46
camp_16781	Lapilli	Pioli et al., 2015	Vilancica	Vilancica 2	Chamilla	Vidrio	55.99	13.61	1.46	NaN	NaN	NaN	10.59	8.39	4.43	0.20	3.68	0.96	0.28	NaN	98.61
camp_16781	Lapilli	Pioli et al., 2015	Vilancica	Vilancica 2	Chamilla	Vidrio	55.77	13.85	1.49	NaN	NaN	NaN	10.55	8.20	4.39	0.18	3.56	0.94	0.28	NaN	99.21
camp_16781	Lapilli	Pioli et al., 2015	Vilancica	Vilancica 2	Chamilla	Vidrio	55.11	13.41	1.55	NaN	NaN	NaN	10.77	8.32	4.37	0.17	3.13	0.93	0.27	NaN	98.03
camp_16781	Lapilli	Pioli et al., 2015	Vilancica	Vilancica 2	Chamilla	Vidrio	55.11	14.03	1.49	NaN	NaN	NaN	10.75	8.58	4.40	0.21	3.64	0.95	0.30	NaN	100.42
camp_16781	Lapilli	Pioli et al., 2015	Vilancica	Vilancica 2	Chamilla	Vidrio	56.07	13.49	1.52	NaN	NaN	NaN	10.95	8.14	4.48	0.22	3.74	0.91	0.34	NaN	100.08
camp_16781	Lapilli	Pioli et al., 2015	Vilancica	Vilancica 2	Chamilla	Vidrio	56.41	13.98	1.48	NaN	NaN	NaN	10.64	8.49	4.32	0.14	3.71	0.86	0.23	NaN	100.28
camp_16781	Lapilli	Pioli et al., 2015	Vilancica	Vilancica 2	Chamilla	Vidrio	55.66	13.61	1.46	NaN	NaN	NaN	10.69	8.15	4.20	0.21	3.58	0.93	0.26	NaN	98.75
camp_16781	Lapilli	Pioli et al., 2015	Vilancica	Vilancica 2	Chamilla	Vidrio	55.66	13.54	1.55	NaN	NaN	NaN	10.80	8.30	4.24	0.24	3.57	0.94	0.34	NaN	99.18
camp_16781	Lapilli	Pioli et al., 2015	Vilancica	Vilancica 2	Chamilla	Vidrio	55.75	14.39	1.39	NaN	NaN	NaN	10.25	8.93	4.04	0.23	3.98	0.80	0.20	NaN	99.66
V152017	Spatter	Romero et al., 2003	Vilancica	Vilancica 3	2015	Vidrio	56.14	13.93	1.78	NaN	NaN	NaN	8.84	4.99	0.19	3.38	0.95	0.43	NaN	99.84	
AM030315	Spatter	Romero et al., 2003	Vilancica	Vilancica 3	2015	Vidrio	54.94	12.84	2.21	13.8	NaN	NaN	7.19	3.67	0.21	3.47	1.3	0.5	NaN	99.93	
V151215	Spatter	Romero et al., 2003	Vilancica	Vilancica 3	2015	Vidrio	54.34	14.03	1.15	11.77	NaN	NaN	8.98	5	0.21	3.13	0.94	0.37	NaN	99.32	
V091215	Spatter	Romero et al., 2003	Vilancica	Vilancica 3	2015	Vidrio	54.61	14.09	1.41	11.08	NaN	NaN	8.93	4.89	0.18	3.03	0.96	0.41	NaN	99.56	
BM030315	Spatter	Romero et al., 2003	Vilancica	Vilancica 3	2015	Vidrio	54.53	14.14	1.44	10.56	NaN	NaN	8.6	5.4	0.16	3.35	1.15	0.58	NaN	99.71	
S7030315	Spatter	Romero et al., 2003	Vilancica	Vilancica 3	2015	Vidrio	54.42	15.24	1.56	10.69	NaN	NaN	8.94	4.9	0.17	3.34	0.91	0.36	NaN	99.90	
00070423	Tefra	Werhmann et al., 2014	Vilancica	No identificada	No identificada	Vidrio	56.41	14.82	1.43	10.44	NaN	NaN	8.13	4.89	0.20	2.84	0.83	0.20	NaN	100.00	
00070423	Tefra	Werhmann et al., 2014	Vilancica	No identificada	No identificada	Vidrio	55.92	13.38	1.47	11.07	NaN	NaN	9.28	5.26	0.25	2.98	0.74	0.24	NaN	100.00	
00070423	Tefra	Werhmann et al., 2014	Vilancica	No identificada	No identificada	Vidrio	55.61	14.81	1.35	10.18	NaN	NaN	9.38	4.63	0.14	3.19	0.70	0.21	NaN	100.00	
00070423	Tefra	Werhmann et al., 2014	Vilancica	No identificada	No identificada	Vidrio	56.50	13.52	1.48	10.56	NaN	NaN	8.88	4.87	0.18	2.99	0.79	0.27	NaN	100.00	
00070423	Tefra	Werhmann et al., 2014	Vilancica	No identificada	No identificada	Vidrio	55.26	16.41	1.31	7.47	NaN	NaN	6.99	5.98	0.21	3.70	0.73	0.16	NaN	100.00	

Anexo 3: Elementos mayores en roca total

Muestra	Referencia	Unidad	Erupción	SiO2	Al2O3	TiO2	FeO	Fe2O3	FeOT	CaO	MgO	MnO	Na2O	K2O	P2O5	PPC	Suma
V1-1	Hickey-Vargas et al., 1989	Villarrica 1	No identificada V1	56.69	15.79	1.29	NaN	10.03	NaN	7.20	3.56	0.18	3.51	1.03	0.27	NaN	99.55
V1-2	Hickey-Vargas et al., 1989	Villarrica 1	No identificada V1	55.56	15.88	1.22	NaN	8.42	NaN	3.32	4.53	0.17	3.98	0.90	0.22	NaN	100.00
V1-3	Hickey-Vargas et al., 1989	Villarrica 1	No identificada V1	52.49	16.55	1.23	NaN	10.25	NaN	9.00	6.40	0.16	3.08	0.71	0.24	NaN	100.11
V2-1a	Hickey-Vargas et al., 1989	Villarrica 2	No identificada V2	52.87	17.37	1.11	NaN	9.28	NaN	9.86	5.08	0.15	2.88	0.64	0.20	NaN	99.44
V2-2a	Hickey-Vargas et al., 1989	Villarrica 2	No identificada V2	51.79	16.89	1.14	NaN	10.03	NaN	9.77	6.63	0.16	2.91	0.61	0.21	NaN	100.14
V2-3	Hickey-Vargas et al., 1989	Villarrica 2	No identificada V2	55.00	16.11	1.37	NaN	10.06	NaN	8.10	4.20	0.16	3.83	0.86	0.29	NaN	99.98
V2-4	Hickey-Vargas et al., 1989	Villarrica 2	No identificada V2	51.97	16.90	0.98	NaN	9.51	NaN	9.81	7.40	0.16	2.92	0.58	0.19	NaN	100.42
V2-5	Hickey-Vargas et al., 1989	Villarrica 2	No identificada V2	55.38	16.04	1.32	NaN	10.68	NaN	7.65	3.67	0.17	3.75	0.91	0.26	NaN	99.83
V2-6	Hickey-Vargas et al., 1989	Villarrica 2	No identificada V2	52.40	17.97	1.11	NaN	9.30	NaN	10.31	5.01	0.15	3.00	0.66	0.23	NaN	100.14
V2-7	Hickey-Vargas et al., 1989	Villarrica 2	No identificada V2	52.68	18.74	1.05	NaN	8.92	NaN	10.25	4.47	0.15	3.06	0.61	0.19	NaN	100.12
V2-8	Hickey-Vargas et al., 1989	Villarrica 2	No identificada V2	51.47	17.59	0.98	NaN	9.12	NaN	10.94	7.04	0.15	3.67	0.43	0.13	NaN	100.29
V2-9	Hickey-Vargas et al., 1989	Villarrica 2	No identificada V2	52.74	16.20	1.03	NaN	9.13	NaN	10.22	5.07	0.15	3.08	0.58	0.19	NaN	100.39
VR2A1	Lohmar et al., 2012	Villarrica 2	Ignimbrita Licán	57.40	16.30	1.16	NaN	9.87	NaN	6.82	3.14	0.17	3.98	0.91	0.22	-0.12	99.83
VR62A	Lohmar et al., 2012	Villarrica 2	Ignimbrita Licán	57.20	16.48	1.17	NaN	9.93	NaN	6.97	3.18	0.17	3.92	0.89	0.23	-0.05	100.09
VR62A2	Lohmar et al., 2012	Villarrica 2	Ignimbrita Licán	57.70	16.30	1.17	NaN	9.95	NaN	6.88	3.17	0.17	4.04	0.92	0.22	-0.27	100.25
VR5-3b	Lohmar et al., 2012	Villarrica 2	Ignimbrita Licán	57.10	16.40	1.18	NaN	9.95	NaN	6.85	3.19	0.17	4.08	0.94	0.22	-0.21	99.87
VR5-3a	Lohmar et al., 2012	Villarrica 2	Ignimbrita Licán	54.50	17.24	1.23	NaN	10.38	NaN	6.90	3.26	0.18	3.86	0.70	0.22	0.99	99.46
VR5-2	Lohmar et al., 2012	Villarrica 2	Ignimbrita Licán	54.30	17.25	1.23	NaN	10.20	NaN	6.72	3.23	0.18	3.74	0.71	0.22	1.72	99.50
VR5-1	Lohmar et al., 2012	Villarrica 2	Ignimbrita Licán	55.50	16.85	1.21	NaN	10.20	NaN	6.82	3.25	0.17	3.89	0.82	0.22	1.1	99.83
VR-4	Lohmar et al., 2012	Villarrica 2	Ignimbrita Licán	54.70	16.90	1.24	NaN	10.40	NaN	6.58	3.28	0.18	3.75	0.77	0.23	1.59	99.82
VR54-1	Lohmar et al., 2012	Villarrica 2	Ignimbrita Licán	57.30	16.16	1.16	NaN	9.86	NaN	6.77	3.12	0.17	4.00	0.92	0.24	-0.32	99.38
VR54-2	Lohmar et al., 2012	Villarrica 2	Ignimbrita Licán	56.60	16.30	1.18	NaN	9.95	NaN	6.74	3.14	0.18	3.95	0.87	0.23	0.17	99.31
VR33-9-1	Lohmar et al., 2012	Villarrica 2	Ignimbrita Licán	56.00	16.90	1.19	NaN	10.00	NaN	7.20	3.21	0.17	3.81	0.75	0.20	0.41	99.84
VR33-9-2	Lohmar et al., 2012	Villarrica 2	Ignimbrita Licán	56.40	16.55	1.18	NaN	10.00	NaN	6.97	3.17	0.17	4.00	0.84	0.22	0.3	99.80
VR31A	Lohmar et al., 2012	Villarrica 2	Ignimbrita Licán	57.00	16.45	1.18	NaN	9.92	NaN	6.86	3.27	0.17	3.97	0.85	0.23	0.08	99.91
VR31D	Lohmar et al., 2012	Villarrica 2	Ignimbrita Licán	57.00	16.28	1.09	NaN	9.80	NaN	7.02	3.19	0.17	3.82	0.86	0.22	0.0	99.80
VR6A	Lohmar et al., 2012	Villarrica 2	Ignimbrita Licán	57.50	16.00	1.15	NaN	9.85	NaN	6.70	3.18	0.17	4.03	0.91	0.22	-0.23	99.48
VR9	Lohmar et al., 2012	Villarrica 2	Ignimbrita Licán	57.80	16.15	1.17	NaN	9.95	NaN	6.80	3.16	0.17	4.04	0.91	0.22	-0.38	99.99
VR16F	Lohmar et al., 2012	Villarrica 2	Ignimbrita Licán	56.90	16.25	1.16	NaN	9.90	NaN	6.80	3.20	0.17	3.80	0.85	0.22	0.2	99.45
VR68B	Lohmar et al., 2012	Villarrica 2	Ignimbrita Licán	56.80	16.30	1.18	NaN	10.00	NaN	7.30	3.23	0.17	3.98	0.88	0.22	-0.15	99.91
VR55b	Lohmar et al., 2012	Villarrica 2	Ignimbrita Licán	56.50	16.45	1.18	NaN	10.00	NaN	6.80	3.20	0.17	3.90	0.88	0.23	0.33	99.64
VR203-1	Lohmar et al., 2012	Villarrica 2	Ignimbrita Licán	58.20	16.50	1.20	NaN	10.14	NaN	6.86	3.22	0.19	3.70	0.85	0.23	0.55	99.87
VR62-1 a	Lohmar et al., 2012	Villarrica 2	Ignimbrita Licán	55.80	15.90	1.47	NaN	11.05	NaN	6.80	3.35	0.18	4.05	0.90	0.28	-0.01	99.77
VR1 b	Lohmar et al., 2012	Villarrica 2	Ignimbrita Licán	53.00	16.55	1.20	NaN	10.25	NaN	8.88	5.68	0.16	3.32	0.71	0.22	-0.07	99.90
VR113-6P	Silva, 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	62.00	15.50	1.10	NaN	6.90	NaN	4.10	1.50	0.20	4.80	1.60	0.40	1.30	99.40
VR119	Silva, 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	56.30	16.50	1.20	NaN	10.20	NaN	7.80	3.70	0.20	3.90	0.90	0.20	-0.40	100.50
VR114	Silva, 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	56.40	16.30	1.20	NaN	10.00	NaN	7.80	3.60	0.20	3.80	0.90	0.20	-0.30	100.10
VR73G	Silva, 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	55.50	16.50	1.20	NaN	10.10	NaN	8.00	3.70	0.20	3.70	0.80	0.20	-0.10	99.80
VR113-7a	Silva, 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	55.60	16.60	1.20	NaN	10.10	NaN	7.70	3.70	0.20	3.70	0.80	0.20	-0.10	99.70
VR73J	Silva, 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	55.20	16.30	1.20	NaN	10.30	NaN	8.20	3.70	0.20	3.80	0.90	0.20	0.40	99.80
VR73K	Silva, 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	56.20	16.30	1.20	NaN	10.10	NaN	7.80	3.70	0.20	3.90	0.80	0.20	-0.40	100.00
VR97-3BD	Silva, 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	56.20	16.40	1.20	NaN	10.00	NaN	7.80	3.70	0.20	3.90	0.90	0.20	-0.40	100.10
VR112AD	Silva, 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	56.10	16.30	1.20	NaN	10.10	NaN	8.00	3.70	0.20	3.90	0.80	0.20	-0.40	100.10
VR73JN	Silva, 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	55.00	16.60	1.20	NaN	10.00	NaN	7.80	3.90	0.20	3.60	0.80	0.20	0.30	99.60
VR115-3P	Silva, 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	56.30	16.40	1.20	NaN	10.00	NaN	7.80	3.70	0.20	3.90	0.90	0.20	-0.40	100.20
VR97-3AF	Silva, 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	61.20	15.30	1.20	NaN	8.50	NaN	5.20	2.10	0.20	4.70	1.40	0.30	-0.40	99.70
VR113-9P	Silva, 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	61.30	15.30	1.20	NaN	8.50	NaN	5.20	2.10	0.20	4.70	1.40	0.40	-0.10	100.20
VR73JP	Silva, 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	64.20	14.90	1.10	NaN	6.90	NaN	4.30	1.50	0.20	4.80	1.60	0.40	0.00	99.90
VR73ic	Silva, 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	63.00	15.30	1.10	NaN	7.30	NaN	4.50	1.70	0.20	4.90	1.50	0.40	-0.20	99.70
VR73JR	Silva, 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	60.40	15.60	1.20	NaN	8.60	NaN	5.60	2.50	0.20	4.50	1.20	0.30	-0.30	99.80
VR73JV	Silva, 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	60.80	15.70	1.10	NaN	8.30	NaN	5.70	2.40	0.20	4.50	1.30	0.30	-0.30	100.00
VR115-9D	Silva, 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	63.50	15.20	1.10	NaN	7.40	NaN	4.70	1.70	0.20	4.90	1.50	0.40	-0.40	100.20
VR73ie	Silva, 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	61.00	15.40	1.20	NaN	8.50	NaN	5.20	2.10	0.20	4.70	1.30	0.40	-0.30	99.70
VR115-9	Silva, 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	51.70	17.40	0.90	NaN	9.50	NaN	10.40	6.80	0.20	2.90	0.50	0.20	-0.10	100.40
VR-73ib	Silva, 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	55.90	16.40	1.20	NaN	10.20	NaN	7.90	3.70	0.20	3.90	0.80	0.20	-0.40	100.00
VR73B	Silva, 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	56.00	16.40	1.20	NaN	10.30	NaN	7.90	3.80	0.20	3.90	0.80	0.20	-0.50	100.20
VR73Kb	Silva, 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	56.00	16.20	1.20	NaN	10.30	NaN	7.80	3.70	0.20	3.80	0.80	0.20	-0.50	99.70
VR73Lb	Silva, 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	56.00	16.30	1.20	NaN	10.20	NaN	7.90	3.60	0.20	3.80	0.80	0.20	-0.40	99.80
VR112Sb	Silva, 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	55.20	16.70	1.20	NaN	10.20	NaN	8.10	3.80	0.20	3.70	0.80	0.20	-0.30	99.80
VR73M	Silva, 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	55.00	16.40	1.20	NaN	10.10	NaN	7.40	3.60	0.20	3.60	0.80	0.20	1.10	99.80
VR73K1	Silva, 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	55.80	16.40	1.20	NaN	10.20	NaN	7.80	3.70	0.20	3.60	0.80	0.20	0.20	100.10
VR73L1	Silva, 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	55.30	16.50	1.20	NaN	10.30	NaN	7.80	3.70	0.20	3.70	0.80	0.20	0.20	99.90
VR64AC	Silva, 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	56.00	16.50	1.20	NaN	10.10	NaN	7.90	3.60	0.20	3.90	0.80	0.20	-0.40	100.00
VR73K-CR1	Silva, 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	56.00	16.30	1.20	NaN	10.00	NaN	7.80	3.60	0.20	3.90	0.90	0.20	-0.50	99.60
VR73N1R	Silva, 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	57.40	16.30	1.20	NaN	9.60	NaN	7.30	3.30	0.20	4.00	0.90	0.30	-0.40	100.10
VR73M1P	Silva, 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	55.60	16.10	1.20	NaN	10.00	NaN	7.80	3.60	0.20	3.80	0.90	0.30	-0.50	100.00
VR-73Mb	Silva, 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	55.80	16.70	1.20	NaN	10.00	NaN	8.20	3.80	0.20	3.70	0.80	0.20	-0.40	100.20
VR73Nb2	Silva, 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	55.80	16.50	1.20	NaN	10.20	NaN	8.20	3.80	0.20	3.80	0.80	0.20	-0.50	100.20
VR73N3	Silva, 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	55.60	16.70	1.20	NaN	10.20	NaN	8.00	3.80	0.20	3.80	0.80	0.20	-0.50	100.00
VR73P	Silva, 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	55.60	16												

(Continuación Anexo 3)

Muestra	Referencia	Unidad	Erupción	SiO2	Al2O3	TiO2	FeO	Fe2O3	FeOT	CaO	MgO	MnO	Na2O	K2O	P2O5	PPC	Suma
VR78-SBS	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	54.80	17.00	1.20	NaN	9.90	NaN	8.30	3.70	0.20	3.60	0.80	0.20	-0.10	99.60
3	Costantini et al., 2011	Villarica 3	Chamilla	52.93	19.40	1.01	NaN	8.93	NaN	9.96	4.03	0.15	2.84	0.58	0.17	NaN	100.00
5	Costantini et al., 2011	Villarica 3	Chamilla	53.04	19.46	1.00	NaN	8.86	NaN	9.94	3.98	0.15	2.79	0.59	0.18	NaN	99.99
8	Costantini et al., 2011	Villarica 3	Chamilla	53.10	19.04	1.00	NaN	8.89	NaN	9.93	4.15	0.15	2.90	0.65	0.18	NaN	99.99
9	Costantini et al., 2011	Villarica 3	Chamilla	52.83	19.68	1.03	NaN	9.03	NaN	9.86	3.88	0.15	2.76	0.60	0.18	NaN	99.99
12	Costantini et al., 2011	Villarica 3	Chamilla	52.62	18.62	0.98	NaN	9.29	NaN	9.96	4.83	0.16	2.75	0.61	0.18	NaN	100.00
14	Costantini et al., 2011	Villarica 3	Chamilla	51.98	19.40	1.01	NaN	9.52	NaN	9.87	4.68	0.16	2.62	0.54	0.18	NaN	99.96
VL05a	Pioli et al., 2015	Villarica 3	Chamilla	53.05	19.39	1.00	NaN	8.85	NaN	10.02	3.90	0.15	2.86	0.60	0.17	NaN	99.99
VL05b	Pioli et al., 2015	Villarica 3	Chamilla	51.16	18.66	0.95	NaN	9.35	NaN	9.76	6.43	0.15	2.79	0.58	0.16	NaN	99.99
VL09a	Pioli et al., 2015	Villarica 3	Chamilla	53.08	19.38	1.01	NaN	8.84	NaN	10.01	3.89	0.14	2.84	0.63	0.18	NaN	100
VL09b	Pioli et al., 2015	Villarica 3	Chamilla	52.90	19.75	1.02	NaN	8.96	NaN	9.94	3.76	0.15	2.72	0.62	0.17	NaN	99.99
VL11a	Pioli et al., 2015	Villarica 3	Chamilla	51.64	19.34	0.92	NaN	9.12	NaN	10.87	5.09	0.15	2.52	0.48	0.16	NaN	99.99
VL11b	Pioli et al., 2015	Villarica 3	Chamilla	52.50	18.49	0.92	NaN	9.08	NaN	10.37	5.07	0.15	2.70	0.55	0.16	NaN	99.99
V3-1	Hickey-Vargas et al., 1989	Villarica 3	No identificada V3	52.71	18.25	1.23	NaN	8.81	NaN	9.91	4.48	0.17	3.38	0.69	0.29	NaN	99.92
V3-2	Hickey-Vargas et al., 1989	Villarica 3	No identificada V3	52.04	17.59	1.14	NaN	9.71	NaN	9.74	5.74	0.15	3.20	0.64	0.22	NaN	100.17
V3-3	Hickey-Vargas et al., 1989	Villarica 3	No identificada V3	52.21	16.62	1.32	NaN	10.46	NaN	9.59	5.33	0.17	3.13	0.78	0.28	NaN	99.89
V3-4	Hickey-Vargas et al., 1989	Villarica 3	No identificada V3	52.43	18.13	1.17	NaN	9.36	NaN	9.95	4.90	0.15	3.23	0.68	0.24	NaN	100.24
802	Lopez-Escobar, 1977	Villarica 3	No identificada V3	52.7	20.81	0.89	6.11	NaN	NaN	10.5	4.8	0.17	3.32	0.44	0.21	NaN	99.95
1921 D04	Pizarro et al., 2019	Villarica 3	Lavas de 1921	52.15	16.98	1.25	6.77	3.61	NaN	9.63	5.4	0.163	3.02	0.757	0.309	-0.23	99.81
R1921 06	Pizarro et al., 2019	Villarica 3	Lavas de 1921	52.49	16.72	1.254	6.67	3.6	NaN	9.64	5.4	0.162	3.03	0.766	0.269	-0.4	99.89
1921 02	Pizarro et al., 2019	Villarica 3	Lavas de 1921	52.25	17	1.255	7.18	3.19	NaN	9.5	5.4	0.151	3.06	0.788	0.263	-0.41	99.82
1921 03	Pizarro et al., 2019	Villarica 3	Lavas de 1921	52.23	17.04	1.232	6.87	3.29	NaN	9.61	5.3	0.157	3.09	0.767	0.269	-0.45	99.41
1921 04	Pizarro et al., 2019	Villarica 3	Lavas de 1921	52.29	16.73	1.296	8.1	2.46	NaN	9.49	5.3	0.162	3.07	0.781	0.277	-0.45	99.51
1921 08	Pizarro et al., 2019	Villarica 3	Lavas de 1921	52.43	16.62	1.304	7.11	3.39	NaN	9.48	5.3	0.163	3.1	0.79	0.286	-0.46	99.51
1921 05	Pizarro et al., 2019	Villarica 3	Lavas de 1921	52.36	16.65	1.326	7.31	3.23	NaN	9.46	5.3	0.164	3.11	0.79	0.276	-0.46	99.50
1948 09	Pizarro et al., 2019	Villarica 3	Lavas de 1948	51.72	16.36	1.084	5.59	4.64	NaN	9.59	7.1	0.157	2.9	0.619	0.21	-0.56	99.41
1948 04	Pizarro et al., 2019	Villarica 3	Lavas de 1948	51.65	16.36	1.095	6.39	3.94	NaN	9.58	7.1	0.156	2.89	0.629	0.22	-0.52	99.49
1948 05	Pizarro et al., 2019	Villarica 3	Lavas de 1948	51.67	16.45	1.098	6.6	3.81	NaN	9.46	7	0.158	2.88	0.63	0.21	-0.52	99.45
1948 06	Pizarro et al., 2019	Villarica 3	Lavas de 1948	52.05	16.27	1.082	6.02	4.04	NaN	9.66	6.9	0.156	2.95	0.622	0.211	-0.47	99.49
1948 07	Pizarro et al., 2019	Villarica 3	Lavas de 1948	51.98	16.34	1.085	6.45	3.58	NaN	9.65	7	0.156	2.93	0.625	0.202	-0.47	99.53
1948 08	Pizarro et al., 2019	Villarica 3	Lavas de 1948	52.38	16.23	1.099	6.67	3.28	NaN	9.54	6.9	0.155	2.94	0.637	0.219	-0.43	99.62
1948 10	Pizarro et al., 2019	Villarica 3	Lavas de 1948	51.87	16.57	1.099	6.47	3.57	NaN	9.53	7	0.156	2.89	0.627	0.212	-0.45	99.54
1948 11	Pizarro et al., 2019	Villarica 3	Lavas de 1948	52.03	16.3	1.086	7.04	2.94	NaN	9.63	7	0.155	2.94	0.623	0.231	-0.48	99.50
1948 12	Pizarro et al., 2019	Villarica 3	Lavas de 1948	52.25	16.93	1.111	4.25	5.81	NaN	9.73	7	0.159	2.92	0.627	0.202	-0.38	99.63
1948 N1	Pizarro et al., 2019	Villarica 3	Lavas de 1948	51.61	16.45	1.098	6.6	3.81	NaN	9.46	7	0.157	2.88	0.63	0.21	-0.52	99.45
1948 01	Pizarro et al., 2019	Villarica 3	Lavas de 1948	51.66	16.37	1.089	6.68	3.55	NaN	9.58	7.2	0.156	2.91	0.618	0.209	-0.46	99.58
1948 02	Pizarro et al., 2019	Villarica 3	Lavas de 1948	51.77	16.32	1.088	6.79	3.45	NaN	9.62	7.1	0.157	2.92	0.619	0.22	-0.49	99.56
RC 1971	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	52.42	16.66	1.112	6.07	3.77	NaN	9.67	6.2	0.153	3.04	0.637	0.219	-0.45	99.50
RM 1971	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	51.97	16.8	1.133	6.07	4.06	NaN	9.66	6.3	0.156	3.01	0.636	0.219	-0.47	99.54
RM1 1971	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	52.21	16.75	1.126	6.47	3.59	NaN	9.59	6.2	0.154	3.04	0.637	0.219	-0.48	99.51
1971 N1	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	52.15	16.82	1.118	5.97	4.04	NaN	9.62	6.2	0.153	3.04	0.637	0.229	-0.48	99.50
1971 N2	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	52.17	16.8	1.108	6.11	3.83	NaN	9.7	6.2	0.153	3.06	0.641	0.2	-0.52	99.45
1971 02	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	52.58	16.58	1.118	6.43	3.38	NaN	9.68	6.2	0.154	3.02	0.643	0.218	-0.45	99.55
1971 03	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	52.24	16.65	1.138	6.78	3.34	NaN	9.61	6.2	0.156	3.01	0.638	0.229	-0.5	99.49
1971 N6	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	52.23	16.56	1.092	7.12	3.01	NaN	9.65	6.3	0.155	3.02	0.633	0.208	-0.61	99.37
R1971 DM	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	52.05	16.65	1.125	8.11	2.32	NaN	9.66	6.1	0.155	3	0.631	0.222	-0.56	99.46
R1971 DV	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	52.21	16.73	1.14	5.55	4.59	NaN	9.63	6.2	0.155	3.01	0.635	0.202	-0.41	99.64
1971 04	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	52.26	16.76	1.116	6.74	3.34	NaN	9.66	6.1	0.154	3.04	0.644	0.211	-0.54	99.49
R1971 04	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	52.48	16.61	1.163	6.43	3.64	NaN	9.52	6.1	0.155	3.05	0.653	0.228	-0.51	99.52
1971 N5	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	52.58	16.56	1.148	6.13	3.83	NaN	9.65	6	0.156	3.06	0.663	0.221	-0.49	99.51
1971 N4	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	52.6	16.42	1.095	6.64	3.21	NaN	9.67	6.3	0.155	3.01	0.644	0.231	-0.48	99.50
1971 05	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	52.21	16.93	1.128	6.41	3.72	NaN	9.46	6	0.154	3.15	0.621	0.227	-0.54	99.47
RM 1971 05	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	52.38	16.74	1.147	6.31	3.79	NaN	9.6	6	0.153	3.01	0.641	0.24	-0.33	99.68
1971 07	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	53.12	16.77	1.132	6.03	3.56	NaN	9.32	6	0.153	3.06	0.662	0.207	-0.44	99.57
1971 08	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	52.14	16.74	1.126	6.77	3.45	NaN	9.6	6.1	0.156	3.03	0.647	0.212	-0.54	99.43
1971 09	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	52.41	16.69	1.112	6.69	3.31	NaN	9.6	6.1	0.154	3.06	0.649	0.23	-0.51	99.50
1971 10 M1	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	52.42	16.84	1.128	6.66	3.2	NaN	9.66	6	0.155	3.04	0.646	0.232	-0.47	99.51
1971 10 M2	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	52.32	16.87	1.131	5.98	3.91	NaN	9.65	6	0.154	3.06	0.647	0.229	-0.49	99.46
1971 11	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	52.14	17.03	1.123	6.97	3.02	NaN	9.67	6	0.154	3.07	0.647	0.219	-0.55	99.49
1971 12	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	52.36	16.91	1.119	6.82	3.1	NaN	9.6	6	0.152	3.08	0.652	0.227	-0.61	99.41
1971 13	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	51.95	17.12	1.123	6.81	3.34	NaN	9.46	6.1	0.155	3.07	0.651	0.237	-0.56	99.46
1971 30	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	52.68	16.69	1.127	7.07	2.82	NaN	9.58	6	0.153	3.				

Anexo 4: Elementos traza en roca total

Muestra	Referencia	Unidad	Erupción	Cr	Co	Ni	Rb	Sr	Zr	Ba
V1-1	Hickey-Vargas et al., 1989	Villarica 1	No identificada V1	29.00	25.60	19.00	24.70	402.00	124.00	285.00
V1-2	Hickey-Vargas et al., 1989	Villarica 1	No identificada V1	89.00	24.60	21.00	19.40	483.00	118.00	287.00
V1-3	Hickey-Vargas et al., 1989	Villarica 1	No identificada V1	228.00	35.20	81.00	17.80	437.00	109.00	229.00
V2-1 a	Hickey-Vargas et al., 1989	Villarica 2	No identificada V2	134.00	25.00	42.00	15.10	437.00	95.00	200.00
V2-2 a	Hickey-Vargas et al., 1989	Villarica 2	No identificada V2	248.00	37.00	85.00	14.60	429.00	92.00	191.00
V2-3	Hickey-Vargas et al., 1989	Villarica 2	No identificada V2	35.00	26.90	22.00	20.40	428.00	114.00	255.00
V2-4	Hickey-Vargas et al., 1989	Villarica 2	No identificada V2	333.00	34.90	102.00	12.90	439.00	84.00	182.00
V2-5	Hickey-Vargas et al., 1989	Villarica 2	No identificada V2	17.00	25.30	12.00	21.40	428.00	118.00	256.00
V2-6	Hickey-Vargas et al., 1989	Villarica 2	No identificada V2	126.00	28.30	40.00	15.50	453.00	97.00	200.00
V2-7	Hickey-Vargas et al., 1989	Villarica 2	No identificada V2	147.00	26.60	36.00	14.00	482.00	89.00	196.00
V2-8	Hickey-Vargas et al., 1989	Villarica 2	No identificada V2	225.00	35.60	70.00	9.70	410.00	62.00	138.00
V2-9	Hickey-Vargas et al., 1989	Villarica 2	No identificada V2	108.00	28.70	42.00	12.20	474.00	84.00	181.00
VR62A1	Lohmar et al., 2012	Villarica 2	Ignimbrita Licán	9.00	23.50	7.00	21.40	410.00	105.00	275.00
VR62A	Lohmar et al., 2012	Villarica 2	Ignimbrita Licán	9	22.5	5.5	20.9	412	106	272
VR62A2	Lohmar et al., 2012	Villarica 2	Ignimbrita Licán	7	21.5	6	21.7	410	107	280
VR5-3a	Lohmar et al., 2012	Villarica 2	Ignimbrita Licán	8	24	6	22.3	415	110	276
VR5-3b	Lohmar et al., 2012	Villarica 2	Ignimbrita Licán	9	27	7	15.9	450	116	295
VR5-2	Lohmar et al., 2012	Villarica 2	Ignimbrita Licán	18	26	8	16.5	409	110	405
VR5-1	Lohmar et al., 2012	Villarica 2	Ignimbrita Licán	9	23	6	19.4	400	114	242
VR-4	Lohmar et al., 2012	Villarica 2	Ignimbrita Licán	7	24	6	18.8	408	115	240
VR54-1	Lohmar et al., 2012	Villarica 2	Ignimbrita Licán	9	30	8	22.1	411	108	284
VR54-2	Lohmar et al., 2012	Villarica 2	Ignimbrita Licán	10	24	6.5	20.1	409	107	267
VR33-9-1	Lohmar et al., 2012	Villarica 2	Ignimbrita Licán	11	31	7	17.9	425	110	310
VR33-9-2	Lohmar et al., 2012	Villarica 2	Ignimbrita Licán	10	24	7.5	19.5	418	110	268
VR31A	Lohmar et al., 2012	Villarica 2	Ignimbrita Licán	10.5	24	7	20.7	411	110	280
VR31O	Lohmar et al., 2012	Villarica 2	Ignimbrita Licán	9	24	6	20.5	403	113	290
VR6A	Lohmar et al., 2012	Villarica 2	Ignimbrita Licán	9.5	24	11	21.8	400	107	274
VR9	Lohmar et al., 2012	Villarica 2	Ignimbrita Licán	7	23	5	21.7	410	107	274
VR16F	Lohmar et al., 2012	Villarica 2	Ignimbrita Licán	9	23	7	20.5	402	106	277
VR68B	Lohmar et al., 2012	Villarica 2	Ignimbrita Licán	8	24	7	20.7	417	104	279
VR55b	Lohmar et al., 2012	Villarica 2	Ignimbrita Licán	8	36	8	21.2	400	113	295
VR20-1	Lohmar et al., 2012	Villarica 2	Ignimbrita Licán	8	25	6	20.5	408	111	260
VR62-1 a	Lohmar et al., 2012	Villarica 2	Ignimbrita Licán	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
VR1 b	Lohmar et al., 2012	Villarica 2	Ignimbrita Licán	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
VR113-6P	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	3.00	8.00	2.00	41.00	330.00	196.00	440.00
VR119	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	24.00	24.00	13.00	20.50	422.00	106.00	245.00
VR114	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	26.00	24.00	12.00	20.50	415.00	106.00	253.00
VR 73G	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	14.00	23.00	11.00	19.40	422.00	100.00	239.00
VR113-7a	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	14.00	24.00	11.00	19.40	422.00	104.00	250.00
VR 73i	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	15.00	14.00	10.00	20.50	116.00	103.00	245.00
VR 73Kc	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	21.00	23.00	13.00	20.20	414.00	105.00	250.00
VR97-3BD	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	20.00	23.00	12.00	21.00	420.00	104.00	250.00
VR112aD	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	23.00	25.00	12.00	20.50	417.00	102.00	252.00
VR 73JN	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	41.00	27.00	20.00	20.00	416.00	104.00	240.00
VR115-3P	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	18.00	24.00	12.00	20.20	418.00	105.00	254.00
VR97-3AP	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	11.00	15.00	2.00	34.50	371.00	167.00	385.00
VR113-9P	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	5.00	14.00	2.00	35.00	366.00	188.00	405.00
VR73JP	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	6.00	8.50	0.00	41.50	330.00	200.00	482.00
VR73Jc	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	4.00	9.00	1.50	37.90	346.00	185.00	412.00
VR73JR	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	8.00	17.00	9.00	31.20	375.00	156.00	362.00
VR73JV	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	9.00	16.00	7.00	32.40	374.00	158.00	355.00
VR115-9D	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	5.00	10.00	3.00	37.00	347.00	185.00	422.00
VR73Jb	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	2.50	14.00	2.00	33.40	366.00	164.00	375.00
VR115-9	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	215.00	34.00	78.00	10.70	400.00	67.00	148.00
VR-73ib	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	14.00	31.00	11.00	20.50	419.00	105.00	244.00
VR73IB	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	15.00	36.00	15.00	20.00	416.00	102.00	245.00
VR73Kb	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	15.00	28.00	11.50	19.90	416.00	102.00	245.00
VR73LB	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	17.00	34.00	15.00	19.90	416.00	105.00	270.00
VR112-5	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	28.00	25.00	13.00	18.50	423.00	101.00	240.00
VR 73L	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	19.00	14.00	14.00	20.00	415.00	105.00	240.00
VR 73Kl	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	17.00	26.00	13.00	19.50	415.00	108.00	245.00
VR73Ll	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	16.00	25.00	13.00	19.50	418.00	106.00	250.00
VR64AC	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	18.00	24.00	11.50	19.90	422.00	103.00	255.00
VR73K-CR1	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	14.00	23.00	11.00	20.60	415.00	103.00	250.00
VR73NIR	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	11.00	21.00	9.00	22.80	406.00	116.00	275.00
VR73NP	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	24.00	25.00	12.00	20.40	407.00	108.00	260.00
VR-73Mb	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	22.00	34.00	14.00	19.30	416.00	101.00	240.00
VR73N2b	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	20.00	28.00	14.00	19.30	419.00	102.00	240.00
VR73N3	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	23.00	26.00	15.00	19.40	419.00	102.00	245.00
VR73P	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	26.00	25.00	15.00	19.10	422.00	102.00	240.00
VR-73-2b	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	22.00	25.00	16.00	19.70	416.00	101.00	240.00
VR58-0	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	28.00	26.00	15.00	18.70	420.00	103.00	245.00
VR58-1A	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	29.00	35.00	24.00	18.00	424.00	100.00	240.00
VR64AB	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	25.00	29.00	18.00	18.70	420.00	100.00	236.00
VR73M	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	22.00	25.00	14.00	19.00	422.00	100.00	240.00
VR73N1	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	19.00	25.00	12.00	19.10	418.00	104.00	245.00
VR57-2C	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	16.00	25.00	13.00	18.60	424.00	103.00	245.00
VR57-2B	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	123.00	39.50	63.00	11.00	620.00	72.00	214.00
VR57-2D	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	17.50	23.50	11.00	19.90	419.00	103.00	251.00
VR57-1	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	4.00	15.00	4.00	33.30	370.00	162.00	372.00
VR57-1B	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	44.00	30.00	22.00	18.20	437.00	96.00	236.00
VR57-2A	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	19.00	26.00	14.50	18.80	424.00	101.00	240.00
VR58-1B	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	16.00	25.00	12.00	20.00	420.00	107.00	265.00
VR78-3AP	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	27.00	24.00	11.00	21.00	414.00	106.00	250.00
VR73O2	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	12.00	18.00	7.50	31.20	385.00	157.00	360.00
VR113-11P	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	13.00	8.00	9.00	54.00	287.00	248.00	560.00
VR85-7P	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	67.00	29.00	26.00	19.00	419.00	101.00	232.00
VR75EV	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	12.00	23.00	10.00	26.50	394.00	135.00	320.00
VR75ER	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	30.00	25.00	15.00	24.70	425.00	118.00	322.00
VR85-5P	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	5.00	3.00	2.00	70.00	197.00	297.00	675.00
VR75EP	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	70.00	23.00	31.00	25.00	410.00	121.00	325.00
VR78-3AD	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	19.00	25.00	11.00	21.00	408.00	108.00	260.00
VR57-4A	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	29.00	28.00	24.00	22.20	422.00	107.00	275.00
VR57-4B	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	21.00	31.00	18.00	19.00	428.00	106.00	260.00
VR57-4C	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	34.00	36.00	21.00	19.10	424.00	107.00	256.00
VR63A	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	13.50	27.00	12.00	19.70	421.00	103.00	245.00
VR78-3AS	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	27.00	25.50	19.00	19.50	421.00	99.00	237.00
VR73O2i	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	25.00	24.00	16.00	18.30	414.00	109.00	245.00
VR-79-1b	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	16.00	54.00	15.00	10.50	445.00	105.00	263.00
VR-79-3b	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	24.00	34.00	17.00	19.00	424.00	104.00	253.00
VR69	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	26.00	28.00	17.00	19.90	443.00	104.00	245.00
VR85-5S	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	32.00	24.00	16.00	21.00	425.00	105.00	245.00
VR85-8S	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	20.00	26.00	16.00	21.00	424.00	105.00	254.00
VR75A	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucón	24.00	24.00	18.00	19.70	428.00	106.00	260.00
VR75E	Silva, 2008	Villarica 2								

(Continuación Anexo 4)

Muestra	Referencia	Unidad	Erupción	Cr	Co	Ni	Rb	Sr	Zr	Ba
VR78-5BS	Silva, 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucon	22.00	24.00	16.00	20.00	427.00	105.00	245.00
3	Costantini et al., 2011	Villarrica 3	Chamilla	74.00	26.00	26.00	16.00	461.00	82.00	205.00
5	Costantini et al., 2011	Villarrica 3	Chamilla	71.00	27.00	24.00	16.00	460.00	83.00	197.00
8	Costantini et al., 2011	Villarrica 3	Chamilla	93.00	27.00	31.00	17.00	458.00	82.00	206.00
9	Costantini et al., 2011	Villarrica 3	Chamilla	71.00	26.00	23.00	15.00	459.00	85.00	203.00
12	Costantini et al., 2011	Villarrica 3	Chamilla	128.00	29.00	36.00	15.00	443.00	79.00	195.00
14	Costantini et al., 2011	Villarrica 3	Chamilla	116.00	27.00	36.00	14.00	443.00	81.00	187.00
VL05a	Pioli et al., 2015	Villarrica 3	Chamilla	71	25	22	17	459	82	206
VL05b	Pioli et al., 2015	Villarrica 3	Chamilla	181	30	77	13	657	63	197
VL09a	Pioli et al., 2015	Villarrica 3	Chamilla	67	25	23	17	465	85	188
VL09b	Pioli et al., 2015	Villarrica 3	Chamilla	65	27	22	17	462	87	198
VL11a	Pioli et al., 2015	Villarrica 3	Chamilla	124	32	40	14	471	75	169
VL11b	Pioli et al., 2015	Villarrica 3	Chamilla	130	27	38	16	456	73	183
V3-1	Hickey-Vargas et al., 1989	Villarrica 3	No identificada V3	105.00	26.80	28.00	14.70	493.00	110.00	217.00
V3-2	Hickey-Vargas et al., 1989	Villarrica 3	No identificada V3	219.00	32.60	64.00	14.90	465.00	94.00	193.00
V3-3	Hickey-Vargas et al., 1989	Villarrica 3	No identificada V3	104.00	31.90	47.00	18.70	426.00	119.00	238.00
V3-4	Hickey-Vargas et al., 1989	Villarrica 3	No identificada V3	129.00	29.20	52.00	15.60	469.00	100.00	209.00
802	Lopez-Escobar, 1977	Villarrica 3	No identificada V3	183	26.5	110	18	374	NaN	185
R1921 D04	Pizarro et al., 2019	Villarrica 3	Lavas de 1921	110	29	50	18	425	101	233
R1921 06	Pizarro et al., 2019	Villarrica 3	Lavas de 1921	110	29	40	17	423	104	236
R1921 02	Pizarro et al., 2019	Villarrica 3	Lavas de 1921	110	30	50	18	417	100	232
R1921 03	Pizarro et al., 2019	Villarrica 3	Lavas de 1921	110	29	50	18	426	100	233
R1921 04	Pizarro et al., 2019	Villarrica 3	Lavas de 1921	120	30	50	18	421	106	241
R1921 08	Pizarro et al., 2019	Villarrica 3	Lavas de 1921	100	30	40	18	415	106	244
R1921 05	Pizarro et al., 2019	Villarrica 3	Lavas de 1921	110	29	40	18	431	107	243
R1948 09	Pizarro et al., 2019	Villarrica 3	Lavas de 1948	310	33	100	14	375	84	186
R1948 04	Pizarro et al., 2019	Villarrica 3	Lavas de 1948	310	33	100	15	381	85	187
R1948 05	Pizarro et al., 2019	Villarrica 3	Lavas de 1948	330	34	110	15	375	84	185
R1948 06	Pizarro et al., 2019	Villarrica 3	Lavas de 1948	300	33	110	15	371	85	185
R1948 07	Pizarro et al., 2019	Villarrica 3	Lavas de 1948	290	33	100	14	384	83	184
R1948 08	Pizarro et al., 2019	Villarrica 3	Lavas de 1948	290	33	100	15	382	88	193
R1948 10	Pizarro et al., 2019	Villarrica 3	Lavas de 1948	310	33	100	15	377	84	185
R1948 11	Pizarro et al., 2019	Villarrica 3	Lavas de 1948	250	33	100	15	383	83	187
R1948 12	Pizarro et al., 2019	Villarrica 3	Lavas de 1948	310	33	100	15	373	86	190
R1948 N1	Pizarro et al., 2019	Villarrica 3	Lavas de 1948	320	34	110	15	374	84	185
R1948 01	Pizarro et al., 2019	Villarrica 3	Lavas de 1948	280	34	100	14	375	84	186
R1948 02	Pizarro et al., 2019	Villarrica 3	Lavas de 1948	330	34	100	15	379	84	186
RC 1971	Morgado et al., 2015	Villarrica 3	Lavas de 1971	170	29	70	14	427	86	201
RM 1971	Morgado et al., 2015	Villarrica 3	Lavas de 1971	170	31	80	15	425	85	200
RMII 1971	Morgado et al., 2015	Villarrica 3	Lavas de 1971	180	30	70	14	423	86	199
R1971 N1	Morgado et al., 2015	Villarrica 3	Lavas de 1971	180	31	70	14	421	86	201
R1971 N2	Morgado et al., 2015	Villarrica 3	Lavas de 1971	170	31	70	15	423	84	199
R1971 02	Morgado et al., 2015	Villarrica 3	Lavas de 1971	190	30	70	15	424	87	202
R1971 03	Morgado et al., 2015	Villarrica 3	Lavas de 1971	180	31	70	14	421	86	199
R1971 N6	Morgado et al., 2015	Villarrica 3	Lavas de 1971	190	31	90	14	414	85	201
R1971 DM	Morgado et al., 2015	Villarrica 3	Lavas de 1971	180	32	80	14	424	85	196
R1971 DV	Morgado et al., 2015	Villarrica 3	Lavas de 1971	180	30	70	14	417	85	197
R1971 04	Morgado et al., 2015	Villarrica 3	Lavas de 1971	180	30	70	15	418	86	198
R1971 04	Morgado et al., 2015	Villarrica 3	Lavas de 1971	180	30	70	14	428	90	205
R1971 N5	Morgado et al., 2015	Villarrica 3	Lavas de 1971	160	29	60	14	420	88	203
R1971 N4	Morgado et al., 2015	Villarrica 3	Lavas de 1971	190	32	70	14	406	85	198
R1971 05	Morgado et al., 2015	Villarrica 3	Lavas de 1971	190	31	80	15	432	89	199
RM 1971 05	Morgado et al., 2015	Villarrica 3	Lavas de 1971	170	30	70	14	420	86	199
R1971 07	Morgado et al., 2015	Villarrica 3	Lavas de 1971	190	31	70	15	427	89	204
R1971 08	Morgado et al., 2015	Villarrica 3	Lavas de 1971	180	31	80	15	412	86	197
R1971 09	Morgado et al., 2015	Villarrica 3	Lavas de 1971	190	31	70	15	420	87	200
R1971 10 M1	Morgado et al., 2015	Villarrica 3	Lavas de 1971	180	30	70	14	420	86	199
R1971 10 M2	Morgado et al., 2015	Villarrica 3	Lavas de 1971	170	30	70	14	429	86	202
R1971 11	Morgado et al., 2015	Villarrica 3	Lavas de 1971	160	30	70	14	434	87	201
R1971 12	Morgado et al., 2015	Villarrica 3	Lavas de 1971	160	31	60	15	433	88	203
R1971 13	Morgado et al., 2015	Villarrica 3	Lavas de 1971	160	30	60	14	431	88	204
R1971 30	Morgado et al., 2015	Villarrica 3	Lavas de 1971	170	31	70	15	428	87	198
R1971 29	Morgado et al., 2015	Villarrica 3	Lavas de 1971	150	29	60	14	438	87	202
RC 1972	Morgado et al., 2015	Villarrica 3	Lavas de 1971	160	31	60	15	430	89	204
V3-5 a	Hickey-Vargas et al., 1989	Villarrica 3	Lavas de 1971	180.00	34.10	74.00	15.50	429.00	100.00	198.00
V3-6	Hickey-Vargas et al., 1989	Villarrica 3	Lavas de 1971	185.00	33.60	73.00	15.50	432.00	99.00	193.00
V3-7	Hickey-Vargas et al., 1989	Villarrica 3	Lavas de 1971	183.00	33.80	74.00	15.70	433.00	102.00	206.00
V3-8	Hickey-Vargas et al., 1989	Villarrica 3	Lavas de 1984	161.00	33.50	67.00	15.30	473.00	103.00	202.00
13R	Witter et al., 2004	Villarrica 3	Lavas de 1984	163	NaN	78	15	448	91	201
H-V	Witter et al., 2004	Villarrica 3	Lavas de 1984	161	NaN	67	15	473	103	202
10R	Witter et al., 2004	Villarrica 3	1999	131	NaN	65	15	458	94	200
11R	Witter et al., 2004	Villarrica 3	1999	135	NaN	64	16	456	96	215
6R	Witter et al., 2004	Villarrica 3	2000	144	NaN	67	16	460	93	199
7R	Witter et al., 2004	Villarrica 3	2000	138	NaN	66	15	453	95	209
VII-15	Romero et al., 2023	Villarrica 3	2015	150	33	80	20	433	107	239
cI001	Werhmann et al., 2014	No identificada	No identificada	50.1	26.3	22.9	15.1	466	81.7	186
cI007	Werhmann et al., 2014	No identificada	No identificada	91.6	31.5	33.7	12.5	469	69.1	175
cI013	Werhmann et al., 2014	No identificada	No identificada	150	34.3	65.2	18.7	424	108	232
cI170	Werhmann et al., 2014	No identificada	No identificada	390	38.7	112	15.4	397	93.2	190

Anexo 5: Tierras raras en roca total

Muestra	Referencia	Unidad	Erupción	La	Co	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
V1-1	Hickey-Vargas et al. 1989	Villarrica 1	No identificada V1	10.60	27.80	Na	17.00	4.42	1.31	Na	0.77	Na	Na	Na	Na	Na	3.05	0.42
V1-2	Hickey-Vargas et al. 1989	Villarrica 1	No identificada V1	10.90	26.30	Na	15.00	3.95	1.20	Na	0.60	Na	Na	Na	Na	Na	2.50	0.37
V1-3	Hickey-Vargas et al. 1989	Villarrica 1	No identificada V1	7.96	22.30	Na	15.10	3.92	1.21	Na	0.55	Na	Na	Na	Na	Na	2.42	0.36
V2-1 a	Hickey-Vargas et al. 1989	Villarrica 2	No identificada V2	7.74	19.50	Na	13.20	3.50	1.07	Na	0.66	Na	Na	Na	Na	Na	2.33	0.33
V2-2 a	Hickey-Vargas et al. 1989	Villarrica 2	No identificada V2	7.80	19.80	Na	12.20	3.29	1.15	Na	0.68	Na	Na	Na	Na	Na	2.35	0.36
V2-3	Hickey-Vargas et al. 1989	Villarrica 2	No identificada V2	10.10	25.80	Na	16.30	4.32	1.28	Na	0.72	Na	Na	Na	Na	Na	2.67	0.36
V2-4	Hickey-Vargas et al. 1989	Villarrica 2	No identificada V2	7.32	18.70	Na	11.90	3.05	0.92	Na	0.49	Na	Na	Na	Na	Na	2.04	0.31
V2-5	Hickey-Vargas et al. 1989	Villarrica 2	No identificada V2	9.76	26.30	Na	16.60	4.14	1.26	Na	0.58	Na	Na	Na	Na	Na	2.83	0.40
V2-6	Hickey-Vargas et al. 1989	Villarrica 2	No identificada V2	8.15	21.50	Na	13.60	3.75	1.16	Na	0.55	Na	Na	Na	Na	Na	2.25	0.34
V2-7	Hickey-Vargas et al. 1989	Villarrica 2	No identificada V2	6.80	19.00	Na	12.10	3.28	1.06	Na	0.57	Na	Na	Na	Na	Na	1.99	0.31
V2-8	Hickey-Vargas et al. 1989	Villarrica 2	No identificada V2	4.21	9.20	Na	8.90	2.58	0.85	Na	0.40	Na	Na	Na	Na	Na	1.41	0.22
V2-9	Hickey-Vargas et al. 1989	Villarrica 2	No identificada V2	6.68	18.20	Na	12.00	3.06	1.07	Na	0.47	Na	Na	Na	Na	Na	1.91	0.3
VR62A1	Lohmar et al. 2012	Villarrica 2	Ignimbrita Licán	10.00	24.00	Na	15.50	4.20	1.33	4.65	Na	4.50	Na	2.75	Na	2.74	Na	Na
VR62A	Lohmar et al. 2012	Villarrica 2	Ignimbrita Licán	9.6	23	Na	15	4.2	1.27	4.3	Na	4.4	Na	2.7	Na	2.74	Na	Na
VR62A2	Lohmar et al. 2012	Villarrica 2	Ignimbrita Licán	11.4	25.5	Na	16.5	4.3	1.32	4.85	Na	4.55	Na	2.85	Na	2.82	Na	Na
VR5-3b	Lohmar et al. 2012	Villarrica 2	Ignimbrita Licán	10	24	Na	15.6	4.2	1.25	4.45	Na	4.5	Na	2.7	Na	2.73	Na	Na
VR5-3a	Lohmar et al. 2012	Villarrica 2	Ignimbrita Licán	9.3	23	Na	15	4	1.25	4.5	Na	4.5	Na	2.7	Na	2.68	Na	Na
VR5-2	Lohmar et al. 2012	Villarrica 2	Ignimbrita Licán	10.2	25	Na	16.5	4.2	1.29	4.7	Na	4.7	Na	2.8	Na	2.74	Na	Na
VR5-1	Lohmar et al. 2012	Villarrica 2	Ignimbrita Licán	9.5	24	Na	15.5	4.1	1.29	4.45	Na	4.5	Na	2.7	Na	2.73	Na	Na
VR-4	Lohmar et al. 2012	Villarrica 2	Ignimbrita Licán	9.8	24.5	Na	16	4	1.32	4.75	Na	4.5	Na	2.8	Na	2.8	Na	Na
VR54-1	Lohmar et al. 2012	Villarrica 2	Ignimbrita Licán	10.2	24.5	Na	15.5	4.2	1.26	4.5	Na	4.4	Na	2.75	Na	2.73	Na	Na
VR54-2	Lohmar et al. 2012	Villarrica 2	Ignimbrita Licán	10.2	24	Na	16	3.95	1.28	4.5	Na	4.5	Na	2.8	Na	2.8	Na	Na
VR33-9-1	Lohmar et al. 2012	Villarrica 2	Ignimbrita Licán	10	24	Na	16	4.1	1.28	4.5	Na	4.55	Na	2.8	Na	2.72	Na	Na
VR33-9-2	Lohmar et al. 2012	Villarrica 2	Ignimbrita Licán	9.5	25	Na	15.5	3.9	1.28	4.2	Na	4.4	Na	2.7	Na	2.68	Na	Na
VR31A	Lohmar et al. 2012	Villarrica 2	Ignimbrita Licán	9.5	23	Na	16	4.2	1.24	4.4	Na	4.5	Na	2.7	Na	2.69	Na	Na
VR31B	Lohmar et al. 2012	Villarrica 2	Ignimbrita Licán	10	24	Na	16	4.1	1.27	4.5	Na	4.5	Na	2.75	Na	2.7	Na	Na
VR6A	Lohmar et al. 2012	Villarrica 2	Ignimbrita Licán	9.8	23.8	Na	15.8	4.2	1.23	4.3	Na	4.5	Na	2.7	Na	2.66	Na	Na
VR9	Lohmar et al. 2012	Villarrica 2	Ignimbrita Licán	9.6	22.7	Na	15.7	4	1.24	4.35	Na	4.4	Na	2.7	Na	2.6	Na	Na
VR16F	Lohmar et al. 2012	Villarrica 2	Ignimbrita Licán	9.8	25.5	Na	16	4.2	1.25	4.45	Na	4.5	Na	2.8	Na	2.76	Na	Na
VR68B	Lohmar et al. 2012	Villarrica 2	Ignimbrita Licán	9.5	22.5	Na	15	4.2	1.24	4.6	Na	4.6	Na	2.8	Na	2.77	Na	Na
VR55b	Lohmar et al. 2012	Villarrica 2	Ignimbrita Licán	9.4	22.3	Na	14.5	3.75	1.26	4.1	Na	4.4	Na	2.7	Na	2.65	Na	Na
VR55a	Lohmar et al. 2012	Villarrica 2	Ignimbrita Licán	10	24.5	Na	15.5	3.85	1.25	4.55	Na	4.6	Na	2.8	Na	2.74	Na	Na
VR62-1 a	Lohmar et al. 2012	Villarrica 2	Ignimbrita Licán	Na	Na	Na	Na	Na	Na	Na	Na	Na	Na	Na	Na	Na	Na	Na
VR1 b	Lohmar et al. 2012	Villarrica 2	Ignimbrita Licán	Na	Na	Na	Na	Na	Na	Na	Na	Na	Na	Na	Na	Na	Na	Na
VR13-6P	Silva 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	17.50	42.00	Na	27.00	6.40	1.60	6.90	Na	6.90	Na	4.30	Na	4.30	Na	Na
VR119	Silva 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	9.50	22.50	Na	15.60	4.10	1.20	4.30	Na	4.50	Na	2.90	Na	2.90	Na	Na
VR114	Silva 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	9.50	23.00	Na	15.70	4.00	1.20	4.30	Na	4.50	Na	2.70	Na	2.70	Na	Na
VR73G	Silva 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	9.10	21.50	Na	14.50	4.10	1.20	4.30	Na	4.40	Na	2.70	Na	2.60	Na	Na
VR113-7a	Silva 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	9.4	22.5	Na	15.5	3.9	1.2	4.4	Na	4.4	Na	2.7	Na	2.7	Na	Na
VR73b	Silva 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	9	22	Na	15	4	1.2	4.5	Na	4.5	Na	2.7	Na	2.7	Na	Na
VR73kc	Silva 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	9.60	23.00	Na	15.00	4.00	1.30	4.50	Na	4.50	Na	2.80	Na	2.70	Na	Na
VR97-3BD	Silva 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	9.30	23.30	Na	15.50	3.80	1.20	4.40	Na	4.50	Na	2.80	Na	2.80	Na	Na
VR12aD	Silva 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	9.40	22.40	Na	15.50	3.7	1.2	4.3	Na	4.3	Na	2.7	Na	2.7	Na	Na
VR73JN	Silva 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	9.60	23.00	Na	15.50	4.3	1.2	4.7	Na	4.7	Na	2.8	Na	2.8	Na	Na
VR115-5P	Silva 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	9.60	23.00	Na	15.40	4.30	1.20	4.30	Na	4.50	Na	2.90	Na	2.90	Na	Na
VR97-3aD	Silva 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	15.20	35.50	Na	24.00	5.70	1.60	6.20	Na	6.20	Na	4.00	Na	3.90	Na	Na
VR113-9P	Silva 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	15.2	36	Na	24	6	1.6	6.3	Na	6.3	Na	3.9	Na	3.9	Na	Na
VR73JP	Silva 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	16.5	40	Na	26	6.2	1.6	6.9	Na	6.7	Na	4.2	Na	4.1	Na	Na
VR73lc	Silva 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	16.00	38.50	Na	25.50	6.30	1.70	6.70	Na	6.70	Na	4.50	Na	4.10	Na	Na
VR73JR	Silva 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	14.00	33.00	Na	22.00	5.70	1.50	6.10	Na	6.00	Na	3.70	Na	3.60	Na	Na
VR73JV	Silva 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	13.80	32.50	Na	21.00	5.60	1.50	6.10	Na	6.00	Na	3.70	Na	3.70	Na	Na
VR115-9D	Silva 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	16.50	38.50	Na	28.00	6.7	1.7	6.8	Na	6.7	Na	4.2	Na	4.2	Na	Na
VR73ie	Silva 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	14.50	34.00	Na	23.00	5.9	1.5	6.2	Na	6.3	Na	3.7	Na	3.5	Na	Na
VR115-9	Silva 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	6.00	14.00	Na	10.00	2.8	0.9	3.1	Na	3.3	Na	2	Na	2	Na	Na
VR-73ib	Silva 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	9.10	22.50	Na	15.10	3.8	1.2	4.5	Na	4.5	Na	2.7	Na	2.7	Na	Na
VR73IB	Silva 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	9.50	23.00	Na	15.00	4.2	1.3	4.5	Na	4.5	Na	2.8	Na	2.8	Na	Na
VR73kb	Silva 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	9.20	23.00	Na	14.50	4	1.3	4.5	Na	4.5	Na	2.8	Na	2.6	Na	Na
VR73LB	Silva 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	9.40	23.50	Na	14.50	4.1	1.3	4.4	Na	4.5	Na	2.8	Na	2.7	Na	Na
VR12cS	Silva 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	9.00	21.50	Na	15.00	3.7	1.2	4.4	Na	4.5	Na	2.7	Na	2.6	Na	Na
VR73i	Silva 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	9.50	23.00	Na	16.00	4.40	1.30	4.60	Na	4.7	Na	2.90	Na	2.90	Na	Na
VR73ki	Silva 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	9.20	22.00	Na	15.00	4.00	1.20	4.50	Na	4.60	Na	2.80	Na	2.80	Na	Na
VR73li	Silva 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	10.00	23.50	Na	15.50	4.40	1.30	4.60	Na	4.70	Na	2.90	Na	2.90	Na	Na
VR64AC	Silva 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	9.70	23.00	Na	15.50	4.20	1.30	4.70	Na	4.60	Na	2.80	Na	2.80	Na	Na
VR73k-CR1	Silva 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	9.50	23.00	Na	15.00	4.00	1.30	4.50	Na	4.50	Na	2.80	Na	2.80	Na	Na
VR73NIR	Silva 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	10.50	25.00	Na	17.00	4.70	1.30	5.00	Na	5.10	Na	3.10	Na	3.00	Na	Na
VR73NP	Silva 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	9.20	22.50	Na	14.50	3.90	1.20	4.40	Na	4.50	Na	2.80	Na	2.70	Na	Na
VR-73mb	Silva 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	8.90	22.00	Na	14.50	3.90	1.20	4.40	Na	4.40	Na	2.60	Na	2.60	Na	Na
VR73Nzb	Silva 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	9.50	23.00	Na	14.50	4.10	1.20	4.40	Na	4.30	Na	2.70	Na	2.60	Na	Na
VR73N3	Silva 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	9.60	23.00	Na	14.50	4.00	1.30	4.50	Na	4.50	Na	2.80	Na	2.70	Na	Na
VR73P	Silva 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	9.50	23.50	Na	14.50	3.90	1.30	4.50	Na	4.50	Na	2.80	Na	2.70	Na	Na
VR78-2b	Silva 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	9.20	21.50	Na	14.70	3.80	1.20	4.20	Na	4.30	Na	2.60	Na	2.60	Na	Na
VR58-D	Silva 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	9.00	21.50	Na	14.50	4.10	1.10	4.50	Na	4.40	Na	2.70	Na	2.60	Na	Na
VR58A	Silva 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	9.00	21.50	Na	14.50	3.90	1.20	4.20	Na	4.30	Na	2.60	Na	2.50	Na	Na
VR64AB	Silva 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	9.00	22.00	Na	14.50	4.00	1.30	4.50	Na	4.40	Na	2.70	Na	2.60	Na	Na
VR73M	Silva 2008	Villarrica 2	Ignimbrita Pucón	9.50	22.50	Na	14.50	3.90	1.20	4.40								

(Continuación Anexo 5)

Muestra	Referencia	Unidad	Erupción	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
VR78-5BS	Silva, 2008	Villarica 2	Ignimbrita Pucon	9.60	23.00	NaN	15.50	4.00	1.20	4.20	NaN	4.40	NaN	2.70	NaN	2.70	NaN
V3-1	Hickey-Vargas et al., 1989	Villarica 3	No identificada V3	10.20	25.30	NaN	15.40	3.82	1.24	NaN	0.65	NaN	NaN	NaN	NaN	2.4	0.35
V3-2	Hickey-Vargas et al., 1989	Villarica 3	No identificada V3	8.07	21.00	NaN	13.40	3.68	1.13	NaN	0.78	NaN	NaN	NaN	NaN	2.37	0.36
V3-3	Hickey-Vargas et al., 1989	Villarica 3	No identificada V3	10.50	27.00	NaN	16.70	4.35	1.27	NaN	0.63	NaN	NaN	NaN	NaN	2.77	0.40
V3-4	Hickey-Vargas et al., 1989	Villarica 3	No identificada V3	8.18	22.20	NaN	14.30	3.69	1.15	NaN	0.54	NaN	NaN	NaN	NaN	2.39	0.34
802	Lopez-Escobar, 1977	Villarica 3	No identificada V3	5.9	16.9	NaN	9	2.43	0.92	2.9	NaN	NaN	0.7	NaN	NaN	1.7	0.27
1921 D04	Pizarro et al., 2019	Villarica 3	Lavas de 1921	9.3	22.3	3.15	14.7	3.7	1.11	4.1	0.7	4.1	0.9	2.6	0.4	2.4	0.36
R1921 06	Pizarro et al., 2019	Villarica 3	Lavas de 1921	10.1	23.6	3.32	15.3	4.1	1.09	4.5	0.7	4.3	0.9	2.6	0.39	2.8	0.38
1921 02	Pizarro et al., 2019	Villarica 3	Lavas de 1921	9.4	23.1	3.29	15.5	3.9	1.14	4.1	0.7	4.2	0.9	2.6	0.4	2.6	0.38
1921 03	Pizarro et al., 2019	Villarica 3	Lavas de 1921	9.3	22.4	3.24	15	3.9	1.05	4.2	0.7	4.2	0.9	2.5	0.39	2.5	0.38
1921 04	Pizarro et al., 2019	Villarica 3	Lavas de 1921	9.9	23.8	3.42	15.8	4.2	1.12	4.2	0.7	4.6	0.9	2.6	0.43	2.7	0.38
1921 08	Pizarro et al., 2019	Villarica 3	Lavas de 1921	10	23.6	3.44	15.8	4.2	1.16	4.5	0.8	4.6	0.9	2.7	0.42	2.7	0.39
1921 05	Pizarro et al., 2019	Villarica 3	Lavas de 1921	9.7	23.3	3.34	15.7	4.3	1.15	4.4	0.7	4.6	0.9	2.7	0.41	2.5	0.39
1948 09	Pizarro et al., 2019	Villarica 3	Lavas de 1948	6.9	17	2.53	11.7	3.3	0.95	3.5	0.6	3.7	0.8	2.3	0.36	2.3	0.35
1948 04	Pizarro et al., 2019	Villarica 3	Lavas de 1948	6.9	16.6	2.53	11.7	3.3	0.92	3.5	0.6	3.8	0.8	2.3	0.36	2.2	0.34
1948 05	Pizarro et al., 2019	Villarica 3	Lavas de 1948	6.9	17.4	2.52	11.9	3.2	1	3.5	0.6	3.8	0.8	2.2	0.36	2.3	0.33
1948 06	Pizarro et al., 2019	Villarica 3	Lavas de 1948	6.8	17.1	2.59	12.1	3.4	0.93	3.7	0.6	3.8	0.8	2.2	0.35	2.3	0.35
1948 07	Pizarro et al., 2019	Villarica 3	Lavas de 1948	6.7	16.4	2.44	11.4	3.3	0.9	3.4	0.6	3.6	0.8	2.3	0.34	2.1	0.31
1948 08	Pizarro et al., 2019	Villarica 3	Lavas de 1948	7.3	18	2.62	12.6	3.5	1.01	3.7	0.6	3.9	0.8	2.4	0.35	2.2	0.32
1948 10	Pizarro et al., 2019	Villarica 3	Lavas de 1948	7.1	17.1	2.53	11.8	3.3	0.96	3.6	0.6	3.7	0.8	2.3	0.35	2.2	0.34
1948 11	Pizarro et al., 2019	Villarica 3	Lavas de 1948	6.9	16.8	2.48	11.6	3.2	0.96	3.6	0.6	3.7	0.8	2.3	0.37	2.3	0.34
1948 12	Pizarro et al., 2019	Villarica 3	Lavas de 1948	7.1	17.4	2.65	12.2	3.3	0.87	3.7	0.6	4	0.8	2.3	0.35	2.2	0.35
1948 N1	Pizarro et al., 2019	Villarica 3	Lavas de 1948	6.9	17.1	2.54	12.2	3.3	0.94	3.7	0.6	3.7	0.8	2.3	0.36	2.3	0.33
1948 01	Pizarro et al., 2019	Villarica 3	Lavas de 1948	6.9	17	2.56	12.2	3.5	1.01	3.7	0.6	3.8	0.8	2.2	0.34	2.2	0.33
1948 02	Pizarro et al., 2019	Villarica 3	Lavas de 1948	7.2	17.2	2.54	12.3	3.3	0.93	3.7	0.6	3.7	0.8	2.3	0.36	2.3	0.33
RC 1971	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	7	17.4	2.51	12.3	3.4	0.95	3.6	0.6	3.7	0.8	2.2	0.35	2.3	0.33
RM 1971	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	7.2	17.7	2.59	13.2	3.3	0.98	3.8	0.6	3.8	0.8	2.2	0.34	2.3	0.34
RM11 1971	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	7.2	17.7	2.62	12.5	3.3	0.97	3.6	0.6	3.7	0.8	2.3	0.35	2.2	0.32
1971 N1	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	7.2	17.5	2.6	12.3	3.6	0.96	3.6	0.6	3.6	0.8	2.4	0.37	2.3	0.32
1971 N2	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	7.3	17.9	2.65	12.6	3.3	0.97	3.8	0.6	3.7	0.8	2.3	0.37	2.3	0.33
1971 02	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	7.2	17.7	2.66	12.6	3.4	0.94	3.6	0.6	3.8	0.8	2.4	0.36	2.3	0.32
1971 03	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	7	17.3	2.57	12.5	3.3	0.99	3.6	0.6	3.8	0.8	2.3	0.34	2.2	0.33
1971 N6	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	6.9	17.5	2.56	12	3.4	0.97	3.6	0.6	3.7	0.8	2.3	0.37	2.4	0.34
R1971 DM	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	7.3	18	2.58	12.7	3.4	0.98	3.6	0.6	3.6	0.8	2.3	0.35	2.2	0.33
R1971 DV	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	7	17.3	2.62	12.5	3.2	0.93	3.5	0.6	3.6	0.8	2.4	0.37	2.3	0.32
1971 04	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	7.1	17.5	2.61	12.4	3.5	0.99	3.6	0.6	3.8	0.8	2.4	0.36	2.2	0.33
R1971 04	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	7.5	18.3	2.62	12.4	3.5	1.04	3.7	0.6	4	0.8	2.3	0.36	2.3	0.34
1971 N5	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	7.1	17.7	2.63	12.4	3.4	0.99	3.6	0.6	3.9	0.8	2.3	0.36	2.3	0.33
1971 N4	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	7.3	17.7	2.57	12.3	3.4	1	3.5	0.6	3.9	0.8	2.3	0.34	2.2	0.33
1971 05	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	7.9	18.9	2.68	12.8	3.4	0.98	3.7	0.6	3.8	0.8	2.4	0.36	2.3	0.33
RM 1971 05	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	6.9	17.4	2.54	11.8	3.5	1.01	3.6	0.6	3.8	0.8	2.3	0.35	2.3	0.34
1971 07	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	8.1	18.8	2.74	12.5	3.5	0.98	3.6	0.6	3.9	0.8	2.3	0.35	2.2	0.33
1971 08	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	7.4	17.9	2.67	13	3.4	1	3.8	0.6	3.9	0.8	2.3	0.36	2.2	0.33
1971 09	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	7.3	17.8	2.64	12.5	3.6	1.02	3.9	0.7	3.8	0.8	2.3	0.35	2.3	0.35
1971 10 M1	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	7.2	17.8	2.67	12.3	3.5	0.99	3.7	0.6	3.8	0.8	2.3	0.36	2.3	0.33
1971 10 M2	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	7.2	17.7	2.56	12.1	3.5	0.96	3.5	0.6	3.8	0.8	2.3	0.36	2.2	0.33
1971 11	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	8.5	20.5	2.83	13.3	3.5	1.08	3.5	0.6	3.9	0.8	2.3	0.38	2.4	0.35
1971 12	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	8.3	20	2.78	13.4	3.5	1.05	3.7	0.6	3.8	0.8	2.3	0.35	2.2	0.33
1971 13	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	8.2	19.9	2.77	13	3.6	1.08	3.6	0.6	3.9	0.8	2.3	0.34	2.2	0.34
1971 30	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	8	19.7	2.72	13.3	3.6	1.03	3.7	0.7	3.9	0.8	2.3	0.35	2.2	0.35
1971 29	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	8	19.6	2.72	13.1	3.4	1.11	3.5	0.6	3.8	0.8	2.3	0.35	2.3	0.35
RC 1972	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	9.1	21.4	2.88	13.8	3.8	1.06	3.8	0.7	4	0.8	2.4	0.36	2.3	0.35
V3-5 a	Hickey-Vargas et al., 1989	Villarica 3	Lavas de 1971	7.91	22.30	NaN	14.10	3.59	1.14	NaN	0.66	NaN	NaN	NaN	NaN	2.40	0.36
V3-6	Hickey-Vargas et al., 1989	Villarica 3	Lavas de 1971	8.04	22.00	NaN	14.20	3.78	1.14	NaN	0.69	NaN	NaN	NaN	NaN	2.39	0.37
V3-7	Hickey-Vargas et al., 1989	Villarica 3	Lavas de 1971	8.02	22.20	NaN	13.20	3.68	1.15	NaN	0.50	NaN	NaN	NaN	NaN	2.41	0.37
V3-8	Hickey-Vargas et al., 1989	Villarica 3	Lavas de 1984	7.77	22.40	NaN	13.90	3.70	1.16	NaN	0.51	NaN	NaN	NaN	NaN	2.25	0.34
Vill-15	Romero et al., 2023	Villarica 3	2015	10.1	24.8	3.5	16.3	4.2	1.3	4.7	0.8	4.9	1	2.9	0.4	2.7	0.4
c001	Werhmann et al., 2014	No identificada	No identificada	7.11	17.2	2.52	11.8	3.11	0.989	3.41	0.556	3.55	0.742	2.07	0.314	2.07	0.314
c007	Werhmann et al., 2014	No identificada	No identificada	6.97	17.8	2.44	11.6	3.01	0.991	3.25	0.539	3.43	0.715	2.00	0.301	1.98	0.299
c013	Werhmann et al., 2014	No identificada	No identificada	9.72	24.1	3.50	16.7	4.35	1.29	4.70	0.766	4.86	1.00	2.80	0.415	2.78	0.420
c070	Werhmann et al., 2014	No identificada	No identificada	7.99	19.6	2.91	13.7	3.65	1.11	3.99	0.655	4.14	0.869	2.40	0.360	2.38	0.356

Anexo 6: Multielementales en roca total

Muestra	Referencia	Unidad	Erupción	Ca	Th	Rb	Ba	Nb	Sr	Zr	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
V1-1	Hickey-Vargas et al. 1989	Vilancama 1	No identificada V1	2.22	22.4	20.0	285.0	3.20	402.00	124.00	10.00	27.80	NaN	17.00	4.42	1.31	NaN	0.71	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	2.50	0.42
V1-2	Hickey-Vargas et al. 1989	Vilancama 1	No identificada V1	1.30	18.0	19.40	287.00	3.60	445.00	118.00	10.60	25.50	NaN	15.50	3.59	1.20	NaN	0.60	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	2.30	0.37
V1-3	Hickey-Vargas et al. 1989	Vilancama 1	No identificada V1	1.70	1.30	17.80	229.00	2.30	407.00	106.00	7.96	22.30	NaN	15.10	3.92	1.21	NaN	0.55	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	2.42	0.36
V2-1-a	Hickey-Vargas et al. 1989	Vilancama 2	No identificada V2	1.62	1.60	14.80	235.00	2.40	410.00	104.00	8.40	22.50	NaN	15.50	3.59	1.20	NaN	0.60	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	2.35	0.36
V2-2-a	Hickey-Vargas et al. 1989	Vilancama 2	No identificada V2	1.60	1.50	14.60	191.00	2.40	429.00	92.00	7.80	22.50	NaN	12.20	3.29	1.15	NaN	0.68	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	2.35	0.30
V2-3	Hickey-Vargas et al. 1989	Vilancama 2	No identificada V2	1.40	1.70	20.40	255.00	2.80	428.00	114.00	10.10	25.80	NaN	16.30	4.32	1.28	NaN	0.72	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	2.67	0.36
V2-4	Hickey-Vargas et al. 1989	Vilancama 2	No identificada V2	1.10	1.30	12.90	162.00	1.90	436.00	84.00	7.52	18.70	NaN	15.90	3.05	0.92	NaN	0.49	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	2.04	0.31
V2-5	Hickey-Vargas et al. 1989	Vilancama 2	No identificada V2	2.00	2.00	21.40	259.00	3.10	428.00	118.00	9.76	23.00	NaN	16.90	4.14	1.26	NaN	0.56	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	2.83	0.40
V2-6	Hickey-Vargas et al. 1989	Vilancama 2	No identificada V2	1.30	1.50	15.50	200.00	2.40	450.00	97.00	8.15	21.90	NaN	13.60	3.78	1.16	NaN	0.55	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	2.25	0.34
V2-7	Hickey-Vargas et al. 1989	Vilancama 2	No identificada V2	1.20	1.30	14.00	196.00	2.50	482.00	89.00	6.80	19.00	NaN	12.10	3.28	1.06	NaN	0.57	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	1.99	0.31
V2-8	Hickey-Vargas et al. 1989	Vilancama 2	No identificada V2	1.00	0.60	9.70	138.00	1.30	410.00	82.00	4.21	12.90	NaN	6.90	2.98	0.86	NaN	0.40	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	1.41	0.22
V2-9	Hickey-Vargas et al. 1989	Vilancama 2	No identificada V2	0.9	1.00	12.20	181.00	2.50	474.00	84.00	6.68	18.20	NaN	12.00	3.08	1.07	NaN	0.47	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	1.91	0.3
V26A1	Lohman et al. 2012	Vilancama 2	Ignimbrita Lucán	NaN	2.05	21.40	275.00	2.40	410.00	105.00	10.00	24.00	NaN	15.50	4.20	1.33	4.65	NaN	4.50	NaN	2.75	NaN	2.74	NaN	2.74
V26A2	Lohman et al. 2012	Vilancama 2	Ignimbrita Lucán	NaN	3	21.7	280	2.5	410	107	11.4	25.5	NaN	16.5	4.3	1.32	4.85	NaN	4.55	NaN	2.85	NaN	2.82	NaN	2.82
VRS-3D	Lohman et al. 2012	Vilancama 2	Ignimbrita Lucán	NaN	2.3	22.3	276	2.8	415	110	10	24	NaN	15.6	4.2	1.25	4.45	NaN	4.5	NaN	2.7	NaN	2.73	NaN	2.73
VRS-3B	Lohman et al. 2012	Vilancama 2	Ignimbrita Lucán	NaN	2.1	15.8	226	2.8	450	118	13.9	23	NaN	15.6	4.1	1.26	4.5	NaN	4.5	NaN	2.2	NaN	2.68	NaN	2.68
VRS-2	Lohman et al. 2012	Vilancama 2	Ignimbrita Lucán	NaN	2.35	16.5	405	2.5	409	110	10.2	24	NaN	16.5	4.2	1.29	4.7	NaN	4.7	NaN	2.8	NaN	2.74	NaN	2.74
VRS-1	Lohman et al. 2012	Vilancama 2	Ignimbrita Lucán	NaN	2.05	19.4	242	2.9	400	114	9.5	24	NaN	15.5	4.1	1.29	4.45	NaN	4.5	NaN	2.7	NaN	2.73	NaN	2.73
VRS-4	Lohman et al. 2012	Vilancama 2	Ignimbrita Lucán	NaN	2.2	19.3	240	3	418	115	9.9	24	NaN	16.0	4.1	1.30	4.75	NaN	4.6	NaN	2.8	NaN	2.8	NaN	2.8
VRS-4.1	Lohman et al. 2012	Vilancama 2	Ignimbrita Lucán	NaN	2.1	22.1	284	2.7	411	108	10.2	24.5	NaN	15.5	4.2	1.28	4.5	NaN	4.4	NaN	2.8	NaN	2.73	NaN	2.73
VRS-4.2	Lohman et al. 2012	Vilancama 2	Ignimbrita Lucán	NaN	2.1	20.1	287	2.8	409	107	10.2	24	NaN	16	3.95	1.28	4.5	NaN	4.5	NaN	2.8	NaN	2.8	NaN	2.8
VRS-4.3	Lohman et al. 2012	Vilancama 2	Ignimbrita Lucán	NaN	1.05	17.5	233	2.7	425	110	10	24	NaN	16	4.1	1.27	4.4	NaN	4.5	NaN	2.7	NaN	2.77	NaN	2.77
VRS-4.4	Lohman et al. 2012	Vilancama 2	Ignimbrita Lucán	NaN	2.2	19.5	288	2.9	418	110	9.5	26	NaN	15.5	3.9	1.28	4.2	NaN	4.4	NaN	2.7	NaN	2.68	NaN	2.68
VRS-4.5	Lohman et al. 2012	Vilancama 2	Ignimbrita Lucán	NaN	1.9	20.7	280	2.5	411	110	9.5	23	NaN	16	4.2	1.24	4.4	NaN	4.5	NaN	2.7	NaN	2.68	NaN	2.68
VRS-4.6	Lohman et al. 2012	Vilancama 2	Ignimbrita Lucán	NaN	1.15	20.7	284	2.9	403	113	10.0	24	NaN	16.5	4.1	1.27	4.4	NaN	4.5	NaN	2.7	NaN	2.68	NaN	2.68
VRS-4.7	Lohman et al. 2012	Vilancama 2	Ignimbrita Lucán	NaN	2.1	21.8	274	3	400	107	9.8	23.8	NaN	15.8	4.2	1.23	4.3	NaN	4.5	NaN	2.7	NaN	2.66	NaN	2.66
VRS-4.8	Lohman et al. 2012	Vilancama 2	Ignimbrita Lucán	NaN	2.15	21.7	274	2.8	410	107	9.8	22.8	NaN	15.7	4	1.24	4.35	NaN	4.4	NaN	2.7	NaN	2.68	NaN	2.68
VRS-4.9	Lohman et al. 2012	Vilancama 2	Ignimbrita Lucán	NaN	1.95	20.7	281	2.9	419	109	9.2	25	NaN	16	4.2	1.25	4.5	NaN	4.5	NaN	2.7	NaN	2.67	NaN	2.67
VRS-5	Lohman et al. 2012	Vilancama 2	Ignimbrita Lucán	NaN	1.9	20.7	279	2.8	417	104	9.5	22.5	NaN	15.5	4.2	1.24	4.6	NaN	4.6	NaN	2.8	NaN	2.77	NaN	2.77
VRS-6	Lohman et al. 2012	Vilancama 2	Ignimbrita Lucán	NaN	2	21.2	295	3	400	113	9.4	22.5	NaN	14.5	3.76	1.26	4.1	NaN	4.4	NaN	2.7	NaN	2.65	NaN	2.65
VRS-6.1	Lohman et al. 2012	Vilancama 2	Ignimbrita Lucán	NaN	2.1	21.2	295	3	400	113	9.4	22.5	NaN	14.5	3.76	1.26	4.1	NaN	4.4	NaN	2.7	NaN	2.65	NaN	2.65
VRS-6.2	Lohman et al. 2012	Vilancama 2	Ignimbrita Lucán	NaN	2.1	21.2	295	3	400	113	9.4	22.5	NaN	14.5	3.76	1.26	4.1	NaN	4.4	NaN	2.7	NaN	2.65	NaN	2.65
VRS-6.3	Lohman et al. 2012	Vilancama 2	Ignimbrita Lucán	NaN	2.1	21.2	295	3	400	113	9.4	22.5	NaN	14.5	3.76	1.26	4.1	NaN	4.4	NaN	2.7	NaN	2.65	NaN	2.65
VRS-6.4	Lohman et al. 2012	Vilancama 2	Ignimbrita Lucán	NaN	2.1	21.2	295	3	400	113	9.4	22.5	NaN	14.5	3.76	1.26	4.1	NaN	4.4	NaN	2.7	NaN	2.65	NaN	2.65
VRS-6.5	Lohman et al. 2012	Vilancama 2	Ignimbrita Lucán	NaN	2.1	21.2	295	3	400	113	9.4	22.5	NaN	14.5	3.76	1.26	4.1	NaN	4.4	NaN	2.7	NaN	2.65	NaN	2.65
VRS-6.6	Lohman et al. 2012	Vilancama 2	Ignimbrita Lucán	NaN	2.1	21.2	295	3	400	113	9.4	22.5	NaN	14.5	3.76	1.26	4.1	NaN	4.4	NaN	2.7	NaN	2.65	NaN	2.65
VRS-6.7	Lohman et al. 2012	Vilancama 2	Ignimbrita Lucán	NaN	2.1	21.2	295	3	400	113	9.4	22.5	NaN	14.5	3.76	1.26	4.1	NaN	4.4	NaN	2.7	NaN	2.65	NaN	2.65
VRS-6.8	Lohman et al. 2012	Vilancama 2	Ignimbrita Lucán	NaN	2.1	21.2	295	3	400	113	9.4	22.5	NaN	14.5	3.76	1.26	4.1	NaN	4.4	NaN	2.7	NaN	2.65	NaN	2.65
VRS-6.9	Lohman et al. 2012	Vilancama 2	Ignimbrita Lucán	NaN	2.1	21.2	295	3	400	113	9.4	22.5	NaN	14.5	3.76	1.26	4.1	NaN	4.4	NaN	2.7	NaN	2.65	NaN	2.65
VRS-6.10	Lohman et al. 2012	Vilancama 2	Ignimbrita Lucán	NaN	2.1	21.2	295	3	400	113	9.4	22.5	NaN	14.5	3.76	1.26	4.1	NaN	4.4	NaN	2.7	NaN	2.65	NaN	2.65
VRS-6.11	Lohman et al. 2012	Vilancama 2	Ignimbrita Lucán	NaN	2.1	21.2	295	3	400	113	9.4	22.5	NaN	14.5	3.76	1.26	4.1	NaN	4.4	NaN	2.7	NaN	2.65	NaN	2.65
VRS-6.12	Lohman et al. 2012	Vilancama 2	Ignimbrita Lucán	NaN	2.1	21.2	295	3	400	113	9.4	22.5	NaN	14.5	3.76	1.26	4.1	NaN	4.4	NaN	2.7	NaN	2.65	NaN	2.65
VRS-6.13	Lohman et al. 2012	Vilancama 2	Ignimbrita Lucán	NaN	2.1	21.2	295	3	400	113	9.4	22.5	NaN	14.5	3.76	1.26	4.1	NaN	4.4	NaN	2.7	NaN	2.65	NaN	2.65
VRS-6.14	Lohman et al. 2012	Vilancama 2	Ignimbrita Lucán	NaN	2.1	21.2	295	3	400	113	9.4	22.5	NaN	14.5	3.76	1.26	4.1	NaN	4.4	NaN	2.7	NaN	2.65	NaN	2.65
VRS-6.15	Lohman et al. 2012	Vilancama 2	Ignimbrita Lucán	NaN	2.1	21.2	295	3	400	113	9.4	22.5	NaN	14.5	3.76	1.26	4.1	NaN	4.4	NaN	2.7	NaN	2.65	NaN	2.65
VRS-6.16	Lohman et al. 2012	Vilancama 2	Ignimbrita Lucán	NaN	2.1	21.2	295	3	400	113	9.4	22.5	NaN	14.5	3.76	1.26	4.1	NaN	4.4	NaN	2.7	NaN	2.65	NaN	2.65
VRS-6.17	Lohman et al. 2012	Vilancama 2	Ignimbrita Lucán	NaN	2.1	21.2	295	3	400	113	9.4	22.5	NaN	14.5	3.76	1.26	4.1	NaN	4.4	NaN	2.7	NaN	2.65	NaN	2.65
VRS-6.18	Lohman et al. 2012	Vilancama 2	Ignimbrita Lucán	NaN	2.1	21.2	295	3	400	113	9.4	22.5	NaN	14.5	3.76	1.26	4.1	NaN	4.4	NaN	2.7	NaN	2.65	NaN	2.65
VRS-6.19	Lohman et al. 2012	V																							

(Continuación Anexo 6)

Muestra	Referencia	Unidad	Erupción	Cs	Th	Rb	Ba	Nb	Sr	Zr	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
1948 01	Pizarro et al., 2010	Villarica 3	Lavas de 1948	1.4	1.2	14	186	1	376	84	8.9	17	2.56	12.2	3.5	1.01	3.7	0.6	3.8	0.8	2.2	0.34	2.2	0.33
1948 02	Pizarro et al., 2010	Villarica 3	Lavas de 1948	1.4	1.2	15	196	1	379	84	7.2	17.2	2.54	12.3	3.3	0.93	3.7	0.6	3.7	0.8	2.3	0.38	2.3	0.33
RC-1971	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	1.4	1.2	14	201	1	427	86	7	17.4	2.51	12.3	3.4	0.95	3.6	0.6	3.7	0.8	2.2	0.35	2.3	0.33
RM 1971	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	1.5	1.2	15	200	1	425	85	7.2	17.7	2.59	13.2	3.3	0.98	3.8	0.6	3.8	0.8	2.2	0.34	2.3	0.34
1971 01	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	1.4	1.1	14	199	1	423	86	7.2	17.7	2.62	12.6	3.3	0.97	3.6	0.6	3.7	0.8	2.3	0.35	2.3	0.35
1971 N1	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	1.4	1.2	14	201	1	421	86	7.2	17.5	2.6	12.3	3.6	0.96	3.6	0.6	3.6	0.8	2.4	0.37	2.3	0.32
1971 N2	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	1.4	1.1	15	199	1	423	84	7.3	17.9	2.65	12.6	3.3	0.97	3.8	0.6	3.7	0.8	2.3	0.37	2.3	0.33
1971 02	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	1.5	1.2	15	202	2	424	87	7.2	17.7	2.66	12.6	3.4	0.94	3.6	0.6	3.8	0.8	2.4	0.36	2.3	0.32
1971 03	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	1.4	1.1	14	199	1	421	86	7	17.3	2.57	12.5	3.3	0.99	3.6	0.6	3.8	0.8	2.3	0.34	2.2	0.33
1971 N6	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	1.4	1.2	14	201	1	414	85	8.9	17.5	2.56	12	3.4	0.97	3.6	0.6	3.7	0.8	2.3	0.37	2.4	0.34
R1971 DM	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	1.5	1.2	14	199	1	424	85	7.3	18	2.58	12.7	3.4	0.98	3.6	0.6	3.6	0.8	2.3	0.35	2.2	0.33
R1971 DV	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	1.5	1.2	14	197	1	417	85	7	17.3	2.62	12.5	3.2	0.93	3.5	0.6	3.6	0.8	2.4	0.37	2.3	0.32
1971 04	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	1.4	1.2	15	198	1	418	86	7.1	17.5	2.61	12.4	3.5	0.99	3.6	0.6	3.8	0.8	2.4	0.36	2.2	0.33
R1971 04	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	1.4	1.2	14	205	1	428	90	7.5	18.3	2.62	12.4	3.5	1.04	3.7	0.6	4	0.8	2.3	0.36	2.3	0.34
1971 N5	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	1.5	1.2	14	203	1	420	88	7.1	17.7	2.63	12.4	3.4	0.99	3.6	0.6	3.9	0.8	2.3	0.36	2.3	0.33
1971 N4	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	1.5	1.2	14	199	1	406	85	7.3	17.7	2.57	12.3	3.4	1	3.5	0.6	3.9	0.8	2.3	0.34	2.2	0.33
1971 05	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	1.5	1.3	15	199	1	432	89	7.9	18.9	2.68	12.8	3.4	0.96	3.7	0.6	3.8	0.8	2.4	0.36	2.3	0.33
RM 1971 05	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	1.4	1.2	14	199	1	420	88	8.9	17.4	2.64	11.8	3.5	1.01	3.6	0.6	3.8	0.8	2.3	0.35	2.3	0.34
1971 07	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	1.5	1.1	15	204	2	427	89	8.1	18.8	2.74	12.5	3.5	0.98	3.6	0.6	3.9	0.8	2.3	0.35	2.2	0.33
1971 08	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	1.5	1.2	15	197	1	412	86	7.4	17.9	2.67	13	3.4	1	3.8	0.6	3.9	0.8	2.3	0.36	2.2	0.33
1971 09	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	1.4	1.2	15	200	1	420	87	7.3	17.8	2.64	12.5	3.6	1.02	3.9	0.7	3.8	0.8	2.3	0.35	2.3	0.35
1971 10 M1	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	1.5	1.2	14	199	1	420	86	7.2	17.9	2.67	12.3	3.5	0.99	3.7	0.6	3.9	0.8	2.3	0.36	2.3	0.33
1971 10 M2	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	1.5	1.2	14	202	1	429	88	7.2	17.7	2.56	12.1	3.5	0.98	3.5	0.6	3.8	0.8	2.3	0.36	2.2	0.33
1971 11	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	1.6	1.4	16	201	3	434	87	8.5	20.5	2.63	13.4	3.5	1.08	3.5	0.6	3.9	0.8	2.3	0.36	2.4	0.35
1971 12	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	1.7	1.4	15	203	3	433	89	8.3	20	2.78	13.4	3.5	1.05	3.7	0.6	3.8	0.8	2.3	0.35	2.2	0.33
1971 13	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	1.7	1.4	14	204	3	431	88	8.2	19.9	2.77	13	3.6	1.08	3.6	0.6	3.9	0.8	2.3	0.34	2.2	0.34
1971 30	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	1.7	1.3	15	199	2	428	87	8	19.7	2.72	13.3	3.6	1.03	3.7	0.7	3.9	0.8	2.3	0.35	2.2	0.35
1971 29	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	1.6	1.3	14	202	2	428	87	8	19.6	2.72	13.1	3.4	1.11	3.5	0.6	3.8	0.8	2.3	0.35	2.3	0.35
RC-1972	Morgado et al., 2015	Villarica 3	Lavas de 1971	1.6	1.4	15	204	3	430	89	9.1	21.4	2.88	13.6	3.8	1.06	3.8	0.7	4	0.8	2.4	0.36	2.3	0.35
V3-a	Hickey-Vargas et al., 1989	Villarica 3	Lavas de 1971	1.70	1.50	15.50	198.00	2.70	429.00	100.00	7.91	22.30	NaN	14.10	3.59	1.14	NaN	0.66	NaN	NaN	NaN	NaN	2.40	0.36
V3-b	Hickey-Vargas et al., 1989	Villarica 3	Lavas de 1971	NaN	1.20	15.50	193.00	2.00	432.00	99.00	8.04	22.00	NaN	14.20	3.78	1.14	NaN	0.69	NaN	NaN	NaN	NaN	2.39	0.37
V3-7	Hickey-Vargas et al., 1989	Villarica 3	Lavas de 1971	1.30	1.10	15.70	206.00	2.60	433.00	102.00	8.02	22.20	NaN	13.20	3.68	1.15	NaN	0.50	NaN	NaN	NaN	NaN	2.41	0.37
V3-8	Hickey-Vargas et al., 1989	Villarica 3	Lavas de 1984	1.60	1.10	15.30	202.00	3.10	473.00	103.00	7.77	22.40	NaN	13.30	3.70	1.16	NaN	0.51	NaN	NaN	NaN	NaN	2.25	0.34
139	Witter et al., 2004	Villarica 3	Lavas de 1984	NaN	2	15	201	3.1	448	91	7	40	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
H-V	Witter et al., 2004	Villarica 3	Lavas de 1984	NaN	1	15	202	3.1	473	103	8	22	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
108	Witter et al., 2004	Villarica 3	1999	NaN	2	15	200	3	458	94	5	25	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
116	Witter et al., 2004	Villarica 3	1999	NaN	0	16	215	3.2	456	95	5	25	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
6R	Witter et al., 2004	Villarica 3	2000	NaN	2	16	199	3.3	460	93	12	25	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
7R	Witter et al., 2004	Villarica 3	2000	NaN	1	15	209	3.5	453	85	5	31	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
18-15	Romero et al., 2003	Villarica 3	2015	2	1.3	20	259	0.1	433	107	10.1	24.8	3.5	16.3	4.2	1.3	4.7	0.8	4.9	2.6	0.4	2.7	0.4	
2001	Wehmann et al., 2014	No identificada	No identificada	1.44	1.33	15.1	195	1.72	466	87.7	7.71	17.2	2.52	11.8	3.11	0.989	3.41	0.556	3.55	0.742	2.07	0.314	2.07	0.314
2007	Wehmann et al., 2014	No identificada	No identificada	1.13	1.28	12.5	175	1.54	489	89.1	6.97	17.8	2.44	11.6	3.01	0.991	3.25	0.539	3.43	0.715	2.00	0.301	1.98	0.299
2013	Wehmann et al., 2014	No identificada	No identificada	1.59	1.52	18.7	232	2.38	424	108	9.72	24.1	3.50	16.7	4.35	1.29	4.78	4.86	1.00	3.95	0.415	2.78	0.420	
2170	Wehmann et al., 2014	No identificada	No identificada	1.62	1.30	15.4	190	2.00	397	93.2	7.95	19.6	2.91	13.7	3.65	1.11	3.99	0.655	4.14	0.869	2.40	0.380	2.38	0.350