



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
Facultad de Ciencias Químicas  
Departamento Ciencias de la Tierra



# DETERMINACIÓN DE LAS EMISIONES DE DIÓXIDO DE AZUFRE (SO<sub>2</sub>) DEL VOLCÁN GUALLATIRI, REGIÓN DE ARICA Y PARINACOTA, CHILE.

Memoria para optar a Título de Geólogo

Antonio Felipe Pacheco San Miguel

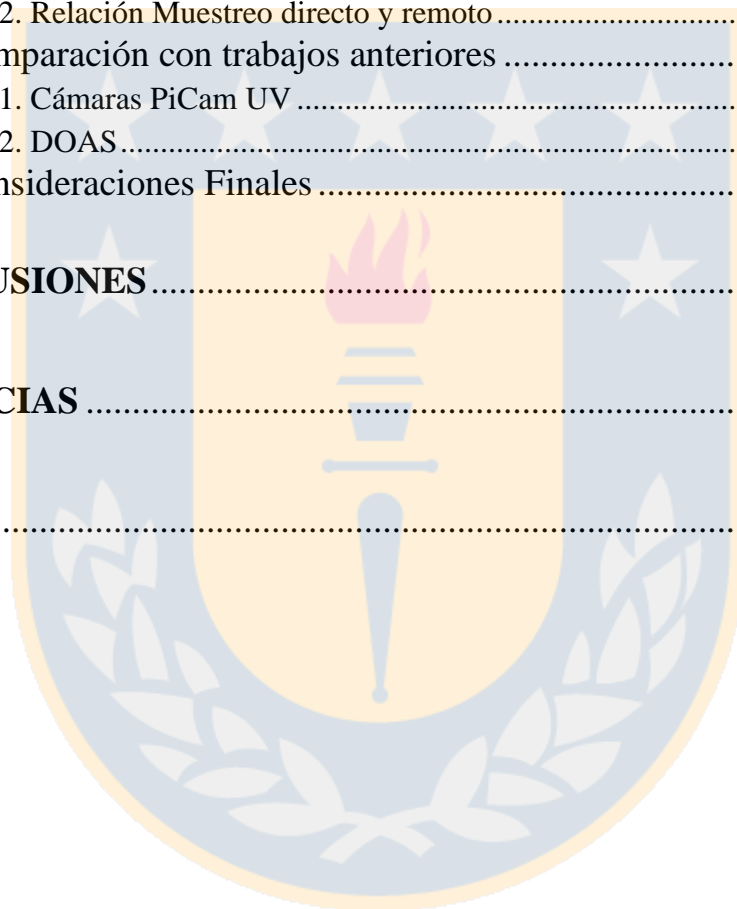
**Profesora Patrocinante:** Dra. Verónica Oliveros Clavijo  
**Profesor Guía:** Dr. Felipe Aguilera Barraza  
**Profesores de Comisión:** Dra. Fernanda Álvarez Amado  
Dr. José Luis Palma Lizana

Concepción, 2022.

# ÍNDICE

	Página
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.1. Generalidades y planteamiento del problema. ....	1
1.2. Objetivo .....	2
1.2.1. Objetivo general .....	2
1.2.2. Objetivos específicos .....	2
1.3. Ubicación y Accesos .....	2
1.4. Fisiografía.....	4
1.5. Metodología de Trabajo .....	4
1.5.1. Generalidades .....	4
1.5.2. Muestreo directo.....	5
1.5.3. Cámara PiCam UV.....	7
1.5.4. Espectrometría de Absorción Óptica Diferencial (DOAS).....	11
1.6. Trabajos anteriores .....	13
1.7. Agradecimientos.....	14
<b>2. MARCO GEOLÓGICO</b> .....	15
2.1. Geología regional .....	15
2.1.1. Altiplano.....	15
2.1.2. Zona Volcánica Central.....	15
2.2. Geología local.....	17
2.2.1. Volcán Guallatiri.....	17
2.2.2. Actividad geotermal .....	19
<b>3. MARCO TEÓRICO</b> .....	21
3.1. Gases volcánicos .....	21
3.2. Dióxido de Azufre (SO <sub>2</sub> ) .....	22
3.3 Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> ).....	22
3.4. Gases nobles.....	23
<b>4. RESULTADOS</b> .....	25
4.1. Condiciones generales de terreno.....	25
4.2. Cámaras PiCam .....	26
4.2.1. Mediciones en terreno .....	26
4.2.2. Emisiones de SO <sub>2</sub> .....	29
4.2.3. Determinación de la velocidad del viento.....	30
4.2.4. Estimación de incertidumbres .....	31
4.3. DOAS .....	32
4.3.1. Condiciones generales.....	32

4.3.2. Emisiones de SO <sub>2</sub> .....	35
4.4. Muestreo directo .....	37
4.4.1. Composición química .....	37
4.4.2. Composición isotópica .....	40
<b>5. DISCUSIONES.....</b>	<b>42</b>
5.1. Comparación de valores entre PiCam 1 y 10 .....	42
5.2. Comparación de resultados entre cámaras UV y DOAS .....	43
5.3. Muestreo directo .....	44
5.3.1. Química del gas.....	44
5.3.2. Relación Muestreo directo y remoto .....	46
5.4. Comparación con trabajos anteriores .....	47
5.4.1. Cámaras PiCam UV .....	47
5.4.2. DOAS .....	49
5.5. Consideraciones Finales .....	50
<b>6. CONCLUSIONES.....</b>	<b>51</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>53</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>57</b>



## Índice de Figuras

Figura	Página
1. 1. Mapa de ubicación y accesos. (a) Distribución de las Zonas Volcánicas Norte, Central, Sur y Austral (ZVN, ZVC, ZVS y ZVA respectivamente). (b) Mapa de Chile destacando la región de estudio. (c) Mapa de la región de Arica y Parinacota mostrando las rutas de acceso al Volcán Guallatiri. (d) Imagen satelital del Volcán Guallatiri con sus campos fumarólicos, obtenida del <i>Google Earth Pro</i> . ....	3
1. 2. Diagrama del muestreo directo de gases volcánicos en fumarolas, extraído de Aguilera (2008). ....	6
1. 3. Diagrama de muestreo de gases volcánicos condensado en fumarolas, extraído de Aguilera (2008). ....	7
1. 4. Cámara PiCam UV a. Fotografía externa de la cámara PiCam en punto de muestreo remoto, de coordenadas 18°29'25,54''S 69°07'20,35''W. b. Fotografía del interior de la cámara PiCam, mostrando la batería, lentes y GPS. ....	8
1. 5. Ventana de procesamiento de datos. Se distingue el perfil inicial (ICA 1; color negro), luego el siguiente perfil que corresponde a la ICA 2 (color rojo), y finalmente una línea ortogonal (color verde), secciones por las cuales se calculan la concentración de SO <sub>2</sub> y la velocidad de la pluma, extrapido de Layana (2022). ....	10
1. 6. Gráfico de absorción de SO <sub>2</sub> en función del tiempo para ambos perfiles. La diferencia vertical se debe a la dilución del gas ocurrida entre un perfil y el otro. ....	11
1. 7. DOAS a. Fotografía externa del DOAS, en punto de medición remota, de coordenadas 18°29'25,54''S 69°07'20,35''W. b. Fotografía del interior del DOAS, mostrando sus diferentes componentes. ....	12
2. 1. Mapa geológico del volcán Guallatiri, obtenido de Sepúlveda y otros (2021). ....	19
4. 1. Mapa de ubicación de mediciones, mostrando los lugares exactos de las mediciones, la ruta de acceso al cráter desde el estacionamiento de la camioneta y los campos fumarólicos. Tomada y modificada del <i>software Google Earth Pro</i> . ....	25
4. 2. a. Fotografía del lugar de medición remota, de coordenadas 18°29'25,54''S y 69°07'20,35''W. b. Fotografía del lugar de medición directa, de coordenadas 18°25'24,98''S y 69°05'30,59''W. ....	25
4. 3. Resultados entregados por el <i>software PostProcess_v2.1.4</i> . a. Imagen del volcán Guallatiri con las concentraciones de SO <sub>2</sub> en ppm*m. b. Cuadro de resultados, se destaca en cuadros rojos la concentración de SO <sub>2</sub> en kg/s y la velocidad de la pluma en m/s. c. Gráfico de las ICA's en función del número de imágenes. d. Gráfico de las ICA's en función del tiempo de medición, se observa un pequeño desacople entre las dos curvas. ....	27

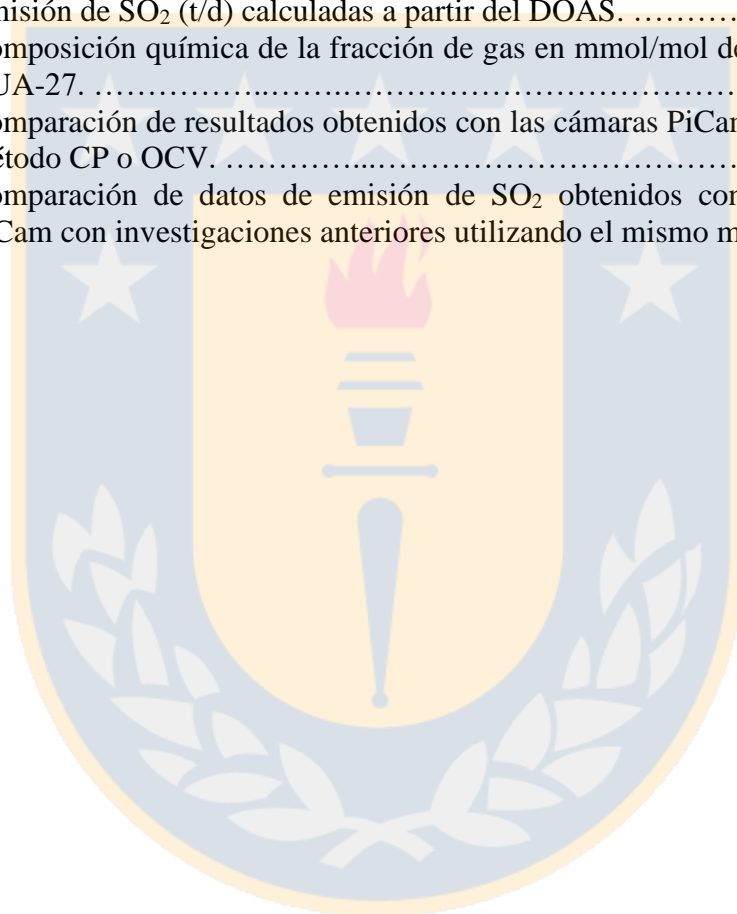
4.	4.	a. Imagen del volcán Guallatiri representativa de la secuencia 5 de la PiCam 1 el 20-08-2021, con mucho ruido de fondo hacia la derecha de la imagen, generada por la intensa luz solar proveniente del E. b. Superior: gráfico de la calibración 3 a los 1.998 ppm*m de SO <sub>2</sub> , mostrando una muy baja absorbancia de SO <sub>2</sub> . b. Inferior: curva de calibración obtenida en base las tres celdas de calibración, con mal ajuste inicial, su gradiente fue multiplicado en cada píxel de las imágenes procesadas convirtiéndolos en valores de ppm*m. ....	28
4.	5.	a. Imagen del volcán Guallatiri con la ICA utilizada para determinar el flujo de SO <sub>2</sub> del SF. b. Imagen del volcán Guallatiri con la ICA utilizada para determinar el flujo de SO <sub>2</sub> para ambos centros fumarólicos (SF + SWF). ....	29
4.	6.	Gráfico de las 2 funciones ICA de <i>cross correlation</i> con sus tiempos correspondientes, obtenida para el total de imágenes de la secuencia 1 del 21 de agosto con la cámara PiCam 10. ....	31
4.	7.	Resultados entregados por el <i>software SpecScan</i> al procesar los datos medidos por el DOAS, para el scan 17 del día 20 de agosto. a. Gráfico de la calibración <i>clear</i> , <i>dark</i> y de la pluma en función de la longitud de onda, se observa un buen ajuste lineal entre el <i>clear</i> y la pluma en el cuadro amarillo (correspondiente a la absorción del SO <sub>2</sub> ) y una baja absorción para el <i>dark</i> . b. Gráfico de la columna de densidad en ppm*m medida y ajustada a un estándar, se resalta en un cuadro rojo el error arrojado igual a 3,9. c. Gráfico de la columna de densidad en ppm*m en función del ángulo de escaneo, se aprecia un <i>peak</i> positivo a los 60°, en el lado izquierdo se resalta en cuadro rojo los parámetros utilizados (distancia a la pluma y velocidad del viento) y el flujo de SO <sub>2</sub> obtenido tanto en kg/s como en t/d. ....	33
4.	8.	Representación del rango de medición del DOAS, por medio del rectángulo naranja. a. Medición horizontal, el lente del DOAS se dispone de manera vertical y la medición se realiza de manera horizontal como lo indica la doble flecha. b. Medición vertical, el lente del DOAS se dispone de manera horizontal y la medición se realiza de manera vertical como lo indica la doble flecha. ....	35
4.	9.	Gráficos de la columna de densidad en ppm*m en función del ángulo de escaneo. a. Gráfico representativo del scan 12 del día 20 de agosto, mostrando dos grandes <i>peak</i> positivos a los 10 y 55°. b. Gráfico representativo del scan 71 del día 21 de agosto, mostrando un único <i>peak</i> positivo a los 35°. ....	36
4.	10.	Gráficos de flujos de SO <sub>2</sub> en t/d en función del tiempo, tanto para el día 20 de agosto (gráfico superior) como para el 21 de agosto (gráfico inferior), indicando la desviación estándar para cada uno de los scan realizados. ....	37

4.	11.	Diagramas ternarios para los gases del volcán Guallatiri y aguas termales Chirigualla, obtenidos de Inostroza y otros (2020a). a. Diagrama ternario Ar-He-N <sub>2</sub> , indicando una composición andesítica, típica de los volcanes de arco. b. Diagrama ternario Ar-H <sub>2</sub> S-SO <sub>2</sub> , donde Ar representa el componente atmosférico, SO <sub>2</sub> el magmático y H <sub>2</sub> S el hidrotermal, mostrando influencia magmática e hidrotermal en las muestras de gas y de agua. c. Diagrama ternario Ar-CH <sub>4</sub> -HCl, donde Ar representa el componente atmosférico, HCl el magmático y CH <sub>4</sub> el hidrotermal, mostrando influencia magmática e hidrotermal en las muestras de gas y de agua. ....	40
5.	1.	Concentración de uranio y torio (expresada en ppm) y valores R/Ra en volcanes activos y potencialmente activos en CVZ. La línea gris sólida sigue los valores medios U + Th, mientras que la línea discontinua gris oscuro sigue los valores U + Th más altos para cada volcán. Extraído de Inostroza y otros (2020a). ....	45
5.	2.	Diagrama binario de valores de δ <sup>18</sup> O-H <sub>2</sub> O y δD-H <sub>2</sub> O (en ‰ vs V-SMOW) para muestras de agua y condensado de gas del volcán Guallatiri, indicando el campo “andesítico”, valor LMWL = <i>Local Meteoric Water Line</i> y SMOW = <i>Standard Mean Oceanic Water</i> . Extraído de Inostroza y otros (2020a). ....	46
5.	3.	Modelo geoquímico conceptual de la circulación de fluidos en el volcán Guallatiri, mostrando el sistema magmático-hidrotermal y sus asociados, extraído de Inostroza y otros (2020a). Rc/Ra es la relación R/Ra, pero con la corrección de contaminación atmosférica. ....	47



## Índice de Tablas

Tabla	Página
1. 1. Características de la cámara PiCam, extraída y modificada de Wilkes y otros (2017). ppm*m = parte por millón por metro. ....	8
4. 1. Resumen de características en común a ambos días de medición remota.	26
4. 2. Detalles de las características de medición junto con las horas de medición de cada secuencia. ....	28
4. 3. Resumen de las emisiones más altas obtenidas para cada una de las secuencias si se procesan el total de imágenes. ....	30
4. 4. Detalle de la configuración del DOAS junto con las horas de medición.	34
4. 5. Emisión de SO <sub>2</sub> (t/d) calculadas a partir del DOAS. ....	35
4. 6. Composición química de la fracción de gas en mmol/mol de la muestra GUA-27. ....	38
5. 1. Comparación de resultados obtenidos con las cámaras PiCam utilizando método CP o OCV. ....	42
5. 2. Comparación de datos de emisión de SO <sub>2</sub> obtenidos con la cámara PiCam con investigaciones anteriores utilizando el mismo método. ....	48



## Resumen

El volcán Guallatiri corresponde a un estratovolcán con desgasificación pasiva permanente, desde sus campos fumarólicos situados en el cráter y en el flanco suroccidental, perteneciente a la comuna de Putre, región Arica y Parinacota, Chile. El presente trabajo consiste en estudiar dichas fumarolas con el fin de determinar el flujo de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) emitido por estas. Para ello se implementaron dos métodos de medición remota, durante el 20 y 21 de agosto del 2021; espectrómetro de absorción óptica diferencial (DOAS) y dos cámaras ultravioletas PiCam. Además de una medición directa de los gases y condensado de gas de la fumarola situada en la cima del volcán el día 20 de agosto 2021.

El flujo promedio final de SO<sub>2</sub> que se obtuvo con las cámaras PiCam es igual a  $22,81 \pm 5,14$  t/d, lo cual es concordante con mediciones de trabajos anteriores donde se encontró un flujo de SO<sub>2</sub> promedio que oscila entre los 20 a 50 t/d. Las cámaras PiCam son capaces de determinar la velocidad de la pluma volcánica, que en este caso dio de promedio 3,4 m/s. Utilizando esta velocidad del viento, con el DOAS se determinó una emisión de SO<sub>2</sub> promedio igual a  $267,9 \pm 141,9$  t/d. Se piensa que esta gran diferencia en los valores obtenidos se debe principalmente a una sobreestimación de los datos por parte del DOAS y a una subestimación de los datos obtenidos con las cámaras PiCam, por una dispersión y dilución de la luz, sobre todo por estar a una gran distancia del centro de emisión (> 5 km).

La emisión de SO<sub>2</sub> encontrada es relativamente baja en comparación a otros volcanes del norte de Chile, por lo que no existe una influencia predominantemente magmática en los gases del volcán Guallatiri, al ser el SO<sub>2</sub> un proxy del flujo magmático. La medición directa indica bajas concentraciones de especies magmáticas (SO<sub>2</sub>, HCl, HF) lo que confirma una influencia hidrotermal, además de la magmática, en los gases emitidos desde las fumarolas. Esto está de acuerdo con el modelo geoquímico conceptual propuesto por Inostroza y otros (2020a), para este volcán, que afirma que los gases fumarólicos fueron alimentados por una fuente magmática profunda y reaccionaron posteriormente con un acuífero somero, lo que explica el componente hidrotermal.



## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Generalidades y planteamiento del problema.

El proceso de desgasificación en los volcanes activos es una clave muy importante para entender el equilibrio de los volátiles dentro de la dinámica de la Tierra, la dinámica de las cámaras magmáticas, el sistema de chimenea y el comportamiento eruptivo, proporcionando en este último caso, información útil para la vigilancia volcánica. Una de las informaciones más importantes obtenidas del proceso de desgasificación corresponde a la medición del flujo volátil total de un solo volcán (Oppenheimer y otros, 2003), el cuál puede aproximarse al flujo de los tres principales gases volcánicos ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  y  $\text{SO}_2$ ; Aiuppa y otros, 2008). La contribución de estos gases junto a otras especies gaseosas de menor concentración proporciona información valiosa de procesos profundos como las contribuciones de la placa subducida y del manto empobrecido al magma original (Fisher, 2008).

Los flujos volátiles totales pueden verse fuertemente afectados por el comportamiento eruptivo de un solo volcán y por distintos procesos superficiales. La desgasificación eruptiva contribuye menos del 15% del flujo volátil total (Fischer y Chiodini, 2015), pero se pueden producir fuertes variaciones por una frecuente actividad eruptiva y/o por el estilo eruptivo (Shinohara, 2008). La actividad hidrotermal favorece el lavado de volátiles magmáticos originales, produciendo variaciones en la concentración de especies más solubles ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ). La desgasificación pasiva a largo plazo produce altas cantidades de magma desgasificado, lo que a su vez favorece el desarrollo de grandes sistemas hidrotermales (Shinohara, 2008). En consecuencia, existen varios factores, profundos y superficiales, que pueden influir en el flujo volátil total medido en un solo volcán, y su identificación es crucial para minimizar la subestimación de ese flujo.

En específico, el  $\text{SO}_2$  es de suma importancia en el monitoreo volcánico al considerarse un proxy del manto, y por su baja concentración atmosférica. Además, es fácil de detectar por espectroscopia ultravioleta por lo que es ideal para mediciones de detección remotas (Galle y otros, 2003).

A pesar de que se han realizado varios trabajos en la Zona Volcánica Central (ZVC) de los Andes, con el fin de determinar las características de los fluidos emitidos por los volcanes de desgasificación pasiva, solo uno pocos se han centrados en determinar el flujo volátil total de volcanes individuales (Tamburello y otros, 2014).

En Chile existen volcanes activos con desgasificación pasiva donde su ubicación remota ha dificultado, incluso imposibilitado, la realización de estudios geológicos detallados y el monitoreo de los flujos de gases. Es por esta razón que se estudia de forma individual el volcán Guallatiri, situado al norte de Chile. Corresponde a un estratovolcán de desgasificación pasiva permanente desde dos campos fumarólicos distintos, que emiten una mezcla de fluidos de origen magmático e hidrotermal (Inostroza y otros, 2020a).

Su nombre proviene del aimara “wallatire” que significa “hábitat de guallatas”. Cuenta la leyenda que el Guallatiri junto con los volcanes Sajama y Tacora fueron galanes que cortejaban a dos hermosas mellizas. Luego que Sajama raptara a una de ellas Tacora lo enfrenta, sosteniendo una larga lucha. Sajama acuchilló el vientre de Tacora, dejándole una llaga purulenta, correspondiente a la veta de azufre del volcán. El dios Pachacamac los convierte en volcanes junto con las mellizas, que corresponden a los Nevados de Payachatas (volcanes Parinacota y Pomerate). Dicen que el Guallatiri sigue enamorado de ellas, y si uno lo mira mucho se enoja y lanza fumarolas por su cráter (Wikiexplora, 2021).

## **1.2. Objetivo**

### **1.2.1. Objetivo general**

El objetivo general de este estudio es comprender los procesos que controlan la desgasificación del volcán Guallatire.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

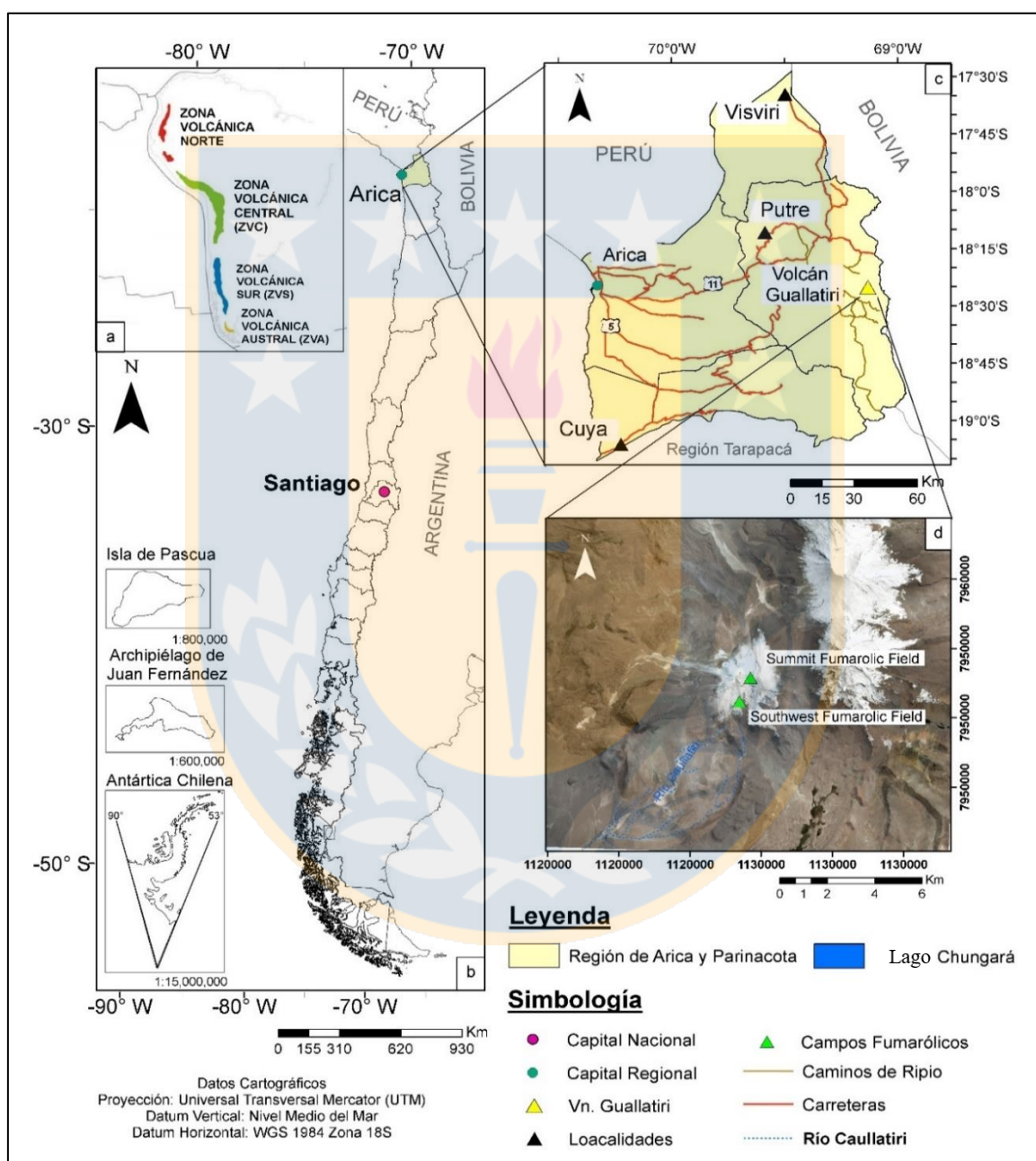
- Estimar el flujo total de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) del volcán Guallatire.
- Determinar si existe una influencia estacional en la emisión de SO<sub>2</sub> del volcán Guallatire.

## **1.3. Ubicación y Accesos**

El volcán Guallatiri, localmente conocido como Pedro Caporata, se ubica en la región de Arica y Parinacota, provincia de Parinacota, comuna de Putre, Chile (Figura 1.1), dentro de la Reserva Nacional Las Vicuñas. Su cráter central se encuentra a los 18°25' S y 69°05' W, justo al oeste de la frontera entre Chile y Bolivia, a 16 km al sur del Lago Chungará y 55 km al SE de la localidad de Putre.

La forma más eficiente de llegar al volcán Guallatiri, es por la carretera internacional Arica-La Paz de la ruta 11 en dirección a Putre. Luego, en la intersección con la ruta A-235, se transitan 55 km dirección sureste hasta el poblado de Guallatire, donde se instala el campamento base. Para acceder al flanco norte del volcán (al campo fumarólico del cráter), desde el poblado de Guallatiri se recorren ~35 km por la ruta A-235, en dirección norte

hasta la intersección con la ruta A-95, por la cual se prosigue por 8 km más. Luego se debe tomar un desvío hacia el sur, hacia el caserío de Chirigualla, por ~15 km hasta llegar a la falda del volcán, donde se estaciona el vehículo a una altura aproximada de 5.000 m s.n.m. Otra opción de llegar al poblado de Guallatiri, si se proviene por el sur es por la ruta A-95, que conecta el salar de Surire con el lago Chungará.



**Figura 1.1: Mapa de ubicación y accesos. a. Distribución de las Zonas Volcánicas Norte, Central, Sur y Austral (ZVN, ZVC, ZVS y ZVA respectivamente). b. Mapa de Chile destacando la región de estudio. c. Mapa de la región de Arica y Parinacota mostrando las rutas de acceso al Volcán Guallatiri. d. Imagen satelital del Volcán Guallatiri con sus campos fumarólicos, obtenida del Google Earth Pro.**

## **1.4. Fisiografía**

La región de Arica y Parinacota se caracteriza por un clima de tundra de lluvia estival (Sarricolea y otros., 2016), con un promedio de precipitaciones entre los años 2010 y 2021 igual a 185,5 mm/año según la estación meteorológica del Lago Chungará, de la red agrometeorológica del Instituto de Investigaciones Agropecuaria (INIA).

Regionalmente, el volcán Guallatiri se emplaza en el sistema endorreico de la cuenca del río Lauca, que nace a 30 km al NW y fluye en dirección hacia Bolivia. Localmente, debido a los Nevados de Quimsachata, una barrera topográfica hacia el oeste, la red hídrica del volcán fluye en dirección norte, oeste y sur. Las quebradas de mayor importancia corresponden a la quebrada Plazuela, la que fluye hacia el norte para alimentar al bofedal Chungará y, finalmente, desembocar en el lago homónimo; la quebrada Trapiche-Chirigua hacia el noroeste, tributaria del río Chusjavidá; la quebrada Ancuta hacia el suroeste, que desemboca en el río Chusjavidá; y el río Caullatiri hacia el sur, principal curso de agua superficial que nace del volcán y que alimenta al río Lauca (Jorquera y otros, 2019).

## **1.5. Metodología de Trabajo**

### **1.5.1. Generalidades**

Para cumplir los objetivos propuestos se realizó un trabajo de gabinete que consta de una investigación y recopilación de material bibliográfico de la zona de estudio, poniendo énfasis en estudios geológicos y geoquímicos publicados en informes, memorias, libros y publicaciones en revistas científicas.

Complementariamente, miembros del equipo del núcleo de investigación de riesgo volcánico realizaron exposiciones para la correcta utilización de la cámara ultravioleta (UV) PiCam y para el espectrómetro de absorción óptica diferencial (DOAS, por sus siglas en inglés), abarcando desde la correcta instalación en terreno de las cámaras, hasta la adquisición y procesamiento de datos obtenidos.

Posteriormente se realizaron dos campañas de terreno. La primera desde el 25 de mayo al 2 de junio de 2021, cuyo fin fue aprender a utilizar los diferentes equipos (DOAS y PiCam UV) a emplear en este trabajo. La segunda campaña se llevó a cabo desde el 13 hasta el 25 de agosto de 2021, donde se aplicó el muestreo remoto de la actividad fumarólica del volcán Guallatiri con los dos métodos ya mencionados, además de un muestreo directo de gases y de condensado de gas desde la fumarola cratérica.

### 1.5.2. Muestreo directo

Se llevó a cabo el muestreo de las fumarolas localizadas en la cima del volcán, utilizando la técnica de muestreo directo de Giggenbach y Goguel (1989). El análisis completo de la química inorgánica-orgánica y de las composiciones isotópicas de la fase gaseosa y líquida se realizó en el Laboratorio de Rocas y Fluidos del Departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Florencia, Italia, y en los laboratorios de la Institución Nacional de Geofísica y Vulcanología (INGV) de Palermo, Italia.

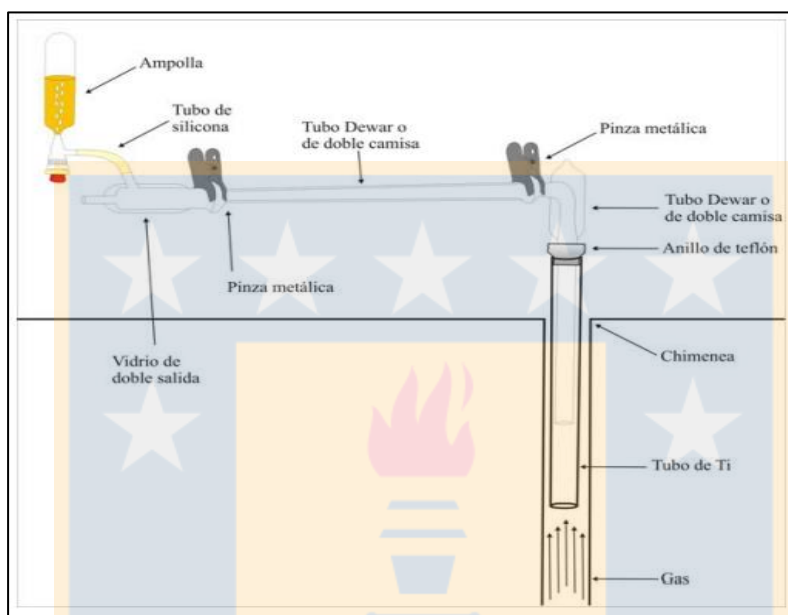
Para un correcto muestreo de gases se eligen lugares con poca o nula filtración de aire con el objetivo de disminuir la contaminación (Berríos, 2015). Las muestras (4 en total) son tomadas usando ampollas de vidrio de Giggenbach de 60 ml evacuadas al vacío, donde 2 fueron rellenas por una solución básica (trampa alcalina) de 4 M de NaOH y 0,15 M de Cd(OH)<sub>2</sub>, cerradas por una válvula de Thorion o Rotaflo. La temperatura se mide ocupando una termocupla.

El procedimiento empleado para tomar una muestra directamente desde una fumarola se describe a continuación (Figura 1.2):

- Se debe canalizar el flujo introduciendo un tubo de titanio (1 m de largo\*2,5 cm de diámetro) en el punto de emisión, evitando que se produzcan filtraciones por los costados.
- Restringir el flujo introduciendo un anillo de teflón en el tubo de titanio, evitando de esta manera la entrada de aire y protegiendo la línea de vidrio.
- Armar la línea de vidrio *pyrex*, la cual consiste en tubos de vidrio *Dewar* o de doble camisa que se conectan entre sí con pinzas metálicas, y están separadas por un espacio de vacío, lo que evita caídas abruptas de temperaturas y posibles cambios en la composición del gas.
- En la parte final de la línea de muestreo se conecta una pieza de doble salida, para obtener un flujo de salida óptimo, esto impide que en el interior se creen reflujos de gas o aspiración de aire que contaminaría la muestra.
- Conectar todo el sistema a la ampolla de vidrio, por medio de un tubo de silicona que se pone en la salida diagonal superior de la última pieza de vidrio descrita. La ampolla se ubica en posición vertical con la válvula de Thorion en la parte inferior, se sujeta con la mano y el muestreo se inicia al abrir lentamente la válvula de la ampolla. De ser necesario se debe ir enfriando la ampolla debido a las altas temperaturas que puede alcanzar.

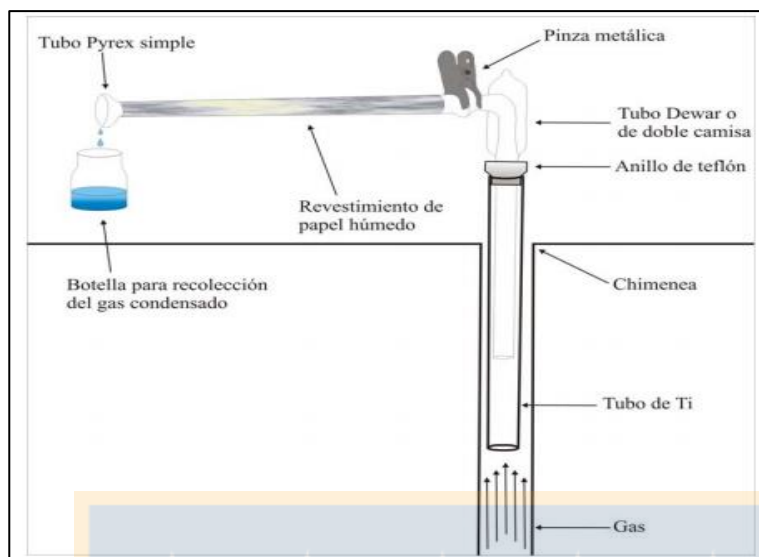


- Durante el muestreo se generarán burbujas producto del ingreso del gas. Una vez finalizado el burbujeo, o que sea muy lento, se debe cerrar la válvula para evitar pérdida de la muestra.
- Finalizado el muestreo, la boquilla se rellena con agua Milli-Q y se sella con parafilm.



**Figura 1.2.: Diagrama del muestreo directo de gases volcánicos en fumarolas, extraído de Aguilera (2008).**

Posterior al muestreo con ampollas, se realizó un muestreo de gas condensado utilizando el mismo sistema de tubo de titanio más una línea de vidrio, descrito anteriormente, sustituyendo la pieza de vidrio de doble salida por un tubo de *pyrex* simple (Figura 1.3). Este último es revestido por una capa de papel humedecido o hielo, capaz de condensar el gas. El condensado es recolectado en una botella de vidrio oscura de 50 ml.



**Figura 1.3: Diagrama de muestreo de gases volcánicos condensado en fumarolas, extraído de Aguilera (2008).**

### 1.5.3. Cámara PiCam UV

La cámara PiCam (Figura 1.4a) permite la estimación en forma remota del flujo de dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) emitidos desde volcanes activos (Wilkes y otros, 2016), midiendo densidades ópticas de la pluma (Gliß y otros, 2017). Se implementan dos cámaras como un par co-alineado, con un filtro de paso de banda (12,5 mm de diámetro y 10 nm de ancho) montado antes de cada lente; uno centrado en 310 nm (lente A) y otro en 330 nm (lente B). Ambos lentes están conectados a un computador *Raspberry Pi 3* a través de la interfaz en serie de la cámara (Wilkes y otros, 2017), el cual está albergado en una caja Pelican, así como una batería y Sistema de Posicionamiento Global (GPS) (Figura 1.4b). El lente A es capaz de captar el  $\text{SO}_2$ , ya que este gas absorbe la luz UV a esa longitud de onda, de las cuales se puede derivar los flujos, mientras que el lente B es utilizado como imagen base al no absorber luz UV en esa longitud (Wilkes y otros, 2017).



**Figura 1.4:** Cámara PiCam UV a. Fotografía externa de la cámara PiCam en punto de muestreo remoto, de coordenadas 18°29'25,54''S 69°07'20,35''W. b. Fotografía del interior de la cámara PiCam, mostrando la batería, lentes y GPS.

Sus principales ventajas corresponden a su bajo costo ( $\approx$  USD 500, en comparación de  $>$  20.000 USD de las cámaras convencionales), su pequeño tamaño (30\*12\*12 cm), peso ligero (por lo que es fácil de transportar), y la mejora significativa de la sensibilidad de UV al reemplazar el filtro Bayer por uno de cuarzo transmisor de UV (Wilkes y otros, 2017). Además, los sistemas de cámaras capturan las columnas de emisión con una alta resolución espacial y temporal, lo que permite recuperar las velocidades del gas en la pluma directamente de las imágenes tomadas (Gliß y otros, 2017).

Las características y especificaciones de la cámara se resumen en la tabla 1.1.

**Tabla 1.1: Características de la cámara PiCam**, extraída y modificada de Wilkes y otros (2017). ppm\*m = parte por millón por metro.

Características	Cámara PiCam
Número de cámaras	2
Ópticos	Lentes de cuarzo plano convexos con antirreflejos de 6 mm
Sensor CMOS	Omnivisión OV5647
Resolución del sensor ( $P_H * P_V$ )	2592*1944
Resolución usada ( $P_H * P_V$ )	648*486
Digitalización (Bits-RAW)	10-Bit RAW
Distancia focal (mm)	9
Frecuencia de captura de imagen máxima (Hz)	0,25
Dimensiones (cm)	30*12*12
Peso (kg)	1,5
Precisión SO <sub>2</sub> (ppm*m)	90



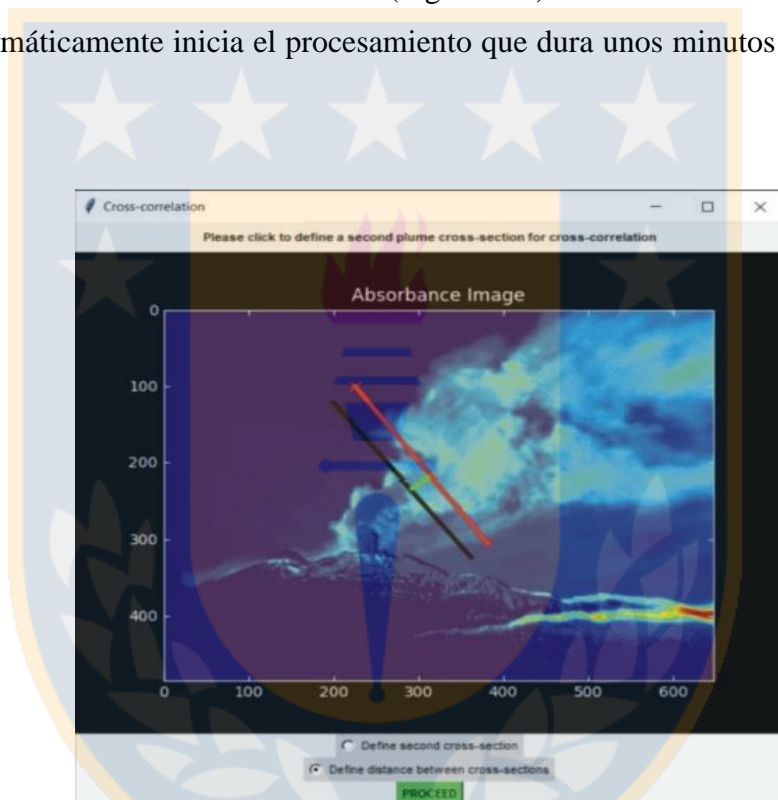
Su instalación en terreno consiste en:

- Montar la cámara sobre un trípode dejando ambos lentes alineados horizontalmente, a una distancia máxima de 10 km (idealmente < 5 km) de la fumarola a medir, y de preferencia perpendicular a la dirección de propagación de la pluma.
- Conectar la batería y el GPS. Una vez estabilizado este último, se conecta la cámara por *Wireless* al computador portátil y se abre el *software PyCamUV\_v2.1*.
- Ajustar el enfoque moviendo suavemente los lentes. La cámara debe estar apuntando al volcán, considerando que aparezca parte del edificio volcánico y cielo limpio libre de pluma. Se puede corroborar la imagen generada con *Test Capture*.
- Ingresar los parámetros que controlan la cámara; *Shutter speed* (velocidad de obturación) y *Framerate* (frecuencia de adquisición de imágenes). En general, el *Shutter speed* toma valores de 400-700 ms y 50-80 ms para los lentes A y B respectivamente, y el *Framerate* de 0,2-0,25 Hz.
- Hacer las correspondientes calibraciones de *dark*, *clear* y con las celdas de calibración de cuarzo (en este caso de 100, 467 y 1989 ppm\*m). Se recomienda hacer cada paso tres veces para cada lente.
- Terminada la calibración se selecciona el tipo de alineación de las imágenes, ya sea en *OPENCV ECC* (OCV) o en *Control Point* (CP). En ambos casos se debe escoger un *BG CROP*, iguales en posición y tamaño para ambos lentes. Idealmente utilizar *OPENCV ECC*, ya que hace una alineación automática de las imágenes. En caso contrario, con *Control Point*, se debe tener un mínimo de cinco puntos de control identificables tanto en el lente A como en el B.
- Agregar la distancia a la pluma en *Image Geometry Setting*
- Trazar la línea de perfil (*Integrated Column Amount = ICA*) en la pestaña *ANALYSIS*, lo más perpendicular a la dirección de la pluma.
- Las mediciones empiezan al seleccionar *START ACQUISITION*.
- Las mediciones no deben superar los 60 min, por cambios en la intensidad de la luz. Para finalizar la medición se aprieta en el botón *END ACQUISITION*. Para realizar una nueva medición se debe volver a calibrar la cámara.

El procesamiento de imágenes se logró por medio del *software PostProcess\_v2.1.4*, contrastando los canales de los lentes A y B para aislar la absorción de SO<sub>2</sub> y para eliminar

fuentes de extinción comunes a ambas longitudes de onda como lo son algunos aerosoles y gotas de agua (Gliß y otros, 2017). A partir del logaritmo de la relación píxel por píxel de las dos imágenes se puede calcular la densidad óptica del  $\text{SO}_2$ , que es proporcional a la densidad de columna de  $\text{SO}_2$  a lo largo de la línea de visión (Klein y otros, 2017).

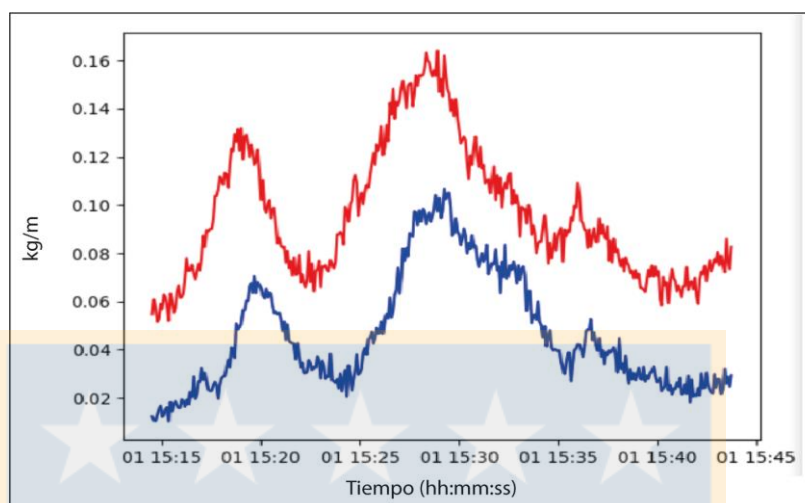
Antes de iniciar el procesamiento de las imágenes es necesario trazar un perfil perpendicular a la trayectoria de la pluma (al igual que para la medición en terreno), luego se da inicio al procesamiento al hacer click en *start processing*. Se abre una ventana de *Cross-correlation* con el perfil demarcado y se solicita trazar un segundo perfil, paralelo al primero, y la distancia entre ambas ICA's (Figura 1.5). Finalmente se aprieta el botón *proceed* y automáticamente inicia el procesamiento que dura unos minutos (Layana, 2022; Rojas, 2019).



**Figura 1.5: Ventana de procesamiento de datos.** Se distingue el perfil inicial (ICA 1; color negro), luego el siguiente perfil que corresponde a la ICA 2 (color rojo), y finalmente una línea ortogonal (color verde), secciones por las cuales se calculan la concentración de  $\text{SO}_2$  y la velocidad de la pluma, extraído de Layana (2022).

Uno de los resultados entregados por la cámara PiCam es un gráfico de absorción de  $\text{SO}_2$  en función del tiempo de ambas ICA's utilizadas. Si la medición se realiza de manera correcta, las curvas se deberían poder sobreponer una con la otra, mostrando una clara correlación entre ellas, a pesar de tener cierta variación en la vertical (Figura 1.6). Esta diferencia en la vertical se observa mayormente al realizar el segundo perfil a una mayor distancia del primero, lo que implica una mayor dilución del gas entre un perfil y otro. La

dilución del gas depende, a su vez, de la composición de la pluma, condiciones atmosférica y condiciones de viaje del gas, entre otros factores.



**Figura 1.6:** Gráfico de absorción de SO<sub>2</sub> en función del tiempo para ambos perfiles. La diferencia vertical se debe a la dilución del gas ocurrida entre un perfil y el otro.

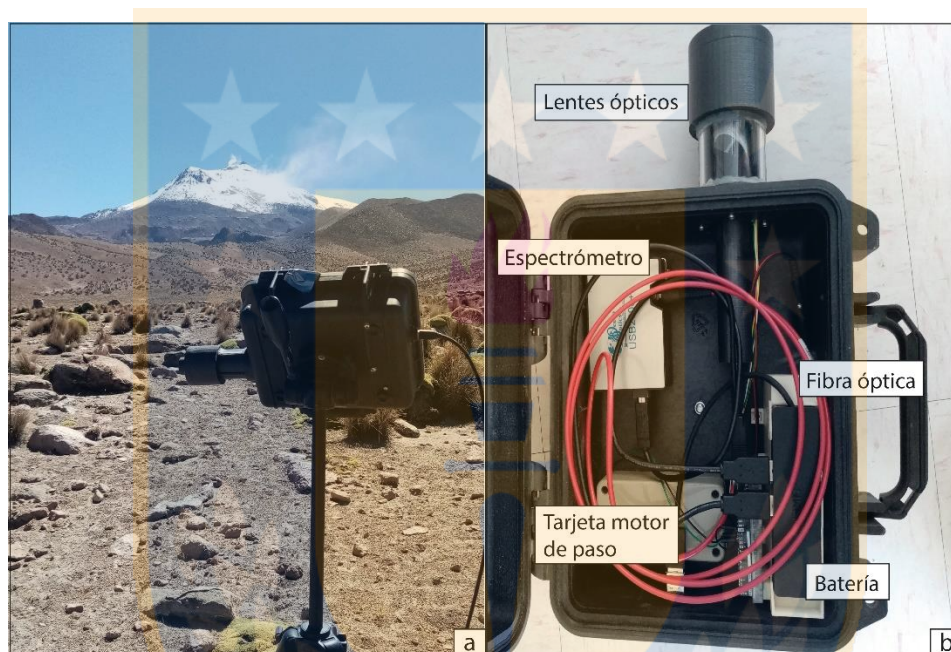
Los principales factores internos/externos que influyen en las mediciones, ya sea positiva o negativamente, de las cámaras PiCam incluyen: (1) velocidad de la pluma, (2) distancia a la pluma (Klein y otros, 2017), (3) densidades de la columna de la celda de gas, (4) dilución de la luz, (5) detección de SO<sub>2</sub>, (6) dispersión múltiple y (7) deriva de calibración (Aguilera y otros, 2020).

#### 1.5.4. Espectrometría de Absorción Óptica Diferencial (DOAS)

La espectrometría de absorción óptica diferencial (DOAS) se basa en la ley de Beer-Lambert modificada, considerando la dispersión de Mie de partículas de aerosol y la dispersión de Rayleigh de moléculas de aire (Bobrowski, 2007). Permite determinar la concentración de varios gases trazas simultáneamente sin alterar su comportamiento químico, midiendo sus estructuras de absorción de banda estrecha en el espectro UV y visible (Platt y Stutz, 2008).

El objetivo básico del DOAS (Figura 1.7a) es recuperar las concentraciones de los gases trazas medidos, para ello las características de absorción superpuestas deben separarse numéricamente. Esto se puede debido que la sección transversal de absorción de muchas especies gaseosas es única, equivalente a una huella dactilar (Bobrowski, 2007), que para el SO<sub>2</sub> está en el rango ~300-315 nm (Rodríguez y Nadeau, 2015).

Para el correcto funcionamiento del equipo es necesario una fuente de luz que atraviese la atmósfera (en este caso el sol) sea recolectada por un telescopio y enviada a un sistema detector-espectrógrafo a través de una fibra óptica de vidrio de cuarzo (Bobrowski, 2007). Ahí se realiza la separación en los diferentes componentes espectrales mediante una rejilla y se registra el espectro, típicamente en un dispositivo de carga acoplada (CCD) (Rodríguez y Nadeau, 2015). En su extremo está conectado a un espectrómetro *Ocean Insight USB2000+*, el cual cuenta con un sensor *Sony ILX511A*, con resolución espectral de  $\sim 0,65$  nm en un rango espectral  $\sim 240$ -400 nm (Figura 1.7b).



**Figura 1.7: DOAS a. Fotografía externa del DOAS, en punto de medición remota, de coordenadas  $18^{\circ}29'25,54''S$   $69^{\circ}07'20,35''W$ . b. Fotografía del interior del DOAS, mostrando sus diferentes componentes.**

La instalación de este equipo en terreno se describe a continuación:

- Instalar el espectrómetro sobre el trípode dejando el cabezal en posición vertical frente a la pluma, idealmente a una distancia  $< 10$  km, y de preferencia perpendicular a la dirección de propagación de la pluma.
- Conectar el cable de energía de color amarillo “*Output*” en la entrada “*Input*” para cargar la batería.
- Enlazar el espectrómetro al computador mediante un cable USB e iniciar el *software SpecScan*.
- Se debe escanear en primer lugar cielo limpio-pluma-cielo limpio a modo de testeo. Para esto se selecciona la opción *Single-mode* y se ajusta el *Integration time (ms)*, que por defecto está configurada en 100 ms, hasta tener una correcta

saturación de SO<sub>2</sub>. Apuntando a cielo limpio, se realiza una primera *ACQUIRE*, para que el DOAS haga, de forma automática, una calibración al *dark* y luego un *clear*, junto con una primera medición de prueba. En el gráfico de resultado se debería formar una campana de Gauss, lo que estaría indicando que se mide cielo-pluma-cielo.

- El escaneo se inicia al seleccionar *ACQUIRE*. Se debe revisar en el primer gráfico que el espectro se ajusta dentro del recuadro amarillo en una línea diagonal sin estar saturado. En el caso que la pendiente sea muy baja o cercana al *Dark spectrum*, se debe aumentar el *Integration time (ms)* y realizar una nueva adquisición.
- El escaneo termina al presionar *STOP SCAN*.

Las mediciones se realizan en transectos perpendiculares a la dirección de propagación de la pluma volcánica (Rodríguez y Nadeau, 2015), donde los espectros obtenidos son corregidos del ruido instrumental (espectro oscuro) y normalizados respecto al espectro del cielo azul (espectro de trasfondo), eliminando entonces la absorción y dispersión por fuentes no volcánicas e interferencias causadas por la estructura espectral solar (Galle y otros, 2003). Una vez procesadas las columnas de densidad de SO<sub>2</sub> [ppm·m], estas son integradas en una sección bidimensional de la pluma [ppm·m<sup>2</sup> o kg/m]. Luego, los valores obtenidos son multiplicados por la velocidad del viento para obtener las tasas de emisión de SO<sub>2</sub> [kg/s o t/d].

Las principales fuentes de error en los cálculos, ya sea positiva o negativamente, de tasas de emisión de SO<sub>2</sub> son: (1) velocidad de la pluma, (2) errores asociados a la geometría de la pluma, (3) dispersión y absorción de radiación UV por otros componentes, (4) errores relacionados con la rutina de suavizado, filtración y ajuste espectral, (5) cambios en la relación señal-ruido, (6) técnica usada y (7) tasas de pérdida de SO<sub>2</sub> (Rodríguez y Nadeau, 2015).

## 1.6. Trabajos anteriores

Las investigaciones específicas sobre el volcán Guallatiri son escasas y se remontan sólo a la última década.

**Gliß y otros (2017)** son los primeros en medir el flujo de SO<sub>2</sub> del volcán Guallatiri utilizando cámaras UV, encontrando un flujo promedio igual a 51,84 t/d para la fumarola situada en el cráter y  $112,3 \pm 43,2$  t/d para ambos campos fumarólicos. Estos autores



también desarrollaron un método capaz de medir la velocidad de la pluma volcánica a partir de la obtención de imágenes.

**Arratia (2019)** midió el flujo  $\text{SO}_2$  por medio de una cámara UV PiCam, encontrando valores entre  $5,5 \pm 2,8$  t/d a  $48,3 \pm 11,2$  t/d. Utilizando este mismo método **Aguilera y otros (2020)** determinaron un flujo de  $\text{SO}_2$  promedio igual a  $49,95 \pm 15,55$  t/d. Además, estos autores discuten los factores tanto internos como externos que afectan ya sea positiva o negativamente las mediciones de la cámara UV PiCam.

**Inostroza y otros (2020)** realiza el primer estudio químico e isotópico de los gases y aguas del volcán Guallatiri, proporcionando un modelo geoquímico conceptual de la circulación de fluidos para este volcán. Concluye que los gases fumarólicos presentan una importante contribución tanto magmática como hidrotermal, producto de reacciones secundarias a medida que los fluidos ascienden a la superficie, y tienen temperaturas de salida entre los  $80,2$  a los  $265$  °C.

**Sepúlveda y otros (2021)** es el primero en realizar la evolución geológica detallada del volcán Guallatiri, afirmando que se formó en siete fases eruptivas distintas. Donde las primeras cuatro etapas corresponden a extensos flujos de lava efusivas durante el Pleistoceno, y las siguientes son fases más explosivas durante el Pleistoceno-Holoceno caracterizadas por domos, flujos piroclásticos y lavas-domos.

## 1.7. Agradecimientos

Quisiera agradecer al Núcleo de Investigación de Riesgo Volcánico Ckelar por darme la oportunidad de trabajar con ellos y ellas durante este año y por todas las enseñanzas entregadas. A todas aquellas personas que formaron parte de una u otra forma de este trabajo. Agradecer al proyecto Fondecyt 1211220 financiado por ANID, que permitió llevar a cabo los terrenos realizados.

Además, agradezco a todos y todas que estuvieron ahí, durante estos siete largos años de carrera, ya sea por las risas, aventuras, estudio, deporte y/o fiestas asistidas. A los amigos nortinos, de universidad, de colegio, de escalada y de la vida en general. Agradecer al gimnasio de escalada Bioboulder, y toda su gente, por ser mi templo de entrenamiento y distracción en tiempos normales o de estrés.

Agradecimiento especial a mi familia que me apoyó en todo momento durante la vida universitaria. Sobre todo, a mi padre y madre, quienes pagaron mis estudios y siempre me han dado su apoyo incondicional, para realizar todo aquello que me gusta y apasiona.

## 2. MARCO GEOLÓGICO

### 2.1. Geología regional

#### 2.1.1. Altiplano

Ante la ausencia de una definición formal, Tassara y Yañez (2003), proponen una división de la cordillera de los Andes a escala continental, en base de rasgos mayores de la placa subductada y a factores inherentes a la placa continental. De acuerdo con esta segmentación, el volcán Guallatiri se encuentra en los Andes Centrales ( $15^{\circ}$ - $33,5^{\circ}$  S), que a su vez se subdivide, en función de características topográficas, morfoestructurales, magmáticas, tectónicas y litológicas en: Altiplano ( $15^{\circ}$ - $23^{\circ}$  S), Puna ( $23^{\circ}$ - $28^{\circ}$  S) y Cordillera Frontal ( $28^{\circ}$ - $33,5^{\circ}$  S).

El Segmento Altiplano, donde se ubica el área de estudio, presenta morfoestructuras propias como el oroclino Boliviano (también conocido como “Codo de Arica”), o la meseta Altiplano-Puna. La que es flanqueada por la cordillera Principal y Occidental, con una elevación media cercana a los 4.000 m s.n.m., un ancho de 300 km y 2.000 km de largo corresponde al segundo *plateau* más grande del mundo (Isacks, 1998). Este mismo autor afirma, que la meseta Altiplano-Puna se formó por una combinación de acortamiento-engrosamiento cortical y adelgazamiento litosférico sobre una placa subducida de inmersión poco profunda. El segmento Altiplano, también se caracteriza por tener grandes espesores corticales, con máximos de 70-74 km bajo la cordillera Occidental y Oriental y de 60-65 km bajo el altiplano (Beck y otros, 1996). Además, forma parte de la Zona Volcánica Central, una de las cuatro regiones con volcanismo activo de Sudamérica (Stern, 2004).

#### 2.1.2. Zona Volcánica Central

El arco volcánico andino incluye más de 200 estratovolcanes y al menos 12 sistemas de calderas gigantes potencialmente activos, que ocurren en un cinturón segmentado discontinuo que se extiende desde el volcán Nevados del Ruíz ( $4^{\circ}5'$  N) hasta el volcán Fuego (  $54^{\circ}5'$  S). Los cuatro segmentos donde ocurre magmatismo en los Andes son zonas con un ángulo de subducción relativamente inclinado ( $> 25^{\circ}$ ), correspondientes a las zonas volcánicas Norte (ZVN), Central (ZVC), Sur (ZVS) y Austral (ZVA), las cuales son producto de la subducción de las placas oceánicas Nazca (ZVN, ZNC y ZVS) y Antártica (ZVA) bajo la placa Sudamericana. Entre ellas existen regiones donde el ángulo de subducción es relativamente plano ( $< 10^{\circ}$ ) donde el volcanismo está ausente (Stern, 2004).

La ZVC, ubicada entre los  $16^{\circ}$ - $28^{\circ}$  S (Thorpe y Francis, 1979), comprende más de 1.100 edificios volcánicos (de Silva y Francis, 1991), donde muchos de ellos deben ser

anteriores al Pleistoceno debido a las condiciones hiperáridas que han prevalecido desde esa época, que implica una tasa de erosión mínima (Stern y otros, 2007). Los volcanes de la ZVC están restringidos en gran medida a la cordillera Occidental, con tendencia N-S en Chile y Argentina (Andes Centrales del Sur) y NW-SE al norte del Codo de Arica (Andes Centrales del Norte) (Stern, 2004).

A esta altura, la litosfera de la placa de Nazca (< 60 Ma) subducta 7-9 cm/año con un ángulo que varía de 24° a 27° (Stern, 2004), provocando que el frente volcánico se encuentre a 260-340 km al este de la fosa y a 120-150 km sobre la placa subducida (Stern y otros, 2007). Estas condiciones de subducción implican la deshidratación de la placa Nazca y la incorporación de elementos en la cuña del manto suprayacente (y sus respectivas firmas geoquímicas), lo que induce su fusión parcial y, por lo tanto, la generación de magma (Thorpe y Francis, 1979; Thorpe, 1984), que en este caso se ubica en el campo subalcalino con signatura calco-alcalina (Molina y otros, 2015).

La ZVC se caracteriza por tener más de 70 km de espesor cortical (Beck y otros, 1996), producto de un acortamiento cortical (Beck y otros, 1996; Isacks, 1988) y/o de magmatismo subcortical (Schmitz y otros, 1997). El cual, según razones de La/Yb y Ce/Y, empezó progresivamente desde el Mioceno temprano hasta el Plioceno-Pleistoceno (Molina y otros, 2015), aunque otros autores afirman que empezó a mediados del Oligoceno (Mamani y otros, 2010). Debido a este gran espesor de la corteza, los magmas de la ZVC presentan contribuciones significativas derivadas de esta, evidenciado por el análisis geoquímico de razones elementales e isotópicas (Hildreth y Moorbath, 1988; Mamani y otros, 2010; Wörner y otros, 1994). Se estima que la entrada de la corteza en los magmas cuaternarios se encuentra entre el 7-18% (Mamani y otros, 2010) y podría explicar en parte la gran variabilidad química e isotópica presente (Hildreth y Moorbath, 1988). Complementariamente, Molina y otros (2015) afirman que los productos ígneos reflejan variaciones en el espesor cortical a lo largo del tiempo debido a variaciones en el grado de fusión parcial y/o asimilación cortical.

Los principales productos de la ZVC corresponden a andesitas, dacitas y riolitas, y ocasionalmente a andesitas basálticas y basaltos (Stern, 2004), bajo la forma de grandes complejos estratovolcánicos y sistemas de calderas principalmente, pero también como conos piroclásticos pequeños, coladas de lavas aisladas, domos, maars y conos de cenizas (Stern y otros, 2007).



## 2.2. Geología local

### 2.2.1. Volcán Guallatiri

El volcán Guallatiri corresponde a un estratovolcán activo desde el Pleistoceno (710 ka.), emplazado a los 6.071 m s.n.m. en el extremo SW de los Nevados de Quimsachata (SERNAGEOMIN, 2021). Esta última, es una cadena volcánica de 50 km de largo, con orientación NS a NE-SW ubicada en la frontera entre Chile y Bolivia formada, de norte a sur, por los volcanes Humarata, Acatongo, Capurata y Guallatiri (González-Ferrán, 1995) donde la actividad eruptiva a migrado en esa misma dirección durante el Cuaternario, siendo el volcán Guallatiri el único activo actualmente (Watts y otros, 2014).

Este edificio volcánico exhibe actividad desgasificante permanente en su flanco suroccidental y en su cráter (Inostroza y otros, 2020a), y media de 0,7 sismos volcanotectónicos por día (Pritchard y otros, 2014). Corresponde a un complejo de composición predominantemente andesítica y dacítica, siendo el volcán más austral de los Andes Centrales con una capa de hielo permanente (Watts y otros, 2014), caracterizado por la superposición de domos, lavas-domos, depósitos de flujos piroclásticos, depósitos laháricos y depósitos de caída (SERNAGEOMIN, 2021).

El basamento del volcán Guallatiri está formado principalmente por unidades volcánicas y sedimentarias continentales de edad Oligoceno Superior-Pleistoceno, las que rellenan la cuenca Lauca (Sepúlveda y otros, 2021). Las unidades más antiguas se ubican al norte, oeste y sur del volcán y corresponden a la Formación Lupica (Watt y otros, 2014).

La Formación Lupica (Oligoceno Superior-Mioceno inferior) fue definida por Montecinos (1963) y corresponde a una unidad volcanosedimentaria con dominancia de lavas andesíticas-dacíticas y tobas (incluida la ignimbrita del Cordón Belén) con intercalaciones de rocas sedimentarias (areniscas, brechas, conglomerados, fangolitas), tiene un espesor máximo de 3.700 m y está leve a moderadamente plegada (García y otros, 2003). En el Mioceno, se depositaron, en la parte occidental del volcán, lavas andesíticas a dacíticas (García y otros, 2004 en Sepúlveda y otros, 2021). Durante el Plioceno-Pleistoceno, en las partes sur y oeste del edificio, se formó una cuenca intravolcánica que se relleno parcialmente por depósitos lacustres y aluviales de la Formación Lauca (120 m de espesor), intercaladas en su parte superior por la Ignimbrita Lauca (Kött y otros, 1995).

Watts y otros (2014) afirman que la evolución del volcán Guallatiri se puede dividir en dos etapas; etapa I (Pleistoceno medio) caracterizada por la formación de gruesos flujos de lava, y etapa II (Pleistoceno superior-Holoceno superior) por complejos de domos y depósitos piroclásticos. Complementariamente, Sepúlveda y otros (2021) especifican que

el volcán Guallatiri ha evolucionado en siete unidades diferentes (Figura 2.1): Guallatiri 1 (Pg1), Guallatiri 2 (Pg2), Guallatiri 3 (Pg3), Guallatiri 4 (Pg4), Guallatiri 5 (Pg5), domo Tinto y Sur (Hts) y Guallatiri 6 (Pg6), además de depósitos glaciares (Qg). Donde las unidades Pg1, Pg2, Pg3 y Pg4 corresponden a gruesos flujos de lavas cratéricas (< 238 m) del Pleistoceno e ilustran la primera etapa de evolución. En cambio, las unidades Pg5 y Pg6, en una segunda etapa de evolución, muestran una actividad más explosiva (< 7,21 km<sup>3</sup>) durante el Pleistoceno superior-Holoceno, caracterizadas por la formación de lavas-domos, domos tipo “torta”, depósitos de caída y flujos piroclásticos. Asimismo, Hts corresponde a dos domos jóvenes de pequeño volumen (~2,0\*10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>) ricos en cristales andesíticos de alto K anidados en el flanco SW. Por su parte, los depósitos glaciares corresponden a morrenas laterales y frontales diseminadas alrededor del edificio volcánico, encontrándose en discordancia erosiva con las demás unidades (a excepción de Pg6) y ocasionalmente cubiertos por depósitos de caída.

Con una tasa de erupción de 0,36 km<sup>3</sup>/ka el volcán Guallatiri ha sido uno de los volcanes más activos durante el Pleistoceno-Holoceno (Sepúlveda y otros, 2021). El registro histórico indica que se desarrollaron pequeñas erupciones en 1779, 1802, 1826 y 1859, eyección de gases y tefra en 1913 y 1959 junto con una erupción freática en diciembre 1960, además de un importante aumento en la actividad fumarólica en 1987 y 1997 (Petit-Breuilh, 2004), todos con un valor de índice de explosividad volcánica (VEI) de 1-2 (Casertano, 1963 en Sepúlveda y otros, 2021). El 31 de mayo 2015, se reportó una deformación del suelo y dos sismos volcanotectónicos, modificando la alerta técnica a nivel amarillo (SERNAGEOMIN, 2015). El evento eruptivo de mayor magnitud ocurrió durante el Holoceno, tratándose de una erupción subpliniana a pliniana con un VEI igual a 4-5 (Rodríguez y Bertín, 2018).

Debido a su registro eruptivo y la cercanía a asentamientos humanos, el volcán Guallatiri es uno de los volcanes que presenta un mayor riesgo para el norte de Chile, siendo Chungará Viejo, Ancuta y Guallatire las localidades que serían más afectadas, al ubicarse a un máximo de 13 km de distancia del volcán (Reyes y otros, 2021). Sumado a lo anterior, la existencia de un casquete glacial permanente constituye una fuente potencial para la generación de lahares (SERNAGEOMIN, 2021), sobre todo en los flancos oeste y suroeste, los que podrían desplazarse hasta 19 km (Reyes y otros, 2021). Este mismo sector sería el más afectado por flujos piroclásticos y coladas de lavas, alcanzando 10 y 7 km respectivamente. En cambio, el lado este del volcán se vería más afectado por material de

caída, dependiendo de la dirección y velocidad del viento, llegando incluso a Paraguay (Reyes y otros, 2021).

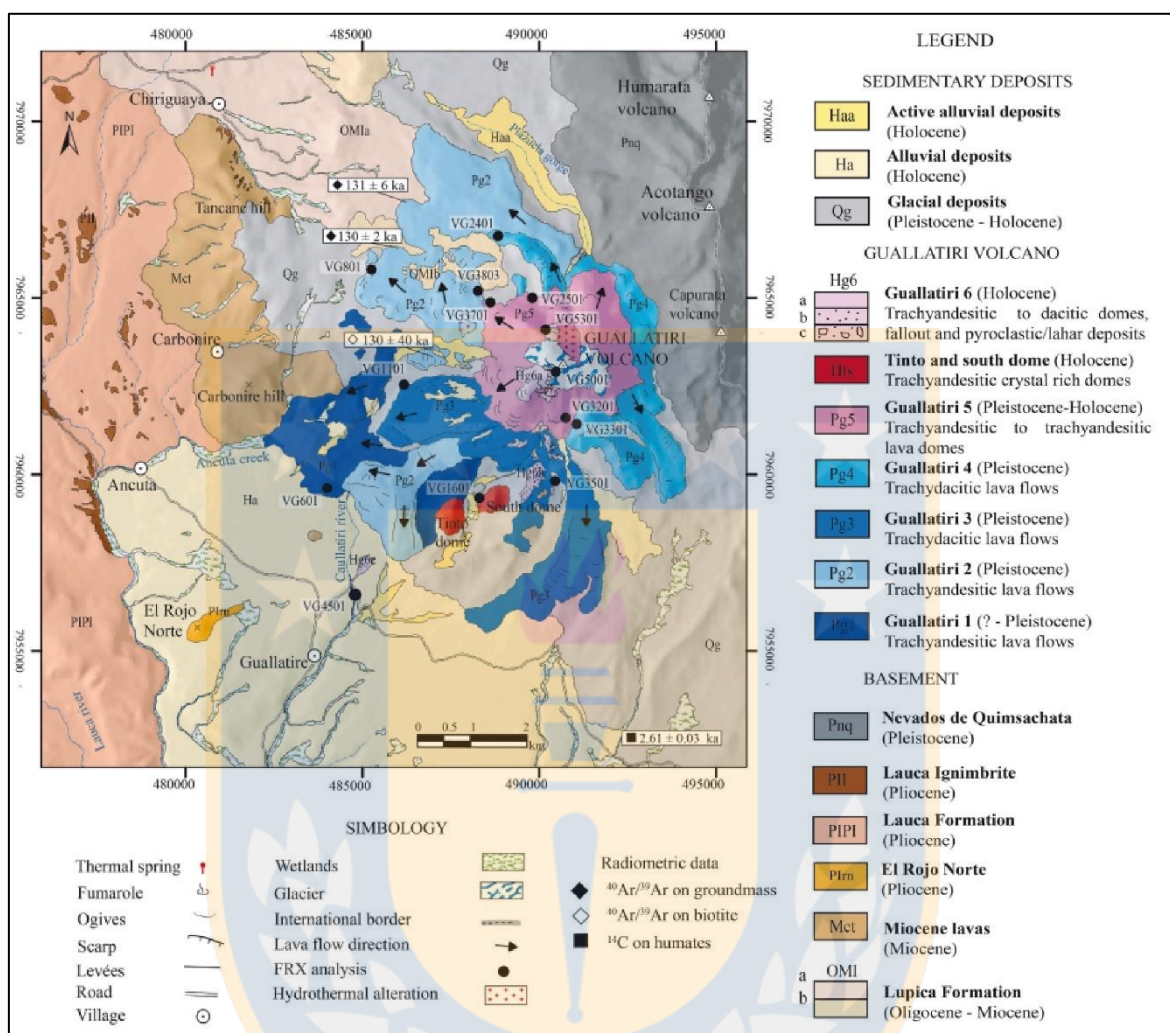


Figura 2.1: Mapa geológico del volcán Guallatiri. Obtenido de Sepúlveda y otros (2021).

## 2.2.2. Actividad geotermal

Como ya se mencionó, el volcán Guallatiri presenta una persistente actividad fumarólica, evidenciada por dos campos fumarólicos; uno en el cráter (*Summit Fumarolic field*, SF) y otro en el flanco suroccidental (*SW Fumarolic field*, SWF) (Inostroza y otros, 2020a), y con las piscinas burbujeantes de Chirigualla (Aguilera, 2008).

Los campos fumarólicos muestran respiraderos en forma de cono y numerosas emisiones de tipo chorro, con flujos de azufre de hasta 15 m de largo, mostrando una clara firma magmática profunda parcialmente modificada por procesos secundarios que ocurren a bajas profundidades, como la adición de fluidos corticales. La composición de los gases está dominada por el vapor de agua, seguida por  $\text{CO}_2$ , luego por  $\text{H}_2\text{S}$  y  $\text{SO}_2$ , con

concentraciones menores de HCl, HF, N<sub>2</sub> y H<sub>2</sub> (Inostroza y otros, 2020a). Esta vigorosa actividad, se asocia con la formación de sublimaciones e incrustaciones en los campos fumarólicos, identificándose doce minerales relacionados a seis familias distintas. Los depósitos originados forman cuatro zonas (gris, rojo, amarillo-naranja y amarillo-blanco) composicionalmente distintas, dependiendo de la temperatura de los gases emitidos, los cuales alcanzan hasta los 265 °C (Inostroza y otros, 2020b).

En el SF, situado a 50 m bajo la cumbre (Inostroza y otros, 2020b), se encuentran tres cráteres de explosión de hasta 5 m de diámetro con temperaturas de salida de gas entre 80,3-265 °C (Inostroza y otros, 2020a). Gliß y otros (2017) obtuvieron tasas de emisión promedio entre 8,6 a 129,6 t/d y máximas de 216 t/d, con vientos que alcanzaron los 4,5 m/s. Arratia (2019), determinó una emisión de  $5,5 \pm 2,8$  a  $48,3 \pm 11,2$  t/d y una velocidad de la pluma de 11 m/s. Por su parte Aguilera y otros (2020), estimaron una velocidad de la pluma entre 1,0 y 10,3 m/s, con una emisión de SO<sub>2</sub> promedio de  $49,9 \pm 15,5$  t/d

En el SWF, las fumarolas están alineadas con una fractura de ~400 m de longitud NE-SW, probablemente relacionado con un sistema de fallas (Inostroza y otros, 2020b), con respiraderos de hasta 3 m de alto y 6 m de diámetro, y temperaturas de salida de 80,2-251 °C aumentando la temperatura en dirección W-E (Inostroza y otros, 2020a).

Las piscinas burbujeantes (de 1 a 1,5 m de diámetro) de Chirigualla, se ubican a 12,5 km al NW del volcán, corresponden a un centro de continua emisión de gases, y están rodeadas por una costra de sínter blanca (Aguilera, 2008). Presenta altos valores de TDS (total de sólidos disueltos), temperaturas de 20,9-50,1 °C, pH casi neutro (6,63-7,8) y una composición de los gases empobrecida en gases magmáticos (SO<sub>2</sub>, HF y HCl) y enriquecida en CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S e hidrocarburos ligeros formados en condiciones hidrotermales, representando la descarga distal de fluidos del volcán Guallatiri (Inostroza y otros, 2020a).



### 3. MARCO TEÓRICO

#### 3.1. Gases volcánicos

Los gases volcánicos son fluidos calientes emitidos desde zonas volcánicas. La composición de ellos es el resultado de una mezcla de componentes corticales, atmosféricos, mantélicos e hidrosféricos (Fisher y Chiodini, 2015). Los volátiles de las diferentes fuentes se transfieren entre ellas por medio de la actividad volcánica y la subducción (Fisher, 2008). Dentro de los gases volcánicos están los gases magmáticos e hidrotermales; los gases magmáticos se liberan directamente del magma, desde los cráteres o flancos del volcán, en cambio, los gases hidrotermales son el resultado de la interacción de gases magmáticos con una fase líquida o la roca de caja. La abundancia relativa de los gases principales, gases trazas, isótopos nobles y estables proporcionan información sobre el origen de las especies individuales de gas y de procesos que se desarrollan en profundidad y superficie (Fisher y Chiodini, 2015), de ahí la importancia de su monitoreo y estudio.

La desgasificación pasiva emite entre el 90-99% de los volátiles totales descargados por los volcanes, siendo el H<sub>2</sub>O la especie más abundante (80-97%), seguida por el CO<sub>2</sub>, especies sulfuradas (SO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S), y menores cantidades de CO, HF, HCl, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>, entre otros. La composición química de las fumarolas es afectada por la temperatura de estas; aquellas de alta temperatura (> 400 °C; gases magmáticos) son más ricas en gases ácidos como SO<sub>2</sub>, HCl y HF, en comparación con fumarolas de temperaturas medias (100-400 °C) o manantiales burbujeantes de baja temperatura (< 100 °C; gases hidrotermales) donde estos gases están ausentes, pero hay abundancia en CH<sub>4</sub> y H<sub>2</sub>S por sobre SO<sub>2</sub> y CO respectivamente (Fisher y Chiodini, 2015).

La extrapolación de estimaciones de las emisiones está cargada de grandes incertidumbres, en especial para especies que se ven afectadas por contribuciones hidrotermales (H<sub>2</sub>O, Cl y F), contaminación atmosférica (N<sub>2</sub>, Ar, Ne) o son extremadamente variables en sus emisiones (H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, etc.) (Fisher, 2008). A pesar de esto, Tamburello y otros (2014), sugieren que existe una composición relativamente uniforme a lo largo de todo el arco chileno, con un miembro terminal de gas magmático característico común, con relaciones de H<sub>2</sub>O/CO<sub>2</sub> = 30-40, CO<sub>2</sub>/S<sub>total</sub> = 0,9-2,2 y S<sub>total</sub>/HCl = 1.4-3,4. Estos mismos autores estiman, para la CVZ, una emisión total de H<sub>2</sub>O de (8-12) x 10<sup>6</sup> t/yr, (6,4-7,3) x 10<sup>5</sup> t/yr de CO<sub>2</sub> y 6.7 x 10<sup>5</sup> t/yr de SO<sub>2</sub>.

### 3.2. Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>)

La relativa alta abundancia en la pluma volcánica de SO<sub>2</sub> (2-12% de masa molar), su bajo contenido atmosférico (< 10 ppb), su fuerte absorción en los rayos ultravioleta, y su sensibilidad a los cambios entre desgasificación eruptiva y pasiva, hacen que el SO<sub>2</sub> sea un excelente ejemplar para la medición remota (Fisher, 2008). Además, el flujo de SO<sub>2</sub> es sumamente útil debido a que se considera un sustituto del flujo de magma, al tener un origen exclusivamente magmático, asumiendo disolución completa del gas y transporte sin pérdidas hasta el punto de medición (Mori y Burton, 2006).

El conocimiento de la concentración de S original en el magma permite determinar el volumen de magma desgasificante, lo cual es crucial tanto para las interpretaciones de las observaciones geofísicas-vulcanológicas como en la evaluación del peligro volcánico, ya que existe una correlación entre la actividad volcánica y el flujo de SO<sub>2</sub> (Mori y Burton, 2006). Nadeau (2011), afirma que existe un vínculo en la fuente entre la desgasificación y la actividad sísmica, donde a mayor volumen de burbujas se producen señales de temblor de mayor amplitud, e implicaría una mayor tasa de emisión de SO<sub>2</sub>. La desgasificación del S puede ejercer una influencia sustancial sobre la evolución magmática y puede implicar impactos en la atmósfera, clima y ecosistemas terrestres. Por lo tanto, el entender la desgasificación de S volcánico nos da información sobre procesos magmáticos, volcánicos, hidrotermales, impactos del volcanismo en el sistema terrestre, y ciclos biogeoquímicos (Oppenheimer, 2011).

Además, el desarrollo de técnicas de escaneo automatizado, como el mini DOAS, ha reducido el período de mediciones de días a pocos minutos (Mori y Burton, 2006). Esto último, junto con su bajo costo, tamaño y peso (Wilkes y otros, 2017) hace que la medición de SO<sub>2</sub> sea excelente para el monitoreo volcánico.

### 3.3 Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)

El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) es el segundo gas más abundante en las plumas volcánicas (Fisher y Chiodini, 2015), y es un regulador no antropogénico clave de los niveles de CO<sub>2</sub> atmosféricos, afectando la evolución del clima de la Tierra a escalas geológicas (Fisher y otros, 2019). Los volcanes liberan CO<sub>2</sub> por expulsión directa desde las fumarolas y como emanaciones difusas en períodos de reposo, ya sea por grietas, rocas o suelo (Fisher y otros, 2019).

Las observaciones directas de CO<sub>2</sub> volcánico son considerablemente dificultoso debido a la gran presencia en la atmósfera de este gas, por lo que siguen siendo bien

limitadas. Además, las redes de observación se encuentran en desarrollo, obteniendo flujos de CO<sub>2</sub> con menos de 60 de los cientos de volcanes activos que actualmente presentan desgasificación, lo que da como resultados catálogos escasos e incompletos (Aiuppa y otros, 2019). Sin embargo, el flujo de CO<sub>2</sub> de los arcos puede aproximarse utilizando la relación CO<sub>2</sub>/<sup>3</sup>He de los gases volcánicos en los arcos y la tasa de emplazamiento de los magmas, asumiendo que el contenido <sup>3</sup>He del miembro final del manto es el de la fuente MORB (Marty y Tolstikhin, 1998). Estos autores estiman un flujo de 2,5 x 10<sup>12</sup> mol/a, donde cerca del 80% del carbono proviene de la subducción.

Sano y Marty (1995), afirman que el carbono de los arcos puede provenir de las dorsales oceánicas, sedimentos ricos en materia orgánica subducidos o a material carbonatado del slab o de la alteración de la corteza.

### 3.4. Gases nobles

Los gases nobles son químicamente inertes, por lo que sus concentraciones en las emisiones volcánicas están controladas por las concentraciones de la fuente y por procesos físicos de esta, como la distribución entre fase líquida y vapor de los diferentes elementos (Ohwada y otros, 2003).

Los estudios de estos elementos (He, Ne, Ar) pueden dar restricciones sobre los procesos físicos y químicos que se desarrollan en los sistemas hidrotermales (Ohwada y otros, 2003). En específico, su estudio isotópico tiene el potencial de limitar el origen de las especies de gases individuales presentes (Fisher y Chiodini, 2015). El He ha llamado mucho la atención por ser un poderoso trazador debido a su concentración traza en el aire (5,4 ppm), tener una amplia gama de proporciones y por sus dos inequívocos orígenes (manto y corteza), los cuales pueden ser discriminados por medio de sus isótopos. El <sup>3</sup>He de origen mantélico (isótopo primordial), y el <sup>4</sup>He resultado de la desintegración de U y Th a Pb (Fisher y Chiodini, 2015).

De esta manera, altas razones de <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He en un fluido indicarían proveniencias desde el manto, mientras que razones bajas se relacionan más con la corteza, pudiendo identificar la contribución relativa de la corteza y el manto al magma y por consiguiente a su fluido derivado.

La distribución de los isótopos de He se expresa como R/Ra, donde R es la razón <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He (indicador sensible de gases de origen profundo; Agosto, 2011) en el gas volcánico y Ra la razón <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He atmosférica (= 1,4x10<sup>-6</sup>), utilizada como referencia. Según Hilton y otros (2002), el manto superior tiene una proporción globalmente uniforme de 8 ± 1 Ra, las emisiones volcánicas de los puntos calientes pueden alcanzar hasta 28 Ra.

En cambio, los volátiles puramente corticales tienen proporciones  $\ll 1$  Ra y generalmente se asume un miembro terminal cortical de 0,04 Ra. En zonas de subducción, esta proporción está controlada mayoritariamente por el espesor cortical (Fisher y Chiodini, 2015), con una media global de 5,37 Ra (Hilton y otros, 2002), con un rango de valores desde 1,21 Ra (volcán Guallatiri; Inostroza y otros, 2020a) hasta los 7,29 Ra (volcán Láscar; Aguilera, 2008) para el norte de Chile.

El Ar y el Ne son buenos indicadores de contaminación de aire, al tener valores atmosféricos notablemente mayores que el He y de las otras dos posibles fuentes terrestres, mantélicas o corticales. La relación Ne/Ar permite estimar contribuciones de componentes con impronta atmosférica, al ser considerados elementos incorporados por fracturas y aguas subterráneas saturadas en aire (Agosto, 2011).

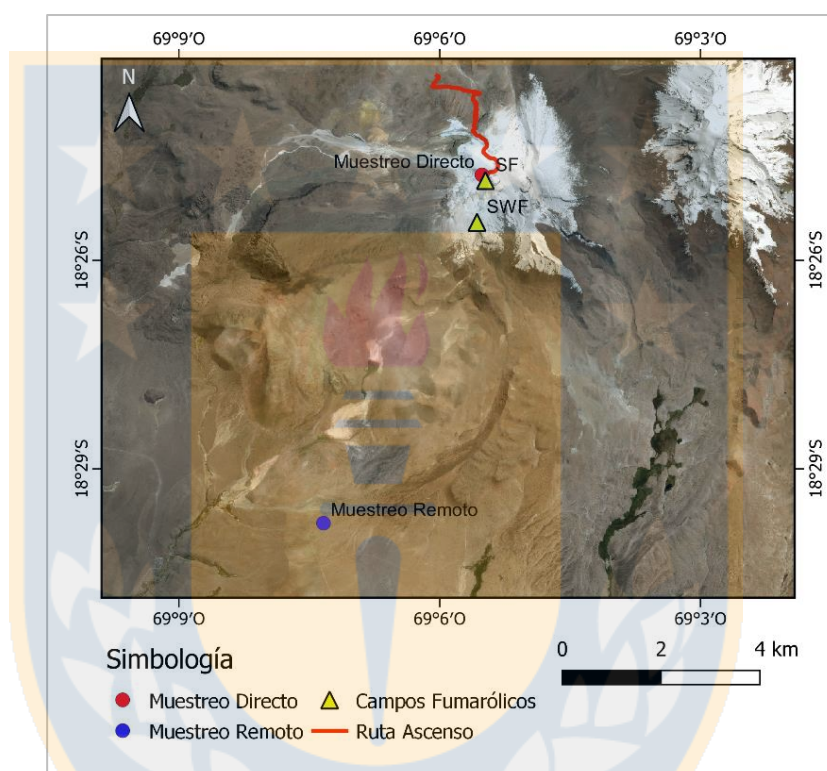




## 4. RESULTADOS

### 4.1. Condiciones generales de terreno

El 20 de agosto de 2021 se llevó a cabo la medición directa en el SF, entre las 13:00 y 14:30 hrs local. Se tomaron dos muestras de ampollas al vacío, dos rellenas con una solución básica (GUA-27 y GUA-28) y una de condensado de gas. Además, ese mismo día y el 21 de agosto de 2021 se realizó la medición remota de las emisiones gaseosas por ambos métodos. La ubicación exacta se muestra en las figuras 4.1, y 4.2.



**Figura 4.1: Mapa de ubicación de mediciones,** mostrando los lugares exactos de las mediciones, la ruta de acceso al cráter desde el estacionamiento de la camioneta y los campos fumarólicos. Tomada y modificada del *software Google Earth Pro*.



**Figura 4.2: a. Fotografía del lugar de medición remota,** de coordenadas  $18^{\circ}29'25,54''S$  y  $69^{\circ}07'20,35''W$ . **b. Fotografía del lugar de medición directa,** de coordenadas  $18^{\circ}25'24,98''S$  y  $69^{\circ}05'30,59''W$ .

Para ambos días de medición remota hubo condiciones en común; como el lugar de medición, la altitud de 4.337 m s.n.m., una distancia a la pluma cratérica de 8.070 m en línea recta, condiciones meteorológicas de cielo despejado con brisas de aire mínimas con ráfagas esporádicas de baja velocidad e intensa luz solar proveniente del este, dirección de la pluma hacia el SE, entre otras, que se resumen en la tabla 4.1.

**Tabla 4.1: Resumen de características en común a ambos días de medición remota.**

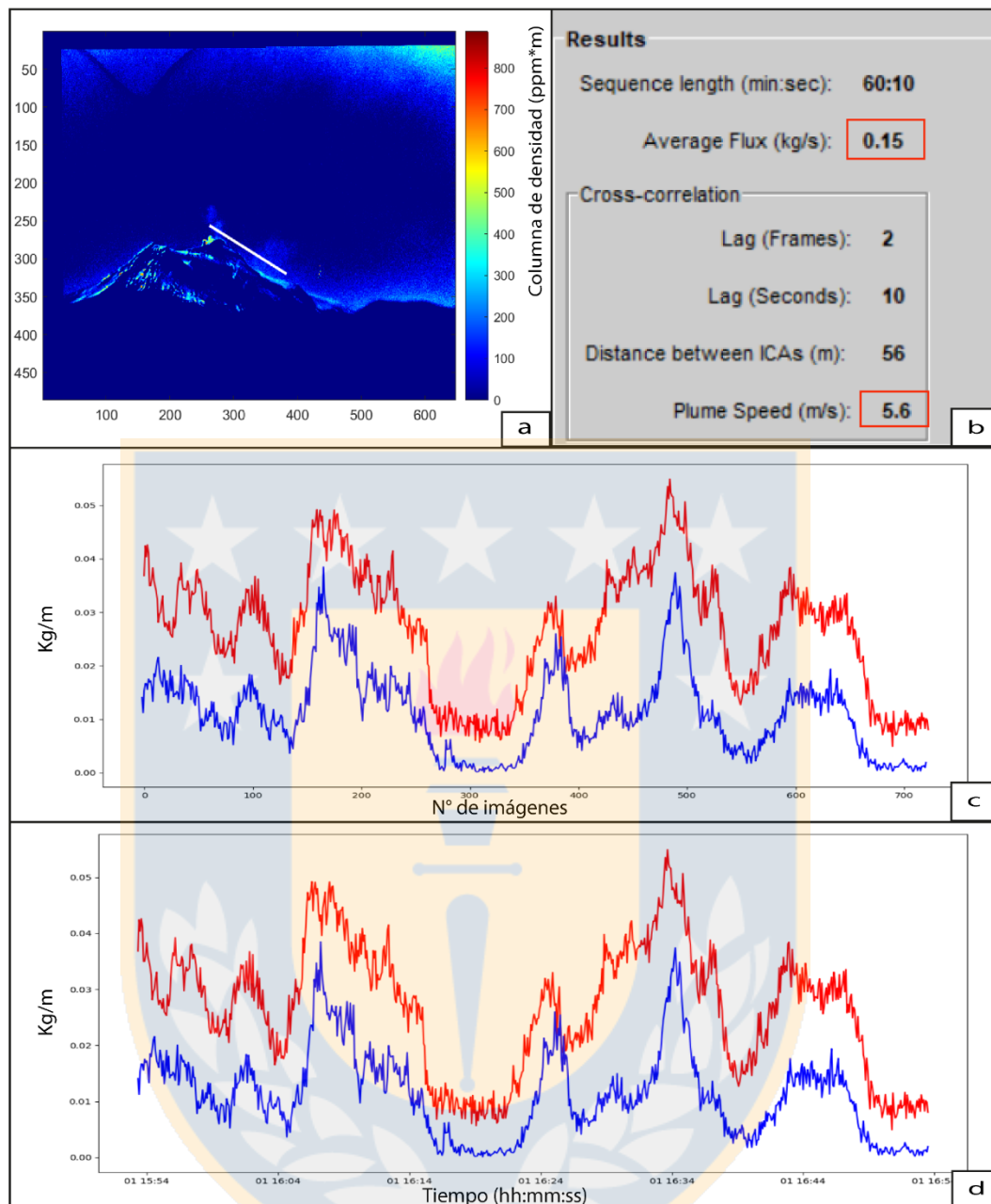
Coordenada W	69°07'20,35"
Coordenada S	18°29'25,54"
Altitud (m s.n.m.)	4.337
Distancia a SF (m)	8.070
Distancia a SWF (m)	7.300
Dirección de la pluma	SE
Altura de la pluma sobre el cráter (m)	1000
Color de la pluma	Blanca al inicio, azulina a mayor altura
Características meteorológicas	Cielo despejado

## 4.2. Cámaras PiCam

### 4.2.1. Mediciones en terreno

Se utilizaron dos cámaras PiCam UV para la medición remota; PiCam 1 (cámara negra) y PiCam 10 (cámara gris). En ambas, las secuencias obtenidas fueron procesadas por el *software PostProcess\_v2.1.4*, obteniendo imágenes con concentraciones de columnas de densidad en ppm\*m (Anexo 1), flujos de SO<sub>2</sub> en kg/s, velocidades de la pluma volcánica en m/s y gráficos de emisión de SO<sub>2</sub> en función del tiempo y del número de imagen (Figura 4.3). A cada concentración de SO<sub>2</sub> en kg/s obtenida, se multiplicó por un factor de conversión igual a 86,4 para transformar la unidad a tonelada/día (t/d).

Se obtuvo un total de 7 secuencias a analizar para ambos días de medición. El número de fotografías capturadas oscila entre las 704 y 1.462 para ambos lentes, en un lapso de captura de 30 a 60 min, entre las 11:00 y 13:46 hrs local, como se detalla en la tabla 4.2 junto a la configuración utilizada en las cámaras.



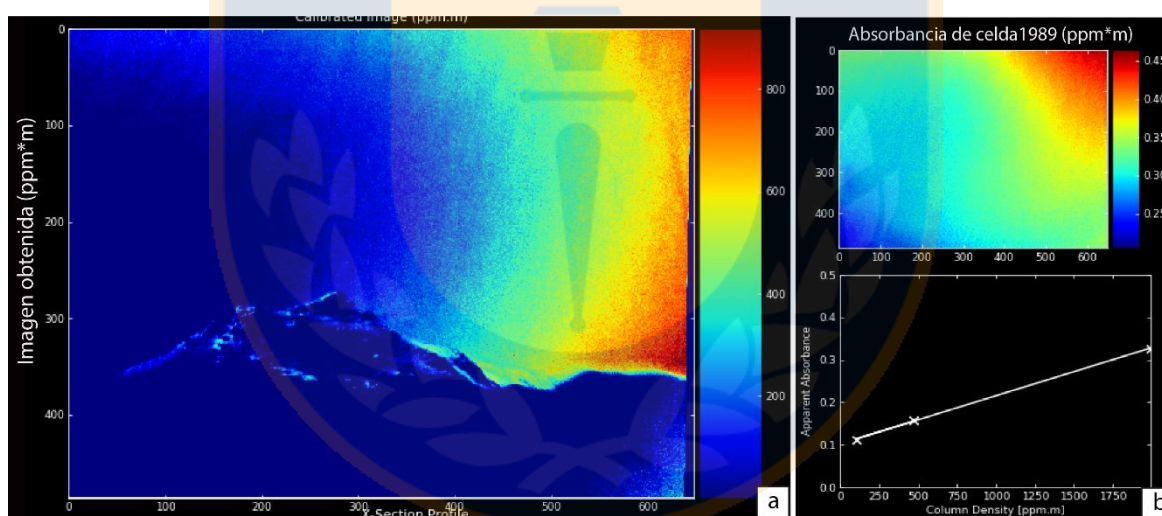
**Figura 4.3: Resultados entregados por el software PostProcess\_v2.1.4.** a. Imagen del volcán Guallatiri con las concentraciones de SO<sub>2</sub> en ppm\*m. b. Cuadro de resultados, se destaca en cuadros rojos la concentración de SO<sub>2</sub> en kg/s y la velocidad de la pluma en m/s. c. Gráfico de las ICA's en función del número de imágenes. d. Gráfico de las ICA's en función del tiempo de medición, se observa un pequeño desacople entre las dos curvas.

Como se aprecia en la tabla 4.2, en dos secuencias fue imposible obtener datos. En la primera secuencia de la cámara PiCam 10 del día 20 de agosto, la falta de datos se asocia a la intensa luz solar presente en el día de medición. Respecto a la secuencia 5 de la PiCam 1 de ese mismo día, la ausencia de resultados se relaciona con una intensa luz solar que genera mucho ruido de fondo, por lo que el instrumento fue incapaz de captar

correctamente el  $\text{SO}_2$ , y con una calibración con muy baja absorbancia y mal ajuste al origen (Figura 4.4).

**Tabla 4.2: Detalles de las características de medición junto con las horas de medición de cada secuencia.**

PiCam	Fecha	Secuencia	Calibración	Hora			Shutter Speed (ms)		Framerate (Hz)	Imágenes	
				Inicio	Final	Rango (min)	A	B		Capturadas	Procesadas
PiCam 10 (Gris)	20-08-2021	1	1	11:00	12:00	60	650	100	0,2	1452	0
		2	2	12:17	13:17	60	650	100	0,2	1462	1462
	21-08-2021	1	1	11:14	11:44	30	550	80	0,2	704	704
		2	2	11:53	12:53	60	550	80	0,2	1446	1446
PiCam 1 (Negra)	20-08-2021	2	2	12:46	13:46	60	550	80	0,2	1432	1432
		5	3	14:10	15:20	60	550	80	0,2	1428	0
	21-08-2021	1	1	11:06	11:50	44	500	80	0,2	1066	1066

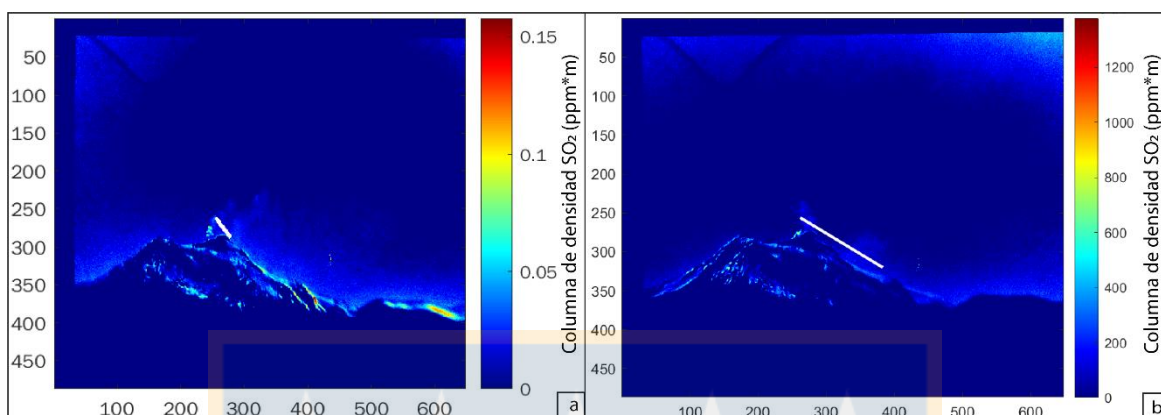


**Figura 4.4: a. Imagen del volcán Guallatiri representativa de la secuencia 5 de la PiCam 1 el 20-08-2021, con mucho ruido de fondo hacia la derecha de la imagen, generada por la intensa luz solar proveniente del E. b. Superior: gráfico de la calibración 3 a los 1.998 ppm\*m de  $\text{SO}_2$ , mostrando una muy baja absorbancia de  $\text{SO}_2$ . b. Inferior: curva de calibración obtenida en base las tres celdas de calibración, con mal ajuste inicial, su gradiente fue multiplicado en cada píxel de las imágenes procesadas convirtiéndolos en valores de ppm\*m.**

Como se mencionó en el capítulo 1.5 de metodología, para obtener el flujo de  $\text{SO}_2$ , es necesario realizar una ICA perpendicular a la dirección de la pluma. Dependiendo de la ICA utilizada se puede determinar el flujo de ambos centros fumarólicos, o de cada uno en



particular. En la figura 4.5 se observan las ICA's utilizadas para la obtención del flujo de  $\text{SO}_2$  para el SF y para SF + SWF en conjunto.



**Figura 4.5:** a. Imagen del volcán Guallatiri con la ICA utilizada para determinar el flujo de  $\text{SO}_2$  del SF, representada por la línea blanca. b. Imagen del volcán Guallatiri con la ICA utilizada para determinar el flujo de  $\text{SO}_2$  para ambos centros fumarólicos (SF + SWF), representada por la línea blanca.

#### 4.2.2. Emisiones de $\text{SO}_2$

De todos los procesamientos realizados se tomaron en cuenta aquellos más representativos de cada secuencia, sus detalles y características de medición se especifican en el Anexo 2. A partir de estos resultados se obtuvo una emisión de  $\text{SO}_2$  promedio igual a  $22,81 \pm 5,14$  t/d y una velocidad de la pluma de 3,4 m/s.

En específico, la PiCam 10 promedió  $29,0 \pm 6,2$  t/d de  $\text{SO}_2$  con una velocidad de 3,2 m/s, con un flujo máximo de emisión igual a  $74,3 \pm 8,6$  t/d (para la secuencia 1 del 21 de agosto) y un flujo mínimo de  $6,9 \pm 5,1$  t/d (para la secuencia 2 del día 21 de agosto), ambos resultados entregados por el método CP. Respecto a la PiCam 1 esta dio una emisión promedio igual a  $13,53 \pm 3,6$  t/d, una velocidad de 3,6 m/s, un flujo máximo y mínimo igual a  $33,70 \pm 4,3$  t/d (secuencia 1 del 21 de agosto) y  $1,73 \pm 3,2$  t/d (secuencia 2 del 20 de agosto) respectivamente, procesados con el método OCV (Anexo 2).

Si se considera el valor más elevado de cada secuencia analizada, procesando el total de las imágenes, se obtiene un promedio de  $\text{SO}_2$  igual a  $19,4 \pm 3,8$  t/d y una velocidad de la pluma de 3,7 m/s (Tabla 4.3). La cámara PiCam 10 presenta valores superiores en comparación con la cámara PiCam1;  $22,1 \pm 4,1$  t/d versus  $15,1 \pm 3,5$  t/d.

Como ya se ha mencionado en varias ocasiones, el volcán Guallatiri tiene dos campos fumarólicos; SF y SWF. Al tratar de estimar la concentración de cada uno en particular se obtuvieron resultados únicamente para el SF, con una emisión promedio igual

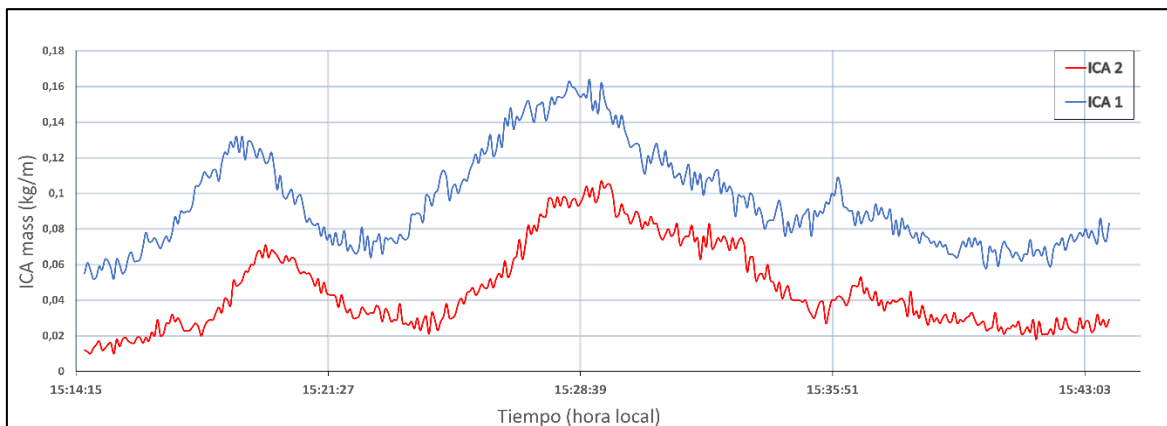
a  $18,5 \pm 3,7$  t/d de  $\text{SO}_2$  y una velocidad de 4,0 m/s. Al igual que para el resto de los resultados presentados, la cámara PiCam 10 arrojó valores superiores que la cámara PiCam 1;  $22,9 \pm 3,7$  t/d para la primera versus  $15,55 \pm 3,8$  t/d para la segunda. La falta de resultados para el SWF en específico se discutirá más adelante.

**Tabla 4.3: Resumen de las emisiones obtenidas para cada una de las secuencias si se procesan el total de las imágenes.**

PiCam	Día	Secuencia	N° Imágenes procesadas	Calibración	Doc Fluxes.txt	Emisión $\text{SO}_2$ (t/d)			Velocidad viento (m/s)	Campo fumarólico	Método analítico
						Promedio	Máximo	Mínimo			
Gris (10)	20-08-2021	2	1462	2	25	$25,1 \pm 3,8$	44,1	17,3	5,3	SF	CP
	21-08-2021	1	704	1	1	$20,7 \pm 3,5$	31,1	13,0	3,5	SF	CP
		2	1446	2	36	$20,7 \pm 4,9$	38,9	8,6	2,4	SF + SWF	CP
Promedio:						$22,2 \pm 4,1$	38,0	12,9	3,7		
Negra (1)	20-08-2021	2	1432	2	41	$10,36 \pm 2,63$	22,464	3,456	4,1	SF	OCV
	21-08-2021	1	1066	1	44	$19,87 \pm 4,31$	33,696	10,4	3	SF	OCV
	Promedio:						$15,1 \pm 3,5$	28,08	6,93	3,6	
Promedio:						$19,4 \pm 3,8$	34,0	10,5	3,7		

#### 4.2.3. Determinación de la velocidad del viento

La velocidad de la pluma se calcula por medio de la técnica de *cross-correlation*, que utiliza dos funciones o ICA's paralelas entre ellas y perpendiculares a la dirección de propagación de la pluma. Estas secciones transversales presentan una cantidad de gas en ppm\*m que se desplaza a lo largo de imágenes sucesivas. Entonces, el método compara la similitud de ambas ICA's en base al desplazamiento de una respecto a la otra, calculando el retraso de tiempo entre las dos series de tiempo (Figura 4.6).



**Figura 4.6** Gráfico de las 2 funciones ICA de *cross-correlation* con sus tiempos correspondientes, obtenida para el total de imágenes de la secuencia 1 del 21 de agosto con la cámara PiCam 10.

#### 4.2.4. Estimación de incertidumbres

Como se mencionó en el capítulo 2 de metodología, existen varios factores que pueden causar una sobre o subestimación del flujo de  $\text{SO}_2$ . Para cada uno de estos factores se calculó la incertidumbre correspondiente (Anexo 2), según lo descrito y explicado por Layana (2022) en su tesis doctoral.

La incertidumbre (I) de la velocidad de la pluma se calculó a partir de la distancia entre las dos ICA's realizadas y una incertidumbre de la distancia a la pluma de 50, 100 y 200 m, según las siguientes ecuaciones:

$$I_{\text{Total}} = \sqrt{(I_{\text{ICA}})^2 + (I_{\text{Tiempo}})^2} \quad (1)$$

$$I_{\text{ICA}} = \frac{I_{\text{distancia a la pluma}}}{\text{Distancia a la pluma}} \quad (2)$$

$$I_{\text{Tiempo}} = \frac{\text{tiempo de adquisición de las imágenes}/2}{\text{tiempo de respuesta de la cámara}} \quad (3)$$

La incertidumbre asociada a la calibración se pudo realizar solamente cuando se efectuaron mínimo dos calibraciones válidas para un mismo día. Esta se calcula restando las pendientes de las calibraciones obtenidas, según:

$$I_{\text{Calibración}} = \frac{\text{Calibración 1} - \text{Calibración 2}}{\text{Calibración 1}} \quad (4)$$

La incertidumbre asociada al llenado de gas contenido en las celdas de cuarzo es de  $\pm 10\%$ , según el fabricante. Al estar midiendo perpendicular a la dirección de propagación de la pluma esta incertidumbre se considera insignificante. Respecto a la dilución de la luz se

asume un error de  $\pm 20\%$ , al estar a más de 5 km de la fuente de emisión, aunque este error podría estar subestimado.

Respecto a la incertidumbre de la detección de  $\text{SO}_2$  esta se calcula a partir de la diferencia entre las calibraciones al cielo limpio ( $\Delta C$ ), del número de píxeles en la sección transversal de la pluma (N) y del ancho de cada píxel (h) en base de la siguiente ecuación:

$$I_{\text{ICA}} = \sqrt{N(\Delta C * h)^2} \quad (5)$$

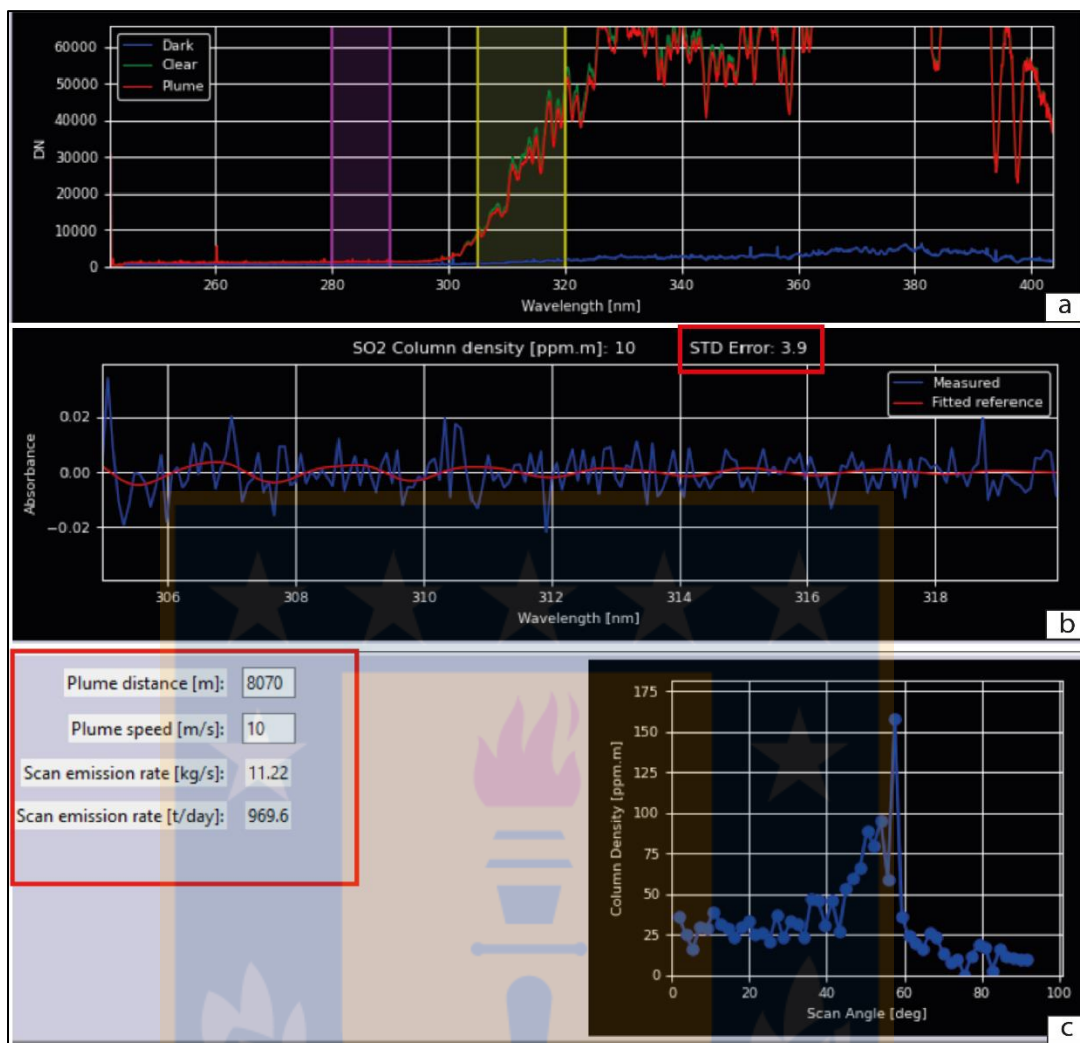
Esto arroja un error del orden del 1%, únicamente para la detección del  $\text{SO}_2$ . Si se promedia el total de las incertidumbres calculadas se tiene un error de  $\pm 6,2\%$ , lo que es un valor muy bajo.

### 4.3. DOAS

#### 4.3.1. Condiciones generales

Todos los datos medidos en terreno se procesaron por el el *software SpecScan*, a una velocidad del viento fija, obteniendo un gráfico de columna de densidad en ppm\*m en función del ángulo de escaneo, un gráfico de la calibración *clear, dark* y de la pluma en función de la longitud de onda y un gráfico de la columna de densidad en ppm\*m de la medición ajustada a un estándar (Figura 4.7).





**Figura 4.7:** Resultados entregados por el software *SpecScan* al procesar los datos medidos por el DOAS, para el scan 17 del día 20 de agosto. **a.** Gráfico de la calibración *clear*, *dark* y de la pluma en función de la longitud de onda, se observa un buen ajuste lineal entre el *clear* y la pluma en el cuadro amarillo (correspondiente a la absorción del SO<sub>2</sub>) y una baja absorción para el *dark*. **b.** Gráfico de la columna de densidad en ppm\*m medida y ajustada a un estándar, se resalta en un cuadro rojo el error arrojado igual a 3,9. **c.** Gráfico de la columna de densidad en ppm\*m en función del ángulo de escaneo, se aprecia un *peak* positivo a los 60°, en el lado izquierdo se resalta en cuadro rojo los parámetros utilizados (distancia a la pluma y velocidad del viento) y el flujo de SO<sub>2</sub> obtenido tanto en kg/s como en t/d.

Se registró un total de 141 y 117 scan para los días 20 y 21 de agosto respectivamente. La totalidad fueron procesados a una velocidad máxima de la pluma volcánica equivalente a 10 m/s. Luego se filtraron los datos a 128 scan para el primer día y 96 scan para el segundo día de medición. La tabla 4.4 indica la configuración utilizada del DOAS para ambos días de trabajo, la hora de medición y el total de scan obtenidos y analizados de manera resumida y el Anexo 3 de forma detallada para cada uno en específico.

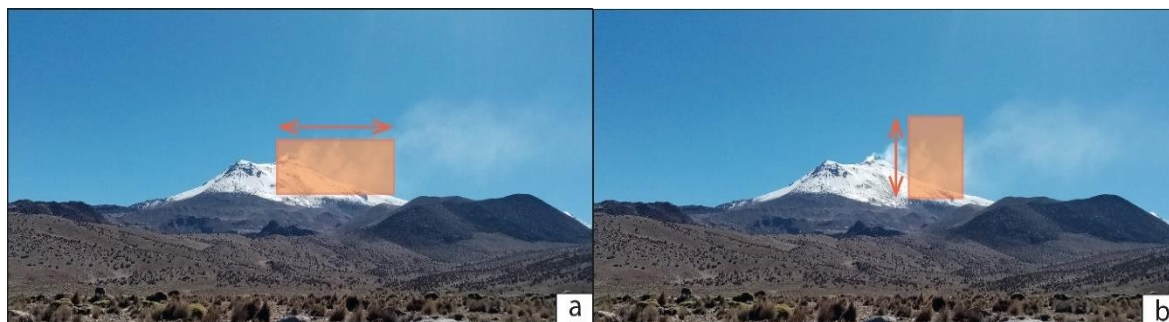
El DOAS permite eliminar scan específicos que arrojan un dato erróneo o inusual. Del total de los scan, 24 fueron eliminados; 20 de ellos fue por presentar un error > 10%, 7

por arrojar un valor muy negativo, 5 por no registrar la medición (*no scan data*) y 2 por un cambio de ángulo de medición puntual. En el caso donde se obtuvo un resultado negativo, esto se debe a que el DOAS agarró parte del edificio volcánico. Estos datos eliminados no fueron tomados en cuenta al momento de determinar el flujo de SO<sub>2</sub>.

**Tabla 4.4: Detalle de la configuración del DOAS junto con las horas de medición.**

Fecha	N° de Scan		Hora (hrs:min:ss)			N° de escáner	Parámetros del DOAS			
	Totales	Procesados	Inicio	Final	Total		Tiempo de integración (ms)	Co-adding spectra	Ángulo de escaneo (°)	Tiempo promedio por scan
20-08-2021	141	128	11:32:45	15:25:14	3:52:29	1-16 94-141	650	1	90	0:00:54
						17-93	650	2	90	0:01:24
21-08-2021	117	96	10:27:16	13:08:01	2:40:45	13-52 96-117	650	1	80	0:01:01
						53-95	650	2	80	0:01:34

El DOAS mide directamente la concentración de SO<sub>2</sub> desde el conjunto de la pluma volcánica. Si el lente se encuentra en posición horizontal se está midiendo verticalmente (dirección del escaneo), y si se encuentra en posición vertical se mide de manera horizontal la fumarola volcánica (Figura 4.8). Durante el sábado 21 de agosto, las mediciones se realizaron de forma vertical (lente en posición horizontal) desde el scan 1 al 95 y de manera horizontal desde el scan 96 en adelante (scan 117).



**Figura 4.8: Representación del rango de medición del DOAS, por medio del rectángulo naranja. a. Medición horizontal,** el lente del DOAS se dispone de manera vertical y la medición se realiza de manera horizontal como lo indica la doble flecha. **b. Medición vertical,** el lente del DOAS se dispone de manera horizontal y la medición se realiza de manera vertical como lo indica la doble flecha.

Mientras el scan se desarrolla de manera horizontal se intenta medir específicamente la pluma del SF, en cambio cuando se mide de manera vertical se mide ambos campos fumarólicos.

#### 4.3.2. Emisiones de SO<sub>2</sub>

Una vez filtrados los scan, se calculó el flujo emitido de SO<sub>2</sub> en función de las velocidades del viento medidas en terreno ( $\bar{x} = 1,7$  m/s) y obtenidas con las cámaras PiCam UV ( $\bar{x} = 3,4$  m/s y Max = 5,3 m/s).

Considerando una velocidad de la pluma promedio de 3,4 m/s, para el primer día de medición se obtuvo  $267,8 \pm 136,5$  t/d y para el segundo día  $252,8 \pm 131,6$  t/d, por lo que el promedio de ambos días es igual a  $267,9 \pm 141,9$  t/d (Tabla 4.5). Los detalles de emisiones para cada scan en específico se encuentran en Anexo 3.

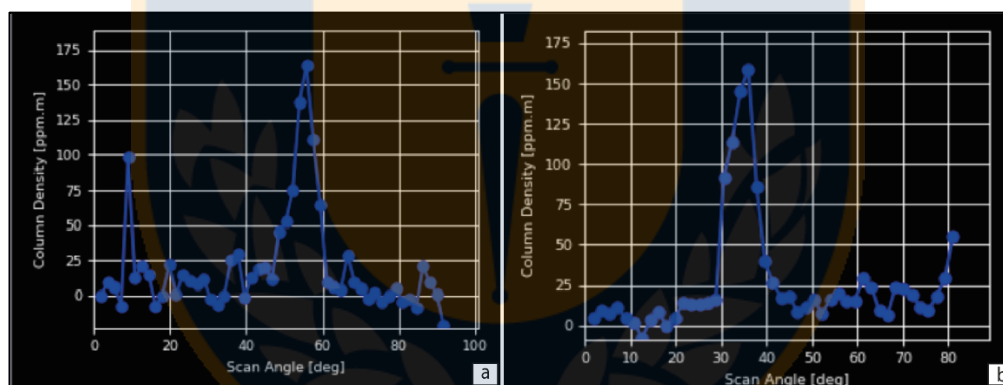
**Tabla 4.5: Emisión de SO<sub>2</sub> (t/d) calculadas a partir del DOAS.**

Día	Error (%)	Velocidad de la Pluma (m/s)	SO <sub>2</sub> (t/d)	D.E
20-08-2021	6,3	1,7	133,9	± 144,5
		5,3	417,5	
		3,4	275,7	
21-08-2021	5,7	1,7	126,4	± 139,4
		5,3	394	
		3,4	260,2	
Promedio	6,0	1,7	130,1	± 134,1
		5,3	405,7	
		3,4	260,3	

La menor emisión registrada, para una velocidad de 3,4 m/s, fue medida el día 21 de agosto equivalente a 59,5 t/d. Ese mismo día se obtuvo la emisión máxima de  $\text{SO}_2$  igual a 436,7 t/d a esa misma velocidad.

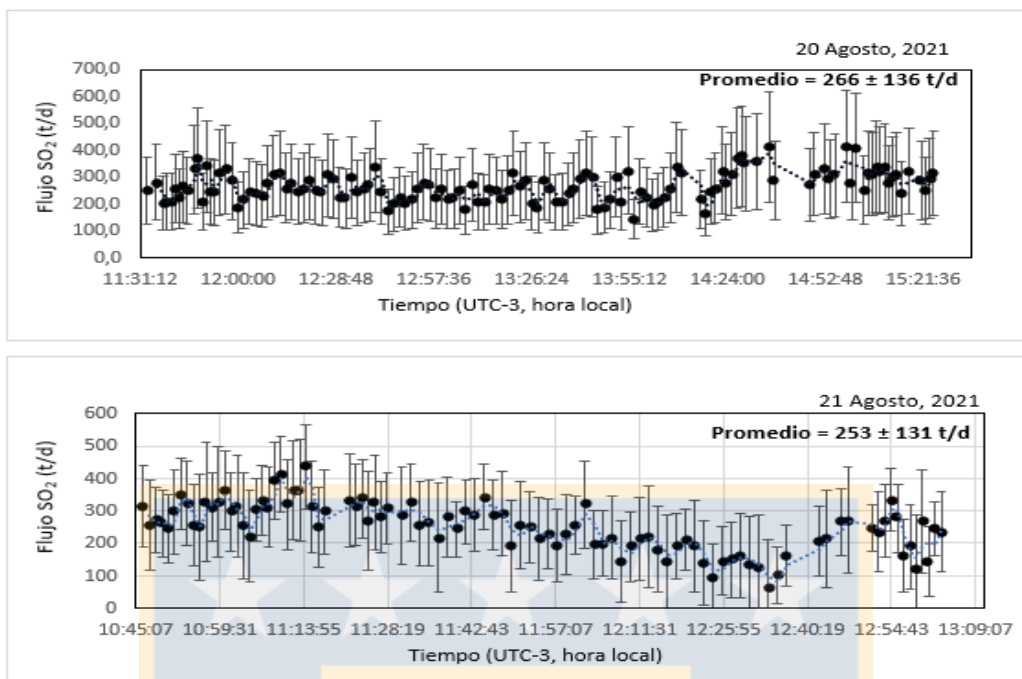
Respecto a la influencia de la posición del lente no hubo mayores diferencias en la medición de  $\text{SO}_2$  para el día 21 de agosto. Se registró un promedio de 256,3 t/d con el lente en posición horizontal (scan 1 al 95) y 229,6 t/d cuando el lente se encontraba verticalmente (scan 96 al 117). Por lo tanto, no se pudo obtener resultados específicos para cada campo fumarólico por separado, se determinó un flujo para el conjunto de la pluma volcánica.

En la mayoría de los resultados obtenidos se puede observar un gran *peak* positivo en el gráfico de la columna de densidad en función del ángulo de escaneo. E incluso, en algunos scan se pueden apreciar dos *peak* distintos (Figura 4.9). Estos *peak* estarían representando los dos campos fumarólicos del volcán Guallatiri. El de mayor tamaño corresponde al SF y el de menor tamaño a SWF, este último no siempre se logra diferenciar del resto de la fumarola volcánica.



**Figura 4.9:** Gráficos de la columna de densidad en ppm\*m en función del ángulo de escaneo. **a.** Gráfico representativo del scan 12 del día 20 de agosto, mostrando dos grandes *peak* positivos a los 10 y 55°. **b.** Gráfico representativo del scan 71 del día 21 de agosto, mostrando un único *peak* positivo a los 35°.

Otra forma de representar los resultados es bajo la forma de gráficos de flujo de  $\text{SO}_2$  en función del tiempo de medición (Figura 4.10). Como se observa en la figura 4.10, para ambos días los valores son bastante homogéneos entre sí, con una leve tendencia a aumentar el flujo de  $\text{SO}_2$  entre las 14:00 y 14:30 hrs para el día 20, y una tendencia suave a disminuir el flujo entre las 12:00 y 12:40 hrs para el día 21.



**Figura 4.10:** Gráficos de flujos de SO<sub>2</sub> en t/d en función del tiempo, tanto para el día 20 de agosto (gráfico superior) como para el 21 de agosto (gráfico inferior), indicando la desviación estándar para cada uno de los scan realizados.

#### 4.4. Muestreo directo

Para el análisis de muestras de gas y condensados de gas se tomarán en cuenta las muestras tomadas, además de aquellas obtenidas por Inostroza y otros (2020a). Los detalles de la composición química (en mmol/mol) e isotópica (en ‰) de la fracción de gas obtenidas por Inostroza y otros (2020a) se dan en el Anexo 4. De las cuatro muestras tomadas durante el terreno, se tienen los datos únicamente de GUA-27. Tampoco se obtuvo resultado para la muestra de condensado de gas.

##### 4.4.1. Composición química

Las temperaturas de los gases fumarólicos oscilaron entre 80,3 y 265 °C para el SF y entre 80,2 a 251 °C para el SWF con aumento de temperatura de W-E. (Inostroza y otros, 2020a). Las muestras tomadas en esta campaña tienen temperatura de 180 °C (GUA-28) y 230 °C (GUA-27).

Para el SF, Inostroza y otros (2020a) encontraron una composición química de los gases fumarólicos dominada por el vapor de agua (871 a 910 mmol/mol), seguida por CO<sub>2</sub> (75 a 124 mmol/mol), y luego por H<sub>2</sub>S, N<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> (hasta 7,2, 3,9 y 2,2 mmol/mol respectivamente). Presenta menores concentraciones de HCl y HF ≤ 0,77 y 0,045 mmol/mol respectivamente y máximas de H<sub>2</sub> de 0,25 mmol/mol. Respecto al CO y el He las concentraciones son aún más bajas ≤ 0,00051 y 0,0019 mmol/mol. El metano fue el



volátil orgánico más abundante con 0,0079 mmol/mol como máxima, mientras que los alcanos y alquenos tienen concentraciones  $\leq 0,00016$  y  $0,000013$  mmol/mol correspondientemente.

La composición de la muestra GUA-27 (Tabla 4.6) sigue la misma tendencia composicional, dominada por el vapor de agua (940 mmol/mol) y CO<sub>2</sub> (56 mmol/mol), seguida por H<sub>2</sub>S, N<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>. En comparación con los datos de Inostroza y otros (2020a), GUA-27 tiene menor concentración de CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> y HCl, pero dentro de un rango aceptable. La concentración de N<sub>2</sub> (0,57 mmol/mol) es bastante inferior al mínimo del resto de las muestras (2,1 mmol/mol). La concentración de H<sub>2</sub>, Ar y O<sub>2</sub> igual presentan valores bajos para SF, pero similares a algunas muestras del SWF.

**Tabla 4.6: Composición química de la fracción de gas en mmol/mol de la muestra GUA-27.**

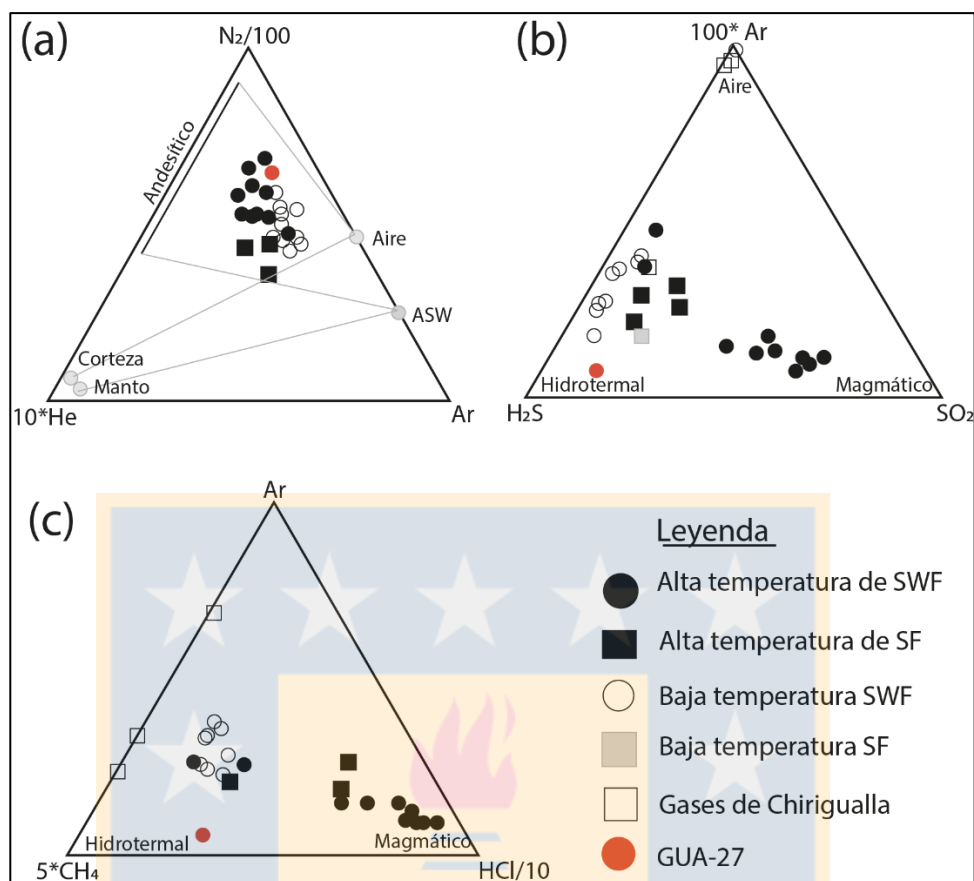
H <sub>2</sub> O	940	HCl	0,13	He	0,000095
CO <sub>2</sub>	56	HF	0,016	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,000043
H <sub>2</sub> S	2,64	O <sub>2</sub>	0,00056	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0,000009
N <sub>2</sub>	0,57	Ar	0,0021	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,000008
SO <sub>2</sub>	0,36	H <sub>2</sub>	0,075	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	0,000011

Al igual que los gases fumarólicos del SF, la composición de SWF estuvo dominada por el vapor de agua (882 a 935 mmol/mol), seguido por CO<sub>2</sub> (55 a 113 mmol/mol), luego por H<sub>2</sub>S (6,2 mmol/mol), SO<sub>2</sub> (4,5 mmol/mol) y N<sub>2</sub> (1,6 a 4,1 mmol/mol). Las concentraciones de HCl son  $\leq 0,66$  mmol/mol y las de HF  $\leq 0,034$  mmol/mol, mientras que las de H<sub>2</sub> oscilan entre 0,05 y 0,44 mmol/mol. Respecto al CO y He se determinaron concentraciones  $\leq 0,00088$  y  $0,0016$  mmol/mol respectivamente. El metano fue el volátil orgánico más abundante con máxima de 0,0096 mmol/mol. La concentración de los alcanos (etano y propano) tuvieron máximas de 0,00022 y 0,000045 mmol/mol. Mientras que los alquenos variaron de  $6 \times 10^{-7}$  mmol/mol (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>) a  $2.6 \times 10^{-5}$  mmol / mol (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>).

Al graficar estos valores en un diagrama ternario de N<sub>2</sub>-Ar-He (Figura 4.11a) los gases analizados tienen una composición típica de los volcanes de arco (Inostroza y otros, 2020a), acercándose al campo “andesítico” caracterizado por elevadas relaciones de N<sub>2</sub>/Ar y N<sub>2</sub>/He (Fisher y Marty, 2005). Por otro lado, utilizando un diagrama ternario de Ar-H<sub>2</sub>S-SO<sub>2</sub> (Figura 4.11b), que representan la influencia de los componentes atmosférico, hidrotermal y magmático respectivamente, se aprecia un claro dominio de estas dos últimas. Esto último es corroborado en el diagrama ternario Ar-CH<sub>4</sub>-HCl (Figura 4.11c), donde el componente hidrotermal es representado por el metano y el magmático por el HCl.

Al observar la posición de la muestra GUA-27 en los diagramas ternarios (Figura 4.11), se identifica una clara predominancia de influencia hidrotermal en vista a los componentes magmático y atmosférico. Esta influencia es más notoria que en el resto de las muestras de alta temperatura del SF, e incluso de aquellas muestras del SWF. Este alto componente hidrotermal puede deberse a una baja, o nula, contaminación atmosférica, evidenciada por la baja concentración de Ar, lo que implica que la muestra se desplace hacia la arista opuesta. De todas formas, la muestra GUA-27 sigue la misma tendencia que las otras muestras, indicando que el volcán Guallatiri no ha tenido cambios en su composición a lo largo del tiempo, manteniéndose estable

La diferencia composicional de las muestras es explicada por un proceso de depuración, es decir reacciones secundarias entre agua-gas-roca. Aquellas muestras ubicadas en pendientes pronunciadas (es decir las de SWF de alta temperatura) y las del cráter están menos influenciadas por este proceso en comparación con las obtenidas en el SWF occidental (Inostroza y otros, 2021a). Este último se encuentra a lo largo de un valle fluvial, por lo que el agua meteórica proveniente del deshielo del casquete glacial fue mezclada por los fluidos volcánicos ascendentes a una profundidad relativamente baja y ambiente húmedo. Estas condiciones permitieron que el gas magmático se disolviera parcialmente en un cuerpo de agua somero, lo que implica que los fluidos volcánicos se enfriaran a la temperatura de la condensación del vapor de agua (Inostroza y otros, 2021a).



**Figura 4.11: Diagramas ternarios para los gases del volcán Guallatiri y aguas termales Chirigualla, obtenido y modificado de Inostroza y otros (2020a). a. Diagrama ternario Ar-He-N<sub>2</sub>, indicando una composición andesítica, típica de los volcanes de arco. b. Diagrama ternario Ar-H<sub>2</sub>S-SO<sub>2</sub>, donde Ar representa el componente atmosférico, SO<sub>2</sub> el magmático y H<sub>2</sub>S el hidrotermal, mostrando influencia magmática e hidrotermal en las muestras de gas y de agua. c. Diagrama ternario Ar-CH<sub>4</sub>-HCl, donde Ar representa el componente atmosférico, HCl el magmático y CH<sub>4</sub> el hidrotermal, mostrando influencia magmática e hidrotermal en las muestras de gas y de agua.**

#### 4.4.2. Composición isotópica

Los valores de  $\delta^{13}\text{C-CO}_2$  medidos en las muestras de SWF fueron de -8,56 a -7,02 ‰ frente a V-PDB (no hubo resultados para las muestras de SF). La composición de  $\delta^{13}\text{C-CO}_2$  puede atribuirse a los basaltos de las dorsales oceánicas (MORB = M) correspondiente a un proxy del manto superior, a sedimentos ricos en materia orgánica subducidos (= S) o a material carbonatado (= C) ya sea proveniente del slab o de la alteración de la corteza (Sano y Marty, 1995).

La fuente del carbono de las fumarolas del volcán Guallatiri se relacionan principalmente a reacciones de descarbonatación dentro de la corteza oceánica alterada (C ~73-74%), seguida por contribución de S ~24% y finalmente con M ~3% (Anexo 4). Mientras que los valores de M fueron más bajos que los encontrados por Sano y Marty

(1995) para volcanes de arco (4-20%), la contribución de S fue significativamente mayor que la calculada para los volcanes Lascar y Lastarria (~5%). Entonces, la firma de CO<sub>2</sub> que muestran los gases del volcán Guallatiri se atribuyen a las rocas de su basamento que corresponden a sucesiones sedimentarias continentales intercaladas con rocas volcánicas. (Inostroza y otros, 2020a).

Las relaciones R/Ra en los gases de SWF variaron entre 1,21 a 2,96, y se encontró una máxima de 3,06 para la muestra GUA-10 del SF. Los valores se acercan al promedio encontrado por Hilton y otros (2002) para el norte de Chile, igual a  $2,39 \pm 1,43$  Ra, para un total de 12 volcanes.



## 5. DISCUSIONES

### 5.1. Comparación de valores entre PiCam 1 y 10

En el capítulo 4.2.2 se mencionó que los valores obtenidos por la PiCam 10 son superiores a aquellos de la PiCam 1. Esto se asocia, en parte, a que las mediciones de la PiCam 10 se realizaron únicamente por medio del método CP (*Control Point*), en cambio la PiCam 1 fue procesada mayoritariamente por el método OCV (*Opencv ECC*).

Es así como todos los datos obtenidos para la PiCam 10 fueron procesados por el método CP. Al intentar procesar alguna secuencia por el método OCV las imágenes de los lentes A y B no se acoplaban correctamente, por lo que fue imposible obtener resultados. Sin embargo, este método si fue posible utilizarlo en la cámara PiCam 1, donde se obtuvieron resultados tanto con CP como con OCV. Al comparar dos análisis muy similares, cambiando únicamente la herramienta de procesamiento de las imágenes, se observa que el método OCV entrega valores inferiores en comparación con el método CP (para la gran mayoría de los casos). Esto último queda evidenciado por el análisis de la segunda secuencia del primer día de medición, donde en un procesamiento utilizando CP se obtiene un flujo igual a  $10,36 \pm 3,1$  t/d, pero con OCV da una emisión de  $6,91 \pm 3,2$  t/d (Tabla 5.1). Esto se ve replicado en los resultados obtenidos por Arratia (2019), donde los flujos más elevados fueron obtenidos utilizando el método CP, en comparación con el método OCV (Tabla 5.2).

**Tabla 5.1: Comparación de resultados obtenidos con las cámaras PiCam utilizando método CP o OCV.**

Día	Secuencia	Calibración	Imágenes procesadas	Absorbance Image	Doc .txt	Emisión SO <sub>2</sub> (t/d)			Velocidad del viento (m/s)	Campo fumarólico	Método utilizado
						Promedio	Máximo	Mínimo			
20-08-2021	2	2	1432	18	18	$10,36 \pm 3,1$	22,46	3,45	4,5	SF + SWF	CP
				19	19	$6,91 \pm 3,2$	18,14	1,73	3,9	SF + SWF	OCV

En la mayoría de los casos, la herramienta OCV no logra ajustar adecuadamente las imágenes de los lentes A y B creando una falsa columna doble, lo que sí se puede realizar utilizando el método CP de forma manual utilizando puntos de control comunes en ambas imágenes. Aguilera y otros (2020) concluyeron que la diferencia entre ambos métodos para la emisión de SO<sub>2</sub> puede ser de al menos 35%.



Cabe resaltar que el valor más alto de la cámara PiCam 1 ( $= 33,70 \pm 4,3$  t/d) fue procesado por el método OCV. Por lo tanto, la diferencia del 35% entre ambos métodos no implica que en la totalidad de los casos se van a obtener mayores valores con CP que con OCV. Además, esta diferencia no se ve reflejada en los resultados obtenidos por Aguilera y otros (2020) donde se obtuvieron resultados parecidos con ambos métodos (Tabla 5.2).

Respecto a la falta de resultados representativos únicamente del SWF se piensa que esto se puede deber a varios factores. En primer lugar, las plumas de ambos campos fumarólicos se mezclan apenas salir del edificio volcánico, por lo que la individualización de cada uno por separado es difícil, sobre todo la del SWF al considerar su posición respecto a SF y la dirección de propagación de la pluma. También puede ser que las emisiones de  $\text{SO}_2$  provenientes del SWF sean muy bajas, no llegando al mínimo de detección del instrumento, correspondiente a  $90 \text{ ppm}\cdot\text{m}$  (Wilkes y otros, 2017). Se piensa esto debido que ningún trabajo anterior ha logrado tener resultado únicamente para el SWF. Además, al estar a más de 5 km de los centros de emisión los valores pueden ser subestimados al no generar un correcto contraste entre la pluma volcánica y el cielo de fondo adyacente a esta.

## 5.2. Comparación de resultados entre cámaras UV y DOAS

Existe una gran diferencia entre el flujo de  $\text{SO}_2$  obtenido con las cámaras PiCam UV con el entregado por el DOAS. Mientras que el primero dio una emisión de  $22,81 \pm 5,1$  t/d, el segundo estimó una emisión igual a  $267,9 \pm 141,9$  t/d.

Esta gran diferencia en los resultados se puede deber a que el DOAS mide el conjunto de la pluma volcánica, indiferenciando los dos campos fumarólicos. Estos se diferencian únicamente por los *peak* presentes en el gráfico de densidad de columna en función del ángulo de escaneo (Figura 4.9a). Por su parte, las cámaras PiCam tienen la opción de elegir qué campo fumarólico se va a analizar, dependiendo la ICA utilizada (Figura 4.5), que corresponde a un transecto de la pluma volcánica que sería representativa del total de esta. Por lo que se podría subestimar el flujo al elegir un solo campo fumarólico, o parte de ellos.

Esta brecha se elimina si se compara el menor valor registrado con el DOAS, correspondiente al scan 93 del 21 de agosto, con el mayor promedio registrado con la PiCam 10, en la secuencia 1 del 21 de agosto. Mientras que el primer valor es de  $59,5 \pm 29,7$  t/d, el segundo es de  $56,2 \pm 8,6$  t/d, ambos muy parecidos.

Por otra parte, el límite mínimo de detección de las cámaras PiCam es de 90 ppm\*m (Wilkes y otros, 2017), y el del DOAS fluctúa entre 5-10 ppm\*m, equivalente a 25-60 t/d si se considera una velocidad media de la pluma igual a 3,0 m/s (Edmond y otros, 2003). Esto implica que el DOAS es mucho más sensible a la absorción del SO<sub>2</sub>, en comparación con las cámaras PiCam UV, en especial en fumarolas volcánicas con un bajo flujo de SO<sub>2</sub>, como es el caso en estudio. Las cámaras PiCam deben interpolar los resultados si las emisiones de SO<sub>2</sub> son muy bajas, en función de las celdas de calibración de cuarzo utilizadas, en este caso la más baja es de 100 ppm\*m.

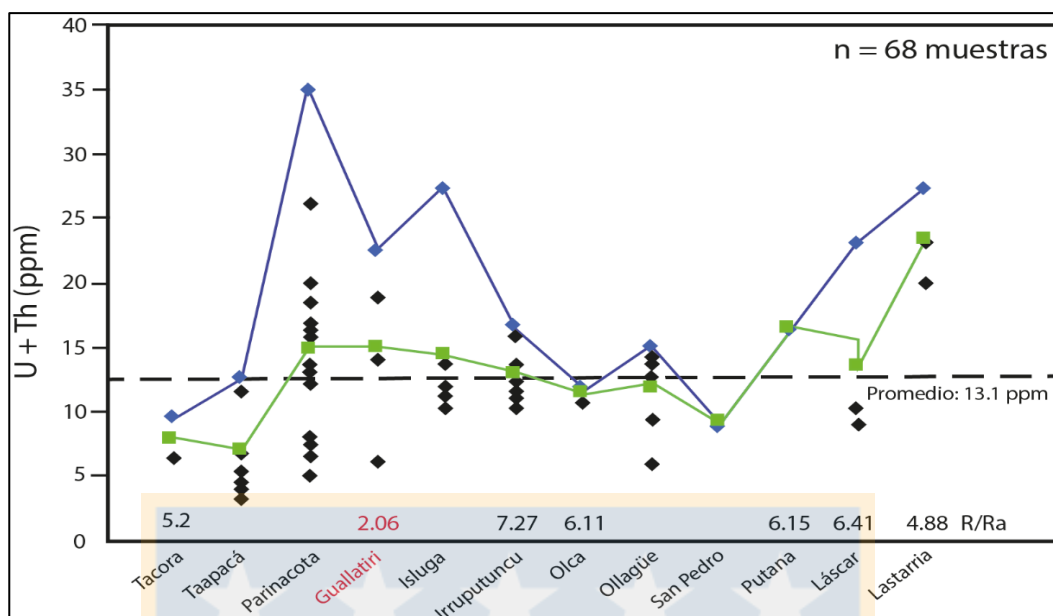
Además, el post procesamiento de la cámara PiCam es más manual que el del DOAS, por lo que existe un mayor factor de error humano. Por ejemplo, a no realizar la segunda ICA completamente paralela a la primera, o no acoplar correctamente las imágenes de ambos lentes.

### **5.3. Muestreo directo**

#### **5.3.1. Química del gas**

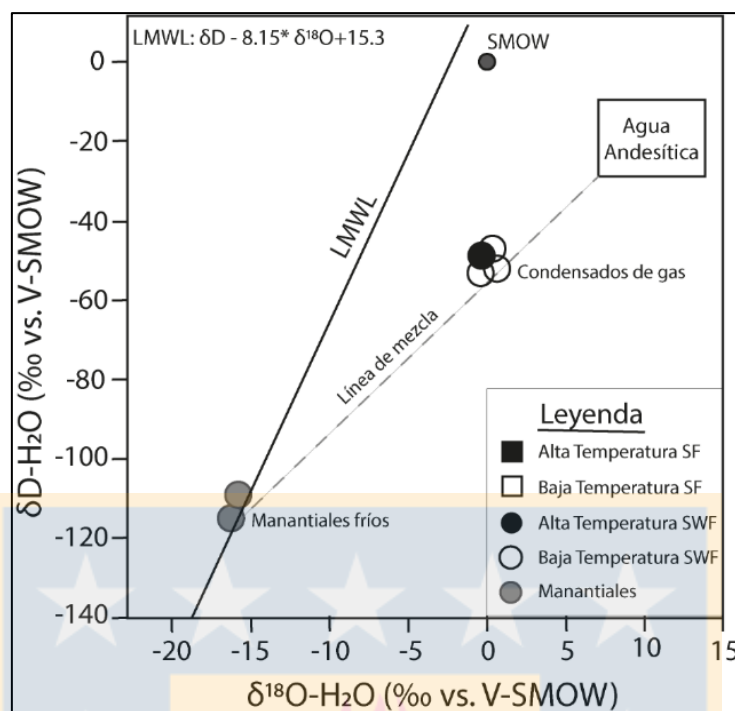
Las relaciones R/Ra encontradas para los gases de las fumarolas del volcán Guallatiri (R/Ra entre 1,21 a 3,06), siguen siendo valores bajos respecto al promedio típico de volcanes de arcos activos (5,37 Ra; Hilton y otros, 2002). Esto se podría explicar por una mayor desintegración radiogénica de U y Th en Pb dentro del magma y por ende mayor adición de <sup>4</sup>He y/o por contribución de fluidos corticales ricos en <sup>4</sup>He (Inostroza y otros, 2020a).

Complementariamente, las concentraciones de U + Th en rocas de lava del Pleistoceno superior – Holoceno del volcán Guallatiri son más elevadas que las medidas en las lavas de la mayoría de los volcanes activos del norte de Chile (Figura 5.1). Las lavas del volcán Parinacota, ubicadas solo 40 km al norte del caso en estudio, también presenta valores de U + Th superiores a la media (Figura 5.1), Bourdon y otros (2000), proponen que se relacionan con procesos de deshidratación que afectan a la corteza oceánica. Por lo tanto, los bajos valores de R/Ra que caracterizan las fumarolas del volcán Guallatiri se explicarían por un enriquecimiento de <sup>4</sup>He en los productos eruptivos de la zona de estudio y aledaña (Inostroza y otros, 2020a).



**Figura 5.1: Concentración de uranio y torio (expresada en ppm) y valores R/Ra en volcanes activos y potencialmente activos en CVZ.** La línea verde sigue los valores medios U + Th, mientras que la línea azul sigue los valores U + Th más altos para cada volcán. Extraído de Inostroza y otros (2020a).

Los valores de  $\delta^{18}\text{O-H}_2\text{O}$  y  $\delta\text{D-H}_2\text{O}$  en los condensados fumarólicos de SF variaron de -0.3 a 0.6 ‰, y para SWF entre -52 y -47 ‰ ambas vs. V-SMOW (Inostroza y otros, 2020a). Estos valores son intermedios entre aquellos característicos de los manantiales fríos y el campo “andesítico”, propio de los gases descargados por magmatismo andesítico de subducción (Figura 5.2). Esto implica que los manantiales fríos y termales asociados al volcán Guallatiri tienen influencia de agua meteórica, proveniente del casquete glaciar cratérico, de las lluvias de verano o de nieve (Inostroza y otros, 2020a).



**Figura 5.2:** Diagrama binario de valores de  $\delta^{18}\text{O}\text{-H}_2\text{O}$  y  $\delta\text{D}\text{-H}_2\text{O}$  (en ‰ vs V-SMOW) para muestras de agua y condensado de gas del volcán Guallatiri, indicando el campo “andesítico”, valor LMWL = *Local Meteoric Water Line* y SMOW = *Standard Mean Oceanic Water*. Extraído de Inostroza y otros (2020a).

### 5.3.2. Relación Muestreo directo y remoto

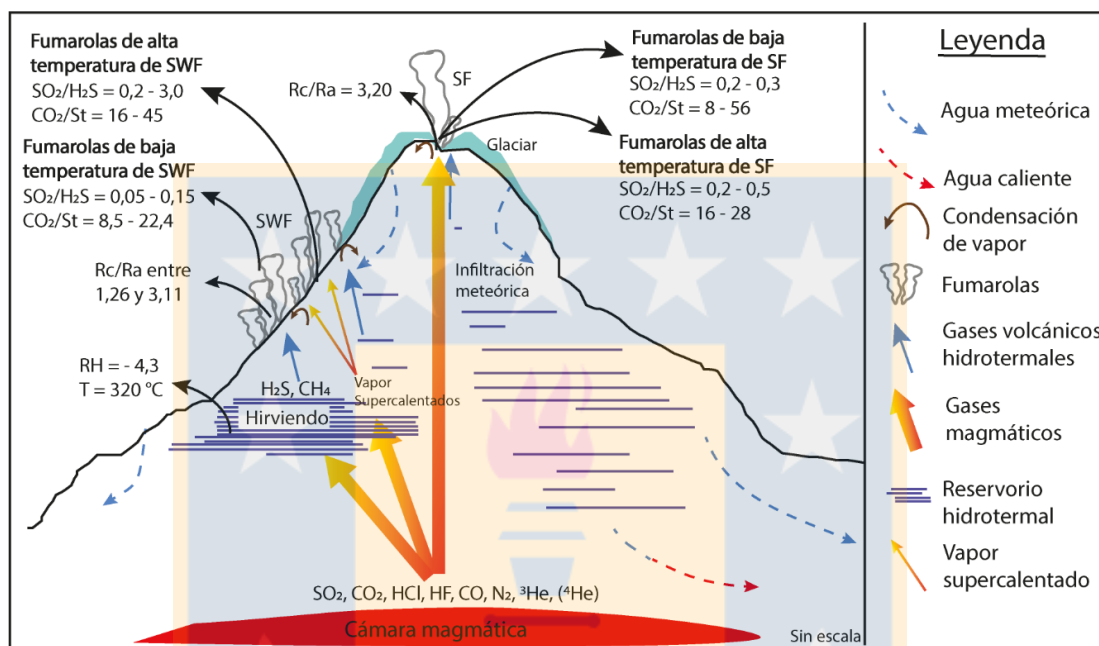
El  $\text{SO}_2$  es un proxy del flujo magmático, por lo tanto, una mayor emisión de  $\text{SO}_2$  indica una mayor influencia magmática en los gases de la pluma volcánica. Bajo este concepto, la fumarola volcánica del volcán Guallatiri no tiene una influencia magmática predominante, al tener bajas tasas de emisión de  $\text{SO}_2$  en comparación con otros volcanes del norte de Chile.

El resultado obtenido con las cámaras PiCam UV en este trabajo, igual a 22,81 t/d, es bajo en comparación a las 243 t/d que Arratia (2019) determinó para el volcán Isluga (con la misma cámara) o para las 554 t/d y 884 t/d que Tamburello y otros (2014) encontraron para los volcanes Láscar y Lastarria respectivamente.

Lo anterior es concordante con las relativamente bajas concentraciones de compuestos gaseosos de origen magmáticos ( $\text{SO}_2$ , HCl y HF) encontrados por muestreo directo (Figura 4.11a y 4.11b) que indican una influencia hidrotermal además de la magmática.

Esto está de acuerdo con el modelo geoquímico conceptual propuesto por Inostroza y otros (2020a), que afirma que los gases fumarólicos fueron alimentados por una fuente

magmática profunda y reaccionaron posteriormente con un acuífero somero (Figura 5.3). Es así como los fluidos magmáticos fueron afectados durante su ascenso hacia la superficie por una depuración, principalmente en depresiones morfológicas donde las fracturas favorecen la permeación de agua meteórica, lo que explicaría el componente hidrotermal y magmático de los gases volcánicos.



**Figura 5.3: Modelo geoquímico conceptual de la circulación de fluidos en el volcán Guallatiri, mostrando el sistema magmático-hidrotermal y sus asociados, extraído de Inostroza y otros (2020a).  $Rc/Ra$  es la relación  $R/Ra$ , pero con la corrección de contaminación atmosférica.**

## 5.4. Comparación con trabajos anteriores

### 5.4.1. Cámaras PiCam UV

Al comparar los resultados obtenidos con ambas cámaras PiCam UV con investigaciones anteriores, realizadas por Gliß y otros (2017), Arratia (2019) y Aguilera y otros (2020), los valores de esta investigación se encuentran dentro del rango esperable (Tabla 5.2).

Si tomamos en consideración las emisiones de  $SO_2$  únicamente para el SF, en este trabajo oscilan entre  $10,36 \pm 2,6$  t/d y los  $25,1 \pm 3,8$  t/d, con media de  $18,55 \pm 3,7$  t/d. Este valor se parece al promedio encontrado por Arratia (2019) que es igual a  $21,28 \pm 5,4$  t/d. En cambio, los resultados tanto de Gliß y otros (2017) como de Aguilera y otros (2020) son bastante superiores, ambos en torno a las 50 t/d.



Hay que considerar que los datos tomados por Gliß y otros (2017) y Aguilera y otros (2020) se realizaron en primavera; noviembre y diciembre respectivamente. En cambio, Arratia (2019) realizó su campaña de terreno a principios de abril (otoño) y esta investigación se llevó a cabo en agosto (invierno). Complementariamente la red agrometeorológica del Instituto de Investigaciones Agropecuaria (INIA), en una frecuencia de meses, indica que la mayor variación de velocidad del viento ocurre entre los meses de mayo-octubre, junto con las menores temperaturas del aire (Anexo 5). Por lo tanto, se podría pensar que existe una influencia meteorológica que afectaría la emisión de SO<sub>2</sub> dependiendo la estación del año en la cual se realice la medición. En este caso habría un menor flujo de SO<sub>2</sub> para los meses de otoño-invierno en comparación con los meses de primavera-verano.

**Tabla 5.2: Comparación de datos de emisión de SO<sub>2</sub> obtenidos con la cámara PiCam con investigaciones anteriores utilizando el mismo método.**

Referencia	Fecha medición	Método	Emisiones SO <sub>2</sub> (t/d)		Velocidad viento (m/s)		Distancia pluma (km)	Campo Fumarólico
			Promedio	Max	Promedio	Max		
Pacheco (2022)	(20-21)-08-2021 Invierno	PiCam	18,5 ± 3,7	32,8	4,0	5,3	8,1	SF
		PiCam	22,81 ± 5,1	56,2	3,4	4,1	8,1	SF + SWF
Aguilera y otros (2020)	10-12-2017 Primavera	PiCam/CP	49,4 ± 18,8	101	9,0	-	5,2	SF
	12-12-2017 Primavera	PiCam/OCV	50,5 ± 12,3	86,4	10,3	-	10,8	SF
Arratia (2019)	05-04-2018 Otoño	PiCam/CP	5,5 ± 2,8	13,0	1,0	-	8,4	SF
		PiCam/OCV	12,2 ± 3,1	19,9	2,2	-	8,4	SF
		PiCam/CP	19,1 ± 4,5	32,0	8,5	-	8,4	SF
		PiCam/CP	48,3 ± 11,2	86,4	11,0	-	8,4	SF
Gliß y otros (2017)	(20-22)-11-2014 Primavera	PiCam	51,84	216	1,5	4,5	13,3	SF
		PiCam	112,3 ± 43,2	250,6	1,5	3,4	13,3	SF + SWF

Lo mencionado anteriormente se repite sí se compara el flujo de SO<sub>2</sub> encontrado para ambos campos fumarólicos de los datos de Gliß y otros (2017) (= 112,3 ± 43,2 t/d) con el valor promedio más alto obtenido en esta investigación, también para ambos centros de emisión, en la primera secuencia del 21 de agosto con la cámara PiCam 10 (= 56,2 ± 8,6 t/d). Tener en consideración que la serie de tiempo utilizada por Gliß y otros (2017) para la

obtención de sus datos es muy corta (solo 11 min) por lo que no se puede utilizar para determinar emisiones típicas del volcán Guallatiri.

Sin embargo, Arratia (2019) encuentra un flujo máximo de  $\text{SO}_2$  igual a  $48,3 \pm 11,2$  t/d, lo cual es muy similar a los valores de los dos otros trabajos mencionados, y distante con la máxima establecida en esta tesina para el SF. Bajo esta premisa, la influencia meteorológica no sería tan relevante, como sí podría serlo si se considera solamente la media de los resultados.

Para la verificación de una influencia meteorológica considerable es necesario realizar mediciones con una mayor periodicidad, ya sea mensuales o una vez por época del año. De todas formas, existe una tendencia que a mayor velocidad de la pluma volcánica mayor es el flujo de  $\text{SO}_2$  encontrado, por lo que no se puede descartar del todo una influencia meteorológica.

#### **5.4.2. DOAS**

El único flujo de  $\text{SO}_2$  registrado con anterioridad para el volcán Guallatiri medido con un DOAS corresponde al realizado por el SERNAGEOMIN, en mayo de 2014. En este reporte se afirma una emisión de  $\text{SO}_2$  equivalente a 550 t/d. Este valor es casi el doble de lo registrado en esta campaña de terreno ( $= 260,3 \pm 134,1$  t/d) con el mismo instrumento.

Sin embargo, en el informe de SERNAGEOMIN no está indicada la velocidad del viento que utilizaron para calcular el flujo de  $\text{SO}_2$  emitido por el volcán. Revisando la velocidad del viento en la red agrometeorológica INIA, para esa fecha hubo de promedio (para el mes de mayo), una velocidad igual a 7,7 m/s, en la estación del Lago Chungará, Putre. Si se realizan los cálculos de emisión de  $\text{SO}_2$  a esa velocidad, para los datos registrados en este trabajo, se obtiene un promedio de 603,4 t/d. Por ende, si consideramos que el cálculo de flujo de  $\text{SO}_2$  realizado por SERNAGEOMIN fue con una velocidad  $\approx 7,7$  m/s, ambos datos serían concordantes entre sí.

Ese mismo año Gliß y otros (2017) registraron una máxima de 250,6 t/d y un promedio de  $112,3 \pm 43,2$  t/d de  $\text{SO}_2$  (Tabla 5.2), con cámara UV. La máxima encontrada por estos autores es similar al promedio conseguido con el DOAS en esta campaña. Considerando que uno de los principales factores que afectan la medición del DOAS corresponde a la dispersión múltiple de la luz, y que esta genera una sobreestimación del flujo (Rodríguez y Nadeau, 2015), se piensa que los datos obtenidos podrían estar sobreestimados, en especial al estar a una distancia  $> 8$  km de la pluma.

## 5.5. Consideraciones Finales

A pesar de obtener resultados dentro del rango esperado y concordante con trabajos anteriores con las cámaras PiCam UV, estos pueden estar subvalorados principalmente por estar a una gran distancia de las fuentes de emisión. Al estar a más de 5 km de las fumarolas, en este caso  $> 8$  km, hay una mayor dilución de la luz, y por ende un menor contraste entre el cielo de fondo y la pluma. Aguilera y otros (2020), estimaron una subestimación  $\sim 42\%$  del flujo de  $\text{SO}_2$  original para mediciones a  $> 8$  km, únicamente producto de este factor. Además, la presencia de nieve y un casquete glacial permanente generan un mayor reflejo de la luz, lo que se ve incrementado aún más por la intensa luz solar de los días de medición. Por lo que se recomienda, para una futura campaña de terreno, realizar mediciones a una distancia menor de 5 km.

Teniendo en consideración que las mediciones remotas se efectuaron en las mismas condiciones para ambos instrumentos, se esperaría encontrar un flujo de  $\text{SO}_2$  similar. Como ya se presentó, esto último no se cumple, obteniendo valores muy superiores con el DOAS que con las cámaras PiCam UV. Esto también se ve reflejado en los resultados de las otras investigaciones aquí mostradas, donde el flujo de  $\text{SO}_2$  medido con DOAS es superior a aquellos calculados con cámaras PiCam. Solo los valores máximos encontrados con las cámaras PiCam se parecen a los valores mínimos o medios obtenidos con el DOAS. Por lo tanto, lo recién planteado, nos permite inferir que el DOAS tiende a sobrestimar el flujo de  $\text{SO}_2$  y/o que las cámaras UV lo subestiman.

## 6. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se presentaron dos metodologías diferentes para la determinación remota del flujo total de SO<sub>2</sub> para el volcán Guallatiri. Tanto el DOAS como las cámaras PiCam UV demostraron ser buenas herramientas en la medición a distancia de gases, gracias a su pequeño tamaño y peso y su fácil operabilidad en terreno y en el post procesamiento.

Las cámaras PiCam UV arrojaron un flujo promedio de SO<sub>2</sub> igual a  $22,81 \pm 5,14$  t/d y una velocidad de la pluma volcánica de 3,4 m/s. Utilizando esa misma velocidad con el DOAS se determinó una emisión de  $267,9 \pm 141,9$  t/d de SO<sub>2</sub>. Esta gran diferencia se explica en parte porque las cámaras PiCam utilizan un transecto de la pluma volcánica y el DOAS mide la totalidad de esta. Además, el DOAS tiende a sobreestimar los valores por la dispersión múltiple de la luz y las cámaras PiCam tienden a subestimarlos por la dilución de la luz, y por ende un menor contraste entre la pluma y cielo limpio. Ambos factores aumentan proporcionalmente a una mayor distancia del centro de emisión de la pluma volcánica. Por lo que se recomienda que en futuras campañas de terreno se realicen mediciones a una distancia inferior de los 5 km y no a más de 8 km, como fue en este caso.

Los resultados obtenidos están dentro de un rango aceptado en comparación con investigaciones pasadas. No se descarta completamente una influencia meteorológica en la emisión de SO<sub>2</sub>, sin embargo, esta no sería tan significativa, y para su corroboración es necesario realizar un mayor número de mediciones con una mayor periodicidad, tal vez mensualmente o una por estación.

Lo recién mencionado, junto con la similitud encontrada para la muestra GUA-27 del muestreo directo respecto a aquellas muestras tomadas con anterioridad, indican que no han ocurrido cambios en la composición del volcán Guallatiri a lo largo del tiempo, manteniéndose estable.

Las bajas tasas de emisión y los resultados de la medición directa indican que existe un importante componente hidrotermal en los gases fumarólicos, además del factor magmático. Con temperaturas de salidas entre 80,3 y 265 °C los gases del SWF fueron clasificados por Inostroza y otros (2020a) en: gases de alta temperatura (> 177 °C) con una influencia magmática predominante y en gases de baja temperatura (< 96 °C) con influencia hidrotermal predominante. Por su parte los gases del SF se encuentran en una posición intermedia entre estos dos componentes.

Su composición corresponde a la característica de los volcanes de arco, acercándose al campo “andesítico”. Los valores isotópicos de  $\delta^{18}\text{O-H}_2\text{O}$  y  $\delta\text{D-H}_2\text{O}$  vs. V-SMOW

indican que los fluidos del volcán Guallatiri tienen influencia de agua meteórica, encontrándose entre los dominios de manantiales fríos y el campo “andesítico” de subducción.

El trabajo realizado es concordante con el modelo geoquímico conceptual propuesto por Inostroza y otros (2020a), que afirma la existencia de un acuífero somero en las depresiones morfológicas, donde ocurre una depuración de los fluidos magmáticos ascendentes. Este modelo explica la influencia hidrotermal y magmática de los gases estudiados, y las bajas emisiones de  $\text{SO}_2$  del volcán Guallatiri en comparación con otros volcanes del norte de Chile.





## REFERENCIAS

AGUILERA, F. (2008). Origen y naturaleza de los fluidos en los sistemas volcánicos, geotermales y termales de baja entalpía de la Zona Volcánica Central (ZVC) entre los 17°43' S y 25°10' S. Tesis para optar al Título de Doctor en Ciencias de la Tierra, Universidad Católica del Norte, Antofagasta (Inédito): 331 pp. Antofagasta.

AGUILERA, F.; LAYANA, S.; ROJAS, F.; ARRATIA, P.; WILKES, T. C.; GONZÁLEZ, C. & URETA, G. (2020). First Measurements of Gas Flux with a Low-Cost Smartphone Sensor-Based UV Camera on the Volcanoes of Northern Chile. *Remote Sensing MPDI*. N°13, Vol 12:1-25.

AGUSTO, M. R. (2011). Estudio geoquímico de los fluidos volcánicos e hidrotermales del Complejo Volcánico Copahue-Caviahue y su aplicación para tareas de seguimiento. Tesis para optar al Título de Doctor en Ciencias Geológicas, Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (Inédito): 295 pp. Buenos Aires.

ARRATIA, P. (2019). Estimación de las emisiones de dióxido de azufre mediante una cámara UV de bajo costo en los volcanes Guallatiri, Isluga e Irruputuncu, Chile. Tesis para optar a Título de Geóloga, Universidad Católica del Norte, Chile (Inédito): 85 pp. Antofagasta.

AIUPPA, A., GIUDICE, G., GURRIERI, S., LIUZZO, M., BURTON, M., CALTABIANO, T., MCGONIGLE, A.J.S., SALERNO, G., SHINOHARA, H., & VALENZA, M., (2008) Total volatile flux from Mount Etna. *Geophysical Research Letters* N° 24, Vol 35.

AIUPPA, A., FISCHER, T. P., PLANK, T., & BANI, P. (2019). CO<sub>2</sub> flux emissions from the Earth's most actively degassing volcanoes, 2005–2015. *Scientific Reports*, N° 1, Vol 9, 1-17.

BANCO DE CHILE. 18 de mayo de 2021. Volcán Guallatiri. Santiago. Recuperado el 18 de mayo de 2021 de <<[http://www.wikiexplora.com/Volc%C3%A1n\\_Guallatiri.>>](http://www.wikiexplora.com/Volc%C3%A1n_Guallatiri.>>).

BECK, S. L.; ZANDT, G.; MYERS, S. C.; WALLACE, T. C.; SILVER, P. G. & DRAKE, L. (1996). Crustal-thickness variations in the central Andes. *Geology*. N°5, Vol 24: 407-410. Estados Unidos.

BERRIOS GUERRA, C. A. (2015). Caracterización geoquímica de sistemas geotermales en zonas de transición: Volcanes nevados de Chillán y Copahue. Memoria para optar al Título de Geóloga. Universidad de Chile, Departamento de Geología, Chile (Inédito): 131 pp. Santiago.

BOBROWSKI, N. (2007). Volcanic gas studies by multi-axis differential optical absorption spectroscopy. Tesis para optar a Título de Doctor en Ciencias Naturales, Universidad de Ruperto Carola, Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas, Heidelberg (Inédito): 230 pp. Heidelberg, Alemania.

BOURDON, B., WÖRNER, G., & ZINDLER, A., (2000). U-series evidence for crustal involvement and magma residence times in the petrogenesis of Paríacota volcano, Chile. *Contrib Mineral Petrol*. N° 4, Vol 139, 458–469. Berlín.

DE SILVA, S. L. & FRANCIS, P. (1991). *Volcanoes of the central Andes*. Springer-Verlag:220. Berlín.

EDMONDS, M., HERD, R. A., GALLE, B., & OPPENHEIMER, C. M. (2003). Automated, high time-resolution measurements of SO<sub>2</sub> flux at Soufriere Hills Volcano, Montserrat. *Bulletin of Volcanology*. N 8, Vol 65, 578-586.

FISCHER, T. P. (2008). Fluxes of volatiles (H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, Cl, F) from arc volcanoes. *Geochemical Journal*. N° 1, Vol 42, 21-38. Japón.

FISCHER, T. P., & CHIODINI, G. (2015). Volcanic, magmatic and hydrothermal gases. The encyclopedia of volcanoes. *Haraldur Sigurdsson*. Elsevier Inc :779-797 pp. Academic Press.

FISCHER, T. P., ARELLANO, S., CARN, S., AIUPPA, A., GALLE, B., ALLARD, P., & CHIODINI, G. (2019). The emissions of CO<sub>2</sub> and other volatiles from the world's subaerial volcanoes. *Scientific reports*. N° 1, Vol 9, 1-11.

GALLE, B., OPPENHEIMER, C., GEYER, A., MCGONIGLE, A. J., EDMONDS, M., & HORROCKS, L. (2003). A miniaturised ultraviolet spectrometer for remote sensing of SO<sub>2</sub> fluxes: a new tool for volcano surveillance. *Journal of Volcanology and geothermal research*. N°1-4, Vol 119: 241-254.

GARCÍA, M.; GARDEWEG, M.; HÉRAIL, G. & CLAVERO, J. (2003) Edad del volcanismo Oligoceno-Mioceno del altiplano del norte de Chile (Formación Lupica) e implicancias en la metalogénesis del Cenozoico. Congreso Geológico Chileno, N°10: 10 pp. Concepción.

GLIß, J., STEBEL, K., KYLLING, A., & SUDBØ, A. (2017). Optical flow gas velocity analysis in plumes using UV cameras-Implications for SO<sub>2</sub>-emission-rate retrievals investigated at Mt. Etna, Italy, and Guallatiri, Chile. *Atmos. Meas. Tech. Discuss*, 2017: 1-30.

GONZÁLEZ FERRÁN, O. (1995). Volcanes de Chile. *Instituto Geográfico Militar*: 640 pp. Santiago.

HILDRETH, W. & MOORBATH, S. (1988). Crustal contributions to arc magmatism in the Andes of central Chile. *Contributions to mineralogy and petrology*, N°4, Vol 98: 455-489.

HILTON, D. R., FISCHER, T. P., & MARTY, B. (2002). Noble gases and volatile recycling at subduction zones. *Reviews in mineralogy and geochemistry*, N°1, Vol 47: 319-370.

INOSTROZA, M.; AGUILERA, F.; MENZIES, A.; LAYANA, S.; GONZÁLEZ, C.; URETA, G. & PATZSCHKE, M. (2020b). Deposition of metals and metalloids in the fumarolic fields of Guallatiri and Lastarria volcanoes, northern Chile. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol 393: 1-16.

INOSTROZA, M.; TASSI, F.; AGUILERA, F.; SEPÚLVEDA, J. P.; CAPECCHIACCI, F.; VENTURI, S. & CAPASSO, G. (2020a). Geochemistry of gas and water discharge from the magmatic-hydrothermal system of Guallatiri volcano, northern Chile. *Bulletin of Volcanology*. N° 7, Vol 82: 1-16.

ISACKS, B. L. (1988). Uplift of the central Andean plateau and bending of the Bolivian orocline. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, N° B4, Vol 93, 3211-3231.

JORQUERA, C.; RODRÍGUEZ, I.; BERTIN, L.; & FLORES, F. (2019). Peligros Volcán Guallatiri, región de Arica y Parinacota. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental. 1 mapa escala 1:50.000, 35-45 pp Santiago.

KLEIN, A., LÜBCKE, P., BOBROWSKI, N., KUHN, J., & PLATT, U. (2017). Plume propagation direction determination with SO<sub>2</sub> cameras. *Atmospheric Measurement Techniques*. N°3, Vol 10: 979-987.

KÖTT, A.; GAUPP, R. & WÖRNER, G. (1995). Miocene to Recent history of the Western Altiplano in Northern Chile revealed by lacustrine sediments of the Lauca Basin (18 15'–18 40' S/69 30'–69 05' W). *Geologische Rundschau*. N°4, Vol 84: 770-780.

LAYANA, S. (2022). Procesos que controlan el balance térmico-magmático en sistemas volcánicos activos de la Zona Volcánica Central (ZVC). Tesis para opta al Título de Doctor en Ciencias mención Geología, Universidad Católica del Norte, Antofagasta (Inédito): 244 pp. Antofagasta.

MAMANI, M.; WÖRNER, G. & SEMPERE, T. (2010). Geochemical variations in igneous rocks of the Central Andean orocline (13°S to 18°S): Tracing crustal thickening

and magma generation through time and space. *Geological Society of America Bulletin*. N°1-2, Vol122:162-182.

MOLINA, P. G.; HERRERA, S. & DECKART, K. (2015). Geoquímica de productos magmáticos en la Cordillera Occidental (norte de Chile a los 19°15' S): Resultados preliminares e implicancias tectono-magmáticas. Congreso Geológico Chileno, N°14: 590-593. Serena.

MORI, T., & BURTON, M. (2006). The SO<sub>2</sub> camera: A simple, fast and cheap method for ground-based imaging of SO<sub>2</sub> in volcanic plumes. *Geophysical research letters*, N°24, Vol 33: 1-5.

NADEAU, P. A. (2011). Ultraviolet digital imaging of volcanic plumes: implementation and application to magmatic processes at basaltic volcanoes. Tesis para optar al Título de Doctor en Filosofía (Geología), Universidad Tecnológica de Michigan, Departamento de Ciencias y de Ingeniería Geológicas y Mineras (Inédito): 200 pp. Michigan.

OPPENHEIMER, C., PYLE, D., & BARCLAY, J. (2003). Volcanic Degassing. Geological Society: 213 pp. Londres.

OPPENHEIMER, C., SCAILLET, B., & MARTIN, R. S. (2011). Sulfur degassing from volcanoes: source conditions, surveillance, plume chemistry and earth system impacts. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. N°1, Vol 73: 363-421.

OHWADA, M., OHBA, T., HIRABAYASHI, J. I., NOGAMI, K., NAKAMURA, K., & NAGAO, K. (2003). Interaction between magmatic fluid and meteoric water, inferred from 18 O/16 O and 36 Ar/H<sub>2</sub>O ratios of fumarolic gases at the Kusatsu Shirane volcano, Japan. *Earth, planets and space*. N°2, Vol 55: 105-110. Japón.

PETIT-BREUILH, M. E. (2004). La historia eruptiva de los volcanes hispanoamericanos (siglos XVI al XX). Servicio de Publicaciones del Exmo. Cabildo Insular de Lanzarote-Casa de los volcanes: 214 pp. Huelva.

PLATT, U. & STUTZ, J., 2008: Differential Optical Absorption Spectroscopy: Principles and applications. Springer-Verlag: 608 pp. Heidelberg.

PRITCHARD, M. E.; HENDERSON, S. T.; JAY, J. A.; SOLER, V.; KRZESNI, D. A.; BUTTON, N. E. & CLAVERO, J. (2014). Reconnaissance earthquake studies at nine volcanic areas of the central Andes with coincident satellite thermal and InSAR observations. *Journal of volcanology and geothermal research*. Vol 280: 90-103.

REYES-HARDY, M. P., BARRAZA, F. A., BIRKE, J. P. S., CÁCERES, A. E., & PIZARRO, M. I. (2021). GIS-based volcanic hazards, vulnerability and risks assessment of the Guallatiri Volcano, Arica y Parinacota Region, Chile. *Journal of South American Earth Sciences*, Vol 109: 1-21.

RODRÍGUEZ, I. & BERTÍN, L (2018). Peligros del volcán Guallatiri, región de Arica y Parinacota: antecedentes preliminares. Congreso Geológico Chileno 2018, N° 15, Resumen 1048. Concepción.

RODRÍGUEZ, L. A., & NADEAU, P. (2015). Resumen de las principales técnicas de percepción remota usadas en volcanes para monitorear las emisiones de gas en la superficie. *Revista Geológica de América Central*. N°52: 67-105.

SANO, Y., & MARTY, B. (1995). Origin of carbon in fumarolic gas from island arcs. *Chemical Geology*. N°1-4, Vol 119: 265-274.

SARRICOLEA, P., HERRERA-OSSANDON, M., & MESEGUER-RUIZ, Ó. (2017). Climatic regionalisation of continental Chile. *Journal of Maps*, N°2, Vol 13: 66-73.

SCHMITZ, M.; HEINSOHN, W. D. & SCHILLING, F. R. (1997). Seismic, gravity and petrological evidence for partial melt beneath the thickened central Andean crust (21–23 S). *Tectonophysics*. N°3-4, Vol 270: 313-326.

SHINOHARA, H. (2008) Excess degassing from volcanoes and its role on eruptive and intrusive activity. *Reviews in Geophysics*, N°4, Vol 46. Japón

SEPÚLVEDA, J. P.; AGUILERA, F.; INOSTROZA, M. & REYES, M. P. (2021). Geological evolution of the Guallatiri volcano, Arica y Parinacota Region, northern Chile. *Journal of South American Earth Sciences*. Vol 107: 1-17.

SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGÍA Y MINERÍA (SERNAGEOMIN) (2015). Reporte de Actividad Volcánica (RAV), región de Arica y Parinacota (Año 2014, mayo 31, Volumen 5). Santiago.

SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGÍA Y MINERÍA (SERNAGEOMIN) (2015). Reporte Especial de Actividad Volcánica (REAV), región de Arica y Parinacota (Año 2015, mayo 31, 14: 00 local time). Santiago.

SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGÍA Y MINERÍA (SERNAGEOMIN) (2021). Volcán Guallatiri. Santiago. << <https://www.sernageomin.cl/volcan-guallatiri/>>>.

STERN, C. R. (2004). Active Andean volcanism: its geologic and tectonic setting. *Revista geológica de Chile*. N°2, Vol 31: 161-206.

STERN, C.R.; MORENO, H.; LÓPEZ-ESCOBAR, L.; CLAVERO, J.; LARA, L.E.; NARANJO, J.A.; PARADA, M.A. & SKEWES, M.A. (2007). Chilean volcanoes. The Geology of Chile. Moreno, T. & Gibbons, W. (eds.): The Geological Society: 402 pp. Londres.

TAMBURELLO, G., HANSTEEN, T. H., BREDEMEYER, S., AIUPPA, A., & TASSI, F. (2014). Gas emissions from five volcanoes in northern Chile and implications for the volatiles budget of the Central Volcanic Zone. *Geophysical Research Letters*. N°14, Vol 41: 4961-4969.

TASSARA, A. & 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*. N°2, Vol 30: 159-186.

THORPE, R. S. & FRANCIS, P. W. (1978). Variations in Andean andesite compositions and their petrogenetic significance. *Tectonophysics*. N°1, Vol 57: 53-70. Holanda.

THORPE, R. S. (1984). The tectonic setting of active Andean volcanism. Andean magmatism chemical and isotopic constraints. Harmon R.S., Barreiro B.A. (eds): 258 pp. Birkhäuser Boston.

WATTS, R. B.; RIBES, J. C. & SPARKS, R. S. J. (2014). The origin and emplacement of Domo Tinto, Guallatiri volcano, Northern Chile. *Andean geology*. N°3, Vol 41: 558-588.

WILKES, T. C., MCGONIGLE, A. J., PERING, T. D., TAGGART, A. J., WHITE, B. S., BRYANT, R. G., & WILLMOTT, J. R. (2016). Ultraviolet imaging with low-cost smartphone sensors: Development and application of a raspberry Pi-based UV camera. *Sensors*. N°10, Vol 16: 2-8.

WILKES, T. C., PERING, T. D., MCGONIGLE, A. J. S., TAMBURELLO, G., & WILLMOTT, J. R. (2017). A low-cost smartphone sensor-based UV camera for volcanic SO<sub>2</sub> emission measurements. *Remote Sensing*. N°1, Vol 9: 1-11.

WÖRNER, G.; MOORBATH, S.; HORN, S.; ENTENMANN, J.; HARMON, R. S.; DAVIDSON, J. P. & LOPEZ-ESCOBAR, L. (1994). Large-and fine-scale geochemical variations along the Andean arc of northern Chile (17.5°–22°S). *Tectonics of the southern Central Andes Springer-Verlag*: 77-92 pp. Heidelberg, Berlín.





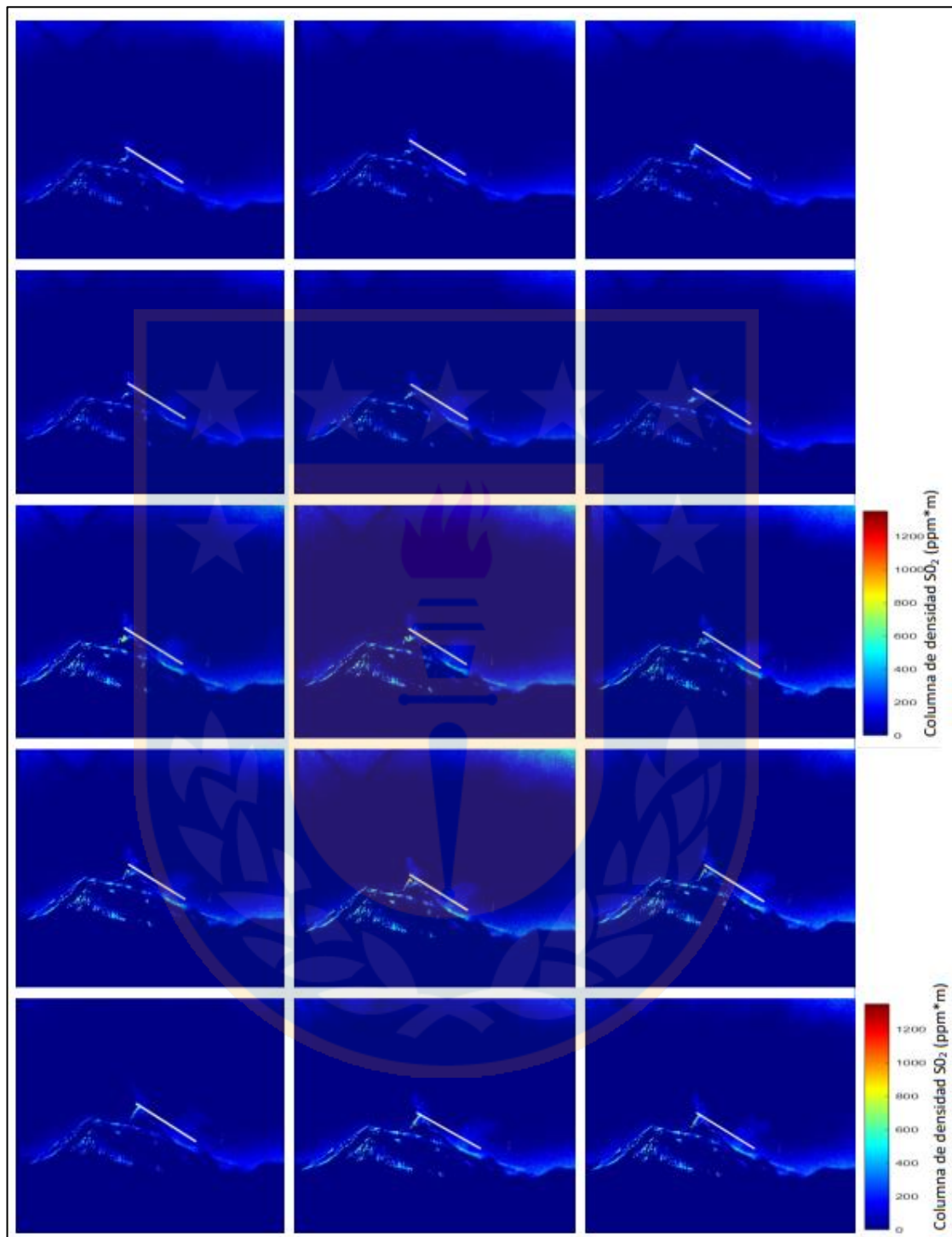
## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>Anexo</b>		<b>Página</b>
1.	Secuencia de imágenes representativas de SO <sub>2</sub> (ppm*m) del Volcán Guallatiri. ....	59
2.	Detalle de las secuencias seleccionadas para las cámaras PiCam UV. .	60
3.	Detalles de los scan medidos con el DOAS. ....	62
4.	Composición muestras de muestras de gas. ....	73
5.	Reporte de Red Agrometeorológica INIA. ....	75





### ANEXO 1: Secuencia de imágenes representativas de $\text{SO}_2$ (ppm\*m) del Volcán Guallatiri.



**Figura 1:** Secuencia acota de imágenes representativas de concentraciones de  $\text{SO}_2$  (ppm\*m), obtenidas por medio del software PostProcess\_v2.1.4 y Matlab, para la segunda secuencia del 21-08 para la PiCam 10.

## ANEXO 2: Detalle de las secuencias seleccionadas para las cámaras PiCam UV

**Tabla 1 Configuración de las cámaras PiCam UV con las características detalladas para cada secuencia.**

PiCam	Día	Secuencia	Carpeta imágenes	N° Imágenes procesadas	Calibración	Absorbance imágenes	Doc Fluxes.txt	Emisión SO <sub>2</sub> (t/d)			D.E.	Velocidad viento (m/s)	Campo fumarólico medido	Método analítico
								Promedio	Máximo	Mínimo				
Gris (10)	20-08-2021	2	Totales	1462	2	15	25	25,1	44,1	17,3	3,8	5,3	SF	CP
	21-08-2021	1	Totales	704	1	3	1	20,7	31,1	13,0	3,5	3,5	SF	CP
		1	Totales	704	1	19	10	19,9	34,6	11,2	5,7	2,4	SF + SWF	CP
		1	Modificadas 1	568	1	4	4	36,3	61,3	21,6	10,0	3,2	SF + SWF	CP
		1	Modificadas 1	568	1	8	8	27,7	51,0	15,6	8,3	2,9	SF + SWF	CP
		1	Modificadas 3	536	1	7	6	36,3	44,9	23,3	5,5	2,5	SF+ SWF	CP
		1	Modificadas 3	536	1	1	12	56,2	74,3	36,3	8,6	4,1	SF + SWF	CP
		2	Totales	1446	2	9	26	18,1	35,4	6,9	5,1	2,4	SF + SWF	CP
		2	Totales	1446	2	19	36	20,7	38,9	8,6	4,9	2,4	SF + SWF	CP
	Promedio:								29,0	46,2	17,1	6,2	3,2	
Negra (1)	20-08-2021	2	Totales	1432	2	18	18	10,36	22,46	3,45	3,07	4,5	SF + SWF	CP
		2	Totales	1432	2	19	19	6,91	18,14	1,73	3,2	3,9	SF + SWF	OCV
		2	Totales	1432	2	33	41	10,36	22,46	3,46	2,63	4,1	SF	OCV
	21-08-2021	1	Totales	1066	1	75	63	17,28	30,24	9,5	4,05	3,2	SF	CP
		1	Totales	1066	1	22	44	19,87	33,70	10,40	4,31	3	SF	OCV
		1	Modificadas 1	980	1	33	81	16,42	32,83	7,78	4,42	4,3	SF	CP
	Promedio:								13,53	26,64	6,05	3,60	3,8	
Promedio:								22,81	38,36	12,67	5,14	3,45		

PiCam 10: En la secuencia “Modificadas 1” del 21 de agosto se eliminaron 136 fotos intermedias, por un mal ajuste en las ICA’s, y en “Modificadas 3” se eliminaron 48 fotos iniciales y 120 finales, buscando un mejor acople entre las ICA’s.

PiCam 1: En la secuencia “Modificadas 1” del 21 de agosto se eliminaron 52 fotos iniciales y 34 finales.

Tabla 2: Detalle de las incertidumbres calculadas para cada secuencia.

PiCam	Día	Secuencia	Calibración	Absorbance images	Doc Fluxes.txt	U Velocidad del viento		U Calibración	U Celdas de cuarzo	U Dilución de la luz	U Dirección pluma	U Detección SO <sub>2</sub>	U total
						Mínima	Máxima						
Gris (10)	20-08-2021	2	2	15	25	25,0	25,1	3,5	0,1	20,0	0,1	0,0	8,1
		1	1	3	1	8,4	8,7	4,2	0,1	20,0	0,1	0,2	5,6
	21-08-2021	1	1	19	10	6,3	6,7	4,2	0,1	20,0	0,1	0,7	5,3
		1	1	4	4	8,4	8,7	4,2	0,1	20,0	0,1	0,4	5,6
		1	1	8	8	5,6	6,1	4,2	0,1	20,0	0,1	0,4	5,1
		1	1	7	6	7,2	7,6	4,2	0,1	20,0	0,1	1,2	5,5
		1	1	1	12	10,0	10,3	4,2	0,1	20,0	0,1	1,1	6,0
		2	2	9	26	2,7	3,6	4,2	0,1	20,0	0,1	1,1	4,9
		2	2	19	36	8,4	8,7	4,2	0,1	20,0	0,1	1,3	5,7
		Promedio:					9,1	9,5	4,2	0,1	20,0	0,1	0,7
Negra (1)	20-08-2021	2	2	18	18	16,7	16,8	10,2	0,1	20,0	0,1	0,2	7,9
		2	2	19	19	8,4	8,7	10,2	0,1	20,0	0,1	0,2	6,5
		2	2	33	41	12,5	12,7	10,2	0,1	20,0	0,1	0,1	7,2
	21-08-2021	1	1	63	75	12,52	12,74	NA	0,1	20	0,1	0,2	5,09
		1	1	22	44	10,0	10,3	NA	0,1	20,0	0,1	0,3	6,2
		1	1	33	81	16,7	16,8	NA	0,1	20,0	0,1	0,3	7,5
	Promedio:					12,79	13,03	10,16	0,10	20	0,10	0,21	6,7
Promedio					10,6	10,9	5,9	0,1	20,0	0,1	0,5	6,2	

### ANEXO 3: Detalles de los scan medidos con el DOAS

Tabla 1: Detalles de la configuración del DOAS para el día 20 de agosto.

N° de Scan	Tiempo UTC-3 (hh:min:ss)			Configuración del DOAS			° Clear
	Inicio	Final	Rango	Tiempo de integración (ms)	Co-adding spectra	Ángulo de escaneo (°)	
1	11:32:45	11:33:49	0:01:04	650	1	90	70
2	11:35:28	11:36:35	0:01:07	650	1	90	10
3	11:37:26	11:38:30	0:01:04	650	1	90	70
4	11:38:38	11:39:42	0:01:04	650	1	90	0
5	11:39:50	11:40:54	0:01:04	650	1	90	60
6	11:41:02	11:42:06	0:01:04	650	1	90	70
7	11:42:14	11:43:18	0:01:04	650	1	90	70
8	11:43:27	11:44:30	0:01:03	650	1	90	70
9	11:44:39	11:45:42	0:01:03	650	1	90	90
10	11:46:40	11:47:42	0:01:02	650	1	90	0
11	11:47:51	11:48:54	0:01:03	650	1	90	0
12	11:49:01	11:50:06	0:01:05	650	1	90	0
13	11:50:15	11:51:18	0:01:03	650	1	90	90
14	11:51:27	11:52:31	0:01:04	650	1	90	0
15	11:52:39	11:53:43	0:01:04	650	1	90	40
16	11:53:51	11:54:56	0:01:05	650	1	90	70
17	11:55:37	11:57:12	0:01:35	650	2	90	75
18	11:57:22	11:58:58	0:01:36	650	2	90	10
19	11:59:08	12:00:44	0:01:36	650	2	90	75
20	12:00:54	12:02:30	0:01:36	650	2	90	90
21	12:02:40	12:04:16	0:01:36	650	2	90	90
22	12:04:26	12:06:02	0:01:36	650	2	90	70
23	12:06:12	12:07:48	0:01:36	650	2	90	15
24	12:07:58	12:09:34	0:01:36	650	2	90	15
25	12:09:44	12:11:20	0:01:36	650	2	90	70
26	12:11:30	12:13:06	0:01:36	650	2	90	20
27	12:13:16	12:14:51	0:01:35	650	2	90	20
28	12:15:02	12:16:37	0:01:35	650	2	90	80
29	12:16:48	12:18:23	0:01:35	650	2	90	70
30	12:18:34	12:20:09	0:01:35	650	2	90	80
31	12:20:20	12:21:55	0:01:35	650	2	90	85
32	12:22:06	12:23:41	0:01:35	650	2	90	80
33	12:23:52	12:25:27	0:01:35	650	2	90	85
34	12:25:37	12:27:13	0:01:36	650	2	90	5
35	12:27:23	12:28:59	0:01:36	650	2	90	0
36	12:29:09	12:30:45	0:01:36	650	2	90	80
37	12:30:55	12:32:31	0:01:36	650	2	90	15
38	12:32:41	12:34:17	0:01:36	650	2	90	80
39	12:34:27	12:36:03	0:01:36	650	2	90	20
40	12:36:13	12:37:49	0:01:36	650	2	90	15

41	12:37:59	12:39:35	0:01:36	650	2	90	85
42	12:39:45	12:41:21	0:01:36	650	2	90	5
43	12:41:31	12:43:07	0:01:36	650	2	90	20
44	12:43:18	12:44:53	0:01:35	650	2	90	65
45	12:45:03	12:46:39	0:01:36	650	2	90	80
46	12:46:49	12:48:25	0:01:36	650	2	90	90
47	12:48:35	12:50:11	0:01:36	650	2	90	80
48	12:50:21	12:51:57	0:01:36	650	2	90	80
49	12:52:07	12:53:43	0:01:36	650	2	90	80
50	12:53:53	12:55:29	0:01:36	650	2	90	90
51	12:55:39	12:57:15	0:01:36	650	2	90	90
52	12:57:25	12:59:01	0:01:36	650	2	90	70
53	12:59:11	13:00:47	0:01:36	650	2	90	85
54	13:00:57	13:02:32	0:01:35	650	2	90	80
55	13:02:43	13:04:18	0:01:35	650	2	90	20
56	13:04:28	13:06:04	0:01:36	650	2	90	10
57	13:06:15	13:07:50	0:01:35	650	2	90	60
58	13:08:01	13:09:36	0:01:35	650	2	90	10
59	13:09:47	13:11:22	0:01:35	650	2	90	65
60	13:11:33	13:13:08	0:01:35	650	2	90	90
61	13:13:19	13:14:54	0:01:35	650	2	90	10
62	13:15:04	13:16:40	0:01:36	650	2	90	70
63	13:16:50	13:18:27	0:01:37	650	2	90	5
64	13:18:37	13:20:13	0:01:36	650	2	90	85
65	13:20:23	13:21:58	0:01:35	650	2	90	20
66	13:22:09	13:23:44	0:01:35	650	2	90	75
67	13:23:55	13:25:30	0:01:35	650	2	90	80
68	13:25:41	13:27:16	0:01:35	650	2	90	60
69	13:27:27	13:29:03	0:01:36	650	2	90	60
70	13:29:13	13:30:49	0:01:36	650	2	90	80
71	13:30:59	13:32:35	0:01:36	650	2	90	5
72	13:32:45	13:34:21	0:01:36	650	2	90	15
73	13:34:31	13:36:07	0:01:36	650	2	90	20
74	13:36:17	13:37:53	0:01:36	650	2	90	75
75	13:38:04	13:39:39	0:01:35	650	2	90	80
76	13:39:50	13:41:25	0:01:35	650	2	90	5
77	13:41:35	13:43:11	0:01:36	650	2	90	5
78	13:43:21	13:44:57	0:01:36	650	2	90	80
79	13:45:07	13:46:44	0:01:37	650	2	90	75
80	13:46:54	13:48:29	0:01:35	650	2	90	40
81	13:48:40	13:50:15	0:01:35	650	2	90	60
82	13:50:26	13:52:01	0:01:35	650	2	90	70
83	13:52:12	13:53:47	0:01:35	650	2	90	50
84	13:53:58	13:55:33	0:01:35	650	2	90	90
85	13:55:44	13:57:20	0:01:36	650	2	90	45
86	13:57:31	13:59:06	0:01:35	650	2	90	50

87	13:59:17	14:00:52	0:01:35	650	2	90	65
88	14:01:03	14:02:38	0:01:35	650	2	90	70
89	14:02:49	14:04:25	0:01:36	650	2	90	65
90	14:04:36	14:06:11	0:01:35	650	2	90	70
91	14:06:21	14:07:57	0:01:36	650	2	90	80
92	14:08:07	14:09:43	0:01:36	650	2	90	90
93	14:09:53	14:11:29	0:01:36	650	2	90	70
95	14:15:39	14:16:43	0:01:04	650	1	90	5
96	14:16:51	14:17:55	0:01:04	650	1	90	60
97	14:18:44	14:19:48	0:01:04	650	1	90	5
98	14:19:56	14:21:01	0:01:05	650	1	90	55
99	14:21:53	14:22:57	0:01:04	650	1	90	45
100	14:23:05	14:24:09	0:01:04	650	1	90	70
101	14:24:40	14:25:44	0:01:04	650	1	90	90
102	14:26:26	14:27:29	0:01:03	650	1	90	70
103	14:27:38	14:28:41	0:01:03	650	1	90	70
104	14:28:50	14:29:54	0:01:04	650	1	90	20
106	14:32:07	14:33:11	0:01:04	650	1	90	75
108	14:35:41	14:36:45	0:01:04	650	1	90	80
109	14:37:23	14:38:26	0:01:03	650	1	90	75
113	14:47:40	14:48:43	0:01:03	650	1	90	80
114	14:48:58	14:50:02	0:01:04	650	1	90	95
116	14:52:12	14:53:16	0:01:04	650	1	90	60
117	14:53:41	14:54:45	0:01:04	650	1	90	20
118	14:55:05	14:56:09	0:01:04	650	1	90	20
120	14:58:22	14:59:25	0:01:03	650	1	90	80
121	15:00:02	15:01:06	0:01:04	650	1	90	70
122	15:01:14	15:02:18	0:01:04	650	1	90	85
124	15:03:39	15:04:43	0:01:04	650	1	90	90
125	15:04:51	15:05:55	0:01:04	650	1	90	10
126	15:06:04	15:07:08	0:01:04	650	1	90	70
127	15:07:16	15:08:20	0:01:04	650	1	90	5
128	15:08:28	15:09:32	0:01:04	650	1	90	70
129	15:09:40	15:10:44	0:01:04	650	1	90	45
130	15:10:52	15:11:56	0:01:04	650	1	90	80
131	15:12:05	15:13:09	0:01:04	650	1	90	10
132	15:13:17	15:14:22	0:01:05	650	1	90	0
133	15:14:30	15:15:34	0:01:04	650	1	90	80
135	15:16:56	15:18:00	0:01:04	650	1	90	80
138	15:20:33	15:21:37	0:01:04	650	1	90	70
139	15:21:46	15:22:49	0:01:03	650	1	90	60
140	15:22:58	15:24:01	0:01:03	650	1	90	80
141	15:24:10	15:25:14	0:01:04	650	1	90	70



Tabla 2: Resultados detallados obtenidos con el DOAS el día 20 de agosto

N° de Scan	STD Error	Velocidad de la pluma (m/s)			Emisión SO <sub>2</sub> (t/d)			Ángulo		D.E		
		Promedio (PiCam)	Terreno	Max	Promedio	Min	Max	1er Peak	2nd Peak	$\sigma$	$\sigma^2$	( $\sigma/x$ )
1	6,8	3,4	1,7	5,3	250,0	125,0	389,7	60		125,0	15625,3	50%
2	7,2	3,4	1,7	5,3	280,8	140,4	437,8	60		140,4	19717,8	50%
3	6,6	3,4	1,7	5,3	202,7	101,4	316,0			101,4	10272,6	50%
4	6,1	3,4	1,7	5,3	209,3	104,7	326,3			104,7	10955,6	50%
5	6,8	3,4	1,7	5,3	208,3	104,1	324,6			104,1	10842,0	50%
6	6,8	3,4	1,7	5,3	257,6	128,8	401,5			128,8	16583,0	50%
7	8,6	3,4	1,7	5,3	221,7	110,9	345,7			110,9	12293,0	50%
8	9,1	3,4	1,7	5,3	261,8	130,9	408,1	60		130,9	17134,8	50%
9	6	3,4	1,7	5,3	248,8	124,4	387,9	60		124,4	15476,9	50%
10	9,3	3,4	1,7	5,3	328,7	164,4	512,5	60		164,4	27018,5	50%
11	8	3,4	1,7	5,3	371,0	185,5	578,3	60		185,5	34411,7	50%
12	7,2	3,4	1,7	5,3	208,0	104,0	324,2	10	60	104,0	10813,7	50%
13	7,7	3,4	1,7	5,3	340,1	170,0	530,1	50		170,0	28911,6	50%
14	6,7	3,4	1,7	5,3	244,8	122,4	381,5	50		122,4	14977,6	50%
15	7,6	3,4	1,7	5,3	241,2	120,6	376,0	50		120,6	14543,9	50%
16	6,6	3,4	1,7	5,3	317,1	158,5	494,2	50		158,5	25130,2	50%
17	3,9	3,4	1,7	5,3	329,7	164,8	513,9	60		164,8	27169,6	50%
18	5,3	3,4	1,7	5,3	284,6	142,3	443,7	60		142,3	20251,3	50%
19	4,5	3,4	1,7	5,3	189,5	94,8	295,4	60		94,8	8979,1	50%
20	4,4	3,4	1,7	5,3	301,0	150,5	469,2	60		150,5	22650,6	50%
21	4,8	3,4	1,7	5,3	246,1	123,0	383,6	60		123,0	15136,1	50%
22	4,8	3,4	1,7	5,3	237,9	119,0	370,9	55		119,0	14152,9	50%
23	5,4	3,4	1,7	5,3	230,4	115,2	359,1	55		115,2	13269,2	50%
24	5,3	3,4	1,7	5,3	277,6	138,8	432,7	50		138,8	19262,1	50%
25	5	3,4	1,7	5,3	304,5	152,2	474,6	50		152,2	23175,5	50%
26	5,7	3,4	1,7	5,3	315,0	157,5	491,0	55		157,5	24802,5	50%
27	6,2	3,4	1,7	5,3	261,2	130,6	407,2	55		130,6	17059,2	50%
28	4,3	3,4	1,7	5,3	281,7	140,8	439,1	60		140,8	19832,5	50%
29	4,3	3,4	1,7	5,3	247,1	123,6	385,3	60		123,6	15270,3	50%
30	5,8	3,4	1,7	5,3	258,2	129,1	402,4	60		129,1	16661,9	50%
31	5,3	3,4	1,7	5,3	283,1	141,5	441,2	55		141,5	20029,3	50%
32	4,3	3,4	1,7	5,3	250,3	125,2	390,2	50		125,2	15663,5	50%
33	4,4	3,4	1,7	5,3	240,5	120,2	374,9	50		120,2	14457,9	50%
34	6,3	3,4	1,7	5,3	307,4	153,7	479,2	60		153,7	23628,0	50%
35	6,1	3,4	1,7	5,3	292,8	146,4	456,4	50		146,4	21429,2	50%
36	4,8	3,4	1,7	5,3	222,9	111,5	347,5	40-60		111,5	12425,3	50%
37	4,3	3,4	1,7	5,3	219,4	109,7	342,0			109,7	12030,6	50%
38	4,8	3,4	1,7	5,3	298,1	149,1	464,7	40-60		149,1	22217,7	50%
39	6	3,4	1,7	5,3	240,8	120,4	375,3	50		120,4	14494,7	50%
40	5,7	3,4	1,7	5,3	260,9	130,5	406,7	60		130,5	17019,3	50%

41	5,7	3,4	1,7	5,3	269,0	134,5	419,4	55		134,5	18095,9	50%
42	6,2	3,4	1,7	5,3	338,4	169,2	527,5	60		169,2	28623,2	50%
43	5,3	3,4	1,7	5,3	245,9	122,9	383,2	60		122,9	15111,0	50%
44	4,6	3,4	1,7	5,3	169,2	84,6	263,7	55		84,6	7155,8	50%
45	5,1	3,4	1,7	5,3	197,9	99,0	308,6	50		99,0	9795,9	50%
46	5,3	3,4	1,7	5,3	223,3	111,7	348,2	50		111,7	12470,9	50%
47	4,2	3,4	1,7	5,3	201,8	100,9	314,6	50	60	100,9	10183,2	50%
48	5	3,4	1,7	5,3	214,6	107,3	334,5	60		107,3	11514,1	50%
49	6,9	3,4	1,7	5,3	260,8	130,4	406,6			130,4	17006,0	50%
50	5,1	3,4	1,7	5,3	281,8	140,9	439,2	60		140,9	19846,9	50%
51	4,9	3,4	1,7	5,3	271,5	135,8	423,3	60		135,8	18431,3	50%
52	5,4	3,4	1,7	5,3	219,9	109,9	342,8	60		109,9	12086,6	50%
53	3,9	3,4	1,7	5,3	254,6	127,3	396,9	60		127,3	16204,3	50%
54	5	3,4	1,7	5,3	215,2	107,6	335,5	60		107,6	11579,9	50%
55	5,7	3,4	1,7	5,3	222,0	111,0	346,0	60		111,0	12315,7	50%
56	5,2	3,4	1,7	5,3	249,7	124,9	389,3	50		124,9	15591,3	50%
57	5,5	3,4	1,7	5,3	176,9	88,5	275,8	50		88,5	7826,6	50%
58	5,5	3,4	1,7	5,3	269,0	134,5	419,4	40	50-60	134,5	18095,9	50%
59	4,9	3,4	1,7	5,3	209,2	104,6	326,1	55		104,6	10937,8	50%
60	5,2	3,4	1,7	5,3	204,8	102,4	319,2	60		102,4	10483,9	50%
61	5,2	3,4	1,7	5,3	254,9	127,4	397,3	60		127,4	16238,9	50%
62	4,6	3,4	1,7	5,3	249,3	124,7	388,6	50	60	124,7	15540,4	50%
63	4,9	3,4	1,7	5,3	216,0	108,0	336,7	60		108,0	11664,2	50%
64	4,4	3,4	1,7	5,3	253,8	126,9	395,6			126,9	16100,6	50%
65	6,2	3,4	1,7	5,3	314,0	157,0	489,5			157,0	24647,4	50%
66	6,6	3,4	1,7	5,3	262,5	131,3	409,2	60		131,3	17228,4	50%
67	4,7	3,4	1,7	5,3	283,4	141,7	441,8	60		141,7	20082,3	50%
68	4,8	3,4	1,7	5,3	202,4	101,2	315,5	60		101,2	10241,6	50%
69	4,6	3,4	1,7	5,3	189,4	94,7	295,3	60		94,7	8969,4	50%
70	4,3	3,4	1,7	5,3	284,1	142,1	442,9	60		142,1	20183,6	50%
71	6	3,4	1,7	5,3	261,4	130,7	407,5	55		130,7	17085,9	50%
72	5,9	3,4	1,7	5,3	205,8	102,9	320,8	60		102,9	10585,1	50%
73	5,2	3,4	1,7	5,3	208,5	104,2	324,9			104,2	10863,3	50%
74	4,6	3,4	1,7	5,3	235,5	117,7	367,0	55		117,7	13859,2	50%
75	4,9	3,4	1,7	5,3	260,0	130,0	405,3	60		130,0	16904,2	50%
76	4,8	3,4	1,7	5,3	293,1	146,6	457,0	60		146,6	21483,9	50%
77	6,8	3,4	1,7	5,3	313,1	156,5	488,0	60		156,5	24503,5	50%
78	5	3,4	1,7	5,3	300,5	150,2	468,4	55		150,2	22573,9	50%
79	4,5	3,4	1,7	5,3	177,9	89,0	277,3	60		89,0	7914,1	50%
80	4,4	3,4	1,7	5,3	187,7	93,9	292,7	60		93,9	8812,3	50%
81	5,2	3,4	1,7	5,3	214,3	107,2	334,1	50		107,2	11481,3	50%
82	6,2	3,4	1,7	5,3	299,8	149,9	467,4	15		149,9	22471,8	50%
83	6,9	3,4	1,7	5,3	208,0	104,0	324,2			104,0	10813,7	50%
84	4,9	3,4	1,7	5,3	325,3	162,6	507,1	60		162,6	26451,4	50%
85	5,8	3,4	1,7	5,3	144,3	72,1	224,9	40	55	72,1	5205,3	50%
86	4,5	3,4	1,7	5,3	247,0	123,5	385,1	60		123,5	15257,7	50%

87	4,7	3,4	1,7	5,3	224,2	112,1	349,5	60		112,1	12569,8	50%
88	4,9	3,4	1,7	5,3	194,8	97,4	303,6	60		97,4	9485,4	50%
89	4,7	3,4	1,7	5,3	210,8	105,4	328,7	60		105,4	11112,7	50%
90	4,5	3,4	1,7	5,3	223,0	111,5	347,7	60		111,5	12436,7	50%
91	5,2	3,4	1,7	5,3	261,2	130,6	407,2	60		130,6	17059,2	50%
92	5,2	3,4	1,7	5,3	336,2	168,1	524,1	60		168,1	28256,3	50%
93	5	3,4	1,7	5,3	317,1	158,5	494,2	60		158,5	25130,2	50%
95	9	3,4	1,7	5,3	300,2	150,1	467,9	40	55	150,1	22527,9	50%
96	7	3,4	1,7	5,3	167,7	83,8	261,4			83,8	7029,8	50%
97	7	3,4	1,7	5,3	244,3	122,1	380,8			122,1	14915,2	50%
98	8,3	3,4	1,7	5,3	260,1	130,1	405,5			130,1	16917,4	50%
99	6,8	3,4	1,7	5,3	324,4	162,2	505,7			162,2	26307,9	50%
100	6,9	3,4	1,7	5,3	282,4	141,2	440,3	60		141,2	19942,8	50%
101	6,6	3,4	1,7	5,3	309,8	154,9	482,9	60		154,9	23995,2	50%
102	7,7	3,4	1,7	5,3	372,2	186,1	580,2	60		186,1	34632,8	50%
103	8,5	3,4	1,7	5,3	375,8	187,9	585,8	60		187,9	35300,4	50%
104	7,9	3,4	1,7	5,3	351,8	175,9	548,3	60		175,9	30934,5	50%
106	8,4	3,4	1,7	5,3	358,2	179,1	558,4	60		179,1	32081,1	50%
108	7,6	3,4	1,7	5,3	410,8	205,4	640,3	60		205,4	42186,7	50%
109	7,1	3,4	1,7	5,3	287,0	143,5	447,4	55		143,5	20591,4	50%
113	7,3	3,4	1,7	5,3	270,2	135,1	421,2			135,1	18256,3	50%
114	7,4	3,4	1,7	5,3	309,2	154,6	482,0			154,6	23905,8	50%
116	8	3,4	1,7	5,3	330,8	165,4	515,6	30	50	165,4	27349,2	50%
117	9,6	3,4	1,7	5,3	291,1	145,5	453,7			145,5	21181,0	50%
118	9,2	3,4	1,7	5,3	305,6	152,8	476,3			152,8	23341,4	50%
120	8,7	3,4	1,7	5,3	416,2	208,1	648,8	60		208,1	43311,4	50%
121	7,4	3,4	1,7	5,3	278,4	139,2	434,0			139,2	19375,5	50%
122	7,5	3,4	1,7	5,3	409,1	204,5	637,7			204,5	41838,2	50%
124	8,6	3,4	1,7	5,3	252,5	126,2	393,6	50		126,2	15937,0	50%
125	9	3,4	1,7	5,3	312,4	156,2	487,0			156,2	24397,2	50%
126	9,1	3,4	1,7	5,3	309,9	155,0	483,1			155,0	24011,1	50%
127	9,3	3,4	1,7	5,3	338,0	169,0	526,9	60		169,0	28560,0	50%
128	8,4	3,4	1,7	5,3	324,6	162,3	506,0			162,3	26341,0	50%
129	9,1	3,4	1,7	5,3	332,7	166,4	518,7	20		166,4	27676,3	50%
130	10	3,4	1,7	5,3	278,1	139,0	433,5			139,0	19333,0	50%
131	9,2	3,4	1,7	5,3	299,7	149,9	467,2	20	60	149,9	22456,5	50%
132	8,4	3,4	1,7	5,3	309,7	154,9	482,8			154,9	23979,5	50%
133	7,8	3,4	1,7	5,3	238,9	119,5	372,4	50		119,5	14270,5	50%
135	8,8	3,4	1,7	5,3	322,2	161,1	502,3			161,1	25956,1	50%
138	8,9	3,4	1,7	5,3	287,3	143,7	447,9	10		143,7	20635,3	50%
139	8,9	3,4	1,7	5,3	247,4	123,7	385,6	15		123,7	15295,5	50%
140	8,3	3,4	1,7	5,3	295,9	148,0	461,3	55		148,0	21894,5	50%
141	9,1	3,4	1,7	5,3	314,4	157,2	490,0			157,2	24706,2	50%

Promedio 6,28

267,8 133,9 417,5

136,5

Tabla 3: Configuración del DOAS para el día 21 de agosto.

N° de Scan	Tiempo UTC-3 (hh:min:ss)			Configuración del DOAS			°Clear
	Inicio	Final	Rango	Tiempo de integración (ms)	Co-adding spectra	Ángulo de escaneo (°)	
13	10:45:58	10:46:54	0:00:56	650	1	80	60
14	10:47:02	10:47:58	0:00:56	650	1	80	10
15	10:48:07	10:49:03	0:00:56	650	1	80	10
16	10:49:11	10:50:07	0:00:56	650	1	80	15
17	10:50:16	10:51:11	0:00:55	650	1	80	35
18	10:51:20	10:52:16	0:00:56	650	1	80	20
19	10:52:24	10:53:20	0:00:56	650	1	80	30
20	10:53:29	10:54:24	0:00:55	650	1	80	20
21	10:54:33	10:55:29	0:00:56	650	1	80	60
22	10:55:37	10:56:33	0:00:56	650	1	80	30
23	10:56:42	10:57:37	0:00:55	650	1	80	15
24	10:57:46	10:58:42	0:00:56	650	1	80	25
25	10:58:50	10:59:46	0:00:56	650	1	80	10
26	10:59:55	11:00:51	0:00:56	650	1	80	20
27	11:00:59	11:01:55	0:00:56	650	1	80	70
28	11:02:03	11:02:59	0:00:56	650	1	80	70
29	11:03:08	11:04:04	0:00:56	650	1	80	55
30	11:04:12	11:05:08	0:00:56	650	1	80	10
31	11:05:16	11:06:12	0:00:56	650	1	80	60
32	11:06:21	11:07:17	0:00:56	650	1	80	10
33	11:07:25	11:08:21	0:00:56	650	1	80	20
34	11:08:29	11:09:25	0:00:56	650	1	80	20
35	11:09:34	11:10:30	0:00:56	650	1	80	20
36	11:10:37	11:11:33	0:00:56	650	1	80	60
37	11:11:42	11:12:38	0:00:56	650	1	80	60
38	11:12:46	11:13:42	0:00:56	650	1	80	60
39	11:13:52	11:14:46	0:00:54	650	1	80	70
40	11:14:55	11:15:51	0:00:56	650	1	80	20
41	11:15:59	11:16:55	0:00:56	650	1	80	70
42	11:17:03	11:17:59	0:00:56	650	1	80	30
46	11:21:21	11:22:17	0:00:56	650	1	80	15
47	11:22:25	11:23:21	0:00:56	650	1	80	25
48	11:23:30	11:24:25	0:00:55	650	1	80	20
49	11:24:33	11:25:30	0:00:57	650	1	80	80
50	11:25:38	11:26:34	0:00:56	650	1	80	70
51	11:26:43	11:27:38	0:00:55	650	1	80	55
52	11:27:47	11:28:43	0:00:56	650	1	80	20
53	11:30:04	11:31:28	0:01:24	650	2	80	20
54	11:31:38	11:33:02	0:01:24	650	2	80	20
55	11:33:13	11:34:36	0:01:23	650	2	80	60
56	11:34:47	11:36:11	0:01:24	650	2	80	20
57	11:36:21	11:37:45	0:01:24	650	2	80	20

58	11:37:55	11:39:19	0:01:24	650	2	80	15
59	11:39:29	11:40:53	0:01:24	650	2	80	20
60	11:41:04	11:42:28	0:01:24	650	2	80	60
61	11:42:38	11:44:02	0:01:24	650	2	80	25
62	11:44:12	11:45:36	0:01:24	650	2	80	80
63	11:45:46	11:47:10	0:01:24	650	2	80	15
64	11:47:21	11:48:45	0:01:24	650	2	80	20
65	11:48:55	11:50:19	0:01:24	650	2	80	20
66	11:50:29	11:51:53	0:01:24	650	2	80	70
67	11:52:03	11:53:27	0:01:24	650	2	80	60
68	11:53:38	11:55:01	0:01:23	650	2	80	20
69	11:55:12	11:56:36	0:01:24	650	2	80	20
70	11:56:46	11:58:11	0:01:25	650	2	80	20
71	11:58:21	11:59:45	0:01:24	650	2	80	20
72	11:59:55	12:01:19	0:01:24	650	2	80	55
73	12:01:30	12:02:53	0:01:23	650	2	80	60
74	12:03:04	12:04:28	0:01:24	650	2	80	55
75	12:04:36	12:06:02	0:01:26	650	2	80	55
76	12:06:12	12:07:36	0:01:24	650	2	80	20
77	12:07:46	12:09:10	0:01:24	650	2	80	67
78	12:09:21	12:10:45	0:01:24	650	2	80	55
79	12:10:55	12:12:19	0:01:24	650	2	80	15
80	12:12:29	12:13:53	0:01:24	650	2	80	50
81	12:14:03	12:15:27	0:01:24	650	2	80	20
82	12:15:38	12:17:02	0:01:24	650	2	80	40
83	12:17:12	12:18:36	0:01:24	650	2	80	40
84	12:18:46	12:20:10	0:01:24	650	2	80	20
85	12:20:20	12:21:44	0:01:24	650	2	80	50
86	12:21:55	12:23:18	0:01:23	650	2	80	65
87	12:23:29	12:24:53	0:01:24	650	2	80	50
88	12:25:03	12:26:27	0:01:24	650	2	80	20
89	12:26:37	12:28:01	0:01:24	650	2	80	50
90	12:28:12	12:29:35	0:01:23	650	2	80	55
91	12:29:46	12:31:10	0:01:24	650	2	80	70
92	12:31:20	12:32:44	0:01:24	650	2	80	0
93	12:32:54	12:34:18	0:01:24	650	2	80	20
94	12:34:29	12:35:52	0:01:23	650	2	80	40
95	12:36:03	12:37:29	0:01:26	650	2	80	40
96	12:41:53	12:42:49	0:00:56	650	1	80	15
97	12:43:12	12:44:08	0:00:56	650	1	80	70
98	12:45:41	12:46:37	0:00:56	650	1	80	75
99	12:46:46	12:47:41	0:00:55	650	1	80	70
102	12:50:59	12:51:55	0:00:56	650	1	80	30
103	12:52:03	12:52:59	0:00:56	650	1	80	75
104	12:53:08	12:54:03	0:00:55	650	1	80	80
105	12:54:12	12:55:08	0:00:56	650	1	80	75

106	12:55:17	12:56:13	0:00:56	650	1	80	70
107	12:56:21	12:57:17	0:00:56	650	1	80	45
108	12:57:26	12:58:21	0:00:55	650	1	80	40
109	12:58:29	12:59:26	0:00:57	650	1	80	0
110	12:59:34	13:00:30	0:00:56	650	1	80	70
111	13:00:39	13:01:35	0:00:56	650	1	80	55
112	13:01:43	13:02:39	0:00:56	650	1	80	80
113	13:02:48	13:03:44	0:00:56	650	1	80	45

**Tabla 4: Resultados detallados obtenidos con el DOAS para el día 21 de agosto.**

N° de Scan	STD Error	Velocidad de la pluma (m/s)			Emisión de SO <sub>2</sub> (t/d)			Ángulo		D.E		
		Promedio (PiCam)	Terreno	Max	Promedio	Min	Max	1er Peak	2nd Peak	$\sigma$	$\sigma^2$	$\sigma / x(\text{SO}_2)$
13	7,2	3,4	1,7	5,3	313,4	156,7	488,5	50		156,7	24551,4	0,5
14	8,8	3,4	1,7	5,3	256,6	128,3	399,9	50		128,3	16456,3	0,5
15	8,7	3,4	1,7	5,3	272,5	136,3	424,8	45		136,3	18570,1	0,5
16	6,8	3,4	1,7	5,3	260,1	130,1	405,5	40		130,1	16917,4	0,5
17	6,6	3,4	1,7	5,3	244,7	122,3	381,4	45		122,3	14965,1	0,5
18	7,8	3,4	1,7	5,3	296,1	148,1	461,6	40		148,1	21924,7	0,5
19	6	3,4	1,7	5,3	352,0	176,0	548,7	40		176,0	30976,4	0,5
20	6,8	3,4	1,7	5,3	324,2	162,1	505,4	40		162,1	26274,8	0,5
21	6,8	3,4	1,7	5,3	255,2	127,6	397,8	40		127,6	16277,9	0,5
22	6,7	3,4	1,7	5,3	250,3	125,2	390,2	40		125,2	15663,5	0,5
23	7,2	3,4	1,7	5,3	327,4	163,7	510,3	40	50	163,7	26795,4	0,5
24	6,2	3,4	1,7	5,3	311,6	155,8	485,7	40	45	155,8	24275,2	0,5
25	7,1	3,4	1,7	5,3	328,2	164,1	511,6	40	50	164,1	26923,6	0,5
26	6,7	3,4	1,7	5,3	363,5	181,7	566,6	40	45	181,7	33025,8	0,5
27	6,3	3,4	1,7	5,3	296,2	148,1	461,8	40	45	148,1	21939,8	0,5
28	6,3	3,4	1,7	5,3	313,5	156,7	488,7	40	45	156,7	24567,4	0,5
29	7,3	3,4	1,7	5,3	254,4	127,2	396,5	40	45	127,2	16178,3	0,5
30	6,4	3,4	1,7	5,3	223,3	111,7	348,2	40	50	111,7	12470,9	0,5
31	5,9	3,4	1,7	5,3	302,4	151,2	471,3	40	50	151,2	22855,7	0,5
32	6,5	3,4	1,7	5,3	332,6	166,3	518,5	40	45	166,3	27659,3	0,5
33	6,3	3,4	1,7	5,3	312,4	156,2	487,0	40	45	156,2	24397,2	0,5
34	7	3,4	1,7	5,3	390,6	195,3	608,9	45		195,3	38147,2	0,5
35	6,2	3,4	1,7	5,3	412,1	206,1	642,5	40		206,1	42466,5	0,5
36	6,1	3,4	1,7	5,3	320,3	160,2	499,3	50		160,2	25650,3	0,5
37	6,1	3,4	1,7	5,3	363,4	181,7	566,4	35	50	181,7	33007,3	0,5
38	6,1	3,4	1,7	5,3	363,1	181,6	566,0	45		181,6	32964,0	0,5
39	6	3,4	1,7	5,3	436,7	218,3	680,7	40		218,3	47668,4	0,5
40	6,7	3,4	1,7	5,3	313,3	156,6	488,3	35		156,6	24535,5	0,5
41	6	3,4	1,7	5,3	249,8	124,9	389,4	35		124,9	15604,0	0,5
42	6,6	3,4	1,7	5,3	295,2	147,6	460,2	35		147,6	21789,0	0,5
46	6,4	3,4	1,7	5,3	332,0	166,0	517,6	35	45	166,0	27563,3	0,5
47	6,8	3,4	1,7	5,3	318,4	159,2	496,4	35	45	159,2	25351,6	0,5



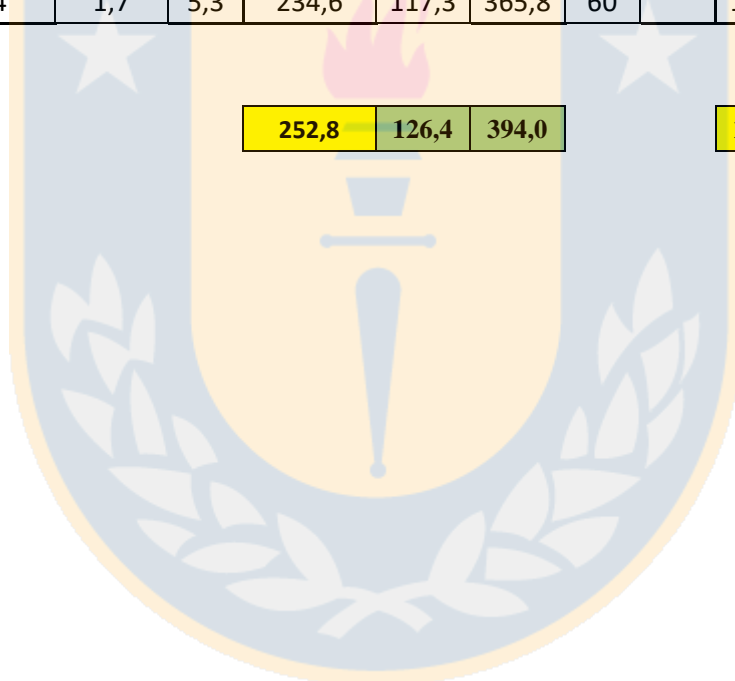
48	6,5	3,4	1,7	5,3	337,8	168,9	526,6	35	45	168,9	28525,5	0,5
49	6	3,4	1,7	5,3	269,7	134,8	420,3	40		134,8	18178,3	0,5
50	7,2	3,4	1,7	7:12	326,4	163,2	508,7	35		163,2	26628,7	0,5
51	6,6	3,4	1,7	7:12	281,1	140,6	438,3	35		140,6	19760,8	0,5
52	6,4	3,4	1,7	7:12	308,3	154,2	480,6	40		154,2	23764,1	0,5
53	5,1	3,4	1,7	5,3	284,0	142,0	442,8	40		142,0	20169,1	0,5
54	4,3	3,4	1,7	5,3	326,0	163,0	508,2	40		163,0	26567,7	0,5
55	3,8	3,4	1,7	5,3	259,1	129,6	404,0	40		129,6	16789,4	0,5
56	4,3	3,4	1,7	5,3	262,4	131,2	409,1	40		131,2	17215,0	0,5
57	4,6	3,4	1,7	5,3	217,5	108,7	339,0	35		108,7	11826,3	0,5
58	4,5	3,4	1,7	5,3	281,2	140,6	438,4	40		140,6	19775,1	0,5
59	5,1	3,4	1,7	5,3	242,5	121,2	378,0	35		121,2	14700,1	0,5
60	4,7	3,4	1,7	5,3	296,6	148,3	462,4	35		148,3	21995,3	0,5
61	5	3,4	1,7	5,3	288,4	144,2	449,5	35	40	144,2	20791,9	0,5
62	5,1	3,4	1,7	5,3	341,7	170,9	532,7	35		170,9	29195,5	0,5
63	4,6	3,4	1,7	5,3	287,1	143,5	447,5	35		143,5	20606,0	0,5
64	5,1	3,4	1,7	5,3	292,2	146,1	455,4	35		146,1	21339,7	0,5
65	4,4	3,4	1,7	5,3	192,3	96,2	299,8	35		96,2	9245,2	0,5
66	4,5	3,4	1,7	5,3	256,2	128,1	399,3	35		128,1	16404,0	0,5
67	4,6	3,4	1,7	5,3	248,0	124,0	386,6	35		124,0	15379,7	0,5
68	4,6	3,4	1,7	5,3	214,6	107,3	334,5	35		107,3	11514,1	0,5
69	5	3,4	1,7	5,3	229,1	114,5	357,1	35		114,5	13120,8	0,5
70	4	3,4	1,7	5,3	193,2	96,6	301,1	35		96,6	9330,4	0,5
71	4,4	3,4	1,7	5,3	227,2	113,6	354,2	35		113,6	12907,5	0,5
72	4,8	3,4	1,7	5,3	256,3	128,1	399,5	35		128,1	16417,0	0,5
73	4,5	3,4	1,7	5,3	320,3	160,2	499,3	35		160,2	25650,3	0,5
74	4,7	3,4	1,7	5,3	195,8	97,9	305,2	35		97,9	9581,7	0,5
75	4,5	3,4	1,7	5,3	200,3	100,2	312,3	35		100,2	10032,8	0,5
76	4,6	3,4	1,7	5,3	217,4	108,7	338,9	35		108,7	11815,3	0,5
77	4,5	3,4	1,7	5,3	144,6	72,3	225,4	30		72,3	5227,4	0,5
78	5,1	3,4	1,7	5,3	188,9	94,5	294,5	30		94,5	8924,4	0,5
79	5	3,4	1,7	5,3	213,1	106,6	332,2	30		106,6	11354,2	0,5
80	5	3,4	1,7	5,3	218,3	109,1	340,3	30		109,1	11911,5	0,5
81	4	3,4	1,7	5,3	181,7	90,8	283,2	30		90,8	8253,4	0,5
82	4,3	3,4	1,7	5,3	143,3	71,7	223,4	30		71,7	5134,4	0,5
83	4,7	3,4	1,7	5,3	192,0	96,0	299,3	30		96,0	9215,8	0,5
84	4,5	3,4	1,7	5,3	209,3	104,7	326,3	30	80	104,7	10955,6	0,5
85	4,4	3,4	1,7	5,3	190,5	95,3	297,0	30		95,3	9072,8	0,5
86	4,5	3,4	1,7	5,3	138,2	69,1	215,5	30	80	69,1	4777,9	0,5
87	4,6	3,4	1,7	5,3	92,8	46,4	144,7	30	80	46,4	2153,9	0,5
88	4,1	3,4	1,7	5,3	144,9	72,5	225,9	30	80	72,5	5249,6	0,5
89	4,9	3,4	1,7	5,3	148,3	74,1	231,1	30		74,1	5496,3	0,5
90	4,4	3,4	1,7	5,3	162,6	81,3	253,4	30		81,3	6606,0	0,5
91	4,7	3,4	1,7	5,3	134,2	67,1	209,1	30		67,1	4500,0	0,5
92	4,8	3,4	1,7	5,3	129,3	64,7	201,6	80		64,7	4182,0	0,5
93	5	3,4	1,7	5,3	59,5	29,8	92,8	80		29,8	885,1	0,5

94	5,1	3,4	1,7	5,3	100,8	50,4	157,1		50,4	2539,0	0,5
95	5	3,4	1,7	5,3	162,8	81,4	253,7		81,4	6622,5	0,5
96	7,9	3,4	1,7	5,3	205,0	102,5	319,5	60	102,5	10504,8	0,5
97	6,4	3,4	1,7	5,3	214,5	107,3	334,4	60	107,3	11503,2	0,5
98	6,4	3,4	1,7	5,3	265,7	132,8	414,1	60	132,8	17645,9	0,5
99	6,7	3,4	1,7	5,3	270,5	135,3	421,7	60	135,3	18297,7	0,5
102	6,4	3,4	1,7	5,3	246,5	123,3	384,3	65	123,3	15194,8	0,5
103	6,3	3,4	1,7	5,3	233,8	116,9	364,4	65	116,9	13659,8	0,5
104	6,4	3,4	1,7	5,3	268,4	134,2	418,3	65	134,2	18004,5	0,5
105	6,5	3,4	1,7	5,3	333,9	167,0	520,5	60	167,0	27874,6	0,5
106	7,1	3,4	1,7	5,3	277,9	138,9	433,2	60	138,9	19304,6	0,5
107	6,5	3,4	1,7	5,3	162,9	81,5	254,0	60	81,5	6636,4	0,5
108	6,5	3,4	1,7	5,3	189,2	94,6	294,9	60	94,6	8950,1	0,5
109	6,7	3,4	1,7	5,3	118,3	59,2	184,4	60	59,2	3499,9	0,5
110	6,5	3,4	1,7	5,3	265,6	132,8	414,0	60	132,8	17632,4	0,5
111	6	3,4	1,7	5,3	142,8	71,4	222,6	60	71,4	5098,0	0,5
112	6,3	3,4	1,7	5,3	244,2	122,1	380,6	65	122,1	14902,8	0,5
113	6,3	3,4	1,7	5,3	234,6	117,3	365,8	60	117,3	13763,3	0,5

Promedio	5,7
----------	-----

252,8	126,4	394,0
-------	-------	-------

131,6
-------





**Tabla 2: Composición química de la fracción de gas en mmol/mol de las muestras de la fumarola del volcán Guallatiri, tomadas por Inostroza y otros (2020a).** C.F = Campo fumarólico. RH =  $\text{Log}(\text{H}_2/\text{H}_2\text{O})$ . b.d.l = *below detected limit*.

Muestra	C.F.	T(°C)	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	HCl	HF	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	Ar	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	He	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	RH
GUA-1	SF	264	880	113	0,95	4,1	b.d.l.	b.d.l.	2,2	0,013	0,014	0,21	0,0036	0,00051	0,0015	0,00012	0,0000008	0,000043	0,000013	-3,6
GUA-2	SF	265	895	98	0,66	2,9	0,31	0,032	2,9	0,011	0,015	0,16	0,0021	0,00043	0,0011	0,00016	0,0000009	0,000055	0,000011	-3,7
GUA-3	SF	83,2	871	124	0,39	1,8	b.d.l.	b.d.l.	2,1	0,036	0,013	0,23	0,0039	0,00011	0,0006	0,00015	0,0000006	0,000048	0,000012	-3,6
GUA-4	SWF	91,4	906	85	0,55	3,9	0,13	0,009	3,8	0,055	0,031	0,21	0,0073	0,00013	0,0012	0,00019	0,0000007	0,000045	0,000016	-3,6
GUA-5	SWF	91,4	913	79	0,51	3,5	b.d.l.	b.d.l.	3,5	0,049	0,025	0,39	0,0076	0,00013	0,0016	0,00022	0,0000008	0,000041	0,000013	-3,4
GUA-6	SWF	177	888	105	0,51	2,6	0,22	0,011	3,5	0,015	0,019	0,076	0,0064	0,00066	0,0013	0,000078	0,0000011	0,000012	0,0000061	-4,1
GUA-7	SWF	177	883	111	0,33	2,1	0,15	0,013	3,1	0,011	0,023	0,051	0,0096	0,00077	0,0011	0,000085	0,0000011	0,000014	0,0000055	-4,2
GUA-8	SF	258	902	89	1,6	3,8	0,77	0,036	2,5	0,012	0,026	0,25	0,0066	0,00039	0,0019	0,000055	0,0000015	0,000017	0,0000061	-3,6
GUA-9	SF	80,3	910	75	2,2	7,2	b.d.l.	0,045	3,9	0,019	0,021	0,23	0,0055	0,00015	0,0015	0,000052	0,0000008	0,000009	0,0000053	-3,6
GUA-10	SF	257	900	93	1,5	3,1	0,23	0,015	2,2	0,008	0,016	0,22	0,0079	0,00016	0,0011	0,000091	0,0000013	0,000016	0,0000079	-3,6
GUA-11	SWF	91	935	56	0,39	6,2	0,16	0,011	2,5	0,051	0,022	0,089	0,0091	0,00013	0,0008	0,000087	0,0000009	0,000016	0,000021	-4
GUA-12	SWF	231	900	91	3,4	2,1	0,54	0,021	2,1	0,009	0,0088	0,36	0,0015	0,00066	0,0006	0,000021	0,0000013	0,000008	0,000016	-3,4
GUA-13	SWF	251	884	107	4,5	1,5	0,41	0,016	1,8	0,0071	0,0085	0,31	0,0013	0,00087	0,0007	0,000015	0,0000015	0,000006	0,000018	-3,5
GUA-14	SWF	215	879	113	2,9	2,3	0,66	0,025	1,9	0,0044	0,0076	0,28	0,0016	0,00041	0,0009	0,000016	0,0000012	0,000009	0,000015	-3,5
GUA-15	SWF	215	897	95	3,6	1,7	0,63	0,034	2,2	0,056	0,0068	0,25	0,0011	0,00066	0,0009	0,000009	0,0000011	0,000006	0,000012	-3,6
GUA-16	SWF	208	882	109	4,4	1,9	0,55	0,033	1,6	0,0044	0,0074	0,39	0,0018	0,00053	0,0007	0,000017	0,0000015	0,000005	0,000011	-3,4
GUA-17	SWF	208	903	87	4,3	2,2	0,51	0,04	2,4	0,0028	0,0059	0,44	0,0015	0,00088	0,0006	0,000008	0,0000017	0,000005	0,000009	-3,3
GUA-18	SWF	180	908	85	2,3	1,5	0,36	0,026	2,9	0,0066	0,0081	0,36	0,0022	0,00065	0,0005	0,000023	0,0000014	0,000007	0,000019	-3,4
GUA-19	SWF	189	915	78	2,1	2,3	0,28	0,024	2,4	0,0051	0,0076	0,34	0,0024	0,00074	0,0007	0,000025	0,0000014	0,000008	0,000014	-3,4
GUA-20	SWF	96	922	68	0,59	5,9	0,17	0,005	3,3	0,011	0,0015	0,11	0,0064	0,00014	0,0008	0,000047	0,0000008	0,000012	0,000018	-3,9
GUA-21	SWF	82,9	929	61	0,41	5,5	0,16	0,007	3,4	0,0008	0,019	0,088	0,0081	0,00013	0,0009	0,000056	0,0000009	0,000013	0,000015	-4
GUA-22	SWF	80,6	934	55	0,36	6,2	0,13	0,011	4,1	0,013	0,026	0,086	0,0077	0,00011	0,0008	0,000038	0,0000007	0,000015	0,000018	-4
GUA-23	SWF	80,6	931	59	0,38	5,8	0,17	0,006	3,5	0,018	0,023	0,12	0,0095	0,00014	0,0012	0,000051	0,0000006	0,000017	0,000026	-3,9
GUA-24	SWF	89,8	929	63	0,25	4,7	0,15	0,007	3,1	0,022	0,027	0,078	0,0068	0,00011	0,0013	0,000046	0,0000008	0,000019	0,000021	-4,1
GUA-25	SWF	80,2	933	57	0,44	5,2	0,19	0,009	3,8	0,016	0,022	0,069	0,0073	0,00012	0,0011	0,000058	0,0000011	0,000017	0,000021	-4,1

## ANEXO 5: Reporte de Red Agrometeorológica INIA

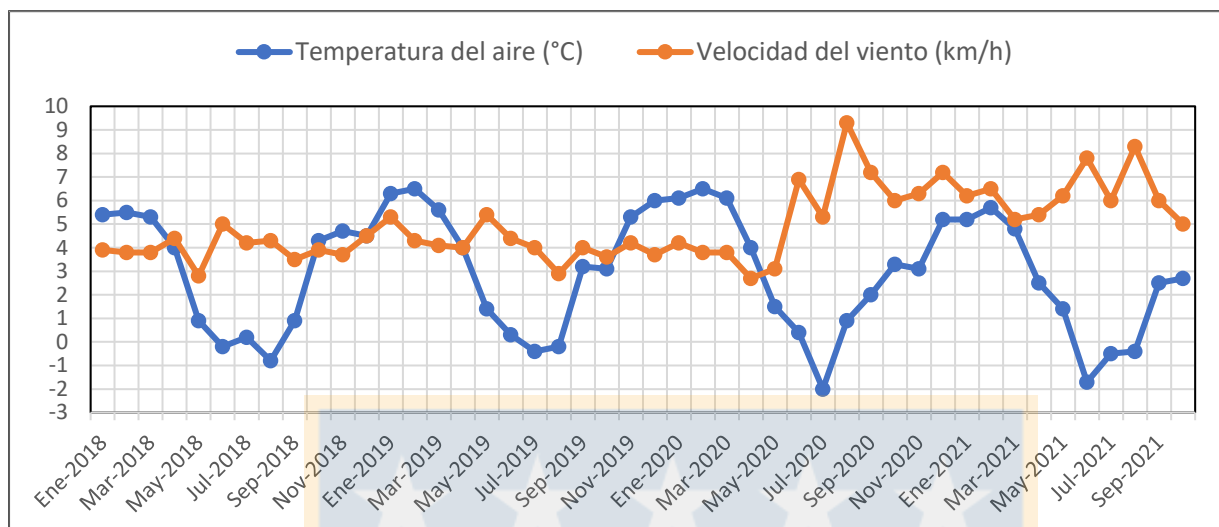
**Tabla 1: Temperatura del aire (°C) y velocidad del viento (km/h) para los meses de enero 2018 hasta octubre 2021, tomado de la estación Lago Chungará, Putre, INIA.**

Tiempo UTC-4	Temperatura del Aire (°C)	Velocidad del Viento (km/h)
Ene-2018	5,4	3,9
Feb-2018	5,5	3,8
Mar-2018	5,3	3,8
Abr-2018	4	4,4
May-2018	0,9	2,8
Jun-2018	-0,2	5
Jul-2018	0,2	4,2
Ago-2018	-0,8	4,3
Sep-2018	0,9	3,5
Oct-2018	4,3	3,9
Nov-2018	4,7	3,7
Dic-2018	4,5	4,5
Ene-2019	6,3	5,3
Feb-2019	6,5	4,3
Mar-2019	5,6	4,1
Abr-2019	4	4
May-2019	1,4	5,4
Jun-2019	0,3	4,4
Jul-2019	-0,4	4
Ago-2019	-0,2	2,9
Sep-2019	3,2	4
Oct-2019	3,1	3,6
Nov-2019	5,3	4,2
Dic-2019	6	3,7
Ene-2020	6,1	4,2
Feb-2020	6,5	3,8
Mar-2020	6,1	3,8
Abr-2020	4	2,7
May-2020	1,5	3,1

Tiempo UTC-4	Temperatura del Aire (°C)	Velocidad del Viento (km/h)
Jun-2020	0,4	6,9
Jul-2020	-2	5,3
Ago-2020	0,9	9,3
Sep-2020	2	7,2
Oct-2020	3,3	6
Nov-2020	3,1	6,3
Dic-2020	5,2	7,2
Ene-2021	5,2	6,2
Feb-2021	5,7	6,5
Mar-2021	4,8	5,2
Abr-2021	2,5	5,4
May-2021	1,4	6,2
Jun-2021	-1,7	7,8
Jul-2021	-0,5	6
Ago-2021	-0,4	8,3
Sep-2021	2,5	6
Oct-2021	2,7	5

**Tabla 2: Promedio, mínimo y máximo de la velocidad del viento (km/h) por año.**

Año	Velocidad del viento (km/h)		
	Promedio	Mínimo	Máximo
2018	3,94	2,8 (mayo)	5 (junio)
2019	4,16	2,9 (agosto)	5,4 (mayo)
2020	6,41	2,7 (abril)	9,3 (agosto)
2021	6,23	4,7 (octubre)	8,3 (agosto)



**Figura 1: Gráfico de la temperatura del aire (°C) y velocidad del viento (km/h) de la estación de Lago Chungará, Putre INIA, en función de los meses del año desde enero 2018 hasta octubre 2021.**