



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**

**TASA DE CRECIMIENTO DEL COMPLEJO DE DOMOS DEL
VOLCÁN CHAITÉN, PERIODO MAYO 2008 - DICIEMBRE 2009.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE GEOLOGA

CAROLINA EUGENIA VALENZUELA JERIA

PROFESOR GUIA:
LUIS LARA PULGAR

MIEMBROS DE LA COMISION:
ALFREDO LAHSEN AZAR
ALVARO AMIGO RAMOS

SANTIAGO DE CHILE
ENERO 2011

RESUMEN

La erupción del volcán Chaitén iniciada el 2008 fue una de las más explosivas erupciones en la Tierra dentro de las últimas dos décadas y es la primera erupción de composición riolítica desde Novarupta-Katmai, Alaska, en 1912. El 2 de Mayo del 2008 comenzó la actividad eruptiva con una erupción explosiva tipo sub-pliniana y cerca de diez días después comienza la emisión de lava en el flanco norte del domo ancestral, dando inicio a la formación progresiva de tres domos consecutivos a lo largo de un año. El rápido crecimiento del primer domo, en base a observaciones visuales, da indicios de una alta tasa de extrusión, mucho mayor que las documentadas para otras erupciones formadoras de domos contemporáneas, como Soufrière Hills, Montserrat o Monte Santa Helena, EE.UU. En general, la formación de los domos posteriores es más lenta que la inicial.

Con el objetivo de estimar la tasa de crecimiento durante el periodo Mayo 2008 – Febrero 2009, se calculó el volumen del complejo de domos en base a dos métodos: fotogrametría digital y aproximación a figura geométrica, obteniéndose cinco valores entre ambos. Otro valor fue calculado a partir de un modelo de elevación digital de alta precisión para Diciembre del 2009.

Sobre la base de los resultados, la erupción del volcán Chaitén se puede dividir en tres etapas: Etapa I, del 12 de Mayo del 2008 al 30 de Octubre del 2008, caracterizada por una alta tasa de crecimiento ($26,6 \text{ m}^3/\text{s}$) coincidente con el desarrollo del primer domo; Etapa II, del 30 de Octubre del 2008 al 27 de Febrero del 2009, caracterizada por una moderada tasa de crecimiento ($16,2 \text{ m}^3/\text{s}$), durante la cual se formó el segundo domo y ocurrió el colapso del parcial del complejo de domos; Etapa III, del 27 de Febrero al 7 de Diciembre, caracterizada por una moderada tasa de crecimiento ($9,2 \text{ m}^3/\text{s}$), la generación del tercer domo y la tendencia a declinar la tasa. Estos valores indican una disminución de la actividad efusiva del volcán, que puede interpretarse como el inicio de un periodo de receso.

Agradecimientos

Agradezco a mi madre por su comprensión y cariño ilimitado y a mi padre por su visión crítica y objetiva. Ambos fueron y son el mejor soporte que tengo, el incondicional. A mis hermanos, Ro, Fe y Pau, por las risas y buenos momentos que siempre ayudaron a despejar la mente. Gracias familia por su permanente paciencia y confianza.

A mis grandes amigas y amigo de la U, Vale, Javi, Feña y Joaco, por los años de buena amistad y conversaciones varias que alegraron mi vida universitaria.

A mi profesor guía, Luis Lara, agradezco su paciencia y comentarios en el desarrollo de este trabajo. A Álvaro Amigo sus enseñanzas de volcanología, valiosas sugerencias y aportes. A Gabriel Orozco su constante apoyo, ayuda y recomendaciones en temas de este trabajo y también el haberme regalado su amistad.

A todos quienes me brindaron su compañía, apoyo y/o colaboración en este u otros momentos: Carola, Feña T., Chio, Jany, Chasqui, Mary, Paola, Felipe Tapia, Buho, Marcelo Farías, María Rosa, Cristina Silva, Angie Diefenbach, Christian Brown y Jorge Cueli.

Al Manu por su presencia y cariño de gran ayuda en este último tiempo.

Esta investigación fue financiada por el Programa de Riesgo Volcánico (PRV) del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) y el proyecto Fondecyt 11070222 con el cual fue adquirido el software de modelación PhotoModeler Scanner® 6.

ÍNDICE GENERAL

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Exposición del problema	1
1.2	Hipótesis de trabajo	1
1.3	Zona de estudio	2
1.4	Objetivos.....	3
1.4.1	Objetivos Generales	3
1.4.2	Objetivos Específicos	3
1.5	Método de trabajo.....	4
2.	DOMOS DE LAVA.....	5
2.1	Tipología	5
2.2	Ejemplos de domos de lava.....	6
2.3	Erupciones riolíticas.....	10
3.	VOLCÁN CHAITÉN	12
3.1	Generalidades	12
3.2	Geología del volcán Chaitén	14
3.2.1	Erupciones históricas	14
3.2.2	Erupción Mayo 2008- Diciembre 2009	15
4.	METODOLOGÍA PARA ESTIMACION DEL VOLUMEN	20
4.1	Método 1: Fotogrametría digital.....	22
4.2	Método 2: Aproximación a figura geométrica	35
4.3	Análisis del DEM LIDAR.....	37
5.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	39
5.1	Volumen.....	39
5.2	Tasa de crecimiento	40
6.	DISCUSIÓN	42
6.1	En relación a la metodología y su precisión.....	42
6.2	Volumen y tasa de crecimiento.....	43
6.3	Comparación con otros domos	47
7.	CONCLUSIONES	49
8.	REFERENCIAS.....	50
	ANEXOS	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.	Mapa de ubicación y vías de acceso al volcán Chaitén	.....2
Figura 2.2.1.	Ubicación y fotografía del volcán Novarupta	.....6
Figura 2.2.2.	Ubicación y fotografía del volcán Unzen	.....7
Figura 2.2.3.	Ubicación y fotografía del Monte Santa Helena	.....8
Figura 2.2.4.	Ubicación y fotografía del volcán Redoubt	.....9
Figura 2.2.5.	Ubicación y fotografía del volcán Soufrière Hills	.....10
Figura 3.1.1.	Arco volcánico en la Zona Volcánica Sur (ZVS) y sus cuatro provincias	...13
Figura 3.1.2.	Mapa geológico de la zona	.....15
Figura 3.2.3.1.	Cráteres activos durante la etapa explosiva	.....17
Figura 3.2.3.2.	Evolución de la erupción	.....19
Figura 4.1.1.	Esquema ilustrativo, 30 de Octubre del 2008 (vista en planta)	.....24
Figura 4.1.2.	Vista lateral del domo, dirección norte	.....25
Figura 4.1.3.	Vista lateral del domo, dirección noroeste	.....25
Figura 4.1.4.	Vista lateral del domo, dirección nor-noroeste	.....26
Figura 4.1.5.	Modelo 3D, 30 Oct. 08	.....27
Figura 4.1.6.	Esquema ilustrativo, 27 de Febrero del 2009 (vista en planta)	.....28
Figura 4.1.7.	Vista lateral del domo, dirección nor-noroeste, 27 Feb. 09	.....28
Figura 4.1.8.	Vista lateral del domo, dirección nor-noreste, 27 Feb. 09	.....29
Figura 4.1.9.	Vista lateral del domo, dirección nor-noreste, 27 Feb. 09	.....29
Figura 4.1.10.	Vista lateral del domo, dirección nor-noreste, 27 Feb. 09	.....30
Figura 4.1.11.	Vista lateral del domo, dirección noreste, 27 Feb. 09	.....30
Figura 4.1.12.	Vista lateral del domo, dirección noreste, 27 Feb. 09	.....31
Figura 4.1.13.	Vista lateral del domo, dirección noreste, 27 Feb. 09	.....31
Figura 4.1.14.	Vista lateral del domo, dirección este, 27 Feb. 09	.....32
Figura 4.1.15.	Vista lateral del domo, dirección sureste, 27 Feb. 09	.....32
Figura 4.1.16.	Vista lateral del domo, dirección sureste, 27 Feb. 09	.....33
Figura 4.1.17.	Vista lateral del domo, dirección sur-sureste, 27 Feb. 09	.....33
Figura 4.1.1.18.	Nube de puntos y figura 3D generada	.....35
Figura 4.2.1.	Esquema ilustrativo del método por aproximación a figura geométrica (cono)	.....36

Figura 4.3.1.	DEM LIDAR del volcán Chaitén	38
Figura 5.1.	Volumen acumulado para las distintas fechas estimadas	39
Figura 5.2.	Variación de la tasa de crecimiento entre Mayo del 2008 y Diciembre del 2009	41
Figura 6.2.	Variación de la tasa de crecimiento entre Mayo del 2008 y Diciembre del 2009	43
Figura. 6.3.	Tasa de crecimiento de distintos domos de lava. Modificado de Nakada y otros (1999)	45

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.2.1.	Tasa de crecimiento y volumen acumulado de algunos domos de lava contemporáneos	11
Tabla 4.1.	Fechas con estimación de volumen	22
Tabla 4.2.	Puntos para crear el Plano Base, Sistema de coordenadas WGS84, 18S	22
Tabla 4.2.1.	Estimación error método 2	37
Tabla 5.1.1	Volumen del domo y precisión	39

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Exposición del problema

El 2 de Mayo del 2008 el volcán Chaitén inició una repentina erupción explosiva del tipo sub-pliniana, emitiendo material piroclástico a la atmósfera estimándose un volumen inferior a 1 km³ (Watt y otros, 2009). A su vez, la emisión de lava viscosa dio lugar a la formación progresiva y rápida de al menos 3 domos sucesivos sobre el domo ancestral, parcialmente destruido durante la fase explosiva, y sobrepuestos entre si (Duhart y otros, 2009). En Febrero del 2009 el colapso parcial del complejo de domos generó un depósito en abanico de bloques y cenizas a sus pies, y flujos piroclásticos que se encausaron por el valle del río Chaitén al sur, llegando aproximadamente a 2 km de la ciudad (Duhart y otros, 2009). En adelante, el crecimiento del sistema de domos fue menor en comparación a los primeros meses, lo que no descarta la posibilidad de nuevos colapsos y corrientes de material volcánico (Carn y otros, 2009; Lara, 2009; SERNAGEOMIN, 2008-2010).

La posibilidad de estudiar la formación de domos de lava riolíticos con los métodos y tecnología actual permite entender su generación y comportamiento apoyado en el conocimiento de domos de similar composición ya estudiados. En particular, investigar la tasa de crecimiento contribuye a definir los peligros para el entorno y la población causado por eventos típicos en la formación de domos, como los flujos piroclásticos generados por el colapso de éstos que han provocado gran daño durante la formación de otros domos en el mundo (ej. Soufrière Hills Montserrat, Herd y otro, 2005; Merapi, Thouret y otros, 2000).

1.2 Hipótesis de trabajo

El crecimiento del complejo de domos ocurrió a tasas muy elevadas, en particular durante los primeros meses de erupción, en comparación a otras erupciones formadoras de domos estudiadas (Nakada y otros, 1998; Major y otros, 2008; Lara, Valenzuela y otros, 2009; Wadge y otros, 2010).

1.3 Zona de estudio

Ubicación y vías de acceso

El volcán Chaitén ($42^{\circ}50'S/72^{\circ}39'W$; 962 msnm) se ubica en la Región de los Lagos, en el sector de Chiloé continental, en la parte sur del Parque Pumalín. Dista a 15 km al oeste-suroeste del volcán Michimahuida ($42^{\circ}48'S/72^{\circ}26'W$; 2404 msnm) también considerado activo.

El poblado más cercano al volcán es Chaitén, a 10 km al sur-oeste de éste, el cual se encuentra parcialmente deshabitado debido a la erupción. Otro poblado cercano es caleta Santa Bárbara, 12 km al oeste del volcán. A la zona se llega desde Puerto Montt vía aérea, terrestre o marítima.



Figura 1.1: Mapa de ubicación y vías de acceso al volcán Chaitén. Se indican las principales localidades, rutas y centros volcánicos en la zona. Trazado sobre imagen de NASA World Wind®, 2010.

Fisiografía

El volcán Chaitén se ubica en la parte occidental de la Cordillera Patagónica y pertenece al frente volcánico activo de los Andes del Sur. La elevación de esta zona alcanza en promedio 800 m.s.n.m. y la cumbre más elevada corresponde a la cima del volcán Michimahuida con una altura de 2404 msnm (Montgomery y otros, 2001).

La Región de los Lagos se caracteriza por la presencia usual de morfologías glaciales; con relieves pronunciados, valles con forma de U y cumbres de baja altura, además evidenciadas por la presencia de grandes lagos en la parte norte y el desmembramiento del territorio en la parte sur. Las laderas del volcán Chaitén reflejan rasgos típicos de la acción erosiva de glaciares pasados como circos glaciales y valles amplios.

La red de drenaje fluvial de la zona se caracteriza por tener gran cantidad de recursos hídricos debido a los glaciares, la lluvia y el relieve, lo que produce grandes lagos y ríos caudalosos y torrentosos. Estos nacen en la vertiente oriental de los Andes y desembocan al Pacífico a través de amplios fiordos. El volcán Chaitén se encuentra flanqueado al norte por el río Rayas, el cual nace en el volcán Michinmahuida, y se encuentra conectado a éste por un importante afluente que nace al este-sureste del cráter. Al sur se encuentra el río Chaitén, o Blanco, el cual nace en la parte sur del cráter y desemboca en la bahía de Chaitén.

La tasa de precipitaciones es mayor en las zonas costeras disminuyendo hacia el interior, especialmente en los valles protegidos. En la ciudad de Chaitén se registran más de 3000 mm anuales siendo mayor que lo registrado en sectores como Futaleufú (2000 mm) o Palena (1700 mm) (*fuentes* www.meteochile.cl).

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivos Generales

Comprender la evolución del crecimiento del complejo de domos del volcán Chaitén durante el periodo Mayo del 2008 - Diciembre del 2009.

1.4.2 Objetivos Específicos

1. Calcular el volumen del complejo de domos en distintos momentos durante el periodo Mayo 2008 – Diciembre 2009 a través de fotogrametría digital, análisis de un modelo de elevación o aproximación a figura geométrica.
2. Estimar la tasa de crecimiento del complejo de domos para el periodo Mayo 2008 – Diciembre 2009.

3. Comparar la tasa de crecimiento con el crecimiento de otros domos recientes.

1.5 Método de trabajo

El trabajo consistió fundamentalmente en actividades de gabinete, con un periodo de recopilación inicial de información, y se basa en el análisis de imágenes obtenidas del volcán previo al inicio del trabajo.

A continuación se indican las actividades desarrolladas:

- Revisión de material bibliográfico, cartográfico e informático. Involucra la recopilación y adquisición de publicaciones científicas y bibliografía para la conformación del marco geológico y teórico, recursos de información para la confección de cartografía preliminar y geológica, fotografías aéreas y bases topográficas digitales de la zona de estudio.
- Recopilación y selección de fotografías del volcán Chaitén en distintos momentos de la erupción para ser utilizadas en el programa *PhotoModeler Scanner*®. Con este se genera un modelo tridimensional (3D) que permite estimar el volumen del sistema de domos.
- Análisis del un modelo de elevación obtenido a través de un láser aerotransportado. Este material fue utilizado para estimar un volumen del complejo de domos y sirvió como apoyo y referencia para distintas mediciones.
- Desarrollo de un método geométrico alternativo para estimar el volumen, a partir de fotografías aéreas, en fechas no consideradas anteriormente.
- Comparación de los resultados obtenidos con datos provenientes de erupciones formadoras de domos contemporáneas de igual o similar composición.

2. DOMOS DE LAVA

Los domos son acumulación de material juvenil extruido desde un conducto en volcanes andesíticos a riolíticos (Fink y Anderson, 2000). La mayoría de los domos de lava silíceos están compuestos de un núcleo dúctil, un sólido caparazón y un talud de detritos (Hale y otros, 2009). Pueden ser escarpados o tabulares vistos en perfil; circulares, elípticos o irregulares vistos en planta; uniformes o variados con respecto al color y textura. El diámetro varía de unos pocos metros a kilómetros, en tanto su altura típicamente es de unas decenas de metros a menos de 1 km (Fink y Anderson, 2000). El ciclo de vida de un domo de lava está caracterizado por periodos de crecimiento, reposo y colapso. En general, las fases de crecimiento y reposo pueden durar de una semana a años, con tasas de efusión en el rango de 1-100 m³/s (Fink y Anderson, 2000).

2.1 Tipología

En general, los tipos de domos de lava están caracterizados por su morfología. Sin embargo, la morfología no es estática y puede cambiar durante una erupción (Watt y otros, 2002). Los domos tipo "torta" son bajos y llanos, teniendo una baja relación de aspecto (alto/ancho); con una superficie relativamente irregular y rugosa compuesta de bloques de lava (Fink y Anderson, 2000). Los domos de tipo Peleano o *spiny* se caracterizan por tener espinas de lava irregulares a lo largo de la cresta del domo. Suelen estar rodeados de detritos en la base formados por el colapso de pináculos inestables (Blake, 1989). Los domos tipo *coulée* son lóbulos de baja viscosidad que se extienden desde la parte superior del domo creciendo en todas las direcciones (Watt y otros, 2002). Finalmente, los criptodomos se forman bajo la superficie del volcán por la intrusión de magma en niveles altos (Fink y Anderson, 2000): un criptodomo desestabilizó la ladera norte del Monte Santa Helena antes de la erupción de 1980 (Alidibirov, 1995), y se ha reportado que el mismo fenómeno ocurrió durante el Holoceno en el volcán Parinacota (Clavero y otros, 2004).

2.2 Ejemplos de domos de lava

Domo Novarupta, Katmai, Alaska, U.S.A; 1912

Composición química: riolítica ($\sim 73\% \text{SiO}_2$; Hildreth, 1983)

La erupción de 1912 que dio origen al Valle de los Diez Mil Humos (*Valley of Ten Thousand Smokes*) es discutida en detalle por Hildreth (1983) y Fierstein y otros (1997). En Junio de 1912, aproximadamente 15 km^3 (DRE, *Dense Rock Equivalent*) de magma fue eruptado desde el cráter Novarupta. Simultáneamente en el Monte Katmai, 10 km al este del domo Novarupta, se formó una caldera de casi 600 m de profundidad. El domo Novarupta es un montículo circular de 380 m de diámetro y 65 metros de alto, de superficie irregular con bloques de lava, centrado dentro de una cuenca de 2 km de diámetro. Su volumen es aproximadamente $5 \times 10^6 \text{ m}^3$. Yokoyama (2005) considera que la etapa efusiva duró 200 días para poder calcular la tasa de crecimiento del domo, la que habría sido de $0,28 \text{ m}^3/\text{s}$.



Figura 2.2.1: Ubicación y fotografía del volcán Novarupta. A la izquierda, imagen modificada de NASA World Wind®. A la derecha, fotografía del domo Novarupta, Julio 1987 obtenida del sitio <http://ciencia.nasa.gov>.

Domo de lava del volcán Unzen, Japón; 1990-1995

Composición química: dacítica (64-66% SiO_2 ; Nakada, 1998)

El volcán Unzen comenzó un nuevo ciclo eruptivo en Noviembre de 1990 después de 198 años de inactividad. El 20 de Mayo de 1991 se reportó extrusión de magma desde la cima del cráter, formando un domo y lóbulos que fluyeron suavemente generando una forma alargada. Posteriormente, el continuo suministro de magma formó un total de 13 lóbulos

entre Mayo de 1991 y Octubre de 1995 (Nakada, 1998). El volumen del domo en la cima se ha estimado en 0.094 km^3 (DRE; Ishikawa y otros, 1996). La tasa de efusión fue alta durante 1991, alcanzando el valor máximo del periodo 1991-1995, y luego decreció lentamente. La mayor tasa estimada es de $4,6 \text{ m}^3/\text{s}$ en Septiembre de 1991 (Nakada, 1998).



Figura 2.2.2: Ubicación y fotografía del volcán Unzen. A la izquierda, imagen modificada de NASA World Wind®. A la derecha, fotografía del domo Unzen, al fondo; obtenida del sitio www.rekihaku.ac.jp.

Domos de lava del Monte Santa Helena, Washington, U.S.A.; 1980

Composición química: dacítica (61-64% SiO_2 ; Murase y otros, 1985)

La gran erupción del Monte Santa Helena del 18 de Mayo de 1980, fue seguida por la formación y colapso de domos de lava en el nuevo cráter originado ($2 \times 3,5 \text{ km}$ de diámetro). Moore y Albee (1981) presumen que la protuberancia en la cima justo antes de la explosión era un criptodomo de 0.11 km^3 formado dentro del edificio volcánico. Durante el periodo 1981-1983 la extrusión de lava fue gradual (Swanson y otros, 1987), formando un domo compuesto que continuó su crecimiento. Yokoyama (2005) selecciona 9 de estos pasos graduales de extrusión de corta duración entre 1980-1981 para determinar la tasa de crecimiento, estimándose en $9,7 \text{ m}^3/\text{s}$. Para ese periodo (~ 34 días) el volumen acumulado fue de $28.5 \times 10^6 \text{ m}^3$.



Figura 2.2.3: Ubicación y fotografía del Monte Santa Helena. A la izquierda, imagen modificada de NASA World Wind®. A la derecha, fotografía del domo dentro del cráter, Junio 1982; obtenida del sitio www.volcano.si.edu

Domo de lava del volcán Redoubt, Alaska, U.S.A; 1989-1990

Composición química: andesítica ($\sim 59,8 \text{ SiO}_2$; Miller, 1994)

Durante seis meses de erupción entre 1989 y 1990 el volcán tuvo una fase de crecimiento y destrucción de domos sucesivos, en el que 14 domos andesíticos de corta vida fueron formados y subsecuentemente 13 destruidos. Miller (1994) estima el volumen acumulado de los domos dividiendo el periodo de seis meses en tres segmentos, I, II y III, y calcula la tasa de crecimiento de cada segmento: I produce el mayor domo con la más alta tasa de crecimiento. Los domos en los segmentos II y III no son lo suficientemente grande en volumen para mostrar tasas estables de crecimiento. En el periodo I el volumen del domo es de $20 \times 10^6 \text{ m}^3$ y la tasa de crecimiento dada por Miller (1994) es de $25,4 \text{ m}^3/\text{s}$. El volumen total estimado de los domos de esta erupción es cerca de $90 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Miller, 1994).



Figura 2.2.4: Ubicación y fotografía del volcán Redoubt. A la izquierda, imagen modificada de NASA World Wind®. A la derecha, fotografía del domo Redoubt (al centro), Agosto 2009; obtenida del sitio www.avo.alaska.edu.

Domos de lava del volcán Soufrière Hills, Montserrat; 1995-2009

Composición química: andesítica ($\sim 59,7 \text{ SiO}_2$; Murphy y otros, 2000)

En Julio de 1995 comenzó la erupción con una explosión freática que continuó, en Noviembre de 1995, con la formación de un domo de lava andesítico. Posteriormente, hubo periodos de reposo y extrusión alternados. Wadge y otros (2010) reconocen 4 episodios de extrusión sucesivos durante el periodo 1995-2008: tres grandes episodios con una duración de 2 a 3,5 años cada uno, seguidos por un cuarto episodio menor con una duración de 5 meses. Se estima que cerca de 1 km^3 de lava andesítica fue producido en dicho periodo. Las tasas de extrusión estimadas para cada episodio son 4,5; 2,9; 5,3 y $2,9 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivamente (Wadge y otros, 2010). El tercer episodio (1 Ago. 05 – 20 Abr. 07) corresponde a la mayor tasa promedio de extrusión.



Figura 2.2.5. Ubicación y fotografía del volcán Soufrière Hills. A la izquierda, imagen modificada de NASA World Wind®. A la derecha, fotografía del domo del Soufrière Hills, Mayo 2006; obtenida del sitio www.volcano.si.edu.

Tabla 2.2.1. Tasa de crecimiento y volumen acumulado de algunos domos de lava contemporáneos.

Volcán	Composición química (relativo a %SiO ₂)	Tasa de crecimiento [m ³ /s]*	Periodo**
Novarupta (U.S.A)	riolítica	0,28	200 días (1912)
Unzen (Japón)	dacítica	4,6	1990-1995
Santa Helena (U.S.A)	dacítica	9,7	34 días (1980-1981)
Redoubt (U.S.A)	andesítica	25,4	<1mes (1989-1990)
Soufrière Hills (Montserrat)	andesítica	5,2	2005-2007

* valor máximo o valor promedio máximo calculado; ** periodo considerado para el cálculo de la tasa de crecimiento.

2.3 Erupciones riolíticas

Este tipo de erupciones son escasas en tiempos históricos. La última bien reconocida y estudiada corresponde a la erupción de 1912 de Novarupta-Katmai (Parque Nacional Katmai, Alaska) de 60 horas de duración. Tuvo una etapa inicial explosiva del tipo pliniana y luego una fase efusiva con la extrusión de lava y posterior formación de un domo riolítico (Fierstein y Hildreth, 1992).

Los domos riolíticos son considerados volcanes monogenéticos asociados a una breve erupción, en contraste con los domos andesíticos o dacíticos que generalmente muestran una evolución compleja alternando largos periodos de crecimiento con periodos de destrucción (Carrásco-Nuñez y Riggs, 2008). Los domos riolíticos se caracterizan por la

sucesión de actividad piroclástica y efusiva con una serie de discretos eventos eruptivos. Como antes de la erupción del volcán Chaitén no se había observado la formación de un domo riolítico, se estima que el rango de años de formación vaya desde unos pocos a varios, pudiendo durar hasta varias décadas (Carrásco-Nuñez y Riggs, 2008).

Químicamente un magma ácido-riolítico es aquel que tiene un alto contenido de sílice, más de un 68% (Rogers y Hawkesworth, 2000). Fragmentos de pómez, obsidiana y cenizas del volcán Chaitén, obtenidos durante la fase inicial explosiva de la última erupción, muestran valores de $\text{SiO}_2=73-75\%$ (Reich y otros, 2009). Un alto porcentaje de sílice influye en la viscosidad de éste aumentándola, lo que hace que su desplazamiento sea más lento. Debido a esto las erupciones de esta composición presentan en general dos fases: una explosiva y otra efusiva. En el volcán Chaitén y Katmai-Novarupta se reconocieron estas fases, ambas de composición química mayoritariamente homogénea, pero con proporciones de volumen emitido de piroclastos/lava distintos: $0,5 \text{ km}^3/$ (Fierstein y Hildreth, 1992; Watts y otros, 2009).

En la SVZ también se reconocen otros centros riolíticos, como el campo volcánico Laguna del Maule, el cual consta de 24 centros silíceos (riolíticos y riodacíticos) post-glaciales (Hildreth y otros, 2009) y el Complejo Volcánico Puyehue-Cordón Caulle con erupciones fisurales de riolitas y riodacitas en 1921-22 y 1960 (Gerlach, 1988).

3. VOLCÁN CHAITÉN

3.1 Generalidades

El volcán Chaitén forma parte del arco volcánico activo de los Andes del Sur, en la zona denominada Zona Volcánica Sur (ZVS) que corresponde a un segmento de arco volcánico que se extiende por más de 1400 km en el borde occidental de Sudamérica, entre los 33° y 46°S (Lopez-Escobar y otros, 1995; Stern y otros, 2007). El límite norte coincide con la subducción de la Dorsal de Juan Fernández, mientras que el límite sur se ubica en el Punto Triple de Tatio donde convergen las placas de Nazca, Antártica y Sudamericana.

La ZVS está constituida por más de 70 estratovolcanes compuestos pleistocenos y holocenos, al menos 9 complejos de caldera y centenares de centros volcánicos menores, como conos de piroclastos y maares (Stern y otros, 2007). La ZVS registra más erupciones históricas que los volcanes de la Zona Volcánica Central (ZVC) y la Zona Volcánica Austral (ZVA) en Chile, con cerca de una erupción por año. De los más de 70 estratovolcanes y centros eruptivos menores, a los menos 40 tuvieron erupciones en el Holoceno y 20 de ellos han tenido erupciones históricas (Stern y otros, 2007)

Un rasgo tectónico importante de este segmento lo constituye la Zona de Falla Liquiñe-Ofqui (ZFLO) (Hervé, 1976; Cembrano y otros, 2000) 2009), que corresponde a un sistema estructural activo extendido por más de 1200 km, desde los 38°-47°S, y que está relacionado espacialmente a algunos estratovolcanes compuestos y centros eruptivos menores, coincidiendo con la posición del arco volcánico actual.

La ZVS se subdivide en cuatro provincias de acuerdo a parámetros petrográficos, geoquímicos y tectónicos, subdivisión planteada por López-Escobar y otros, 1995 que es la adoptada en este trabajo: norte (ZVSN), transicional (ZVST), central (ZVSC) y sur (ZVSS). El volcán Chaitén pertenece a la ZVSS (figura 3.1.1).

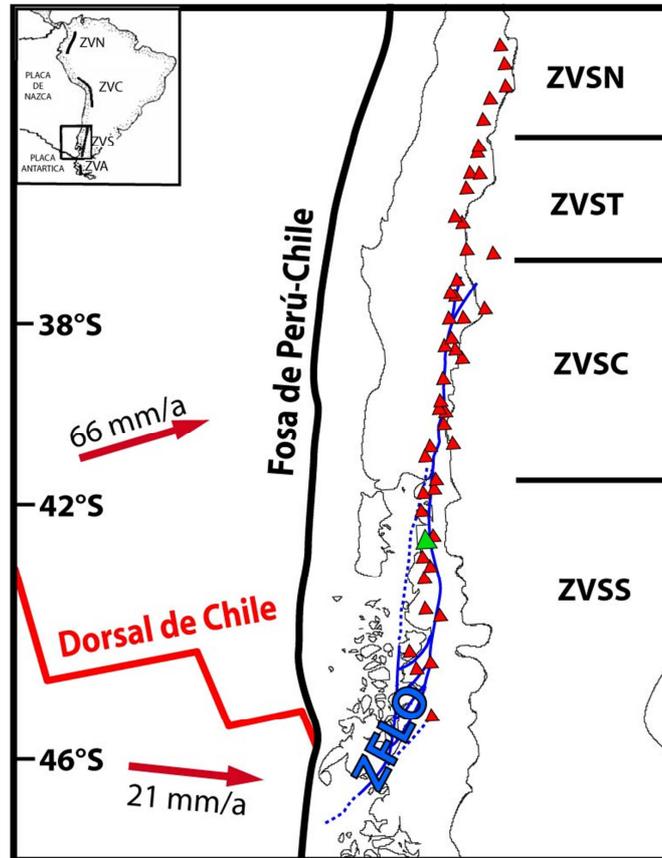


Figura 3.1.1: Arco volcánico en la Zona Volcánica Sur (ZVS) y sus cuatro provincias (López-Escobar y otros, 1995): norte (ZVSN; 33 – 34,5°S), transicional (ZVST; 34,5 – 37°S), central (ZVSC; 37 – 41,5°S) y sur (ZVSS; 41,5 – 46°S). El volcán Chaitén (42,5°S) perteneciente a la SSVZ aparece de color verde.

La SSVZ presenta 13 volcanes Cuaternarios que conforman una estrecha cadena longitudinal en el segmento sur de los Andes (López-Escobar y otros, 1995; Naranjo y Stern, 2004). La mayoría corresponde a estratovolcanes compuestos: Yate, Hornopirén, Michinmahuida, Corcovado, Yanteles, Melimoyu, Mentolat, Cay y Macá. Los demás corresponden a centros eruptivos menores (Hualaihué-Cordón Cabrera y Huequi), domo de lava (Chaitén) o caldera volcánica (Hudson; Stern y otros, 2007). La mayoría de los centros volcánicos en términos geoquímicos varían de basálticos a dacíticos siendo el volcán Chaitén la excepción debido a su composición riolítica (Araya, 1979; Naranjo y Stern, 2004). El Michinmahuida, de mayor volumen que el Chaitén, corresponde a un complejo caldera-estratovolcán cubierto por un extenso glaciar y con actividad eruptiva en 1742 y 1934-1935 (Darwin, 1838; Casertano, 1963; Petit-Breuilh, 2004; fig. 3.2.1).

3.2 Geología del volcán Chaitén

Antes de la erupción iniciada en Mayo del 2008, existían pocos estudios enfocados en este volcán. Araya (1979) describió al volcán Chaitén como una pequeña caldera post-glacial de 3 km de diámetro con un domo de obsidiana riolítica en su cráter, el cual corresponde al actualmente denominado domo ancestral.

Las laderas de la caldera están formadas por una secuencia volcánica estratificada de composición basáltica a andesítica de edad pleistocena, erosionada por la acción de glaciares (Araya, 1979; SERNAGEOMIN-BRGM, 1995). El domo ancestral tiene una base elíptica de 1,5 x 2 km de diámetro y una altura de unos 450 m (SERNAGEOMIN-BRGM, 1995; fig. 3.1.2). Alrededor del volcán Chaitén se observan depósitos cuaternarios volcanogénicos, principalmente piroclastos y de caída, producto del volcán mismo así como del volcán Michinmahuida siendo muchos de estos indistinguibles, aunque dominan los depósitos laháricos (SERNAGEOMIN-BRGM, 1995).

3.2.1 Erupciones históricas

Previo a la última erupción no existen registros claros o fehacientes de actividad histórica de este volcán. La edad mínima de formación del domo ancestral y el cráter donde éste está se estima en 5610 años A.P. (Stern y otros, 2009), edad obtenida para sitios arqueológicos donde se encontraron artefactos hechos de obsidiana gris clara cuya fuente más probable es el volcán Chaitén. La única erupción reportada en la literatura ha sido datada en 9370 años A.P. (Naranjo y Stern, 2004), lo que en realidad corresponde a la datación de una oleada piroclástica sobre la cual se encuentra un depósito de pómez riolíticas de caída amarillas, asociadas por sus características químicas al volcán Chaitén (Watt y otros, 2009). Estos depósitos han sido reconocidos desde unos 11 a 26 km al norte del volcán y ambos habrían sido formados por el mismo evento eruptivo según Naranjo y Stern (2004). Sin embargo, Lara y otros (2009) estiman una edad similar para un depósito ignimbrítico en el volcán Michinmahuida lo que sugiere tomar esta edad con cautela.

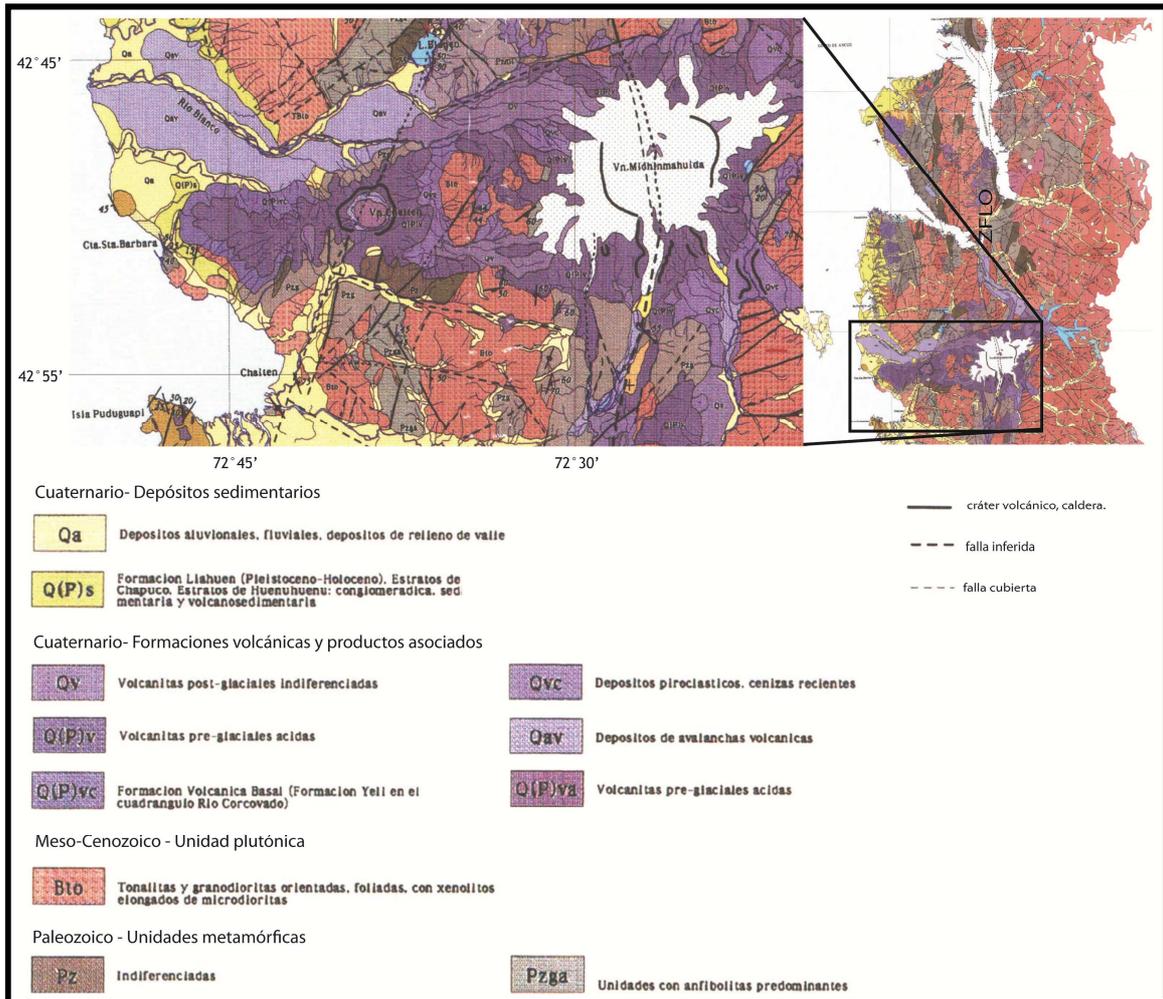


Figura 3.1.2: Mapa geológico de la zona. Los depósitos Cuaternario-volcánicos son indiferenciados con respecto a su procedencia. El río Blanco en este trabajo corresponde al río Rayas. El mapa a la derecha está a escala 1:250000. Z.F.L.O.: Zona de Falla Liquiñe-Ofqui. Modificado de SERNAGEOMIN-BRGM, 1995.

Lara y Moreno (2009) reconocen en la dañada ciudad de Chaitén, depósitos laháricos de similares características a los que afectaron la ciudad el 12 de Mayo del 2008 y obtienen edades radiométricas ^{14}C que, al ser calibradas, sugieren que el volcán Chaitén habría tenido una erupción en el siglo XVII, lo que concuerda con documentos históricos de fecha cercana.

3.2.2 Erupción Mayo 2008- Diciembre 2009

En este subcapítulo se hace una descripción general de la erupción desde su inicio el 2 de Mayo del 2008 hasta su condición actual en Julio 2010, destacando aspectos de la fase

eruptiva explosiva (volumen estimado, efectos en el entorno) y la fase efusiva (aparición primer domo, desarrollo del complejo de domos y colapso parcial, entre otros).

Fase explosiva

Corresponde a la fase inicial de esta erupción que consiste, básicamente, en la expulsión de gases y material piroclástico con una duración cercana a los 10 días (SERNAGEOMIN, 2009; informes técnicos 1-10)

Con tan solo 36 horas de actividad sísmica registrada previa, el 2 de Mayo se inicia una erupción subpliniana aproximadamente a las 04:00 hora local (08:00 UTC) que duró cerca de 6 horas formando una columna eruptiva que alcanzó más de 21 km de altura sobre el domo, según estimaciones visuales (Lara, 2009). El cráter de explosión se localizaba en el flanco norte del domo midiendo cerca de 200 m de diámetro y un segundo cráter, en ese momento inactivo, se localizaba en el flanco nor-norteste midiendo aproximadamente 400 m de diámetro (SERNAGEOMIN, 2009; informe técnico 1). La pluma de cenizas continuó sostenidamente por cerca de una semana, destacando dos columnas estratoféricas (entre 20 y 22 km en altitud) durante el 6 y 8 de Mayo (Carn y otros, 2009). Estas erupciones produjeron algunos flujos piroclásticos por pequeños colapsos de la columna restringidos a áreas dentro de la caldera, en particular en el flanco norte del volcán (Lara, 2009). En los siguientes días se observó que la columna eruptiva disminuyó su altura sin sobrepasar los 8000 msnm, manteniendo un promedio de 6500 msnm (SERNAGEOMIN, 2009; informe técnico 4). El volumen de tefra caída se estima fue $\sim 0.07 - 0.20 \text{ km}^3$ (DRE, *Dense Rock Equivalent*; Watt y otros 2009), que sugiere un índice de explosividad volcánica (Newhall y Self, 1982) en el rango 4. El día 12 de Mayo, lahares que bajaban por el Río Blanco inundaron la ciudad de Chaitén y el sedimento transportado comenzó a embancarse formando deltas de cenizas en la bahía de Chaitén (SERNAGEOMIN, 2009; informe técnico 9).



Figura 3.2.3.1: Cráteres activos durante la etapa explosiva

Fase efusiva

Corresponde a la fase de extrusión de magma con la consecuente formación de uno o más domos. Esta etapa es mucho más extensa que la fase explosiva y tiene una duración de al menos 2 años.

Luego de la fase explosiva, se estima que el día 10-12 Mayo comienza la formación de un domo en el sector nor-noreste del domo ancestral, cubriéndolo casi en su totalidad en poco más de un mes, quedando descubierto el flanco sur (Duhart y otros, 2009). El crecimiento acelerado del domo sugiere tasas de extrusión de $20 - 100 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta finales de Julio (Carn y otros, 2009). Durante Julio, las columnas de cenizas y gases disminuyeron su altura llegando a medir de $3,5 \text{ km}$ (Lara, 2009). A fines de Septiembre el nuevo domo habría tenido un volumen cercano a medio kilómetro cúbico (Carn y otros, 2009). Un

segundo domo se genera a comienzos de Octubre del 2008 en la parte noreste del primero y en Diciembre de ese año ya cubre más de la mitad del primer domo, dejando como remanente el flanco sur. A partir de este mes se observa la formación de una espina central que crecerá rápidamente hasta el 19 de Febrero del 2009 cuando ocurre una violenta explosión que generó un importante colapso parcial del complejo de domos, evidenciado en un amplio escarpe lateral al suroeste de 500 x 500 metros aproximadamente, lo que provocó corrientes piroclásticas hacia el flanco sur y flujos de bloque y ceniza (Carn, 2009; SERNAGEOMIN, 2009). Se estima que el volumen colapsado corresponde al ~10% del complejo (Duhart y otros, 2009). Entre Marzo y Septiembre se observa la formación de un nuevo domo al suroeste del complejo, en la zona de colapso. Hasta Diciembre del 2009 no se observaron variaciones significantes en cuanto a morfología y tamaño del complejo de domos (SERNAGEOMIN, 2009). En una primera etapa se estima que el crecimiento fue cercano a los 50 m³/s y luego disminuyó a ~20 m³/s, estimándose un volumen del complejo de ~0,5 km³ (Lara, Valenzuela y otros, 2009). La erupción continuó durante el 2009 con un crecimiento menos acelerado del complejo de domos, con presencia de espinas de lava, laderas empinadas y generación de flujos de bloques y cenizas.

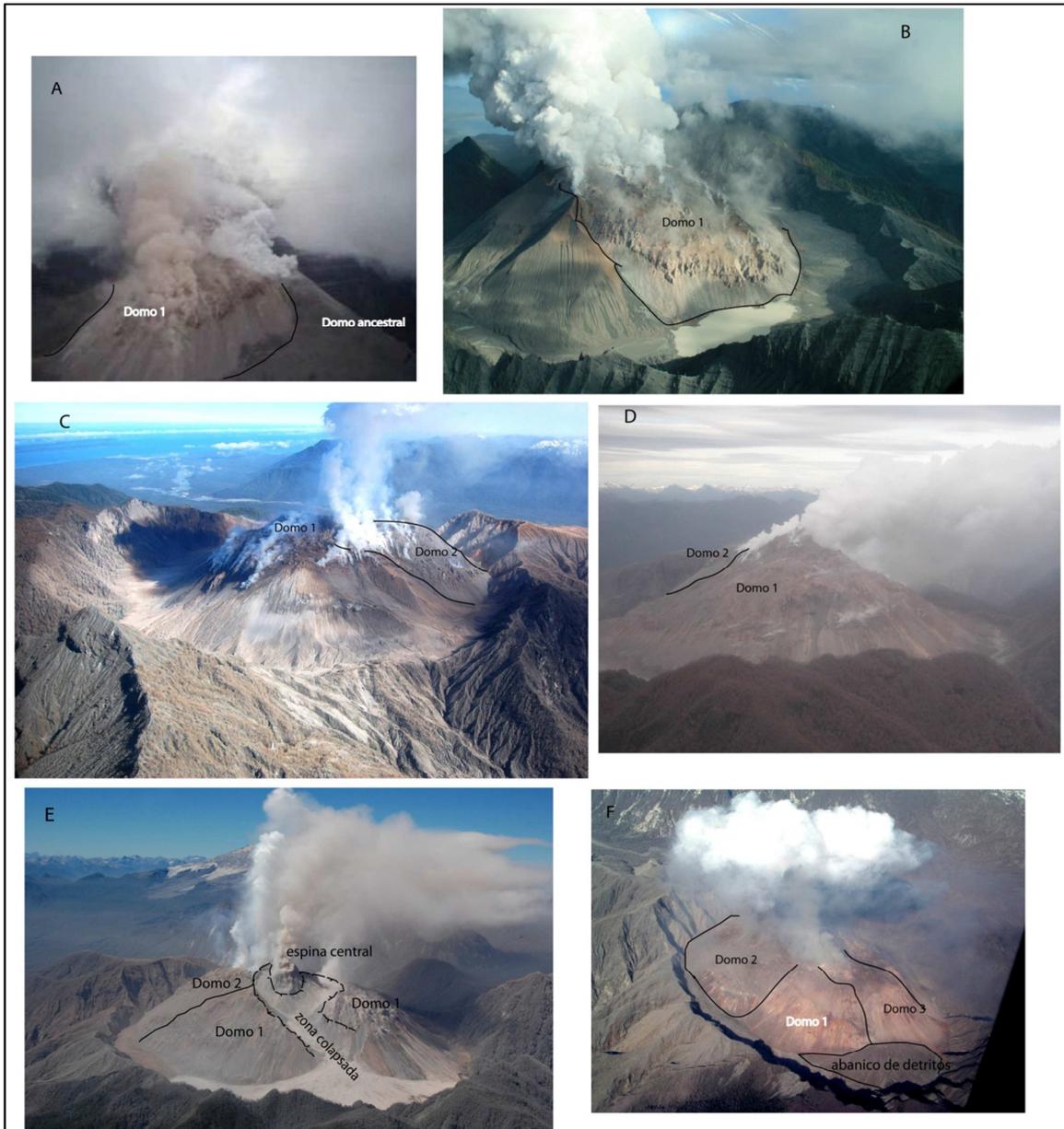


Figura 3.2.3.2: Evolución de la erupción. Se muestra la formación progresiva y superpuesta de los domos, la espina central y el colapso del complejo de domos en Febrero del 2009. A: 12 Mayo 2008, B: 05 Junio 2008, C: 30 Octubre 2008, D: 15 Enero 2009, E: 27 Febrero 2009, F: Septiembre 2009.

4. METODOLOGÍA PARA ESTIMACION DEL VOLUMEN

Por medio de un método cuantitativo de obtención de la tasa de crecimiento del domo, se estimó el volumen de éste en distintas fechas a través de fotogrametría digital y fotointerpretación. El material disponible para la modelación corresponde fotografías aéreas oblicuas de sobrevuelos hechos entre Mayo del 2008 y Septiembre del 2009. Debido a la diversidad y calidad de las fotografías se usaron distintos métodos para obtener un modelo de superficie que luego permitiera calcular el volumen: fotogrametría digital, utilizando el software *PhotoModeler*® *Scanner 6* (PMS), y aproximación a figura geométrica, a través del software ArcGIS® 9 (tabla 4.1). Del primer método se obtuvieron 2 valores de volumen y del segundo se obtuvieron 3. Para calcular el volumen en ambos métodos, se creó un plano base a partir de las curvas de nivel generadas por la cartografía 1:50.000 hecho por el Instituto Geográfico Militar (IGM) previo a la erupción (IGM, 2010), simulando ser la base del domo. Esto que permitió realizar análisis comparativos de superficies.

Por otra parte, se disponía de un modelo de elevación digital (DEM, *Digital Elevation Model*) del sector de Santa Bárbara y el volcán Chaitén, producto de un levantamiento topográfico con láser aerotransportado (LIDAR) colectado en Noviembre del 2009, del cual se obtuvo el valor de volumen a través de un análisis comparativo de superficie entre el plano base y el DEM realizado con ArcGIS. También sirvió como apoyo de los otros métodos para estimar distancias y alturas (tabla 4.1).

Finalmente, al volumen obtenido en cada fecha le fue restado el volumen del domo ancestral, el cual fue calculado con el plano base y las curvas de nivel 1:50000 del IGM.

Se trabajó en el sistema de coordenadas WGS84 (*World Geodetic Sistem 1984*), Huso 18 Sur.

Tabla 4.1 Fechas con estimación de volumen.

Fecha	Método o análisis aplicado	Material analizado	Software utilizado
05 Jun. 08	Aproximación figura geométrica	Fotografías aérea oblicua	ArcGIS
01 Jul. 08	Aproximación figura geométrica	Fotografías aérea oblicua	ArcGIS
30 Oct. 08	Fotogrametría digital	Fotografías aérea oblicua	PMS + ArcGIS
15 Ene. 09	Aproximación figura geométrica	Fotografías aérea oblicua	ArcGIS
27 Feb. 09	Fotogrametría digital	Fotografías aérea oblicua	PMS
07 Dic. 09	Análisis comparativo directo	DEM	ArcGIS

Plano Base y volumen domo ancestral

La creación del plano base surge por la necesidad de cerrar en la base el modelo de superficie creado con los distintos métodos, para luego calcular su volumen. Las curvas de nivel IGM fueron generadas el año 1975 con curvas equidistantes a 50 m.; se digitalizaron el 2010 con curvas equidistantes de 25 metros. Con las curvas digitalizadas se generó un DEM del domo ancestral en ArcGIS. EL algoritmo de interpolación de ArcGIS *Topo to Rater* es un método de interpolación diseñado específicamente para la creación de modelos digitales de terreno. Está basado en el algoritmo ANUDEM desarrollado por Hutchinson (1988). A partir de este DEM se seleccionan 3 puntos ubicados cerca del borde interior de la caldera (tabla 4.2) con los cuales, usando la ecuación de un plano, se genera una grilla de puntos espaciados cada 100 metros que cubre todo el domo, abarcando un área de 2,8 x 2,5 km². Mediante esta grilla se crea un DEM llamado Plano Base, resultando ser un plano oblicuo con respecto al horizonte, con su mínima altura al suroeste la que aumenta hacia el noreste (ver Anexo 1. con imágenes de la metodología).

Tabla 4.2 Puntos para crear el Plano Base. Sistema de coordenadas WGS84, 18S.

Punto	Coordenada X	Coordenada Y	Coordenada Z
PB 1	691754	5253681	504
PB 2	693114	5255103	622
PB 3	690751	5254648	535

El volumen del domo ancestral, que corresponde al volumen contenido entre el DEM del domo ancestral y el Plano Base, es de 0,40 km³. Este valor se aproxima al medio kilómetro cúbico que estima Carn y otros (2009) y a los cerca de 0,4 km³ que sugiere Lara (2009), sin embargo ninguno de ellos corresponde a un valor calculado.

4.1 Método 1: Fotogrametría digital

La fotogrametría es una técnica cuyo objeto es estudiar y definir con precisión la forma, dimensiones y posición en el espacio de un objeto cualquiera utilizando esencialmente medidas hechas sobre una o varias fotografías de ese objeto (Clavo, 1980) orientado principalmente a la obtención de material cartográfico, en especial mapas topográficos. En general se utilizan fotografías aéreas las que pueden ser de dos tipos según el ángulo de toma: verticales u oblicuas. Las primeras se utilizan principalmente con fines fotogramétricos (elaboración de mediciones precisas) y consiste en un barrido sistemático de fotografías tomadas con un ángulo de 90° con respecto al horizonte, las cuales se solapan en al menos un 60%, permitiendo la realización de observaciones estereoscópicas (visualización desde dos perspectivas de un punto que se solapa en dos fotografías, para generar una imagen 3D; García San Juan, 2005). La fotografía oblicua es útil para identificar elementos particulares del paisaje. Consiste en la captura de imágenes con ángulos inferiores a 90°, permitiendo así que resalten con mayor claridad las irregularidades del terreno (García San Juan, 2005).

La fotogrametría se puede clasificar de acuerdo a la posición espacial de la cámara (aérea o terrestre) y/o al tipo de sensor o cámara (analógico o digital) (Lerma, 2003). Por otra parte, el estudio puede ser hecho de manera análoga-analítica, mediante la aplicación de modelos geométricos a imágenes impresas y resolución informatizada, o digital, a través de análisis computacional con imágenes en formato digital (Chacón, 2009). La fotogrametría análoga-analítica utiliza fotografías verticales ya que tiene una escala uniforme y sólo hay diferencias por el relieve del terreno, dejando las fotografías oblicuas para fotointerpretación debido a que la escala no es uniforme (varía en forma lineal) y sólo algunos instrumentos analógicos permiten restituir fotografías inclinadas hasta 18° (González, 2008). Afortunadamente, existen programas computacionales que permiten

hacer análisis fotogramétricos a fotografías oblicuas; uno de ellos es *PhotoModeler Scanner*.

PhotoModeler Scanner (PMS) permite generar modelos 3D de una figura a partir de fotografías digitales sin restricción de orientación. El proceso de restitución fotogramétrica, que consiste en determinar la posición X, Y, Z de un punto de la imagen en el espacio, es casi por completo automatizado. Sin embargo, para utilizar este método se debe cumplir con los siguientes requisitos básicos:

- *Dos o más imágenes del objeto tomadas desde distintas posiciones*; deben tener la mayor porción del objeto superpuesto al ser visto de distintos ángulos, intentando abarcarlo por completo. Permite crear una imagen estereoscópica a partir de 2 imágenes que posteriormente forman el modelo 3D.
- *Al menos 3 puntos de control común entre imágenes*; deben ser fácilmente identificables para su correcto posicionamiento y estar distribuidos ampliamente. De ellos depende la posición geográfica (sistema de referencia espacial) y dimensión del objeto modelado.
- *Conocimiento de los parámetros de la cámara*; tales como largo focal del lente y punto principal, entre otros, que son posible determinar con el programa en caso de poseer la cámara. Permite corregir las distorsiones de la imagen con respecto a la forma real (calibración de la cámara).

La ausencia de uno de estos puntos implica disminución en la precisión del modelo 3D. La restitución en PMS consiste en identificar, en dos o más imágenes, puntos de igual posición espacial (homólogos) sobre el objeto a modelar, de tal manera, que ellos puedan crear la forma real de éste. Los pasos para hacer la restitución son los siguientes:

- Selección de imágenes que cumplan los requisitos
- Calibración de la cámara
- Posicionamiento de los puntos de control
- Identificación de puntos homólogos

Luego de realizar estos pasos el programa genera el modelo 3D.

Una herramienta útil que posee este programa es la "nube de puntos" que completa el modelo 3D adicionando cientos a miles de puntos. Para poder utilizarla es necesario tener pares fotográficos con un ángulo de paralaje pequeño, es decir, la distancia entre fotos debe ser entre 0,10-0,15 veces la distancia de la foto al objeto y deben tener el mismo largo focal.

En base a los requisitos básicos, se estudiaron las fotografías disponibles y se escogieron las de aquellas fechas que al menos cumplieran con 2 de ellos. Con este método se obtuvo el volumen para el 30 de Octubre del 2008 y el 27 de Febrero del 2009. Los puntos de control que se utilizan son extraídos del DEM LIDAR.

30 Octubre 2008

Fueron utilizadas tres fotografías que cubren el domo desde el sureste al este (figuras 4.1.1 a 4.1.4). De los requisitos para utilizar el método, no se cumplía el conocer los parámetros de la cámara ya que no se disponía de ella o sus características. Sin embargo, el programa es capaz de resolver este problema a través de una auto-calibración a partir de las propias fotografías.

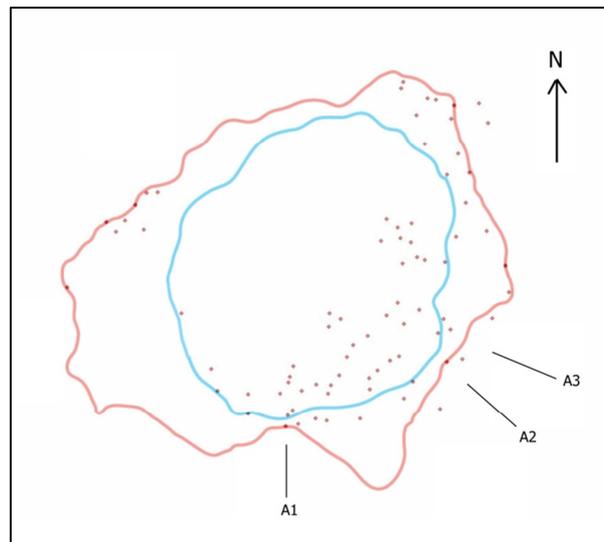


Figura 4.1.1: Esquema ilustrativo, 30 de Octubre del 2008 (vista en planta). La línea roja es el borde de la caldera y la azul el borde del domo. A1, A2 y A3 corresponde a las fotografías utilizadas

indicando su orientación. Los puntos corresponden a puntos de control y homólogos, estos últimos solo cubren la mitad sureste del domo.



Figura 4.1.2: Vista lateral del domo, dirección norte. Los puntos de control se ubican en el borde oriental de la caldera (puntos amarillos) y los puntos homólogos en el domo (cruces). Cortesía de Christian Brown, Gobierno Regional de Los Lagos.

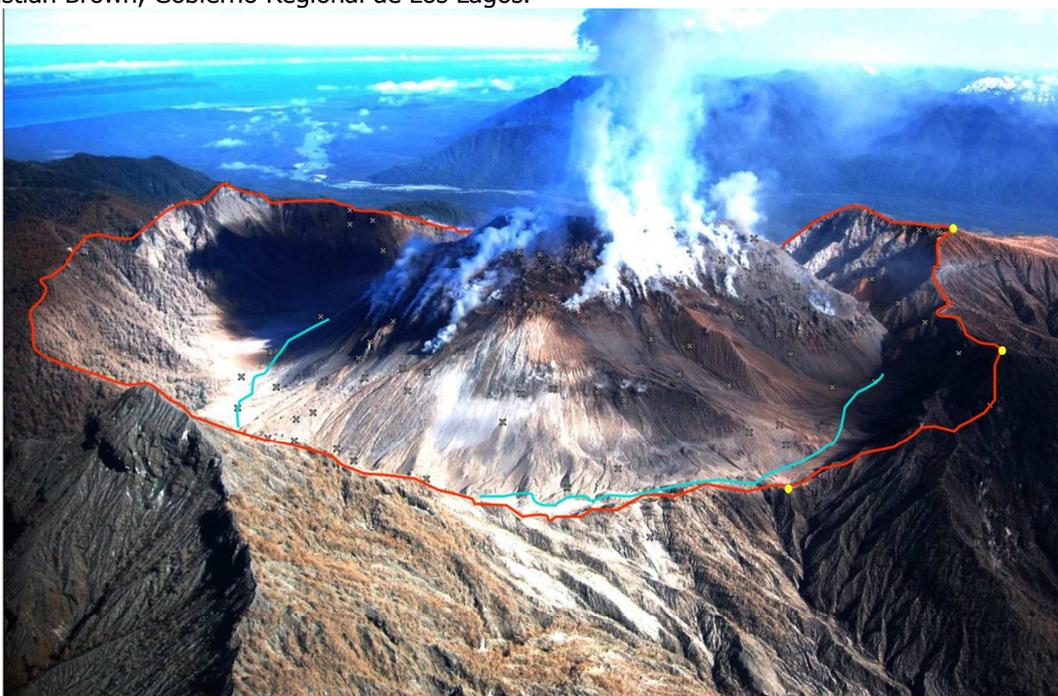


Figura 4.1.3: Vista lateral del domo, dirección noroeste. Muestra los puntos mencionados anteriormente desde otra perspectiva. Cortesía de Christian Brown, Gobierno Regional de Los Lagos.



Figura 4.1.4: Vista lateral del domo, dirección nor-noroeste. Muestra los puntos mencionados anteriormente desde otra perspectiva. Cortesía de Christian Brown, Gobierno Regional de Los Lagos.

Luego de posicionar los puntos de control e identificar los puntos homólogos, se genera un modelo 3D de puntos orientados (con coordenadas X, Y, Z). Estos son exportados a un sistema de información geográfica, en este caso ArcGIS, donde se crea la figura 3D como una red irregular de triángulos. Los algoritmos que se utilizan para la formación de la malla de triángulos irregular, se basan fundamentalmente en la triangulación de Delaunay. Estos algoritmos, cumplen las condicionantes computacionales y geométricos, donde los triángulos formados son lo más regulares posibles, la longitud de los lados de los

triángulos es mínima, y la triangulación formada es única, dando lugar a la red irregular de triángulos que aparentemente ofrece una imagen más fiel del terreno real, y que permite una interpolación coherente entre los valores de altitud de cada uno de los puntos o vértices. (Priego y Porres, 2002). Fue necesario agregar puntos en la zona no cubierta al noroccidente para poder crear la figura 3D. Estos fueron puestos en el borde de la base del domo, siendo determinados en base a observaciones de fotografías tomadas posterior a esta fecha que indican que la zona no varió mayormente, por lo que el borde sería similar al borde del domo del DEM LIDAR. Luego, se calcula el volumen contenido entre la figura 3D y el Plano Base. (Figura 4.1.5.)

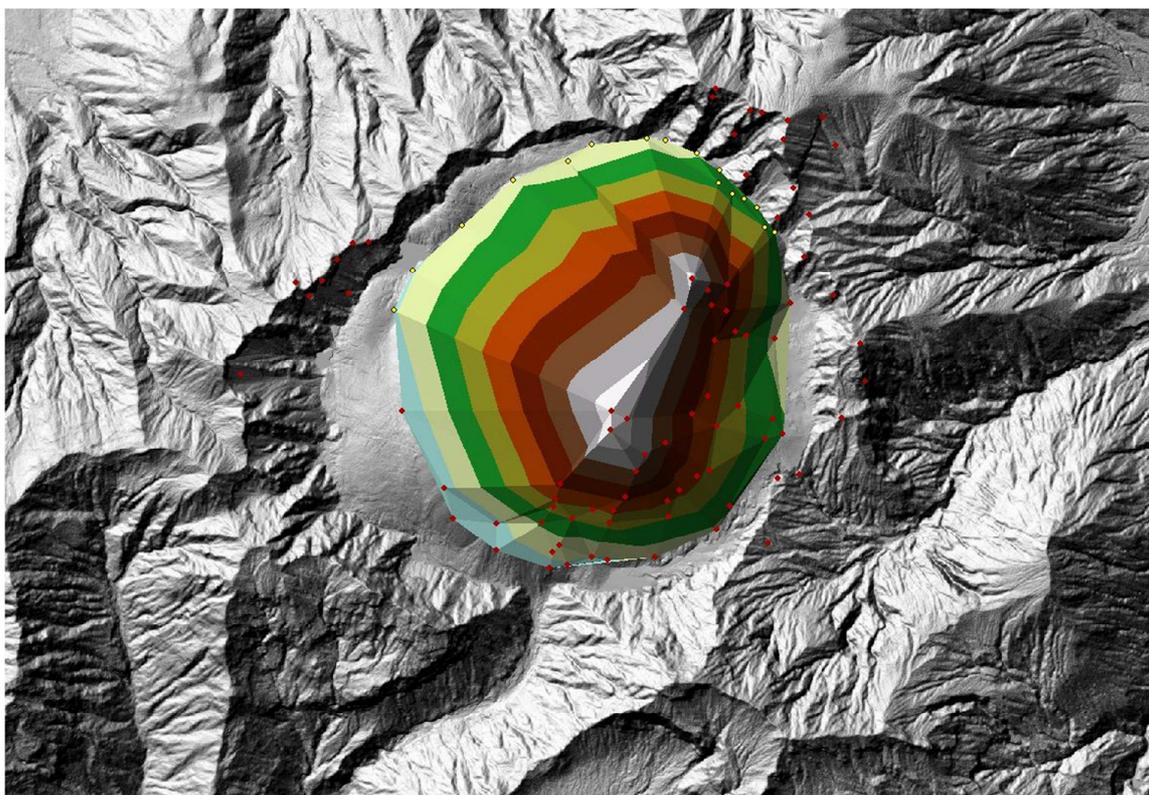


Figura 4.1.5: Modelo 3D, 30 Oct. 08. Los puntos rojos son los exportados de PMS y los amarillos son agregados para limitar la figura y dar forma al domo 3D. Escala 1:20000.

El volumen obtenido para esta fecha es de $0,43 \text{ km}^3$. Este valor se considera como mínimo debido a que no es posible determinar el error de la porción en la zona no cubierta por los puntos homólogos (sector noroccidental). El error asociado a la zona cubierta con puntos

corresponde a 8 m. dada por la precisión del PMS, lo que implica un error de esa porción de volumen de $\pm 0,01 \text{ km}^3$.

27 Febrero 2009

Fueron utilizadas once fotografías que cubren el domo por completo (figuras 4.1.6 a 4.1.17).

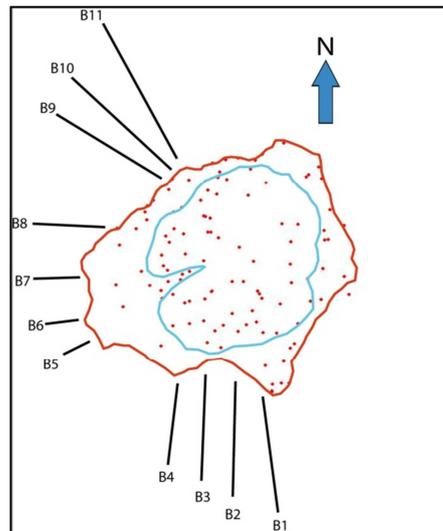


Figura 4.1.6: Esquema ilustrativo, 27 de Febrero del 2009 (vista en planta). Los puntos marcados son puntos homologos, no hay puntos de control.

B1



Figura 4.1.7. Vista lateral del domo, dirección nor-noroeste, 27 Feb. 09. Los puntos homólogos corresponden a las cruces blancas y los amarillos a los puntos de control (tomada por Luis Lara, SERNAGEOMIN).

B2



Figura 4.1.8. Vista lateral del domo, dirección nor-noreste, 27 Feb. 09. (tomada por Luis Lara, SERNAGEOMIN).

B3



Figura 4.1.9. Vista lateral del domo, dirección nor-noreste, 27 Feb. 09. (tomada por Luis Lara, SERNAGEOMIN).

B4



Figura 4.1.10. Vista lateral del domo, dirección nor-noreste, 27 Feb. 09. (tomada por Luis Lara, SERNAGEOMIN).

B5



Figura 4.1.11. Vista lateral del domo, dirección noreste, 27 Feb. 09. (tomada por Luis Lara, SERNAGEOMIN).

B6



Figura 4.1.12. Vista lateral del domo, dirección noreste, 27 Feb. 09. (tomada por Luis Lara, SERNAGEOMIN).

B7



Figura 4.1.13. Vista lateral del domo, dirección noreste, 27 Feb. 09. (tomada por Luis Lara, SERNAGEOMIN).

B8



Figura 4.1.14. Vista lateral del domo, dirección este, 27 Feb. 09. (tomada por Luis Lara, SERNAGEOMIN).

B9



Figura 4.1.15. Vista lateral del domo, dirección sureste, 27 Feb. 09. (tomada por Luis Lara, SERNAGEOMIN).

B10

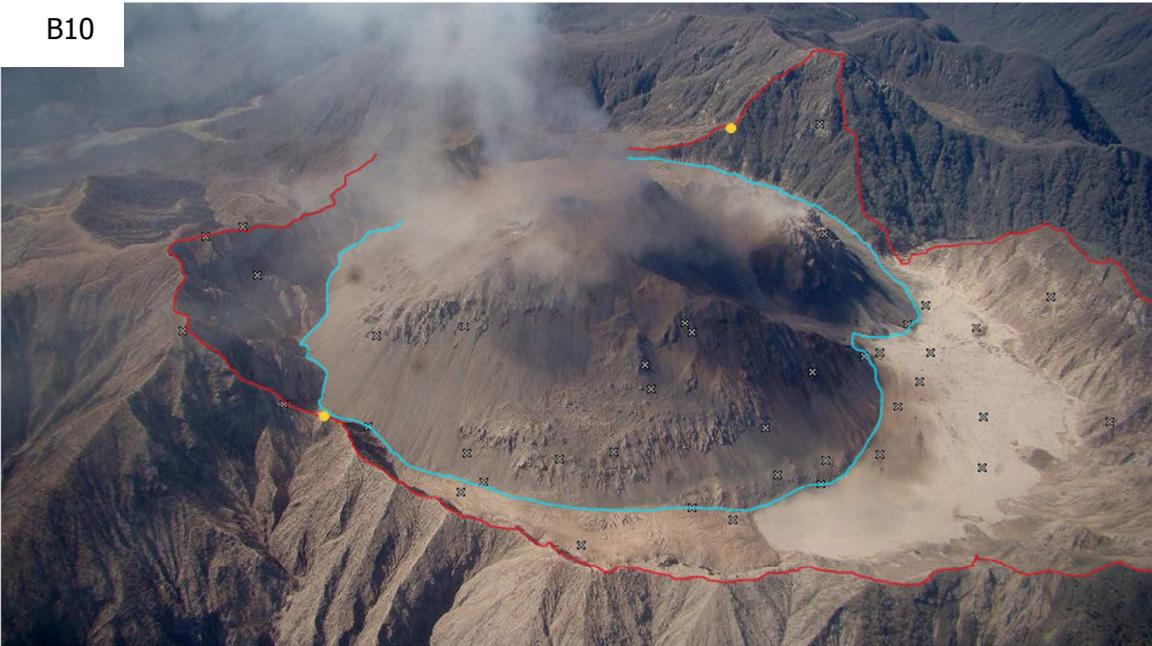


Figura 4.1.16. Vista lateral del domo, dirección sureste, 27 Feb. 09. (tomada por Luis Lara, SERNAGEOMIN).

B11



Figura 4.1.17. Vista lateral del domo, dirección sur-sureste, 27 Feb. 09. (tomada por Luis Lara, SERNAGEOMIN).

Luego de posicionar los puntos de control e identificar los puntos homólogos, se genera un modelo 3D de puntos orientados. En esta fecha fue posible realizar una nube de puntos que cubre casi por completo el domo, exceptuando una pequeña porción al noreste y aquellas partes en la cima que debido a la emisión de gases y cenizas no son visibles (fig. 4.1.18). La nube de puntos genera cerca de 24 mil puntos los que son exportados a ArcGIS para generar un DEM (método de interpolación *Topo to Raster*) que complete la figura 3D. Luego se calcula el volumen contenido entre el domo y el Plano Base.

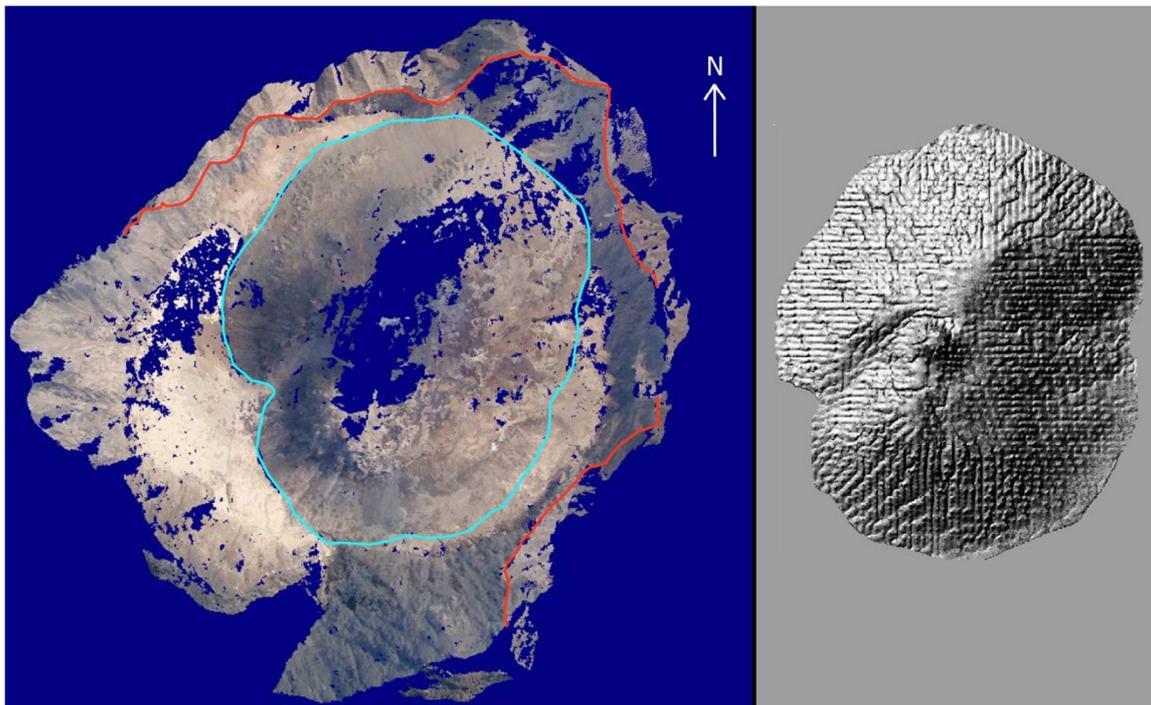


Figura 4.1.18: Nube de puntos y figura 3D generada. En la imagen derecha, se observan zonas vacías de puntos en el centro del domo y hacia el noreste de este, que fueron cubiertas al hacer el DEM. En la imagen izquierda se muestra un *hillshade* de la figura 3D.

El volumen obtenido para esta fecha es de $0,58 \text{ km}^3$. La precisión es de $1/1500$ dado por el modelo generado en PMS, esto se refiere al error acumulativo sobre cada metro, es decir, que por cada 1500 m de longitud existe un error de 1 m . Por lo tanto, el error asociado al volumen corresponde a $\pm 2 \times 10^{-6} \text{ km}^3$ calculado como el área que cubre el domo por la precisión del modelo.

4.2 Método 2: Aproximación a figura geométrica

Consiste en determinar el volumen del domo aproximándolo a una figura geométrica regular. Se escogió la figura de un cono por ser una figura que se asemeja a la morfología del domo y por la factibilidad de crearla a partir del material disponible (fotografías aéreas oblicuas). Este cono representa una figura contenida casi completamente dentro del domo y, por lo tanto, es admisible considerar este valor como el volumen mínimo del domo.

El método es utilizado para obtener el volumen del domo el 05 de Junio del 2008, 01 de Julio del 2008 y del 15 de Enero del 2009, debido a que en las fotografías de estas fechas

es posible determinar los parámetros necesarios para llevar a cabo el método (descritos más adelante). La metodología empleada es la misma para todas las fechas y solo difirieren en los datos métricos de cada una, por lo que será descrita de manera general.

La generación de un cono está determinada por dos variables: el radio de la circunferencia base y la altura del cono. Para determinar la dimensión del cono modelado, el radio se define como el radio de la máxima circunferencia que circunda la base del domo y la altura como la máxima altura del domo. Estos valores aproximados e inferidos de las fotografías disponibles y del DEM LIDAR. La circunferencia es proyectada sobre el Plano Base para generar una figura cerrada, obteniéndose como base de la figura una elipse contenida en ese plano (figura 4.2.1). Con estos valores (altura y circunferencia) se genera el cono en ArcGIS como una red irregular triangulada, posicionada en torno a un punto escogido como el punto central del domo (X: 691964; Y: 5254823; coordenadas UTM, H18S).

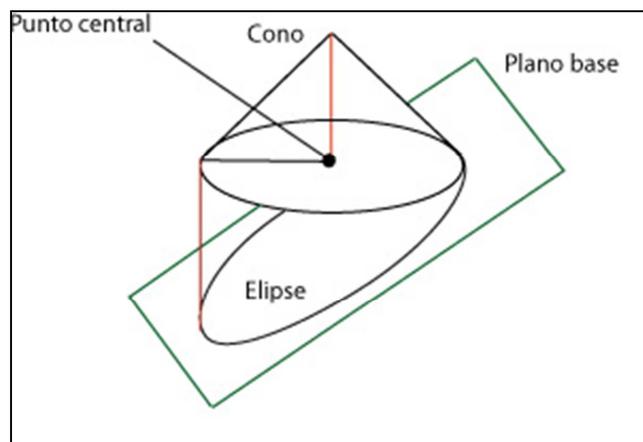


Figura 4.2.1: Esquema ilustrativo del método por aproximación a figura geométrica (cono). El ángulo entre la circunferencia y la elipse está exagerado, en la práctica la inclinación del Plano Base con respecto al horizonte es menor.

Luego, se calcula en volumen contenido entre esta figura y el DEM Plano Base.

El valor obtenido de volumen mínimo para cada fecha es de:

$$V = 0.016 \text{ km}^3 \text{ (05 Jun. 08)}$$

$$V = 0.125 \text{ km}^3 \text{ (01 Jul. 09)}$$

$$V = 0.323 \text{ km}^3 \text{ (15 Ene. 09)}$$

El error es de al menos un 27,4%, el cual es calculado aplicando este mismo método a fechas en las que se obtuvo buena precisión (tabla 4.2.1). Este valor corresponde al mayor error obtenido dentro de esas fechas.

Tabla 4.2.1. Estimación error método 2.

	vol. con buena precisión [km ³]	vol. con método 2 [km ³]	Diferencia vol. [km ³]	Error [%]
domo ancestral	0,41	0,35	0,06	12,6
Feb. 09	0,58	0,42	0,16	27,4
Dic. 09	0,80*	0,77	0,03	4,8

*valor calculado en cap. 4.3.

4.3 Análisis del DEM LIDAR

LIDAR (*Light Detection and Ranging*) es un sistema láser de detección y medición que permite registrar las elevaciones de un terreno a partir de un barrido láser aéreo. El sistema consiste en emitir pulsos de luz láser en la banda del espectro electromagnético desde un aeronave, para posteriormente capturar la señal reflejada por la superficie topográfica barrida obteniendo de esta forma las elevaciones del terreno con gran precisión (Digimapas Chile, 2009).

El levantamiento topográfico realizado con el sistema LIDAR en el sector de Santa Bárbara y el volcán Chaitén fue hecho por Digimapas Chile® con sobrevuelos realizados entre el 15 de Octubre y 07 de Diciembre del 2009 (Markus Rombach; Digimapas Chile Ltda., comunicación personal, 24 de Marzo de 2010). Los productos de este levantamiento se encuentran en el sistema de coordenadas geográficas SIRGAS (Digimapas Chile, 2009) el que fue transformado a WGS84, huso 18 Sur.

Para el análisis del volumen solo se utilizó la información del sector que cubre el volcán Chaitén (figura 4.3.1), la que fue trabajada en ArcGIS. La precisión horizontal y vertical es de ± 0.5 m y las alturas están referidas al nivel medio del mar.



Figura 4.3.1: DEM LIDAR del volcán Chaitén. Centrado se encuentra el domo que en su parte central (sector blanco) no posee datos de altura. Escala 1:20000.

Antes de calcular el volumen hubo que corregir la zona central con ausencia de datos altimétricos (figura 4.3.1). Para esto se creó un DEM del domo donde los valores nulos centrales fueron estimados usando triangulación de Delaunay (Priego y Porres, 2002) a través del programa ENVI 4.2. Luego de esto se tiene una superficie continua con la que se calcula el volumen cerrándola con el Plano Base.

El volumen calculado es de $0,80 \text{ km}^3$, con un error de $\pm 0,003 \text{ km}^3$ dada por la precisión del DEM LIDAR. Este valor también tiene asociado un error temporal ya que los datos fueron registrados en un intervalo de tiempo de 53 días.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1 Volumen

Tabla 5.1: Volumen del domo y error asociado.

Fecha	Volumen acumulado [km ³]	Error [\pm km ³]
05 Jun. 08	0,02	0,002
01 Jul. 08	0,14	0,01
30 Oct. 08	0,39	>0,01
15 Ene. 09	0,37	0,04
27 Feb. 09	0,58	0,000002
07 Dic. 09	0,80	0,003

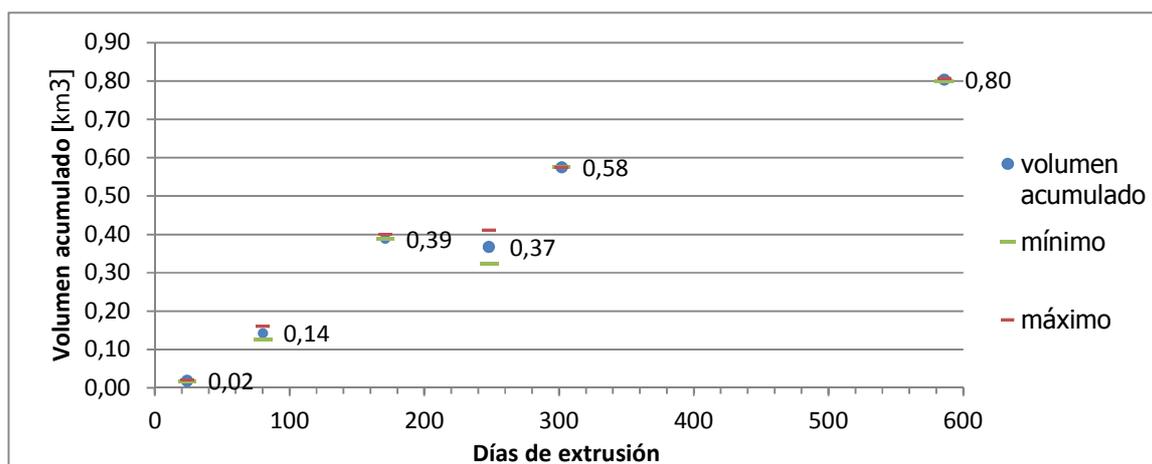


Figura 5.1: Volumen acumulado para las distintas fechas estimadas.

De los volúmenes calculados con el método 2, se considera como volumen acumulado al valor medio del rango definido por el valor mínimo calculado y el valor máximo calculado más el porcentaje de error (27,4%). El volumen calculado es un valor representativo de cada fecha definido así para poder estimar la tasa de crecimiento. Sin embargo el volumen del 15 de Enero del 2009 es menor que el de la fecha anterior, siendo que la tendencia durante el periodo Octubre 2008 – Enero 2009 fue de crecimiento de acuerdo a la

información emitida por SERNAGEOMIN (2009) sin haber pérdida de volumen a causa de explosiones o colapsos del domo.

El error del volumen calculado para 30 Oct. 08 está asociado a una porción del volumen total, que corresponde a casi un tercio de este (0,12 km³). La otra porción corresponde a un volumen mínimo, debido a que la superficie que define esa porción tiene menor altura que la misma superficie calculada para la siguiente fecha (27 de Febrero del 2009), exceptuando la zona colapsada, lo que indica un aumento del volumen. Hay que tomar este valor con cautela ya que el rango de error no está bien definido, en particular el valor máximo. De todas formas, es utilizado para la estimación de la tasa de crecimiento.

El valor obtenido con el DEM LIDAR es asignado al último día del periodo de obtención de datos (07 Dic. 09) suponiendo que el registro se haya completado en los últimos días. El valor del volumen no es modificado debido a su alta precisión.

El valor del 27 de Febrero del 2009 no sufre modificaciones debido a su alta precisión.

5.2 Tasa de crecimiento

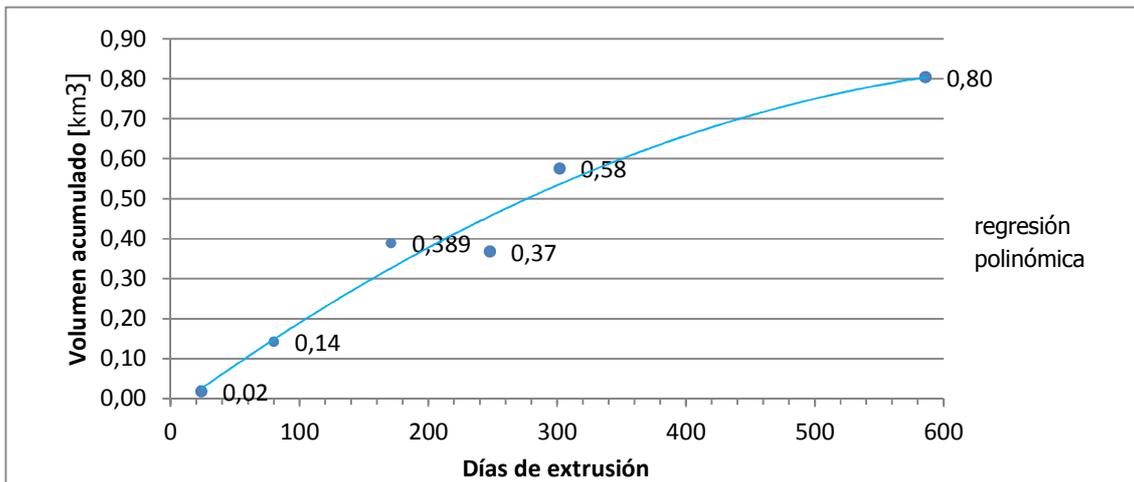


Figura 5.2.1: Variación de la tasa de crecimiento entre Mayo del 2008 y Diciembre del 2009.

Los datos del periodo del 5 de Junio del 2008 al 7 de Diciembre del 2009, correspondiente a la primera y última fecha con valor de volumen estimado, muestran una tendencia al decline de la tasa de crecimiento. En tal periodo la tasa promedio es de 13,6 m³/s.

De acuerdo a la regresión hecha, esta posee un factor de correlación mayor que los otros tipos de regresiones, como lineal o logarítmica, y representa de mejor manera el comportamiento de la tasa de crecimiento.

6. DISCUSIÓN

6.1 En relación a la metodología y su precisión

La tasa de extrusión calculada depende de los métodos aplicados para la obtención del volumen, por esto, es necesario tener claro cuáles son los factores que aumentan o disminuyen el error.

Debido a que no se conoce el valor "real" del domo en ninguna fecha durante la erupción, la exactitud de los valores calculados es imposible de determinar. Sin embargo, la precisión, que está relacionada a la dispersión de los datos con respecto al valor real, está determinada por los errores sistemáticos y aleatorios o accidentales. El error sistemático es el que se repite en todas las mediciones afectando a todos los valores de igual forma; de ser identificado puede repararse. El error aleatorio aparece como fluctuaciones al azar en los valores de mediciones sucesivas escapándose al control de quien mide; no es corregible. Cada método tiene asociados errores sistemáticos y aleatorios en distinta proporción.

Los errores asociados al uso del PMS son del tipo sistemático y están relacionados al nivel de precisión que son colocados los puntos tanto de control como homólogos. A pesar de esto, los valores obtenidos tienen un error muy pequeño dentro de las proporciones con las que se trabajó, siendo el error de unos pocos metros a la escala de kilómetros en la que se trabajaba. En general los tres requisitos básicos, cantidad de fotografías, puntos de control y calibración de la cámara, son los principales factores que determinan la precisión del modelo. Gran cantidad de fotografías de distintos ángulos con un buen paralaje, puntos de control puestos con exactitud y calibración de la cámara hecha directa con ella (no auto-calibración) aumenta la precisión.

Los errores asociados al método por aproximación a figura geométrica son principalmente aleatorios, por lo que es más difícil aumentar la precisión de los valores obtenidos. Varios parámetros determinan el volumen de cada figura geométrica: altura e inclinación del Plano Base, posición del punto central, tamaño de la circunferencia inferior y altura del

punto más alto del domo. Todos ellos, menos el Plano Base, fueron estimados a partir de fotointerpretación aproximando valores y no por fotogrametría lo que implica mayor incerteza que los valores calculados con el método 1. A pesar de esto el método permite estimar un volumen mínimo útil como primera aproximación, obtenido de manera simple en comparación a los otros tanto por el tiempo que demora obtener los otros valores calculados (desde la obtención del material a analizar y su análisis) y el tipo de material (LIDAR o fotografías con características específicas). Observando los valores de volumen de la tabla 4.2.1, se ve que los valores obtenidos con este método son menores que los valores de buena precisión comprobando que el método estima un volumen menor.

El error asociado al análisis LIDAR es sistemático y tiene relación a la interpolación usada para completar la zona con vacío de datos altimétricos. Esta está basada en la triangulación de Delaunay que resulta ser óptima para la definición de terreno según Priego y Porres (2002). Este valor también tiene asociado una variación temporal ya que los registros de datos se hicieron en un periodo de 53 días. Sin embargo, durante ese periodo los cambios morfológicos, y por lo tanto de volumen, parecen no ser de gran envergadura de acuerdo a los informes emitidos por SERNAGEOMIN (2009).

Entre los valores de volumen obtenidos los más confiables son los que corresponden al 27 de Febrero del 2009 y al periodo 15-Oct/07-Dic. del 2009 debido a su alta precisión, $\pm 2 \times 10^{-6}$ y $\pm 0,003 \text{ km}^3$ respectivamente.

A pesar de contar con la mitad de los datos (tres fechas del método 2) con un amplio rango de error, estos valores en conjunto con aquellos de mejor precisión dan señales de la magnitud del volumen durante el periodo, pudiendo estimar e interpretar el crecimiento del domo y su tasa de crecimiento.

6.2 Volumen y tasa de crecimiento

Con respecto al volumen del domo ancestral, durante el periodo entre el 12 de Mayo 2008 y el 07 de Diciembre del 2009 no se registra actividad explosiva que pueda haber destruido de manera importante el domo ancestral. La única actividad destructiva de gran envergadura registrada corresponde al colapso parcial ocurrido el 19 de Febrero del 2009, la que ocurrió al suroeste del complejo de domos dejando un escarpe de colapso que

muestra material juvenil, principalmente del domo 1 (fig. 3.2.3.2 E). Durante el trabajo de campo (Abril del 2010) no se observaron líticos de obsidiana de dimensión decimétrica o mayor en los depósitos de flujos piroclásticos juveniles, en particular en la ladera norte, y solo algunas astillas centimétricas estaban incrustadas en troncos, lo que podría indicar que no hay una disminución significativa de su volumen durante la erupción. Por lo tanto se puede considerar que el valor estimado no varió mayormente durante este periodo.

Si bien la cantidad de datos es baja, se tiene tres valores en fechas con características destacables con respecto al crecimiento.

Carn y otros (2009) sugieren que hubo una alta tasa de crecimiento ($20-100 \text{ m}^3/\text{s}$) desde el inicio de la extrusión hasta finales de Julio del 2008, mientras que Lara (2009) sugiere que fue hasta finales de Octubre del 2008; esto permite suponer que en el mes de Octubre se genera un cambio en la tasa de crecimiento, que además, coincide con la generación del segundo domo. El colapso parcial de los domos ocurrido el 19 Febrero del 2009 implica un cambio en el volumen del complejo y corresponde a un evento típico en la formación de domos de lava. Durante los últimos ~ 3 meses del 2009 la variación morfológica del complejo de domos no es de gran tamaño en comparación a los primeros meses de erupción de acuerdo a los informes del SENAGEOMIN (2009). Los valores de volumen estimado para el 30 de Octubre del 2008, 27 de Febrero del 2009 (post-colapso) y 7 de Diciembre del 2009 pertenecen a las fechas destacables.

De acuerdo a las variaciones de la tasa de crecimiento y a las características expuestas anteriormente, se establecieron tres etapas: Etapa I, desde el inicio de la etapa efusiva al 30 de Octubre del 2008; Etapa II, de esta última fecha al 27 de Febrero del 2009, y Etapa III, del 27 de Febrero al 7 de Diciembre del 2009 (figura 6.2).

La Etapa I corresponde a la etapa con mayor tasa de crecimiento, estimada en $26,6 \text{ m}^3/\text{s}$. Esto concuerda con las observaciones de Carn y otros (2009) y Lara (2009) de este periodo. La alta tasa sería reflejo del abrupto vaciamiento del reservorio magmático posterior a la despresurización del sistema, coincidiendo con una deflación del área al oeste del volcán según Piña (2010) entre Junio y Agosto del 2008 (figura 6.2).

La Etapa II tiene una tasa estimada de 16,2 m³/s. Esta disminución con respecto a la etapa anterior corresponde a un crecimiento rápido, pero desacelerado que concuerda, en parte, con la deflación lenta observada por Piña (2010) desde Agosto del 2008 a Enero del 2009.

La Etapa III tiene una tasa de 9,3 m³/s. Este valor es menor al de las etapas I y II, y refleja la disminución de la tasa de crecimiento, concordante con el decaimiento de la actividad sísmica posterior al colapsos de domos (SERNAGEOMIN, 2009) y a la deflación lenta del sector oeste del volcán registrada por Piña (2010) después del colapso. Esta etapa indicaría una relativa declinación de la actividad eruptiva.

Los límites con respecto a las fechas de cada episodio, podrían ser definidos con mayor precisión, lo que requiere estimar más volúmenes durante el periodo Mayo 2008 – Diciembre 2009. Sin embargo, se puede apreciar que a pesar de tener pocos datos en un amplio periodo de tiempo, la tendencia y magnitud del crecimiento a escala de meses, es concordante con otros estudios, como el de Piña (2010) y Carn y otros (2009).

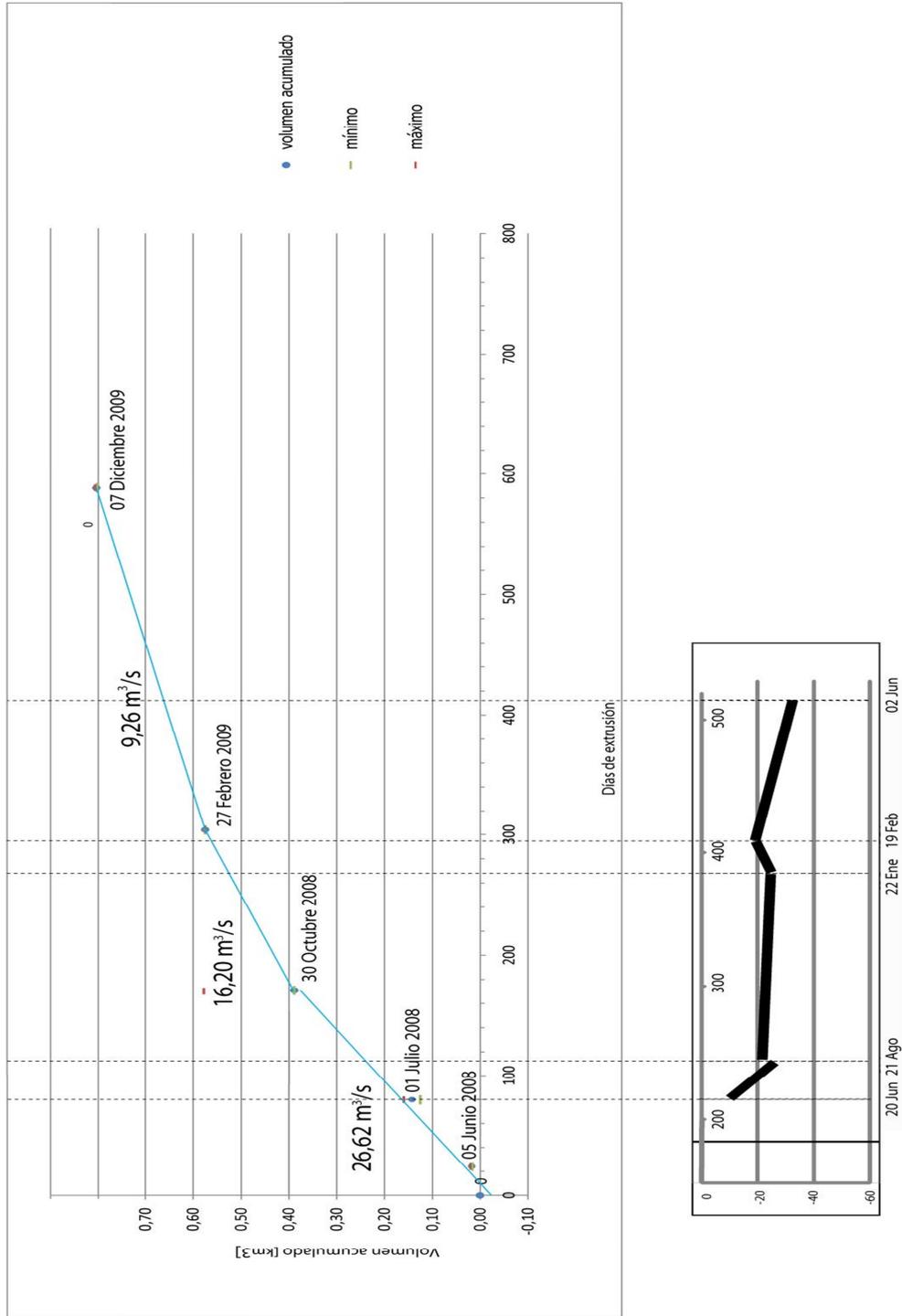


Figura 6.2: Variación de la tasa de crecimiento entre Mayo del 2008 y Diciembre del 2009 (Arriba). La línea azul indica el crecimiento en cada etapa. Abajo, variación vertical del sector oeste del volcán Chaitén, modificado de Piña (2010).

6.3 Comparación con otros domos

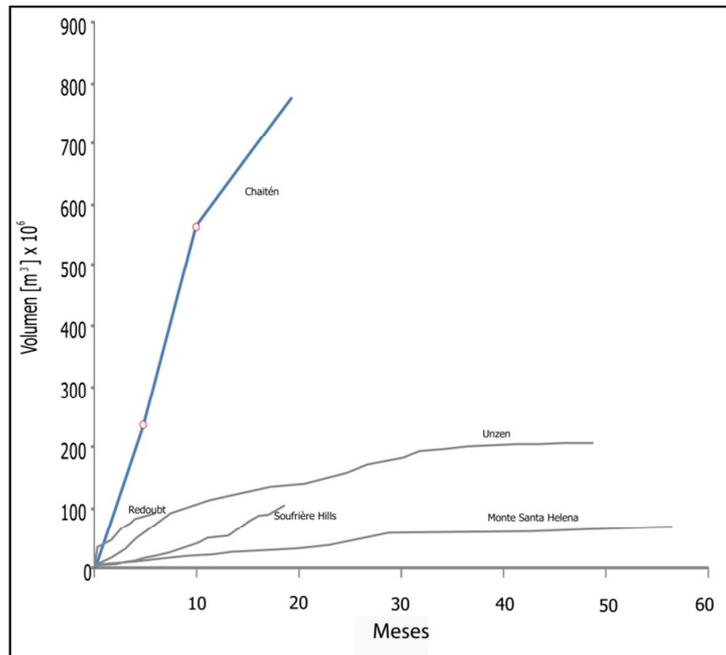


Figura. 6.3: Tasa de crecimiento de distintos domos de lava. Modificado de Nakada y otros (1999)

Con respecto a otras erupciones formadoras de domos la tasa de crecimiento del volcán Chaitén es extremadamente alta en un periodo tiempo más acotado que las otras erupciones.

La erupción del volcán Redoubt de 1989-1990 presenta una alta tasa de crecimiento durante el primer mes de la erupción similar a la estimada en la Etapa I. Su alta tasa estaría relacionada al sitio de emplazamiento del domo, el cual se encuentra confinado en un cráter tipo anfiteatro de laderas empinadas (figura 2.2.4). Esto impide el desarrollo de un domo estable, formando pequeños domos de corta vida ($0.001-0.030 \text{ km}^3$; 3-21 días) (Miller y Chouet, 1994) debido a las constantes destrucciones por colapsos gravitacionales o explosiones que permitirían una extrusión menos presurizada (Miller, 1994). La erupción del volcán Chaitén presenta condiciones morfológicas y características de crecimiento distintas al Redoubt, ya que posee una amplia caldera donde se desarrolla un complejo de

domos que alcanza los $0,80 \text{ km}^3$ y las altas tasas de crecimiento tiene una duración cercana a los 5 meses. Aparentemente, las causas de estas altas tasas responden a distintos factores para cada erupción ya que presentan diferencias composicionales (relativo al SiO_2) y morfológicas importantes.

En la erupción del volcán Soufrière Hills, Montserrat, entre 1995-2009 se reconocen 3 grandes episodios de extrusión con similar comportamiento: crecimiento acelerado inicial seguido por un crecimiento constante durante gran parte del episodio y un decaimiento en los últimos 3 meses. Posterior a cada episodio existe un periodo de pausa de 1,5 - 2 años (Wadge y otros, 2010). En la figura 6.3 se observa el desarrollo del primer episodio (Nov.1995- Mar.1998). El comportamiento de la tasa de crecimiento del volcán Chaitén es similar a los episodios de extrusión del Soufrière Hills, pero con tasas de crecimiento bastante mayor.

El Soufrière Hills presenta 2 erupciones históricas, hace 2000 y casi 400 años, y a partir de la erupción iniciada en 1995 solo ha tenido breves episodios sin actividad eruptiva. El volcán Chaitén parece haber tenido una erupción hace poco más de 200 años (Lara y Moreno, 2009) y la erupción iniciada en Mayo del 2008 continúa en Enero del 2010. Se podría esperar que esta erupción tenga un comportamiento similar al del Soufrière Hills, de periodos cíclicos de actividad y pausa en un lapso de pocos años, aunque Carrásco-Nuñez y Riggs (2008) sugieren que los domos riolíticos están asociados erupciones breves.

7. CONCLUSIONES

Este trabajo, cuyo objetivo es determinar la tasa de crecimiento del complejo de domos durante el periodo Mayo 2008 – Diciembre 2009 y comprender su evolución, se basó en el análisis de fotografías aéreas oblicuas y modelos de elevación digital registrados durante este periodo.

Un punto importante para la estimación del volumen corresponde al método utilizado y a la calidad del material. El método de fotogrametría digital entrega valores de alta precisión, siendo utilizado con todos los requisitos básicos y corresponde al método que entrega la mejor precisión entre los volúmenes estimados, superando incluso al LIDAR. El método por aproximación a figura geométrica, tiene asociado un error muy alto y su uso solo sirve como una primera aproximación al volumen real.

Sobre la base de los resultados, la erupción del volcán Chaitén se puede dividir en tres etapas:

- Etapa I (12 de Mayo del 2008 - 30 de Octubre del 2008) caracterizada por una alta tasa de crecimiento de $26,6 \text{ m}^3/\text{s}$ coincidente con el desarrollo del primer domo y la rápida subsidencia de la zona al oeste del volcán.
- Etapa II (30 de Octubre 2008 - 27 de Febrero del 2009) caracterizada por una moderada tasa de crecimiento ($16,2 \text{ m}^3/\text{s}$), durante la cual se formó el segundo domo y ocurrió el colapso del parcial del complejo de domos.
- Etapa III (27 de Febrero - 7 de Diciembre) caracterizada por una moderada tasa de crecimiento ($9,2 \text{ m}^3/\text{s}$), la generación del tercer domo y la tendencia a declinar la tasa.

Todas las etapas presentan valores mayores de tasa de crecimiento que los otros domos de lava, pero la tendencia a disminuir paulatinamente es común para todos. El volcán Chaitén podría estar entrando en un estado de receso ya que muestra una relativa declinación de la tasa que coincide con la disminución de actividad sísmica registrada por SERNAGEOMIN (2009).

8. REFERENCIAS

- ALIDIBIROV, M., (1995). A model for the mechanism of the May 18, 1980 Mount St. Helens blast. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*: v 66, p. 217-225
- ARAYA, E., (1979). Estudio geológico preliminar del área ubicada entre los 42°30' y 43°20' L. S. y los 72°30' y 73°00' L. W., comuna de Chaitén, provincia de Chiloé, X región. Tesis de grado, Universidad de Chile, Depto. de Geología. 175 p. Santiago.
- BASUALTO, D., P. PEÑA, C. DELGADO, C. GALLEGOS, H. MORENO, J. O. MUÑOZ , 2008. Seismic activity related to the evolution of the explosive eruption of Chaitén volcano in the Southern Andes Volcanic Zone, *Eos Trans. AGU*, 89(53), Fall Meet. Suppl., Abstract V43D-2178.
- BLAKE, S., (1989). Viscoplastic models of lava domes, *IAVCEI Proceedings in Volcanology*, Vol.2. Lava flows and domes, Springer Verlag, Heidelberg, 88-126.
- CARRASCO-NÚÑEZ, G., RIGGS, N.R. (2008). Polygenetic nature of a rhyolitic dome and implications for hazard assessment: Cerro Pizarro volcano, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*,. 171, pp. 307–315.
- CARN, A., PALLISTER, J., LARA, L., EWERT, J., PRATA, A., THOMAS, R., VILLAROSA, G., (2009). The Unexpected Awakening of Chaitén Volcano, Chile. *Eos*, vol. 90, n° 24, p. 205-206.
- CASERTANO, L., (1963). Catalogue of the active volcanoes and solfatara fields of the Chilean continent. *International Volcanological Association*, 60 p. Roma.
- CHACÓN, N., (2009). Topografía Aplicada, guía de aprendizaje, cap. 6, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador.
- CLAVERO, J.E., SPARKS, R.S.J, POLANCO, E., PRINGLE, M.S., (2004). Evolution of Parinacota volcano, Central Andes, Northern Chile. *Revista Geológica de Chile*, vol. 31, n° 2, Diciembre 2004.
- CLAVO, D., (1980). Apuntes de Fotogrametría II, Universidad Politécnica de Madrid (E.U.I.T.T.).
- CEMBRANO, J., Schermer, E., Lavenu, A., Sanhueza, A. (2000). Contrasting nature of deformation along an intra-arc shear zone, the Liquiñe—Ofqui fault zone, Southern Chilean Andes. *Tectonophysics*, vol. 319, pp.129-149.
- DARWIN, C. R., (1838). On the connection of certain volcanic phenomena in South America; and on the formation of mountain chains and volcanoes, as the Effects of the same Power by which Continents are elevated. *Transaction of the Geological Society of London*, vol. 5, n°1838, p. 60-631.
- DIGIMAPAS CHILE, (2009). Informe Final, Proyecto "Servicio de levantamiento aerotransportado para el sector de Santa Bárbara, comuna de Chaitén".
- DUHART, P., MORENO, H., BASUALTO, D., MELLA, M., MUÑOZ, J., (2009). Erupción en curso del volcán Chaitén: productos, impactos y colapso parcial de domos del 19 de febrero de 2009. XII Congreso Geológico Chileno, Simposio n°7, Santiago, Noviembre 2009.
- FIERSTEIN, J., HILDRETH, W., (1992). The plinian eruptions of 1912 at Novarupta, Katmai

- National Park, Alaska. *Bulletin of Volcanology*, vol. 54, p. 646-684.
- FIERSTEIN, J., HOUGHTON, B.F., WILSON C.J.N., HILDRETH, W. (1997): Complexities of plinian fall deposition at vent: an example from the 1912 Novarupta eruption (Alaska), *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, n°76, p. 215-227.
- FINK, J., ANDERSON, S. (2000). Lava domes and coulees, en Sigurdsson, H. *Encyclopedia of Volcanoes* (307-319), Londres: Academic Press.
- FOLCH, A., JORBA, O., VIRAMONTE, J., (2009). Volcanic ash forecast-application to the May 2008 Chaitén eruption, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, n°8, p. 928-940.
- GARCÍA SANJUÁN, L., (2005). *Introducción al Reconocimiento y Análisis del Territorio*. Barcelona: Ariel.
- GERLACH, D.C., FREDERICK, A. F., MORENO, H., LOPEZ-ESCOBAR, L., (1988). Recent Volcanism in the Puyehue—Cordon Caulle Region, Southern Andes, Chile (40°5'S): Petrogenesis of Evolved Lavas. *Journal of Petrology*, vol 29, n° 2, p. 333-382.
- GONZÁLEZ, V.H., (2008). *Cartografía-Fotointerpretación [en línea]*, Universidad Católica de Loja, Ecuador. (<http://www.utpl.edu.ec/eva/descargas/material/143/G21604.8.pdf>.)
- HALE, A.J, CALDER, E.S., WADGE, G., LOUGHLIN, S.C, RYAN, G.A., (2009). Modelling the lava dome extruded at Soufrière Hills Volcano, Montserrat, August 2005-May 2006: Part I: Dome shape and internal structure. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 187, n°1-2, pp. 53-68.
- HERD, R.A., EDMONDS, M., BASS, V.A. (2005). Catastrophic lava dome failure at Soufrière Hills Volcano, Montserrat, 12–13 July 2003. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 148, n° 3-4, pp. 234-252.
- HERVÉ, F. (1976). Estudio geológico de la Falla Liquiñe-Reloncaví en el área de Liquiñe: antecedentes de un movimiento transcurrente (Provincia de Valdivia). *Actas del I Congreso Geológico Chileno*, Santiago, pp. B39-B56.
- HILDRETH, W. (1983). The compositionally zoned eruption of 1912 in the Valley of Ten Thousand Smokes, Katmai National Park, Alaska. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, n° 18, pp. 1-56.
- HILDRETH, W., GODOY, E., FIERSTEIN, J., SINGER, B., (2009). Laguna del Maule volcanic field: Eruptive history of a Quaternary basalt-to-rhyolite distributed volcanic field on the Andean rangecrest in central Chile. *SERNAGEOMIN, Boletín* n° 63.
- HUTCHINSON, M. F., (1988). Calculation of hydrologically sound digital elevation model, *Proceedings of the Third International Symposium on Spatial Data Handling*, August 17–19, Sydney, International Geographical Union, Columbus, Ohio, pp. 117–133.
- INSTITUTO GEOGRAFICO MILITAR, (2010). *Carta Topográfica Chaitén*, 1:50.000, Hoja 110.
- ISHIKAWA, Y., YAMADA, T., CHIBA, T., (1996). Topographic changes on the Unzen Volcano due to volcanic activities from 1991 to 1995. *J. Jpn. Soc. Erosion Control Engineer. ZShin-sabo*. 49-1, 38–44, en Japonés.
- LARA, L.E., (2009). The 2008 eruption of the Chaitén Volcano, Chile: a preliminary report. *Andean Geology*, vol. 36 (1), p. 125-129.

- LARA, L.E., AMIGO, A., MORENO, H. (2009). Volcanismo explosivo del volcán Michinmahuida: primeros antecedentes de una ignimbrita postglacial. XII Congreso Geológico Chileno, Simposio n°7, Santiago, Noviembre 2009.
- LARA, L.E., VALENZUELA, C., BASUALTO, D., PALLISTER, J. (2009). Crecimiento Excepcionalmente Rápido Del Domo Compuesto Del Volcán Chaitén 2008-2009. XII Congreso Geológico Chileno, Simposio n°7, Santiago, Noviembre 2009.
- LARA, L.E., MORENO, R. (2009). Hallazgo de una erupción histórica (siglo XVII) del volcán Chaitén. XII Congreso Geológico Chileno, Simposio n°5, Santiago, Noviembre 2009.
- LERMA, J.L., (2003). Fotogrametría moderna: analítica y digital, editorial Universidad Politécnica de Valencia, p. 40.
- LOPEZ-ESCOBAR, L, CEMBRANO, J, MORENO, H., (1995). Geochemistry and tectonics of the Chilean Southern Andes basaltic Quaternary volcanism (37°-46°S). *Revista Geológica de Chile*, vol.22, N°2, p.219-234.
- MAJOR, J., KINGSBURY, C., POLAND, M., LAHAUSEN R., (2008). Extrusion Rate of the Mount St. Helens Lava Dome Estimated from Terrestrial Imagery, November 2004-December 2005. *A Volcano Rekindled: The Renewed Eruption of Mount St. Helens, 2004-2006*. U.S. Geological Survey Professional Paper 1750, pp. 237-253.
- MILLER, T.P. (1994). Dome growth and destruction during the 1989-1990 eruption of Redoubt Volcano. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, n°62, p.197-212.
- MILLER, T. P., CHOUET, B. A., (1994). The 1989-1990 eruptions of Redoubt volcano: an introduction: in Miller, T. P. and Chouet, B. A., (eds.), *The 1989-1990 eruptions of Redoubt Volcano, Alaska*, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol.62, n°1, pp. 1-10.
- MONTGOMERY, D.R., BALCO, G. Y WILLET, S.D., (2001). Climate, tectonics, and the morphology of the Andes. *Geology*, vol. 29, n° 7, pp. 579-582.
- MOORE, J.G., ALBEE, W.C., (1981). Topographic and structural change, March-July 1980 – Photogrammetric data, en *The 1980 Eruption of Mt. Saint Helens, Washington*, editado por P.W. LIPMAN y D.R: MULLINEUAUX, U.S. Geological Survey Professional Paper, 1250, pp. 123-134.
- MURASE, T., A. MCBIRNEY and G.M. WILLIAM (1985): Viscosity of the dome of Mt. St. Helens. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, n°24, pp. 193-204.
- MURPHY, M.D., R.S.J. SPARKS, J. BARCLAY, M.R. CARROLL, A.M. LEJEUNE, T.S. BREWER, R. MACDONALD, S. BLACK and S. YOUNG (2000). Remobilization of Andesite Magma by Intrusion of Mafic Magma at the Soufriere Hills Volcano, Montserrat, West Indies. *Journal of Petrology*, vol. 41, n°1, pp.21-42.
- NAKADA, S., SHIMIZU, H., OTHA, K., (1998). Overview of the 1990-1995 eruption at Unzen Volcano. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 89, pp. 1-22.
- NARANJO, J., STERN, C.R. (2004). Holocene tephrocronology of the southernmost part (42°30'-45°S) of the Andean Southern Volcanic Zone. *Revista Geológica de Chile*, vol. 31, n° 2, pp. 225-240.
- NEWHALL, C.G., SELF, S. (1982). The volcanic explosivity index (VEI): An estimate of explosive

- magnitude for historical volcanism. *Journal of Geophysical Research*, nº 87, pp. 1231-1238.
- PETIT-BREUILH, M.E. (2004). La historia eruptiva de los volcanes hispanoamericanos (siglos XVI al XX): el modelo chileno. Casa de los Volcanes, España, 431 pp.
- PIÑA, M.C., (2010). Análisis de la deformación superficial de la zona de falla Liquiñe – Ofqui entre los 41° y 46° S en el marco del terremoto de Aysén (2007) y la erupción del volcán Chaitén (2008), mediante modelamiento de GPS.
- PRIEGO, J.E., PORRES, M.J. (2002). La triangulación de delaunay aplicada a los modelos digitales del terreno. En X congreso de métodos cuantitativos, sistemas de información georacay teledetección.
- REICH, M., ZÚÑIGA, A., AMIGO, A., VARGAS, G., MORATA, D., PALACIOS, C., PARADA, M.A., GARREAUD, R. (2009). Formation of cristobalite nanofibers during explosive volcanic eruptions. *Geology*, vol. 37, pp. 435-438.
- ROGERS, N., HAWKESWORTH, C., (2000). Composition of magmas, en *Encyclopedia of Volcanoes*, editada por H. Sigurdsson, pp.115-131, Londres: Academic Press.
- SERNAGEOMIN-BRGM, (1995). Carta metalogénica X región sur. Servicio Nacional de Geología y Minería y Minería-Bureau de Recherches Géologiques et Minières. Informe Registrado, IR-95-05, vol. 1, tomo 1, p. 193.
- SERNAGEOMIN, (2009). Informes técnicos de la erupción del volcán Chaitén [en línea], Servicio Nacional de Geología y Minería-Observatorio Volcanológico Andes del Sur (OVDAS),05-2008/03-2009.
<http://www2.sernageomin.cl/ovdas/ovdas7/informativos2/informes_ovdas01.php>
- STERN, C.R., (2004). Active Andean volcanism: its geologic and tectonic setting. *Revista Geológica de Chile*, vol. 31, nº 2, p. 161-206.
- STERN, C.R., MORENO, H., LOPEZ-ESCOBAR, L., CLAVERO, J., LARA, L., NARANJO, J., PARADA, M., SKEWES, M.A., (2007). Chilean volcanoes, en *The Geology of Chile*, editado por T. Moreno, y W. Gibbons, pp. 147-178.
- STERN, C. R., NARANJO, J. A. (2008). The Southern Part of the Southern Volcanic Zone (SSVZ; 42-46S) of the Andes: History of Medium and Large Explosive Holocene Eruptions. American Geophysical Union, Fall Meeting 2008, abstract V42C-01.
- STERN, C., GARCÍA, C., NAVARRO, X., MUÑOZ, J.(2009). Fuentes y distribución de diferentes tipos de obsidianas en sitios arqueológicos del centro-sur de Chile (38-44°S). *Magallania*, (Chile), 2009. vol. 37, nº1,pp.179-192.
- SWANSON, D.A, DZURISIN, D., HOLCOMB, R.T., IWATSUBO, E.Y., CHADWICK Jr, W.W., CASA DEVALL, T.J., EWERT, J.W., HELIKER, C.C., (1987). Growth of the la va dome at St.Helens, Washington, (USA), 1981-1983, in *The Emplacement of Silicic Domes and Lava Flows*, edited by J.H. FINK, Geol. Soc. Am., Special Pap., 212, pp.1-16. 3
- THOURET, J.C., LAVIGNE, F., KELFOUN, K., BRONTO, S. (2000). Toward a revised hazard assessment at Merapi volcano, Central Java. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 100, nº1-4, pp.479-502
- VALLANCE, J. W., SCHNEIDER, D., SCHILLING, S., (2008). Chapter 9: Growth of the 2004-2006

Lava-Dome Complex at Mount St. Helens. IN David P. Sherrod, William E. Scott, and Peter H. Stauffer (eds) *A Volcano Rekindled: The Renewed Eruption of Mount St. Helens, 2004-2006*. United States Geological Survey: Professional Paper

- WATTS, R.B., R.A. HERD, R.S.J. SPARKS, AND S.R. YOUNG, (2002). Growth patterns and emplacement of the andesitic lava dome at Soufriere Hills Volcano, Montserrat. En *The eruption of Soufriere Hills Volcano, Montserrat from 1995 to 1999, Memoirs of the Geological Society of London* (2002), vol. 21, pp. 115-152.
- WATT, S., PYLE, D., MATHER, T., MARTI, R., MATTHEWS, N., (2009). Fallout and distribution of volcanic ash over Argentina following the May 2008 explosive eruption of Chaitén, Chile. *Journal of Geophysical Research*, vol. 114, B04207, p. 11.
- WADGE, G., R. HERD, G. RYAN, E. S. CALDER, J.C., (2009). Clastic and core lava component of a silicic lava dome. *Geology*, 37 (6). pp. 551-554.
- WADGE, G., R. HERD, G. RYAN, E. S. CALDER, J.C. KOMOROWSI, (2010). Lava production at Soufrière Hills Volcano, Montserrat: 1995–2009, *Geophysical Res. Lett.*, 37, L00E03, doi:10.1029/2009GL041466.
- YOKOYAMA, I., (2005). Growth rates of lava domes with respect to viscosity of magmas. *Annals of Geofisics*, vol.48, n°6, Japón.

ANEXOS

(Metodología para estimar el Plano Base)

Las siguientes imágenes ilustran los pasos seguidos para la obtención del Plano Base.

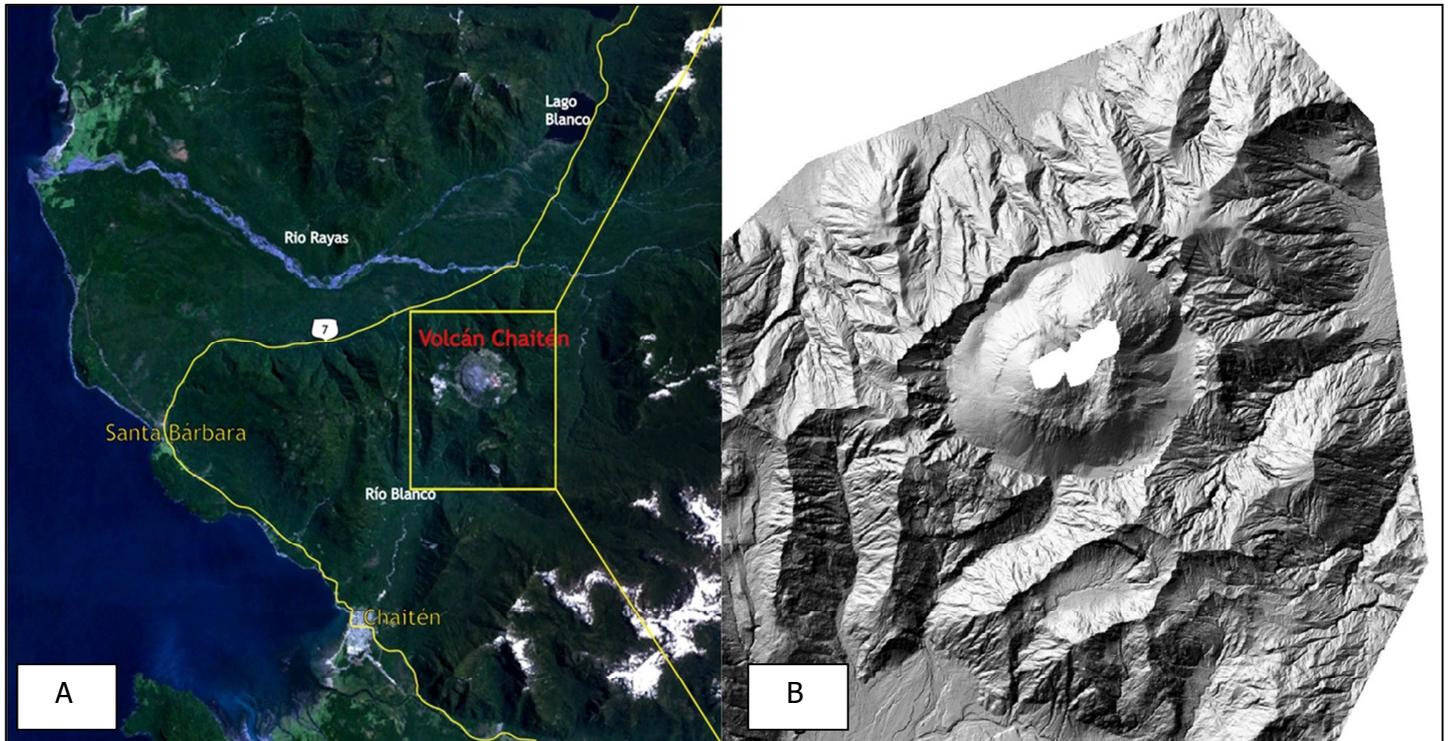


Figura A1.1. Zona utilizada del DEM LIDAR. En (A) se observa la ubicación del volcán Chaitén, encuadrando la zona del DEM LIDAR que se utilizó en el estudio. (Extraída de NASA World Wind®). En (B) se observa el DEM LIDAR utilizado en las siguientes figuras como imagen de referencia.

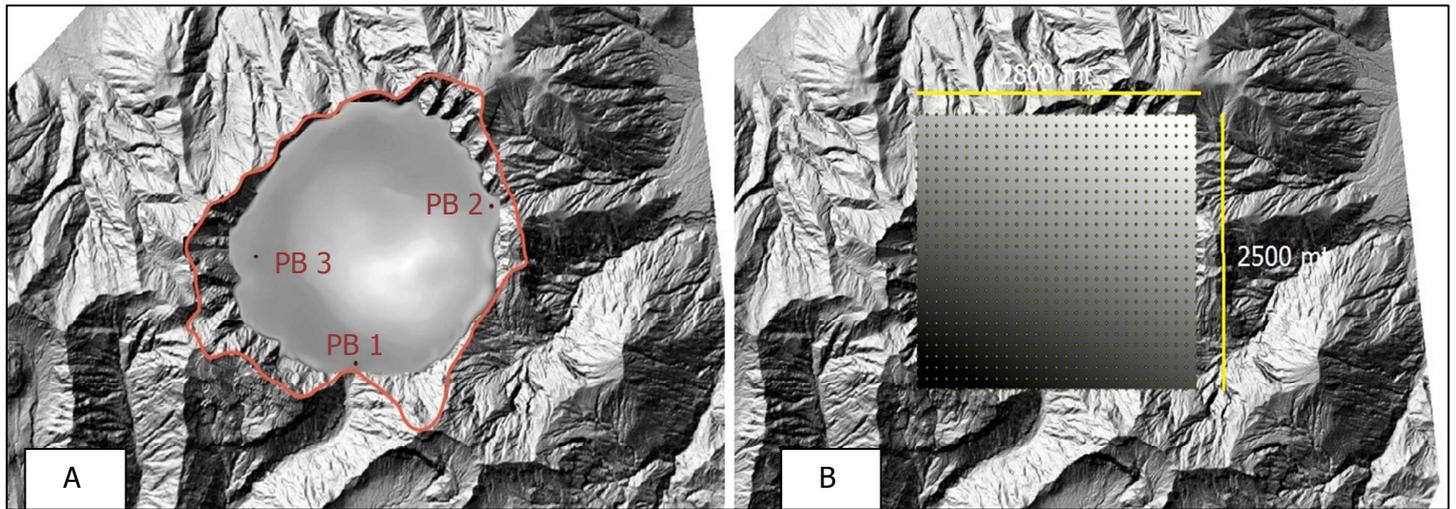


Figura A1.2. Imágenes para generar el DEM Plano Base (Notar que los tonos más claros indican alturas mayores). En (A) se muestra el DEM del domo ancestral generado a partir de las curvas de nivel hechas por el IGM (IGM, 2010) y los tres puntos seleccionados para hacer el Plano Base. En (B) se muestra la grilla de puntos que generan el DEM Plano Base que abarca un área de 2800 x 2500 m².