

Topografía Digital y Modelado de Lahares en el Volcán Copahue, Argentina-Chile

Por ***Sofía Alejandra Viotto***

Presentado ante la Facultad de Matemática, Astronomía y Física y el Instituto de Altos Estudios Espaciales Mario Gulich como parte de los requerimientos para la obtención del grado de

MAGISTER EN APLICACIONES DE INFORMACIÓN ESPACIAL

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

Marzo, 2020

©IG-CONAE 2020

©FaMAF-UNC 2020

DIRECTOR

Dr. Guillermo Toyos

Comisión Nacional de Actividades Espaciales- Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Buenos Aires, Argentina

CO-DIRECTOR

Dra. Marcela Cioccale

Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina

ASESORES METODOLÓGICOS:

Bodo Bookhagen

Ernest Farland

Felipe Lobos



Esta obra está bajo una licencia Creative Commons
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

A mis padres, Nuchi y Sergio. A mis hermanos Toti y Mari. A mí pareja Juani, y a Javi, Elena y Rubén. A mis compas de maestría: Guilli (*la china*, genia total), Ale (*gerente*, hábil con los mails), Dieguito (*chanhgui*, gran compa de mesa), Juampi (*etum*, siempre dispuesto a colaborar), José (*Joseph*, tranquilo y amable) Cyn (tierna total), Yenni (capa y muuy inteligente), Fede (*niño de oro*, con el tipo de humor que yo disfruto), Santi (*verdadero*, increíble persona), Tina (*Marcela Morelo*, comprometida con las causas), Guille (*diputado*, habla hasta por los codos), Dani (*teniente*, capo de la informática) y Jony (gracioso incluso cuando no quiere). A Gustavo y Baldo, mis mentores. A mi gran amiga y colega Paula alguien a quien admiro, quiero y respeto enormemente: te adoro. A Pipi que lo extraño con locura y su familia que es por extensión mía. A mi amada abuela Chita de quién no me pude despedir apropiadamente.

Dícese de una vez en que el sultán, deseoso siempre por ilustrar a su pueblo, mandó traer un elefante de la India, y para que el pánico no se apoderara de aquellas gentes que nunca habían visto un animal más grande que un caballo, mandó encerrarlo en un establo y envió, como primera providencia, a los cinco hombres más sabios de la ciudad a que lo examinaran, y seguidamente explicaran al pueblo lo que habían visto, para que fueran acostumbrándose a aquel fenómeno.[...] Y así comenzó una discusión acalorada entre ellos, porque todos afirmaban ser poseedores de la verdad y acusaban a los demás de locos o mentirosos. Y cada uno decidió darle un nombre distinto al elefante

Un elefante en la Oscuridad- Rumí

Agradecimientos

En primer lugar me gustaría agradecer a todos los miembros del Insituto Gulich (CONAE) por brindarme un espacio para crecer profesionalmente sin el cual no existiría esta tesis, en especial a Leonardo, Anabella, Marcelo y Caro. En segundo lugar a mis directores, Guillermo y Marcela por el tiempo y apoyo que mostraron durante todo este proceso, por guiarme cada vez que me perdía. A Almendra por su predisposición, su buena onda y la habilidad para resolver problemas (sos una genia). Así mismo me gustaría agradecer muy especialmente a los miembros del equipo de trabajo de Airbus Defence and Space por suministrar el modelo WorldDEM para la tesis, y más importante aún por el tiempo y dedicación que me ofrecieron durante la pasantía, en particular a Henning y Ernest mis tutores en las oficinas de Potsdam. También me gustaría agradecerle enormemente a Bodo, profesor de la Universidad de Potsdam y asesor metodológico de la tesis, por guiarme en la creación de modelos digitales de elevación y por tomarse la molestia de responder a mis dudas a toda hora en cualquier día. Por último, me gustaría mencionar a aquellas personas que indirectamente o directamente participaron de la tesis: a Juan por el apoyo y las opiniones, a mis compañeros de maestría que me ayudaron a resolver problemas, me dieron su opinión y me asistieron en esta tesis, a mi amigo y compañero de oficinas Mohamed por intercambiar ideas durante la creación de los modelos y compartir su tiempo conmigo, y a Harald por tomarse la molestia de resolver cada uno de los inconvenientes con mis computadoras. A todos ellos MUCHÍSIMAS GRACIAS!.

Resumen

El estratovolcán activo de Copahue se localiza en el límite chileno argentino. Sus registros geológicos y reportes de eventos eruptivos históricos sugieren una recurrencia del fenómeno de lahares. Un lahar es un tipo de flujo de detritos que se origina en las laderas de un volcán y se desplaza pendiente abajo, pudiendo recorrer grandes distancias desde la fuente.

Este trabajo apunta a caracterizar la topografía del volcán Copahue como insumo para el estudio de la amenaza por lahares en áreas aledañas. Para tal fin se determinaron los volúmenes necesarios para que lahares alcancen comunidades cercanas al volcán. La determinación estuvo basada en simulaciones de áreas de inundación con el método LAHARZ, corridas sobre dos modelos digitales de elevación: WorldDEM (12 m) y un modelo creado con imágenes SPOT 7 (5 m). Adicionalmente se emplearon los modelos SRTM (30 m), ALOS 3D World (30 m) y ASTER GDEM (30 m) para analizar la sensibilidad de LAHARZ.

Los resultados sugieren que la mayoría de los poblados pueden ser alcanzados con lahares de volúmenes entre 10^4 y 10^7 m³ en orden de magnitud. No obstante, según el contexto geológico y climático imperante, volúmenes de órdenes superiores a 10^5 m³ resultan inverosímiles. Con volúmenes menores o iguales a 10^5 m³ es posible alcanzar Butalelbún y Trapa Trapa (valle del Río Queuco), y el centro Las Máquinas (laguna Las Mellizas inferior). En tanto, lahares de tales dimensiones que fluyan por los ríos Agrio Superior o Lomín no alcanzarían ninguna comunidad.

En trabajos posteriores resultaría de interés efectuar simulaciones con otros modelos diferentes a LAHARZ, con el fin de contrastar resultados.

Palabras clave: lahar, LAHARZ, topografía digital, fotogrametría, Volcán Copahue

Abstract

The active stratovolcano of Copahue is located on the Chilean-Argentinean border. Its geological records and reports of historical eruptive events suggest a recurrence of the lahar phenomenon. A lahar is a type of debris flow that originates on the slopes of a volcano and moves downslope, being able to travel large distances from the source.

This work aims to characterize the topography of the Copahue volcano as an input for the study of the lahar hazard in surrounding areas. To this end, the volumes necessary for lahars to reach communities near the volcano were determined. The determination was based on simulations of flood areas with the LAHARZ method, running on two digital elevation models: WorldDEM (12 m) and a model created with SPOT 7 images (5 m). Additionally, SRTM (30 m), ALOS 3D World (30 m) and ASTER GDEM (30 m) models were used to analyze the sensitivity of LAHARZ.

The results suggest that most of the villages can be reached with lahars of volumes between 10^4 and 10^7 m³ in order of magnitude. However, depending on the prevailing geological and climatic context, volumes of orders higher than 10^5 m³ are unlikely. With volumes less than or equal to 10^5 m³ it is possible to reach Butalelbún and Trapa Trapa (valley of the Queuco River), and the Las Máquinas centre (Las Mellizas lagoon). Meanwhile, lahars of such dimensions that flow through the Agrio Superior or Lomín rivers would not reach any community.

In later works, it would be of interest to carry out simulations with other models different from LAHARZ in order to contrast results.

Keywords: lahar, LAHARZ, digital topography, photogrammetry, Copahue Volcano

Índice de Contenidos

1. Introducción	1
1.1. Objetivos	3
1.2. Esquema del trabajo	3
2. Marco Teórico	5
2.1. Topografía Digital: Modelos de Elevación	5
2.1.1. Modelos Interferométricos	6
2.1.2. Modelos ópticos	7
2.1.3. Principios de la fotogrametría	8
2.1.3.1. AMES Stereo Pipeline	10
2.2. Fenómeno bajo estudio: lahares	12
2.2.1. Génesis	12
2.2.2. Comportamiento y fases de un lahar	14
2.2.3. Lahares como amenaza volcánica	15
2.2.4. Modelado del comportamiento de un lahar	16
2.2.4.1. LAHARZ	18
3. Área de estudio	21
3.1. Ubicación	21

3.2. Clima	23
3.3. Hidrología	23
3.4. El Volcán Copahue	24
3.4.1. Marco Geológico	25
3.4.2. Estratigrafía	25
3.4.3. Historia Eruptiva Moderna	26
3.5. Caracterización de la amenaza de lahares en Copahue	28
4. Materiales y Métodos	32
4.1. Topografía digital	32
4.1.1. Pruebas en AMES Stereo Pipeline	32
4.1.2. Modelos con SPOT-5 y SPOT-7	33
4.1.3. Evaluación de calidad	35
4.1.4. Correcciones	36
4.2. Simulaciones con LAHARZ	37
4.2.1. Análisis de sensibilidad	37
4.2.2. Escenarios de inundación de lahares	39
5. Resultados y Discusión	40
5.1. Topografía digital	40
5.1.1. Pruebas en AMES Stereo Pipeline	40
5.1.2. Modelos con SPOT-5 y SPOT-7	42
5.1.3. Discusión	46
5.2. Simulaciones de áreas inundadas por lahares	47
5.2.1. Análisis de sensibilidad	47
5.2.2. Escenario de inundación	50
5.2.2.1. Validación de resultados	53
5.2.3. Discusión	55
6. Conclusiones	58

Anexos	69
A. Validaciones con el altímetro ICESat	69
A.1. Materiales y métodos	69
A.2. Resultados	71
B. Pruebas en AMES Stereo Pipeline	72
C. Metodologías para AMES Stereo Pipeline	76
C.1. Secuencia de procesamiento SPOT 5	76
C.2. Secuencia de procesamiento SPOT 7	78

Índice de figuras

2.1.	a) Tipos de geometrías de adquisición estéreo. Modificado de Quirós, 2014. b) Imágenes Forward, Nadir y Backward de un triplete estéreo. Modificado de Nakada et al, 2016	9
2.2.	Relación entre el paralaje y el incremento de altura del punto A respecto al punto R sobre el plano de referencia. Modificado de Quirós, 2014	9
2.3.	a) Esquema del funcionamiento del programa AMES Stereo Pipeline. b) Ilustración de la operación de correlación entre imágenes. Modificadas del manual del usuario	11
2.4.	Fases de un lahar de Vallance, 2015. (a) Perfil de un lahar en zona proximal, (b) media y (c) distal. FD, FC y FH corresponden a Flujo de Detritos, F. de Corriente y F. Hiperconcentrados, respectivamente. (d) Mecanismos por los cuales se llevan a cabo las transiciones entre distintos tipos de flujo. Modificado de Manville et al., 2013	15
2.5.	a) Destrucción de la ciudad de Armero por el paso de un lahar, luego de la erupción del volcán Nevado del Ruiz en 1985 (Colombia). Crédito: Servicio Geológico de los Estados Unidos (United States Geological Survey). b) Huella dejada por el lahar generado en la erupción del 20 de noviembre de 2007 del volcán Nevado del Huila, en cercanías del poblado de Belalcázar (Colombia). Modificada de Monsalve et al., 2011. Crédito: Servicio Geológico de Colombia	16

2.6. Gráficos de las áreas de inundación transversal A (izquierda) y planimétrica B (derecha), en función del volumen V. Los valores se encuentran en escalas logarítmicas. Las rectas corresponden al ajuste con un 95 % de confianza, cuya pendiente de 2/3 es la potencia del volumen en las ecuaciones del modelo. Modificado de Iverson et al., 1998	18
2.7. Geometría idealizada de un lahar. Muestra la relación entre caída vertical (H) y escorrentía horizontal (L), que controlan la depositación, y las áreas transversal (B) y planimétrica (A) que determinan la extensión del flujo simulado. La intersección entre el cono H/L y la línea de vaguada marca el punto de inicio de la simulación. Modificado de Schilling, 2014	20
2.8. Esquema de funcionamiento de LAHARZ, modificado de Iverson et al., 1998	20
3.1. Ubicación del área de estudio. (1) Lago Caviahue, (2) Lagunas Las Mellizas, (3) Lago Trolope, (4) Laguna del Rincón, (5) Laguna la Achacosa, (6) Laguna El Escorial, (7) Lago El Barco	22
3.2. Izquierda, serie precipitaciones anuales para el período de 1998 a 2018. Derecha, media de los valores mensuales precipitados para el período de 1998 a 2018. Fuente Tropical Rainfall Measuring Mission	23
3.3. Fotografía tomada desde las orillas del lago Caviahue (Argentina). En el fondo se observa el volcán Copahue. Modificado de Sruoga y Consoli, 2011	24
3.4. Mapa geológico del volcán Copahue. En color gris oscuro se muestra la localización de depósitos asociados a lahares. Modificado de Sruoga y Consoli, 2011	26
3.5. a) Erupciones freáticas en el cráter activo (17/Julio/2012). Crédito: Nicolas Sieburger. b) Foto del cráter activo. Modificada de Augusto y Varekamp, 2016	28
3.6. a) Lahares documentados en 1992 por Delpino y Bermúdez. Reporte del <i>Global Volcanism Program</i> , 1992. b) Depósitos asignados a corrientes piroclásticas. Modificado de Petrinovic et al., 2014. b) Combinaciones RGB: Infrarrojo Medio Largo, Infrarrojo Cercano, Verde. Izquierda, antes de los eventos de 1992 y derecha, posterior. Los cambios de coloración en cauces de los ríos Agrío Superior y Lomín, indican nuevos depósitos entre las fechas. Abajo, gráficos de índices de vegetación normalizados en dos puntos, muestran disminuciones del índice entre las fechas. Fuente: Esri Change Matters Application	29
3.7. Mapas de amenazas. a) Mapa de Delpino y Bermudez (1993). b) Mapa de Naranjo et al. (2000) para el SERNAGEOMIN	31

4.1. Ensayos llevados a cabo en ASP. A la derecha se muestran las secuencias de procesamiento, identificando con colores las opciones/pasos exclusivos de cada prueba. A la izquierda, se muestran las opciones y parámetros seleccionados como apropiados para la ronda de ensayos siguiente	34
4.2. Metodologías de procesamiento para la generación de modelos digitales de superficie con SPOT-7 (izquierda) y SPOT-5 (derecha). En negrita se indican las herramientas del programa AMES Stereo Pipeline utilizadas y sus parámetros	36
4.3. Localización de los puntos de inicio para el análisis de sensibilidad (amarillo) y el escenario de inundación (rojo)	38
5.1. Pruebas en AMES Stereo Pipeline. a) T01, b) T02, c) T03, d) T04, e) T05, f) T06, g) T07 y h) T08. Abajo, los histogramas de las diferencias para todas las pruebas	41
5.2. Modelos digitales de superficie con SPOT-5 (15 m de resolución) y SPOT-7, (re-muestreado a 12 m). Todos ellos carecen de correcciones. El rectángulo rojo muestra la posición del volcán Copahue	43
5.3. Distribuciones espaciales de las diferencias de altura para (a) SPOT-7, (b) C1, (c) C2, (d) C3, (e) C5, (f) C123, (g) C125 y (h) C1235, respecto de WorldDEM. Abajo, sus histogramas	44
5.4. Áreas inundadas que inician en el punto PS3, con los modelos ASTER, AW30M, SRTM y WorldDEM (Volumen $1.00 \times 10^6 \text{ m}^3$)	47
5.5. Áreas inundadas que inician en el punto PS1, con los modelos ASTER, AW30M, SRTM y WorldDEM (Volumen: $8.00 \times 10^5 \text{ m}^3$)	48
5.6. Áreas inundadas que inician en el punto PS4, con los modelos ASTER, AW30M, SRTM y WorldDEM (Volumen: $8.00 \times 10^5 \text{ m}^3$)	48
5.7. Áreas inundadas que inician en el punto PS2, con los modelos ASTER, AW30M, SRTM y WorldDEM (Volumen: $2.00 \times 10^6 \text{ m}^3$)	49
5.8. Áreas de inundación de lahares con LAHARZ. (a) Punto de inicio PA1 y PA2. (b), (c) y (d) Punto de inicio PL1. (e) y (f) Punto de inicio PLM	51
5.9. Áreas de inundación que inician en los puntos PQ1, PQ2, PQ3 y PQ4. Todas ellas fluyen por el valle del Río Queuco	52

<p>5.10. Comparaciones entre simulaciones y depósitos, las flechas indican la dirección de avance (probable) de los flujos. a) simulaciones desde los puntos PA1 y PA2, y depósitos sobre el Río Agrío. b) Simulaciones desde los puntos PL1-PL2 y depósitos sobre el margen del río Lomín. c) Simulaciones desde el punto PLM y depósito asociado. e) Simulaciones desde el punto PQ1 y depósitos sobre el flanco oriental. f) Simulaciones desde el punto PQ4 y depósitos asociados.</p>	<p>54</p>
<p>A.1. Distribuciones de los errores. a) Histograma para AW30M. b) Histograma para ASTER. c) Histograma para SRTM. d) Histograma para WorldDEM .</p>	<p>71</p>

Índice de tablas

2.1.	Herramientas básicas de AMES Stereo Pipeline	11
2.2.	Fenómenos con potencial de desencadenar lahares	14
2.3.	Tipos de modelos según Manville et al., 2013 [1]	17
4.1.	Secuencias de procesamiento en AMES Stereo Pipeline. <i>DSM 90 m</i> se refiere al modelo creado en base a las imágenes, <i>RA</i> a los resultados de ajuste, <i>Modo</i> al algoritmo de refinamiento sub-píxel y <i>RS</i> a la resolución horizontal del modelo final en metros	35
4.2.	Características de los modelos digitales de elevación utilizados en simulaciones preliminares. <i>RS</i> : resolución, <i>Adq.</i> : período de adquisición de los datos	37
4.3.	Parámetros para simulaciones con LAHARZ. Sistema de coordenadas (X,Y) UTM -Zona 19 Sur. V: volumen, H/L: caída vertical/distancia de escorrentía horizontal.	38
5.1.	Comparación entre WorldDEM y los modelos digitales en base al primer tile de SPOT-7	42
5.2.	Estadísticas de resumen de la diferencia (Δh) entre los modelos creados y el modelo de referencia	44
A.1.	Parámetros estadísticos para las diferencias entre ICESat y los modelos creados.s. <i>P</i> : puntos	71

Acrónimos

ASI Agenzia Spaziale Italiana

ASP AMES Stereo Pipeline

ASTER ASTER Global Digital Elevation Model

AW30M ALOS Global Digital Elevation Model

CGIAR CSI Consultative Group on International Agricultural Research–Consortium for Spatial Information

DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (Centro Aeroespacial Alemán)

IGN Instituto Geográfico Nacional, Argentina

JAXA Japan Aerospace Exploration Agency, Japón

METI Ministry of Economy, Trade and Industry

MDE Modelo Digital de Elevación

MDS Modelo Digital de Superficie

MDT Modelo Digital del Terreno

NASA National Aeronautics and Space Administration, Estados Unidos

NGA National Geospatial-Intelligence Agency

PC Point Cloud

PRISM Portable Remote Imaging Spectrometer

RMSE Root mean square error

SERNAGEOMIN Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile

SNIT Sistema Nacional de Coordinación de Información Territorial. Chile

SRTM SRTM Global Digital Elevation Model

TRMM Tropical Rainfall Measuring Mission

USGS United States Geological Survey

VEI Volcanic Explosivity Index

WorldDEM World Digital Elevation Model

ZVS Zona Volcánica Sur

Glosario

Agradación: proceso por el cual un lahar incorpora material sólido a la mezcla.

Avalancha: masas de rocas/hielo que se movilizan de manera abrupta desde las laderas de un relieve escarpado.

Backward: tipo de adquisición para pares/tripletes estéreos, cuando el sensor captura un área sobre la cual ya ha pasado mirando.

Deslizamiento: movimiento pendiente abajo de masas por acción gravitacional.

Detrito: fragmento de roca (adjetivo *detrítico*).

Erupción Freática: aquellas en dónde el magma dentro de la cámara magmática entra en contacto con niveles de agua, liberando columnas de vapor de agua y cenizas, entre otros.

Erupción Freátomagnético: erupciones freatomagnéticas son aquellas en dónde además de la emisión de vapor de agua, cenizas, etc., se generan derrames de lavas.

Estratovolcán: tipo de volcán de forma cónica, formado por alternancia entre depósitos de tefras y lavas.

Fases de un lahar: cambios en las proporciones entre sólidos-líquidos que sufre un lahar desde su fuente hasta las áreas distales.

Forward: tipo de adquisición para pares/tripletes estéreos, cuando el sensor captura un área sobre la cual va a pasar.

Flujo de corriente: flujo más diluido que un hiperconcentrado, con menos del 20% de concentración en sólidos.

Flujo de detrito: mezcla de fragmentos sólidos y agua, con una concentración en sólidos entre el 50-80%.

Flujo hiperconcentrado: mezcla de fragmentos sólidos y agua, más diluido que un flujo de detritos. Concentración en sólidos entre 20-50%.

Flujo Piroclástico: flujo producido durante erupciones volcánicas, compuesto por una mezcla de material incandescente y gases, que fluye rápidamente pendiente abajo de un volcán.

Índice de explosividad volcánica: (VEI, Volcanic Explosivity Index) escala de 0 a 8 grados en intensidad con la que se mide la magnitud de una erupción volcánica.

Jökulhlaup: término islandés que describe eventos violentos producidos por contacto entre productos volcánicos y glaciares, que desencadenan enormes inundaciones.

Lahar: tipo de flujo de detritos que se origina en las laderas de un volcán. Mezcla de roca y agua que se desplaza rápidamente.

Modelo Digital de Elevación MDE (del inglés Digital Elevation Model, DEM): modelo topográfico que representa la elevación de la superficie excluyendo vegetación y edificios.

Modelo Digital de Superficie DSM (del inglés Digital Surface Model, DSM): modelo topográfico que representa la superficie del planeta incluyendo los objetos que se ubican sobre la misma.

Modelo Digital del Terreno DTM (del inglés Digital Terrain Model, DTM): modelo topográfico que representa el terreno. Término general para designar ambos modelos digitales de elevación y superficie

Modelo Estereogramétrico: modelo tridimensional de la superficie del planeta.

Nadir: tipo de adquisición con visión perpendicular al área de interés.

Par Estéreo: par de imágenes adquiridas de distintas perspectivas para la recreación de modelos estereogramétricos.

Triplete Estéreo: adquisición de tres imágenes (Forward-Nadir-Backward) para recrear el modelo estereogramétrico.

Piroclastos: fragmentos de roca expelidos de un volcán de cualquier tamaño (adjetivo *piroclástico/a*). También llamados tefra.

Sistema Hidrotermal: formado por roca y fluido (agua, vapor) calentado por actividad volcánica. A su vez la roca tiene la suficiente porosidad para permitir la circulación del fluido.

Tefra: todos los productos volcánicos que se expulsan por la chimenea volcánica, que no sean lava. Sinónimo de piroclasto.

CAPÍTULO 1

Introducción

Lahar es un término indonesio que se refiere a un tipo de flujo de detritos originado en las laderas de un volcán [1]. Estos se generan cuando materiales no consolidados entran en contacto con importantes volúmenes de agua, perdiendo estabilidad y movilizándose pendiente abajo [1, 2]. El agua puede provenir de diferentes fuentes, como fusión de cubiertas de hielo, lluvias intensas o desbordes de lagos en la cima de un volcán [1, 3, 4]. Dado que los lahares tienen un elevado contenido en agua (20-50% en fase de flujo de detrito, [2, 3]), tienen la capacidad de fluir decenas de kilómetros aguas abajo aprovechando la red de drenaje [5].

Por su gran fuerza destructiva los lahares son uno de los riesgos naturales más mortíferos asociados, directa o indirectamente, a la actividad volcánica [2]. Así, comunidades enteras pueden verse devastadas por el paso de lahares. Una de las catástrofes más conocidas ocurrió en 1985, cuando lahares desencadenados en la erupción del Nevado del Ruiz se cobraron la vida de 23000 personas y destruyeron la ciudad de Armero (Colombia) [6, 7]. Trece años después, los flujos en volcán Casita (Nicaragua) iniciados por precipitaciones del huracán Mitch, dejaron un saldo de 2500 personas fallecidas [8]. Dichas tragedias, que por otra parte no son las únicas, ponen de manifiesto la magnitud del impacto que los lahares pueden tener.

En la prevención de futuras catástrofes resultan cruciales la comprensión del fenómeno y el conocimiento de las áreas amenazadas por lahares. Respecto al primero, existen numerosos trabajos que tratan sobre la física del flujo y su comportamiento, el tipo de depósitos, mecanismos desencadenantes, entre otros (ej. [1, 2, 9, 10]). En tanto, el segundo depende exclusivamente de las características geológicas y geomorfológicas del lugar.

Años atrás, la delimitación de dichas áreas dependía exclusivamente del reconocimiento a campo de flujos pasados, que se podría denominar como Método Tradicional [11]. La aproximación tradicional se encuentra limitada por una serie de factores. Primero, el acceso a las áreas afectadas inmediatamente después del evento puede verse dificultado. Segundo, no puede ser aplicado a aquellos volcanes que reúnen todas las características potenciales, pero de los cuales se desconocen depósitos o se encuentran mal preservados. Tercero, asume que las áreas afectadas futuras serán equivalentes a las pasadas, obviando: (1) la imposibilidad de

conocer el volumen de flujos futuros que podrían ser superiores, y (2) las modificaciones en el paisaje que afecten el comportamiento de lahares futuros respecto de los pasados. A pesar de las limitaciones, el método tradicional es uno de los más robustos y de mayor difusión.

Por otra parte las áreas de inundación también pueden ser delimitadas empleando modelos físico-matemáticos, que emulan el fenómeno en una amplia gama de escenarios de ocurrencia. Los mismos complementan a la aproximación tradicional y son especialmente útiles cuando el nivel de conocimiento de flujos pasados es limitado. En la actualidad existen un gran número de modelos computacionales, que van desde métodos simples con pocos parámetros de entrada hasta los realmente complejos que requieren mediciones de variables físicas (viscosidad, esfuerzo de corte, etc.) [1].

En 1998 se publicó el método LAHARZ para delimitar áreas de inundación de manera rápida, simple, reproducible y objetiva [5]. Sus formulaciones se basan en un modelo semi-empírico derivado del análisis estadístico de la geometría de veintisiete lahares en nueve volcanes mundiales [5]. Por su sencillez en la parametrización, LAHARZ cuenta con una amplia difusión en el estudio de la peligrosidad asociada a lahares (ej.[11–14]).

En la Zona Volcánica Sur (ZVS) de los Andes que se extiende desde los 33° hasta los 46° S [15], se concentran un gran número de volcanes activos. Producto del clima imperante, la mayoría de ellos están cubierto por capas de hielo [16]. Dichas acumulaciones constituyen una importante fuente de agua potencial en la generación de lahares, convirtiéndolos en uno de los procesos más peligrosos de la región [11].

El estratovolcán poligenético de Copahue se ubica en el límite chileno-argentino, dentro de la ZVS [17–19]. En el mismo se han registrado en los últimos 200 años al menos 15 ciclos o eventos eruptivos de tipo freático o freato-magmático y baja intensidad [20, 21]. El ciclo más reciente se inició en 2012 y continúa hasta la actualidad [22].

Los lahares constituyen una de las amenazas volcánicas de Copahue, dada por características geológicas propicias para la generación de flujos. En primer lugar, la actividad volcánica y los procesos relacionados pueden actuar como mecanismos desencadenantes de lahares. En segundo lugar, el volcán posee tres fuentes potenciales de agua capaces de iniciar el movimiento: (1) una cubierta nívea estacional, (2) glaciares en el flanco sur y (3) un lago en su cráter activo. Tal y como fue observado en los eventos eruptivos de los años 1992, 1995 y 2000, la fusión de la cubierta nívea-glacial puede desencadenar lahares por rápida liberación de agua de fusión al entrar en contacto con material incandescente [23–25]. Respecto al lago, el mismo podría aportar un volumen considerable de agua si sufre desbordes. Finalmente, el volcán presenta acumulaciones importantes de material no consolidado en sus flancos, al cual puede añadirse volúmenes considerables en una erupción. A modo de ejemplo, se estima que durante el evento eruptivo de 2012 se liberó unos 5.000.000 m³ de roca, el cual generó depósitos de 40 cm de espesor en la boca del volcán [20]. Por otra parte, el campo hidrotermal de pH extremadamente ácido puede contribuir liberando materiales para ser removidos por flujos [26, 27].

Además de las características geológicas y que el fenómeno fue documentado en eventos recientes, existen depósitos cuyo origen ha sido atribuido a lahares [18, 19, 28, 29]. Los depósitos se ubican en los márgenes de los ríos Agrio Superior y Lomín, como así también en los flancos occidental y nor-occidental.

Debe destacarse que no hay un consenso sobre la génesis de las acumulaciones próximas a los ríos Agrio y Lomín. Mientras algunos autores señalan que se asocian a los lahares

de 1992 y 1995 [19, 28], otros proponen que fueron generados por flujos piroclásticos más antiguos [17, 30]. No obstante, análisis de imágenes satelitales Landsat 5 llevados a cabo en el presente trabajo, revelaron cambios en los márgenes de los mencionados ríos que podrían ser compatibles con los flujos reportados.

En cualquier caso, la ocurrencia de nuevos lahares podrían afectar las comunidades argentinas y chilenas cercanas al volcán Copahue. Entre ellas, Caviahue (Argentina) y los asentamientos de Butalelbún y Trapa Trapa (Chile) poseen un mayor nivel de amenaza por: (1) encontrarse en centros de confluencia de los ríos que nacen en el volcán y, (2) encontrarse a menos de 10 Km del volcán.

En este contexto, el estudio de los volúmenes que deberían tener los flujos para alcanzar los poblados aporta información relevante a la discusión sobre el nivel de amenaza. Aquí, los volúmenes requeridos fueron obtenidos aplicando el método LAHARZ y evaluando los resultados en función del panorama geológico. Como LAHARZ mostró una gran sensibilidad al tamaño de pixel y tipo de topografía digital, en las determinaciones de los volúmenes se emplearon modelos digitales de elevación con resoluciones horizontales de 12 m o menores. Así, el presente trabajo pretende aportar información que sirva como línea de base para la discusión del riesgo asociado a lahares en el volcán Copahue.

1.1. Objetivos

El trabajo de tesis apunta a caracterizar la topografía del volcán Copahue como insumo para el modelado lahares, con la finalidad de contribuir al estudio de la amenaza en las áreas aledañas. Para llevar a cabo tal fin se plantearon los siguientes objetivos:

1. Estudiar y definir una metodología de procesamiento con el programa AMES Stereo Pipeline, para generar modelos digitales de elevación de alta resolución con imágenes SPOT 5 y SPOT 7.
2. Evaluar la calidad de los modelos digitales de elevación obtenidos, con el fin de escoger los mejores como insumos para el programa LAHARZ.
3. Evaluar la sensibilidad de LAHARZ a distintos modelos digitales de elevación, para definir cuáles se emplearán en las simulaciones de escenarios de inundación por lahares.
4. Determinar volúmenes requeridos para que lahares alcancen las comunidades según resultados de simulaciones de escenarios de inundación, para evaluar el nivel de amenaza en cada comunidad.

1.2. Esquema del trabajo

El trabajo se divide en cuatro capítulos. El Capítulo 2 está dedicado a los aspectos teóricos. El Capítulo 3 comprende una descripción del área de estudio. En el Capítulo 4 se presentan los materiales y métodos de trabajo, cuyos resultados son abordados en el Capítulo 5. Las conclusiones del trabajo se resumen en el Capítulo 6.

Finalmente, en el apartado de Anexos se incluyen resultados de validaciones y los códigos de procesamiento empleados en LAHARZ.

CAPÍTULO 2

Marco Teórico

El capítulo está dividido en dos secciones principales. La primera sección está dedicada a la topografía digital (definiciones, tipos, generación, etc.). La segunda sección introduce al fenómeno de lahares atendiendo a: génesis, clasificación, comportamiento y modelado.

2.1. Topografía Digital: Modelos de Elevación

Un **Modelo Digital de Elevación** (MDE, del inglés *Digital Elevation Model*) es una representación numérica de la superficie terrestre [31]. Según Fisher y Tate (2006) un MDE es cualquier conjunto de mediciones de elevación, tal que sus proximidades y relaciones espaciales puedan ser determinadas explícita o implícitamente; en otras palabras, un conjunto de datos de elevación con sus correspondientes coordenadas. Dicha información se distribuye en distintos formatos, siendo el más común la representación en grilla de celdas cuadradas e iguales que representa el relieve como una superficie continua [31].

Existen dos términos relacionados al concepto de MDE: Modelo Digital del Terreno (MDT, del inglés *Digital Terrain Model*) y Modelo Digital de Superficie (MDS, del inglés *Digital Surface Model*). Se denomina MDS al modelo que representa la altura del terreno incluyendo los objetos ubicados sobre el mismo (vegetación, edificios, etc.). Mientras un MDT es aquel que registra únicamente la altura del terreno desnudo. En términos generales, ambos MDT y MDS se engloban bajo la denominación de MDE.

Los MDE constituyen una fuente de información útil para visualizar el relieve y generar productos derivados (mapas, perfiles topográficos, etc.), con múltiples aplicaciones en hidrología, geología, ecología, civiles, entre otras. A modo de ejemplo, los modelos se emplean en simulaciones de inundaciones o de propagación de incendios, en el análisis de patrones climáticos influenciados por la topografía y en el estudio de la distribución de cubiertas vegetales según la altura. Luego, el tipo de aplicación y la escala del estudio determinan la resolución horizontal óptima, el tipo de modelo (MDS, MDT) y las precisiones exigidas.

Para la creación de MDE se emplea información adquirida por sensores remotos, digitalizaciones de mapas cartográficos existentes o bien mediciones *in situ* sobre el terreno, con teodolito o estaciones totales del Sistema de Posicionamiento Global (GPS, del inglés *Global Positioning System*) [31–33]. Puesto que los modelos empleados en la tesis corresponden al primer tipo, los párrafos siguientes tratan exclusivamente de MDE derivados de información satelital.

Los sensores remotos colectan información en distintas porciones del espectro electromagnético, resultando de interés para la reconstrucción del terreno los que operan en los rangos visible (0.4-0.7 μm , sensores pasivos) y de las microondas (3.75-15 cm, sensores activos). Los primeros se conocen como sensores ópticos y la técnica para producir MDE se denomina **Fotogrametría Digital** (modelos ópticos) [31, 34]. Los segundos son sensores de radar de apertura sintética (SAR, del inglés *Synthetic Aperture Radar*), y el método **Interferometría SAR** (modelos interferométricos) [31].

En la actualidad las agencias y/o corporaciones asociadas proveen MDE resultantes del procesamiento de información satelital. Algunos son de libre acceso tales como distribuidos por las agencias espaciales estadounidense (NASA, del inglés *National Aeronautics and Space Administration, Estados Unidos*) y japonesa (JAXA, del inglés *National Aeronautics and Space Administration, Estados Unidos*). Mientras que los productos de tipo comercial son usualmente de mayor resolución horizontal, como los comercializados por la empresa alemana Airbus Defence & Space. Así mismo, el usuario cuenta con la posibilidad de generar sus propios MDE acorde a sus requerimientos.

2.1.1. Modelos Interferométricos

La técnica de Interferometría SAR permite generar MDE a partir de interferogramas, los cuales registran las diferencias de fases entre dos imágenes de radar complejas [31, 35]. Para tal fin emplea pares de escenas (par interferométrico) adquiridas simultáneamente por dos antenas SAR montadas en la misma plataforma [36]. Si bien las adquisiciones simultáneas proveen los mejores resultados por una menor decorrelación^a, también pueden emplearse pasadas consecutivas del mismo tipo (ascendente-descendente) [36].

Existen dos modelos interferométricos de amplia difusión y de cobertura global parcial o total. El primero se denomina SRTM Global Digital Elevation Model (SRTM) disponible en dos resoluciones de 30 y 90 metros. El segundo se denomina World Digital Elevation Model (WorldDEM) de 12 m de resolución horizontal.

El modelo SRTM fue desarrollado en base a las adquisiciones realizadas por las antenas de radar de apertura sintética a bordo del *Space Shuttle Endeavour* en Febrero de 2000, como parte de la misión *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) [37]. El proyecto fue realizado en conjunto por la NASA, la Agencia Geoespacial de Inteligencia de Estados Unidos (NGA, del inglés *National Geospatial-Intelligence Agency*), y las agencias espaciales alemana (DLR, del alemán *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.*) e italiana (ASI, del italiano *Agenzia Spaziale Italiana*).

La misión SRTM portó dos radares uno en Banda C de longitud de onda (λ) ~ 5.6 cm, en base al cual se construyó el modelo, y otro en Banda X ($\lambda \sim 3.1$ cm), responsable de asistir

^aRuido asociado a cambios de cobertura entre escenas consecutivas

en las correcciones del primero [37]. Para evitar cambios de cobertura, la misión adquirió pares interferométricos simultáneos entre los 60° de latitud Norte y los 56° de latitud Sur, cubriendo aproximadamente el 80% del planeta terrestre [37].

Es posible disponer del modelo SRTM, en sus dos resoluciones y sin cargo en la página oficial del Servicio Geológico Estadounidense (USGS, del inglés *United States Geological Survey*; <https://earthexplorer.usgs.gov/>). En la misma se encuentran dos versiones: *Non-void filled* (versión 1, datos crudos sin corrección) y *Void-filled* (versión 3) [38]. La última corresponde a un modelo corregido por ruido, delimitación en cuerpos de agua, líneas de costa y relleno de vacíos [38]. En tanto, el Consorcio de Información Espacial (CGIAR CSI, del inglés *Consultative Group on International Agricultural Research—Consortium for Spatial Information*) distribuye la versión 4 de SRTM con 90 m de resolución (<http://srtm.csi.cgiar.org/>). Este modelo deriva de la corrección por vacíos de la versión 1. Debe tenerse en cuenta que una antigua versión distribuida por el consorcio presentaba un corrimiento horizontal de medio pixel respecto a los datos originales [39], aunque dicho problema no afectaría a la versión 4.

Respecto al modelo WorldDEM fue creado por la sociedad comercial conformada por la agencia espacial alemana (DLR, del alemán *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (Centro Aeroespacial Alemán)*) y la empresa Airbus Defence & Space. WorldDEM es un modelo comercial de 12 m de resolución, cuya comercialización depende exclusivamente de Airbus (<https://worldDEM-database.terrasar.com/>).

WorldDEM resulta del procesamiento del modelo TanDEM-X distribuido por la Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (Centro Aeroespacial Alemán) (DLR). A su vez, el último fue elaborado mediante el procesamiento de múltiples adquisiciones simultáneas, por los satélites Terra SAR-X y TanDEM-X ($\lambda \sim 3.12$) [40]. Las adquisiciones se efectuaron entre los años 2011 y 2015.

La empresa Airbus distribuye tres versiones del modelo WorldDEM. La primera se denomina WorldDEM^{CORE} y corresponde a un modelo crudo, sin corrección alguna. El segundo llamado WorldDEMTM corresponde a un modelo con relleno de vacíos, suavizado de la superficie, además de corrección de cuerpos de agua y líneas de costa. El tercero, WorldDEM^{DEM}, es un modelo de suelo desnudo.

2.1.2. Modelos ópticos

Los modelos ópticos se construyen mediante la técnica de fotogrametría, sobre la cual se volverá más adelante en detalle. En la actualidad existen dos productos de gran difusión y libre acceso, ambos de 30 m en resolución, denominados ASTER Global Digital Elevation Model (ASTER) y ALOS Global Digital Elevation Model (AW30M).

El modelo ASTER fue elaborado por la NASA y el Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón (METI, del inglés *Ministry of Economy, Trade and Industry*). En su desarrollo se emplearon imágenes adquiridas entre los 83° de latitud Norte y Sur, por el radiómetro *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER) a bordo del satélite Terra. Su primera versión, desarrollada en base 1.2 millones de adquisiciones y publicada en 2009, tuvo numerosos defectos por interferencia atmosférica, cobertura estéreo deficiente, problemas de fusión, etc [41]. La segunda versión, publicada en el año 2011, fue desarrollada con 260.000 escenas adicionales para mejorar la cobertura y la correlación entre

escenas [41].

En relación al modelo ALOS, éste fue desarrollado por la JAXA con escenas adquiridas por el instrumento pancromático *Portable Remote Imaging Spectrometer* (PRISM) montado en la plataforma *Advanced Land Observing Satellite* (ALOS). En su elaboración se emplearon 3 millones de escenas adquiridas entre los años 2006 y 2011. El modelo AW30M resulta del re-muestreo de la versión comercial de 5 m de resolución horizontal [42].

AW30M fue publicado en 2015 y actualmente cuenta con tres versiones siendo la última en 2019. La versión 1.1 incluía dos tipos según los métodos de re-muestreo de promedio y mediana, mientras que versiones superiores sólo están re-muestradas por promedio [43]. La versión 2.1 se encuentra corregida dentro de los 60° Norte y Sur, por cuerpos de agua, vacíos de información, corregida por cobertura névea y nubes, entre otras (detalles en [42]). En la versión 2.2, las correcciones afectan también latitudes mayores a 60° Norte y Sur.

2.1.3. Principios de la fotogrametría

La Fotogrametría engloba a un conjunto de técnicas que permiten obtener MDS a partir de imágenes ópticas adquiridas sobre un área con perspectivas distintas [31]. En sus orígenes se empleaba un par de fotogramas aéreos captadas con cámaras aerotransportadas (fotogrametría clásica). El procesamiento se llevaba a cabo en un restituidor analógico^b. Con el advenimiento de los procesadores y el desarrollo de la informática, sumado a la mejora en los sistemas de almacenamiento, la técnica pasó a ser digital y se adaptó a imágenes satelitales (fotogrametría satelital).

Tanto de manera analógica como digital, la reconstrucción del relieve se efectúa con un par de imágenes (par estéreo), las cuales deben superponerse geográficamente. La superposición es indispensable ya que la estereoscopia^c sólo puede ser llevada a cabo entre áreas homólogas.

La adquisición de pares estereos con satélites se lleva a cabo según dos geometrías: *transversal* y *longitudinal* [33] (Figura 2.1.a). En la geometría transversal las imágenes se registran desde dos órbitas longitudinales, por lo cual las tomas no se realizan en el mismo día sino en una secuencia de pasadas consecutivas. En la geometría longitudinal las imágenes se adquieren desde la misma órbita con un sensor orientando en distintos ángulos para cada adquisición, o empleando dos/tres sensores distintos que operan en simultáneo.

En la fotogrametría clásica las imágenes que componen un par estéreo reciben el nombre de *Izquierda* y *Derecha*, según la posición que ocupan en el restituidor analógico. Para adquisiciones satelitales en geometría longitudinal las escenas se denominan (i) *Forward* la imagen adquirida con ángulo de visión positivo, es decir, cuando el sensor apunta hacia adelante, (ii) *Nadir* adquirida con un ángulo de visión cercano a la vertical y (iii) *Backward* la imagen adquirida con un ángulo de visión negativo, es decir, cuando el sensor apunta hacia atrás (Figura 2.1.b).

Dado que la fotogrametría satelital y la clásica se rigen por los mismos principios, y que las formulaciones matemáticas de la segunda son más simples, los fundamentos se abordan desde el punto de vista clásico. Ambas se basan en la identificación de puntos homólogos. En la Figura 2.2 los **a'** y **a''** homólogos, representan el punto **A** real sobre el terreno.

^bMecanismo analógico que permite recrear o materializar modelos tridimensionales

^cVisión tridimensional del terreno

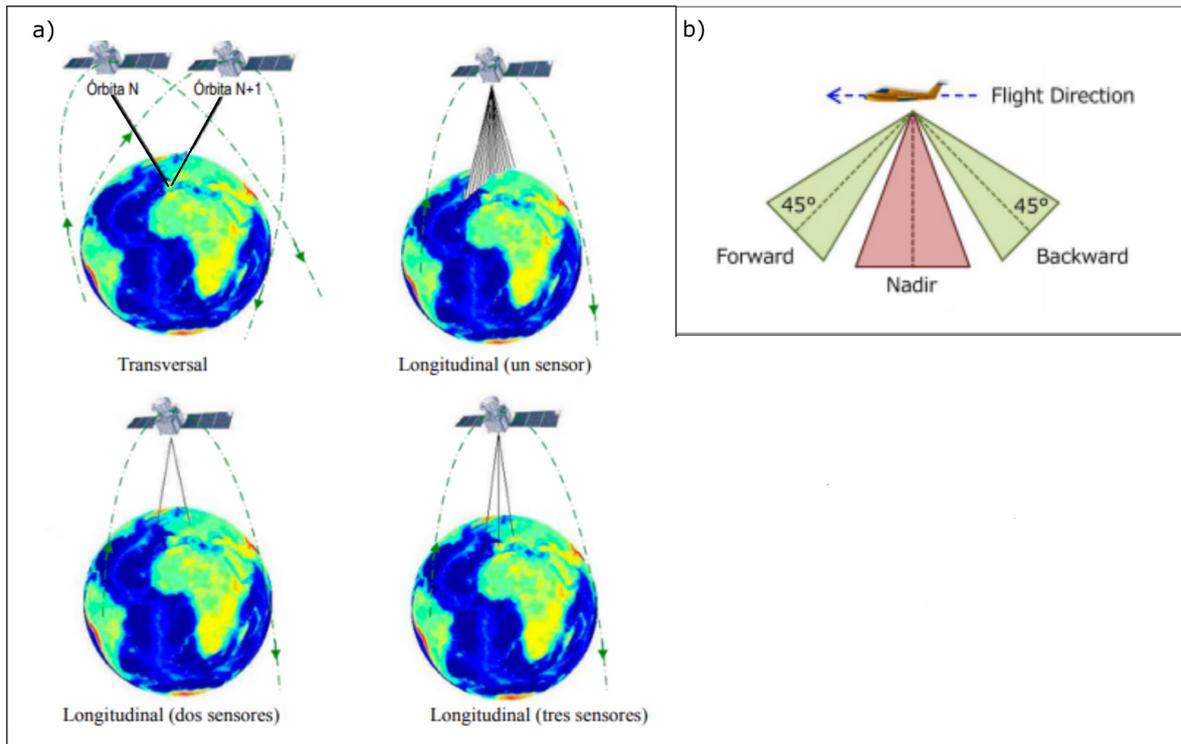


Figura 2.1: a) Tipos de geometrías de adquisición estéreo. Modificado de Quirós, 2014. b) Imágenes Forward, Nadir y Backward de un triplete estéreo. Modificado de Nakada et al, 2016

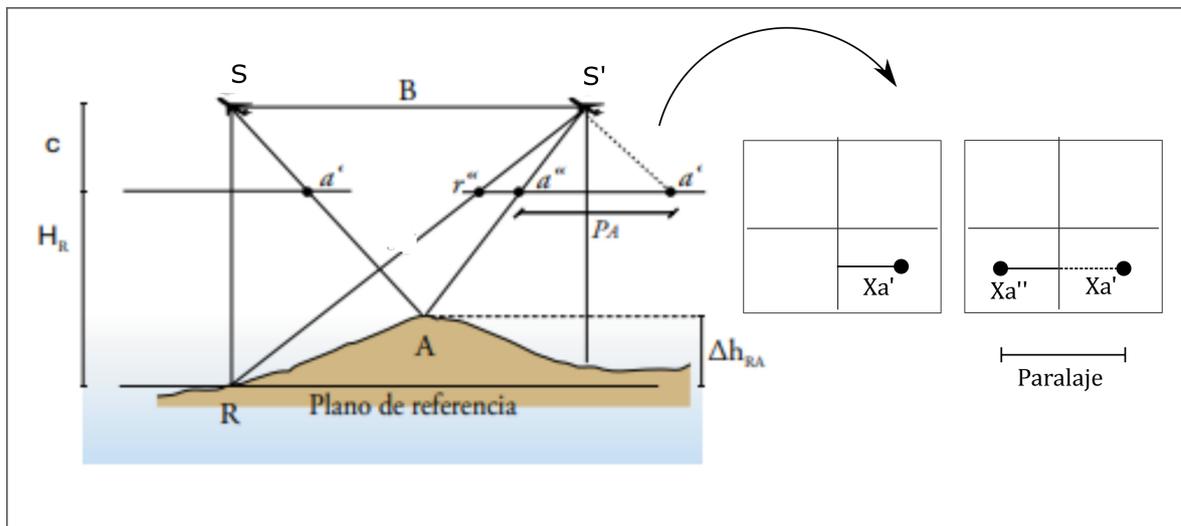


Figura 2.2: Relación entre el paralaje y el incremento de altura del punto A respecto al punto R sobre el plano de referencia. Modificado de Quirós, 2014

Una vez homologados los puntos, las imágenes son restituidas a la posición y geometría de adquisición. Luego un par de rayos que emergen desde los centros de proyección (S-S') y pasen por los puntos homologados, se intersecan en el espacio generando una visión estereoscópica o un modelo estereoscópico [33].

Determinadas las correspondencias entre los puntos a' - a'' , en la fotogrametría clásica las alturas se calculan según la línea de base **Ba**, que es la distancia entre las cámaras al momento de cada toma, y el paralaje **P**, correspondiente al desplazamiento radial de un punto de un

fotograma a otro [33].

$$P_a = x'_a - x''_a \quad (2.1)$$

Con P_a el paralaje del punto **A** en los fotogramas, x'_a y x''_a los desplazamientos desde los respectivos centro de las imágenes a los puntos **a'** y **a''**.

Tomando un punto **R** sobre el plano de referencia, el paralaje permite calcular el incremento de altura del punto **A** respecto al **R** según:

$$\Delta H_{RA} = \frac{H_R * \Delta P_{RA}}{P_A} \quad (2.2)$$

Con ΔH_{RA} el incremento de altura desde **R** a **A**, H_R la distancia de la imagen al plano de proyección medido sobre la vertical y ΔP_{RA} el incremento de paralaje desde el punto **R** al **A** producto del desplazamiento radial.

La distancia H_R corresponde a la cota del punto **R** respecto al plano de referencia y se obtiene por relaciones trigonométricas como sigue:

$$H_R = \frac{cB}{P_R} \quad (2.3)$$

Con c la distancia focal de la cámara y P_R el paralaje de **R**.

En la fotogrametría satelital los modelos tridimensionales dependen de los parámetros orbitales de adquisición (efemérides satelitales y altitud), para "llevar" los modelos a sus posiciones reales en tierra. Los parámetros orbitales describen la posición exacta de los satélites durante las adquisiciones.

2.1.3.1. AMES Stereo Pipeline

El programa AMES Stereo Pipeline (ASP) es una colección de herramientas geodésicas automatizadas de licencia libre, diseñado por la NASA para la generación de MDE y productos cartográficos relacionados. El software permite procesar automáticamente imágenes provenientes de distintas fuentes: sensores montados en satélites que orbitan el planeta Tierra u otros planetas, cámaras aerotransportadas y robots de exploración, entre otros.

En el procesamiento, los principales parámetros de entrada son las imágenes (pares, tripletes) estéreo y sus "cámaras". Las "cámaras" son los archivos (extensiones .XLM ó .DIM) que registran las efemérides satelitales e información de altitud (Modelo del sensor). Los valores orbitales exactos se conocen como Modelo Exacto, y los valores aproximados por un polinomio de coeficiente racional (RPC, del inglés *Rational Polynomial Coefficient*) como Modelo Aproximado. En ASP es conveniente utilizar las aproximaciones por agilizar el trabajo.

En relación al funcionamiento, ASP está provisto de una gran gama de herramientas ideadas para distintos tipos de imágenes. Algunas están destinadas a mejorar la calidad de imágenes y "cámaras", para favorecer al desempeño de los algoritmos estereogramétricos tales como *bundle_adjust* y *map_project* (Figura 2.3.a). No obstante, el núcleo del programa está dado por la herramienta *stereo* (Figura 2.3.a, Tabla 2.1).

La herramienta *stereo* está conformada por un conjunto de algoritmos que se aplican en tres estadios: Pre-procesamiento (filtros, ajuste de órbitas, etc.), Correlación (correspondencias

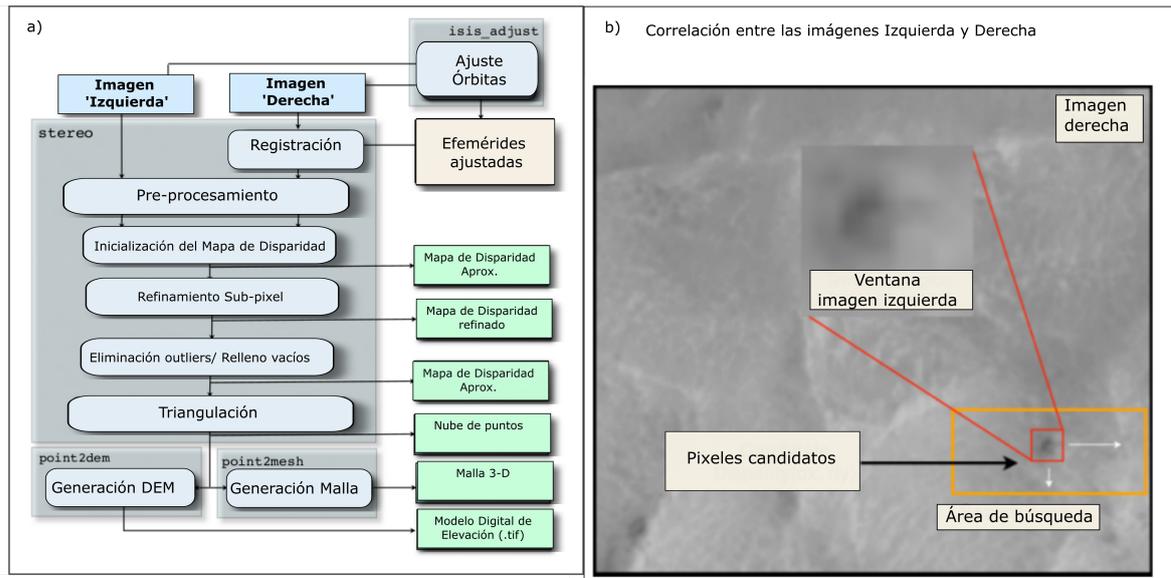


Figura 2.3: a) Esquema del funcionamiento del programa AMES Stereo Pipeline. b) Ilustración de la operación de correlación entre imágenes. Modificadas del manual del usuario

entre píxeles) y Triangulación (proyección al terreno). Como resultado final produce una nube de puntos (PC, del inglés *Point Cloud*) distribuidos de manera no uniforme. El estadio de correlación es clave, ya que de él depende la calidad de los modelos resultantes. Durante el mismo se computa la correspondencia entre píxeles comparando la imagen izquierda con la derecha (Figura 2.3.b). Los resultados se registran en un ráster denominado *Mapa de Disparidad* (Figura 2.3.a), que contiene los vectores que apuntan las posiciones que ocupan los píxeles homólogos en cada imagen.

Tabla 2.1: Herramientas básicas de AMES Stereo Pipeline

Herramienta	Parámetros de Entrada			Resultado
	Archivos		Opciones	
	Necesarios	Opcional		
<i>bundle_adjust</i>	Cám., Imág.	GCP, MDE de referencia, etc.	Modelo de sensor, etc	Modelo de ajuste
<i>map_project</i>	Cám., Imág., MDE	Modelo de ajuste	Modelo de sensor, Resolución de salida, etc	Imág. proyectadas
<i>stereo</i>	Cám., Imág.	Modelo de ajuste, etc.	Modelo de sensor, Modo, Ventanas de Correlación y Sub-píxel, Filtros, etc	PC (x,y,z)
<i>pc_align</i>	Varias PC	GCP, MDE de referencia	-	PC alineadas
<i>pc_merge</i>	Varias PC		-	Una PC fusionada
<i>point2dem</i>	Una PC		Relleno de vacíos, filtros, etc	MDS formato grilla

2.2. Fenómeno bajo estudio: lahares

El término indonesio Lahar se refiere a flujos de detritos originados en las laderas de un volcán, compuestos por agua y sólidos, que se caracterizan por una alta movilidad [1]. En la Conferencia de Penrose de la Sociedad Geológica de América sobre Influencias Volcánicas en la Sedimentación Terrestre del año 1988, fue definido como: *lahar, término general para una mezcla de detritos y agua (distinto a un flujo de corriente normal) que fluye rápidamente desde un volcán controlado por la gravedad* [44].

Usualmente, los lahares son confundidos con deslizamientos de rocas aunque corresponden procesos distintos. La diferencia estriba en el comportamiento que exhibe cada tipo de proceso: mientras los lahares se asemejan a un fluido denso con capacidad de circular incluso por canales tortuosos, los deslizamientos suelen exhibir un comportamiento más rígido con deformaciones concentradas en escarpes de fracturas [4].

Los lahares tienen dimensiones variables que usualmente se encuentran en el rango de 10^4 a 10^9 m³ [3], de los cuales entre el 40 y el 70% corresponde a agua. El porcentaje restante está representado por la carga sólida cuyo origen corresponde a material no consolidado que se encontraba en reposo sobre los flancos del volcán, rocas debilitadas por alteración físico-química y materiales erosionados por el paso del lahar. La dimensión y las proporciones relativas entre los constituyentes dependen de la evolución del flujo en las siguientes fases: *fase de flujo de detritos, fase de transición y fase de flujo hiperconcentrado* [2].

Contrariamente a lo que podría pensarse, los lahares no son fenómenos aislados sino que constituyen un proceso frecuente en numerosos volcanes alrededor del mundo que reúnen ciertas características: i) tienen abundante material no consolidado depositado sobre las laderas, ii) exhiben un elevado gradiente topográfico, y iii) cuentan con fuentes de agua abundantes [5]. Dichos factores representan el potencial de ocurrencia del fenómeno, el cual es gatillado por un mecanismo desencadenante responsable de la pérdida de estabilidad y la consecuente movilización pendiente abajo.

Ejemplos mundiales muestran que los mecanismos desencadenantes operan tanto cuando el volcán se encuentran activo como en períodos de inactividad. A este aspecto se volverá adelante, pero basta señalar que el flujo puede ser iniciado por procesos volcánicos o por otros como lluvias [1, 2].

2.2.1. Génesis

Los lahares se producen al entrar en contacto importantes volúmenes de agua con acumulaciones de material no consolidado en las laderas de un volcán, bajo el accionar conjunta de algún mecanismo iniciador y la gravedad [4, 5]. La contribución de la fuerza de gravedad incrementa con el aumento de los gradientes topográficos.

Las fuentes de agua son variadas e incluyen los casquetes glaciares, el sistema hidrotermal, lagos y lluvias. La cobertura néveo-glacial puede aportar agua producto de una fusión rápida por contacto con productos volcánicos [2]. En tanto, el sistema hidrotermal y las precipitaciones aportan agua al espacio poral [4]. Por otra parte, las precipitaciones torrenciales en climas húmedos aportan un gran volumen de agua, parte de la cual se infiltra y otra corre como escorrentía superficial. Mientras que los lagos cumbrales pueden aportar un volumen

suficiente de agua, si los mismos sufren desbordes [3].

En relación a la fracción sólida, la misma corresponde a cualquier material no consolidado que pueda ser movilizado. Dado que el proceso se inicia en volcanes dicho material corresponde principalmente a productos volcánicos no consolidado (tefra). Aunque pueden ser arrastrados materiales provenientes de la cubierta edáfica, rocas debilitadas por procesos físico-químicos y material coluvio-aluvional.

Las rocas debilitadas química-físicamente son comunes en ambientes volcánicos. La alteración química responde a procesos de lixiviación ácida por aguas hidrotermales, que transforman minerales silicatados a arcillas y desintegran otros [4]. Respecto al debilitamiento físico puede mencionarse la acción glaciaria que remueven y desgastan las rocas, como así también el fenómeno de crioclastia^d. Tanto la debilitación química como física, liberan fragmentos de roca que pueden ser removidas por lahares.

En tanto, los mecanismos desencadenantes se presentan tanto durante periodos de actividad o inactividad volcánica, pudiendo o no estar relacionados con procesos volcánicos (Tabla 2.2). Según lo cual los lahares se clasifican en: *syn-eruptivos* que ocurren durante una erupción, *secundarios* o *post-eruptivos* en corto tiempo después de una erupción que remobilizan los materiales recientemente depositados, y *no eruptivos* que ocurren por otros procesos.

Entre los mecanismos desencadenantes se encuentran la actividad sísmica, intrusiones^e superficiales, erupciones, lluvias torrenciales, liberación del agua contenida en los cráteres y el colapso de flancos, entre otros [3, 5, 45].

Cuando el movimiento se debe a colapso de flancos, se produce una avalancha de rocas que puede evolucionar, por licuefacción, a un lahar [3]. El colapso puede ser gatillado por actividad volcánica, sísmica, sobrepresurización del sistema poral o deformación ocasionada por intrusiones magmáticas [4].

Todos los mecanismos conducen a una pérdida de estabilidad de los materiales. Algunos lo hacen en forma directa, en donde el mismo fenómeno es el que conduce a la generación de un lahar (sismicidad, erupción, precipitación, etc.). Otros actúan en forma indirecta al saturar las rocas e incrementar la presión poral, como el agua que se infiltra de precipitaciones, del sistema hidrotermal o de intrusiones.

En cualquier caso, la presión poral (presión interna del agua de saturación) es clave en la estabilidad de los materiales [46]. La misma depende de las precipitaciones, el nivel piezométrico y propiedades intrínsecas de material (permeabilidad, permeabilidad efectiva, porosidad, etc.) [46]. Cuando la presión de poro se eleva por encima de ciertos valores críticos, los materiales se vuelven inestables [4, 46]. La inestabilidad se debe que dicha presión es ejercida sobre las paredes del poro, por lo tanto tiende a separar los granos.

Tanto los mecanismos desencadenantes como los procesos que coadyuvan en la liberación e inestabilidad de los materiales, influyen sobre la composición y concentración de la fracción sólida. A su vez, tanto la composición como la concentración determinan la movilidad y el comportamiento del flujo [2]. De allí que el fenómeno sea de difícil caracterización.

^dFragmentación mecánica de las rocas por ciclos de hielo-deshielo

^eInfiltración de una masa de roca semi-sólida entre otras 2 sólidas.

2.2.2. Comportamiento y fases de un lahar

Los lahares exhiben un comportamiento complejo determinado por las interacciones partícula-líquido y partícula-partícula, responsables de mantener el movimiento [10]. A su vez, las interacciones están controladas por las proporciones sólido-líquido y las características de la fracción sólida (composición, tamaño, etc.) [1, 10, 47].

Tanto la concentración como la composición de los sólidos son variables en el tiempo, a medida por la distancia recorrida por el flujo desde la fuente crece [2, 45]. Así, la composición depende del tipo de materiales que se encuentren en el avance del flujo. Mientras la concentración cambia según los procesos de dilución, infiltración, depositación, segregación de partículas y agradación [1, 2, 48].

En términos generales a medida que el lahar se aleja de la fuente, sufre una disminución progresiva de la concentración, por depositación del material o dilución e infiltración con aguas de canal [1, 48] (Figura 2.4.d). No obstante, la concentración también puede incrementar por agradación al incorporar materiales erosionados [2, 48] (Figura 2.4.d).

Es importante destacar que los cambios de concentración no afectan de igual modo a todas las porciones del flujo, ya que existe una segregación de partículas en sentido longitudinal. Así, los lahares exhiben un perfil heterogéneo, en donde el frente y la cola del flujo suele tener menores concentraciones que las porciones medias [1, 48] (Figura 2.4.a, 2.4.b y 2.4.c).

La interacción entre los mencionados procesos da lugar a las fases de un lahar. Según Vallance los lahares presentan tres fases: flujo de detritos, flujo hiperconcentrado y flujo de corriente [2, 9]. La fase de flujo de detritos domina en proximidades del volcán, con concentraciones del 50 al 80 % en sólidos y densidades de 1800 - 2300 kg m⁻³ [1] (Figura 2.4.a).

Tabla 2.2: Fenómenos con potencial de desencadenar lahares

Fenómeno	Mecanismo	Período	Efecto
Erupción	<ul style="list-style-type: none"> ○ Caída de piroclastos ○ Lava ○ Flujo piroclástico ○ Liberación de agua subterránea ○ Sismicidad 	Actividad volcánica	<ul style="list-style-type: none"> ○ Fusión de cubierta néveo-glacial ○ Pérdida de estabilidad
Intrusión superficial	<ul style="list-style-type: none"> ○ Sismicidad ○ Liberación de fluidos 	Actividad volcánica	<ul style="list-style-type: none"> ○ Pérdida de estabilidad ○ Incremento de la presión de Poro
Precipitación	<ul style="list-style-type: none"> ○ Escorrentía ○ Agua de infiltración 	Inactividad-actividad	<ul style="list-style-type: none"> ○ Movilización de material ○ Incremento de la presión poral
Colapso de flancos	<ul style="list-style-type: none"> ○ Avalancha de roca 	Inactividad-actividad.	
Desborde de lagos	<ul style="list-style-type: none"> ○ Corrientes de agua 	Inactividad-actividad	<ul style="list-style-type: none"> ○ Movilización de material

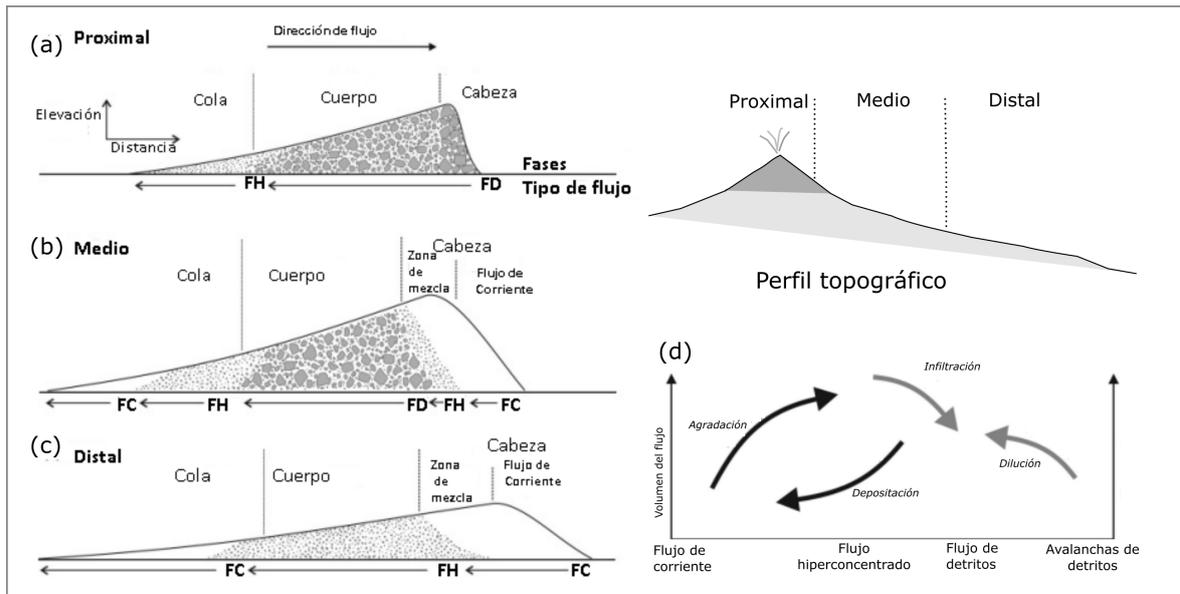


Figura 2.4: Fases de un lahar de Vallance, 2015. (a) Perfil de un lahar en zona proximal, (b) media y (c) distal. FD, FC y FH corresponden a Flujo de Detritos, F. de Corriente y F. Hiperconcentrados, respectivamente. (d) Mecanismos por los cuales se llevan a cabo las transiciones entre distintos tipos de flujo. Modificado de Manville et al., 2013

A mayor distancia se vuelve más relevante la fase de flujo hiperconcentrado, con 20 a 50 % en fracción sólida y densidades de $1300\text{-}1800\text{ kg m}^{-3}$ [1] (Figura 2.4. b). En porciones distales, los flujos se diluyen alcanzando la fase de flujos de corriente, con $\leq 20\%$ en sólido y densidades $\leq 1300\text{ kg m}^{-3}$ [3] (Figura 2.4.c).

Cada fase exhibe un comportamiento diferente. Durante la fase de flujo de detritos se pueden transportar hasta partículas del tamaño de mega-bloques ($\geq 10\text{ m}$ de largo), generando un flujo en donde las fracciones líquido-sólido se mueven al unísono en sección vertical [2, 9]. En la fase de flujo hiperconcentrado las partículas de tamaño arena son transportadas en suspensión y las gravas como carga de fondo, en un flujo turbulento [1, 48]. Mientras la fase de corriente transporta partículas de menor tamaño en suspensión [48].

2.2.3. Lahares como amenaza volcánica

Una **amenaza natural** es un fenómeno que se desarrolla en un área y período de tiempo, cuyos efectos son potencialmente perjudiciales para ecosistemas y comunidades (personas, propiedades) [49]. Si existe suficiente información sobre la recurrencia del fenómeno, entonces puede asignarse una probabilidad de ocurrencia [49]. En tanto, el **riesgo** considera la probabilidad de sufrir pérdidas (humanas, económicas) dentro del área amenazada [49]. Así el riesgo es un valor que cuantifica la amenaza y la magnifica según la vulnerabilidad de las comunidades ($Riesgo = Amenaza * Vulnerabilidad$).

Al igual que otros fenómenos relacionados con el volcanismo, los lahares representan una severa amenaza para comunidades próximas a volcanes propensos a padecerlos. Su rápida generación los torna difícil de predecir exceptuando casos en que se registra actividad volcánica coetánea, en donde se emiten alertas. Por otra parte, pueden inundar valles en corto tiempo y desplazarse a través de ellos, arrasando los objetos a su paso como si se tratase de

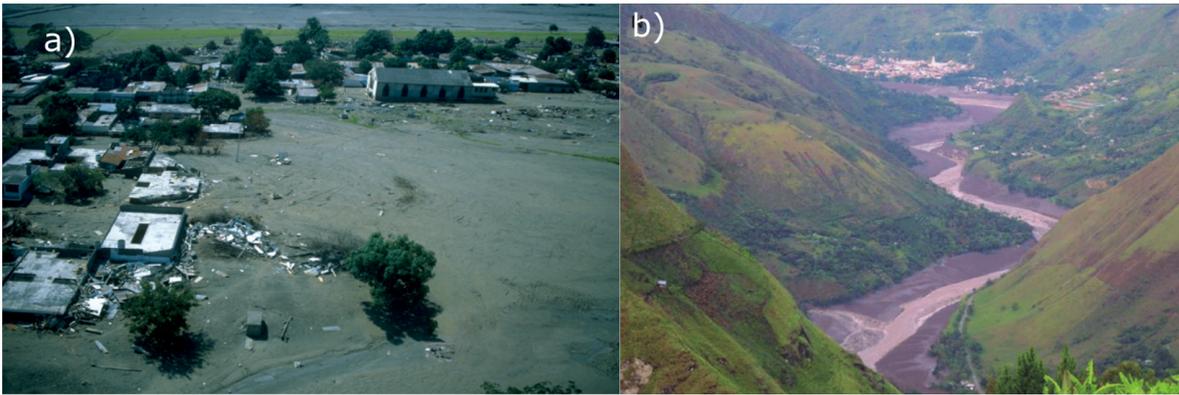


Figura 2.5: a) Destrucción de la ciudad de Armero por el paso de un lahar, luego de la erupción del volcán Nevado del Ruiz en 1985 (Colombia). Crédito: Servicio Geológico de los Estados Unidos (United States Geological Survey). b) Huella dejada por el lahar generado en la erupción del 20 de noviembre de 2007 del volcán Nevado del Huila, en cercanías del poblado de Belalcázar (Colombia). Modificada de Monsalve et al., 2011. Crédito: Servicio Geológico de Colombia

hormigón sin fraguar que fluye pendiente abajo [1, 2, 50].

Existen numerosos ejemplos mundiales de catástrofes acontecidas por lahares. En 1985 la ciudad de Armero (Colombia) fue destruida por lahares desencadenados a raíz de la erupción del volcán Nevado del Ruiz, pereciendo más de 23000 personas [6] (Figura 2.5.b). La erupción de 1991 en Mount Pinatubo (Filipinas) depositó en las laderas del volcán capas tan potentes de ceniza, que los flujos posteriores producidos por las lluvias monzónicas sepultaron los valles circundantes con 3 km^3 de material [50]. En 1998 aproximadamente 25000 personas perecieron por un gran flujo desencadenado por colapso del flanco sur del volcán Casita (Nicaragua), tras las intensas lluvias asociadas al huracán Mitch [8]. En 2007 los poblados de Belalcázar (Figura 2.5.b), Tóez y Mesa de Caloto (Colombia) se vieron azolados por tres episodios de inundación por lahares, producto de la actividad freato-magmática del volcán Nevado del Huila [51].

Por la magnitud de las catástrofes, la caracterización de los lahares se volvió imprescindible para asistir en la identificación y delimitación de áreas amenazadas. En este contexto, la teledetección y los sistemas de información geográficos juegan un rol trascendental como herramientas que ayudan a la comprensión del fenómeno.

2.2.4. Modelado del comportamiento de un lahar

Los mapas de amenaza volcánica constituyen unos de los pilares fundamentales en los que se apoyan las estrategias mitigación y los planes de contingencia para prevenir catástrofes. En los mismos se muestran las áreas propensas a sufrir las distintas amenazas volcánica, entre ellas los lahares, según la topografía y cercanía al volcán.

La forma clásica para delimitación áreas de inundación por lahares emplea la geología de campo, y consiste en el estudio de flujos recientes con determinaciones de: geometría y extensión del flujo, depósitos (tipo, localización, geometría, etc.) y áreas afectadas [5]. En términos generales a menor período de tiempo entre el evento y la recolección de datos, mejor resultará la caracterización del evento. Por ejemplo, depósitos antiguos muestran la ocurrencia del fenómeno pero limitan la reconstrucción del flujo, por su baja preservación en

el tiempo [17] y la tendencia a sufrir erosión. Otro factor a considerar es que la forma clásica asume que que lahares futuros se comportarían de igual modo que eventos pasados, lo cual podría no ser cierto: (i) podrían existir variaciones de volumen, y (ii) los lahares podrían seguir otros recorridos si la topografía ha sufrido modificaciones considerables.

Las áreas de inundación por lahares también pueden ser delimitadas empleando modelos que simulan el comportamiento del flujo. No obstante, la diversidad en mecanismos generadores y ambientes, como así también la complejidad y variabilidad del flujo, constituyen un reto para la formulación de los modelos [1, 5, 45].

En la actualidad existen numerosos métodos/modelos que según Manville et al., 2013 se pueden agrupar en: 1) modelos empíricos, 2) modelos reológicos simples, 3) modelos hidrológicos, 4) modelos de formulaciones complejas, y 5) modelos mixtos (Tabla 2.3) [1]. Entre ellos los de tipo empírico son los más sencillos porque requieren menos parámetros de entrada, lo cual los hace adecuados cuando no existen mediciones a campo de las variables físicas que emplean los modelos complejos.

Tabla 2.3: Tipos de modelos según Manville et al., 2013 [1]

Modelos	Observaciones	Ejemplos
Empírico	Basados en correlaciones entre volumen, áreas transversales, velocidad de flujo, etc. Sin base física	Iverson et al.,1998 ; Pierson,1998
Reológico	Basados en la física del flujo y geometría del depósito, complementados con mediciones reológicas	Yano et al.,1965; Major et al.,1992; Arattano et al.,2006
Hidrológico	Asumen un comportamiento unifásico Newtoniano del fluido. Emplean formulaciones inundación calibradas a lahares	Costa, 1997 ; Manville, 2004 ; Carrivick et al., 2009
Complejos	Formulaciones complejas que simulan el comportamiento multifásico y consideran la reología del flujo	Iverson, 1997 ; Takahashi, 2001 ; Pitman et al., 2005
Mixtos	Combinan modelos hidrológicos con la física del fluido, considerando sedimentación y agradación	Fagents et al., 2006; Carrivick et al., 2010

Uno de los métodos semi-empíricos de mayor difusión en la delimitación de áreas de inundación por lahares, es el denominado LAHARZ [5]. Desde su publicación el modelo en 1998 por el Servicio Geológico Estadounidense, fue aplicado para modelar flujos pasados y/o determinar áreas propensas a ser inundadas por lahares. Capra et al. (2008) simularon áreas de inundación por lahares con LAHARZ y otros fenómenos volcánicos con modelos diferentes, para generar un mapa de peligros volcánicos en el volcán dormido de Toluca (México) . Worni et al. (2012) re-calibraron LAHARZ y parametrizaron el método FLO-2D, con datos de campo del lahar de 2007 en el volcán Nevado del Huila (Colombia); usando los modelos ajustados simularon los eventos de 1997 y 2007, con resultados de gran concordancia a la realidad, y lahares potenciales de mayores dimensiones . Ruiz et al. (2015) emplearon el modelo LAHARZ para determinar posibles áreas de inundación por lahares alrededor del volcán Turrialba (Costa Rica), con énfasis en la afectación de la red vial del país. Castruccio

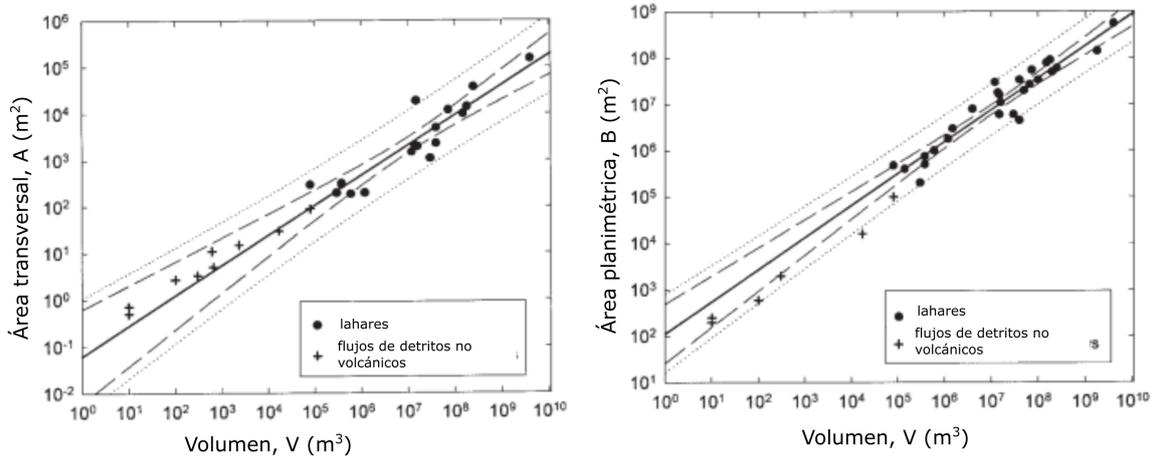


Figura 2.6: Gráficos de las áreas de inundación transversal A (izquierda) y planimétrica B (derecha), en función del volumen V. Los valores se encuentran en escalas logarítmicas. Las rectas corresponden al ajuste con un 95 % de confianza, cuya pendiente de 2/3 es la potencia del volumen en las ecuaciones del modelo. Modificado de Iverson et al., 1998

et al. (2015) re-calibraron LAHARZ para volcanes de la ZVS, y lo aplicaron al estudio de eventos en los volcanes de Cabulco y Villarrica (Chile). Los autores compararon los resultados con las áreas de inundación por lahares simuladas con el modelo de Modificación de la Dirección de Flujo Único (del inglés *Modified Single-Flow-Direction*; Huggel et al., 2003), encontrando que este último determina mejor la extensión de las secciones transversales de los valles. Lee et al. (2015) estudiaron las áreas afectadas por lahares y flujos piroclásticos de la erupción de 2010 en el volcán Merapi (Indonesia), empleando detección de cambios en imágenes satelitales y LAHARZ; como resultado obtuvieron un 55.63 % entre las áreas detectadas y las simuladas.

2.2.4.1. LAHARZ

LAHARZ es un método semi-automatizado en forma de complemento del programa ArcGIS (disponible de manera gratuita en <https://pubs.usgs.gov/of/2014/1073/>). Permite obtener áreas de inundación por lahares de manera rápida, objetiva y reproducible [5]. Está basado en análisis estadísticos de la relación entre el volumen y la geometría (áreas de inundación transversal y planimétrica) de veintisiete lahares en nueve volcanes del mundo. Las ecuaciones que utiliza LAHARZ proponen que las áreas transversales (A) y planimétricas (B) de inundación por lahares son, ambas, proporcionales al volumen del flujo (V; Figura 2.6):

$$A[m^2] = 0,05(V[m^3])^{2/3} \tag{2.4}$$

$$B[m^2] = 200(V[m^3])^{2/3} \tag{2.5}$$

Dichas formulaciones se sustentan en que:

1. *Eventos del pasado proveen una base para predecir futuros lahares,*
2. *Las áreas de inundación distales están confinadas a valles,*
3. *El volumen controla la extensión del lahar,*

4. *Los lahares voluminosos son menos frecuentes que los pequeños,*
5. *Es imposible predecir el volumen de lahares futuros* (Iverson et al., 1998, p.01).

El último punto parece contradictorio, puesto que el método fue pensado para “predecir” áreas de inundación por lahares las cuales dependen íntimamente del volumen del flujo. No obstante, con tal afirmación los autores ponen de manifiesto la utilidad del método, ya que si es imposible conocer el volumen del lahar entonces es mejor modelar una gran número de volúmenes y prepararse para todos los escenarios posibles.

A su vez, el método asume que:

1. Los límites aguas arriba de las áreas planimétricas y transversales de inundación, coinciden con el inicio de la depositación del lahar.
2. Los lahares se mueven aguas abajo manteniendo su masa y densidad constantes.
3. El volumen es constante en el tiempo y representa a la mezcla agua-sólidos.
4. El área planimétrica B corresponde al área inundada por el lahar, que es mayor a la depósito generado. Luego, no se simulan depósitos únicamente sino el flujo completo.
5. En las porciones distales de los valles inundados, el volumen controla la extensión del flujo más que la forma del área inundada.

LAHARZ corre sobre un MDE, simulando las áreas de inundación para volúmenes y puntos de inicio especificados por el usuario. El MDE a emplear debe cubrir el volcán y los cursos de agua de interés. Respecto a los volúmenes, debe considerarse el error del método para definir los incrementos de volumen de modo que las áreas se estadísticamente diferenciables [66]. En tanto, los puntos de inicio deben ser definidos como los lugares en dónde un lahar comenzaría a depositar (área proximal de amenaza). Como criterio de definición, proponen que los puntos de inicio se encuentran en dónde un cono de energía H/L interseca a las vaguadas^f (Figura 2.7).

El cono de energía, que marca un radio en torno al volcán en dónde los flujos han perdido suficiente energía como para depositar material, tiene su ápice en la cima del volcán y una pendiente dada por el cociente entre la caída vertical (H) y la distancia horizontal de escurrería (L; Figura 2.7). Los autores señalan que los valores de H/L en el rango de 0.1-0.3 resultan adecuados para la determinación del inicio de áreas proximales de amenaza.

En relación al funcionamiento, LAHARZ trabaja en etapas (Figura 2.8). Primero, corrige el MDE rellenando depresiones asociadas al ruido. Segundo, obtiene tres grillas de direcciones de flujo, acumulación de flujo y red de drenaje; dichas grillas asisten las simulaciones. Tercero, calcula para cada volumen el valor de las áreas planimétricas y transversal (ecuaciones 2.4 y 2.5). Cuarto, se posiciona en la celda indicada como punto de inicio y rellena el valle hasta hacerlo equiparable al área transversal A. Según el ancho de celda y la cantidad de celdas inundadas en el perfil del valle, obtiene el incremento de área planimétrica dB y lo descuenta del B total. Quinto, avanza a la siguiente celda definida según las grillas hidrológicas y repite el cuarto paso. La simulación finaliza cuando se haya consumido el área B.

^fLínea de mayor profundidad de un cauce

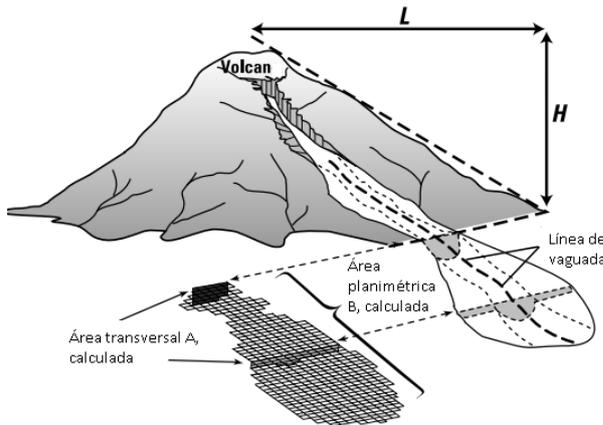


Figura 2.7: Geometría idealizada de un lahar. Muestra la relación entre caída vertical (H) y escorrentía horizontal (L), que controlan la deposición, y las áreas transversal (B) y planimétrica (A) que determinan la extensión del flujo simulado. La intersección entre el cono H/L y la línea de vaguada marca el punto de inicio de la simulación. Modificado de Schilling, 2014

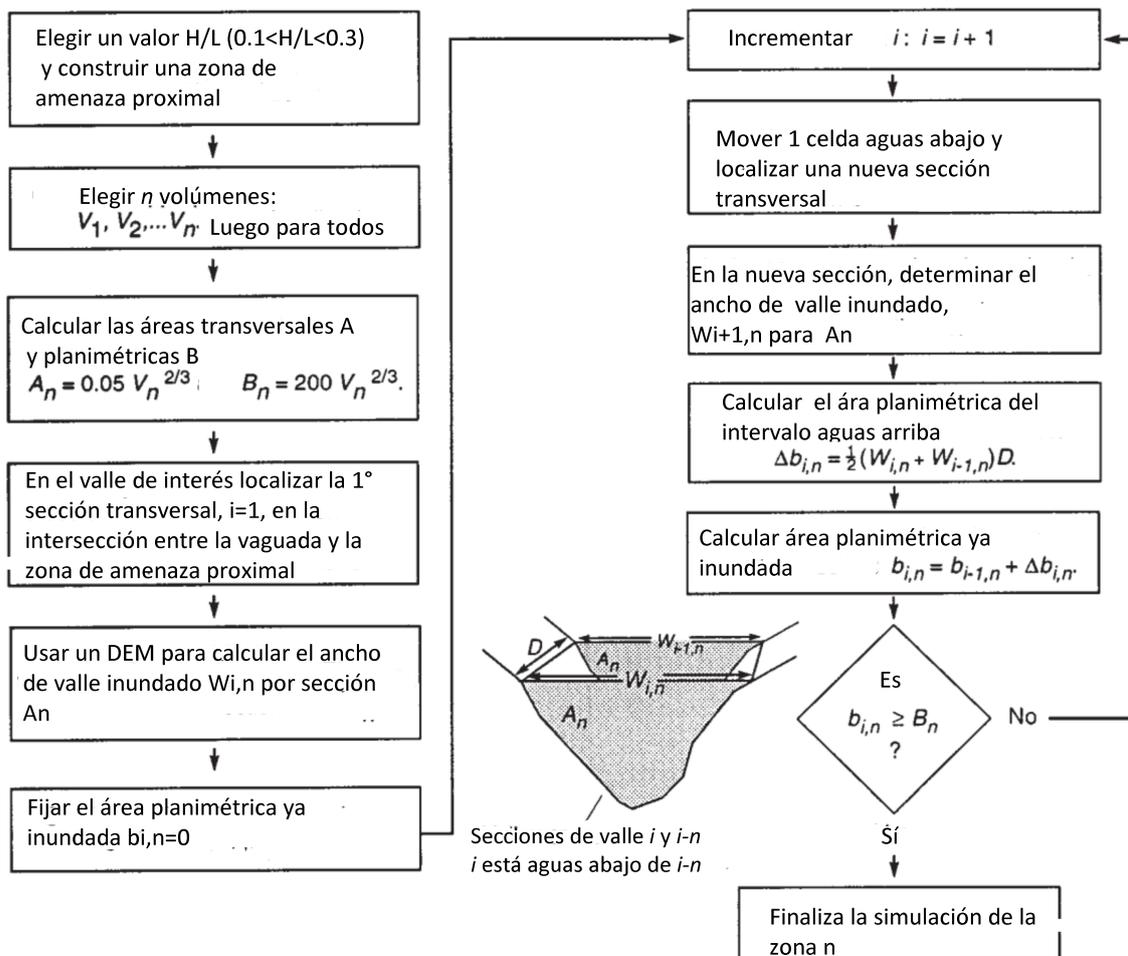


Figura 2.8: Esquema de funcionamiento de LAHARZ, modificado de Iverson et al., 1998

3.1. Ubicación

El área de estudio ($37^{\circ}41'$ – $37^{\circ}55'$ Sur, $70^{\circ}53'$ – $71^{\circ}31'$ Oeste) se ubica al centro-oeste de la provincia de Neuquén (Parque Provincial Copahue, Argentina) y al centro-este de la región de Bío-Bío (Chile; Figura 3.1). En la misma se incluyen el volcán Copahue, la caldera volcánica Caviahue y los valles circundantes.

Dentro del área se desarrolla una extensa red de drenaje, dada por los cinco ríos Agrio Superior, Agrio Inferior, Dulce, Lomín y Queuco. Además, se encuentran una serie de cuerpos de agua correspondientes a los lagos Caviahue (ó Agrio), Trolope y El Barco; y las lagunas Las Mellizas, La Achacosa, Del Rincón y El Escorial.

En las riberas del río Agrio Superior, en dónde desemboca en el lago Caviahue, y a unos 8 km al Este del volcán se encuentra el centro turístico Caviahue con 607 habitantes (Fuente: CENSO 2010, Argentina). A unos 7 km al Noreste del volcán, se ubica la villa turística argentina Copahue que es habitada durante el verano por sus aguas termales. Del lado chileno, sobre las terrazas del río Queuco, se encuentran asentamientos dispersos Pehuenche con escaso desarrollo socio-económico y limitado acceso en épocas de invierno [67]. Entre ellos, los más cercanos al volcán (~ 8 km NO) son Butalelbún y Trapa Trapa de 560 y 300 pobladores respectivamente (Fuente: CENSO 2017, Chile).

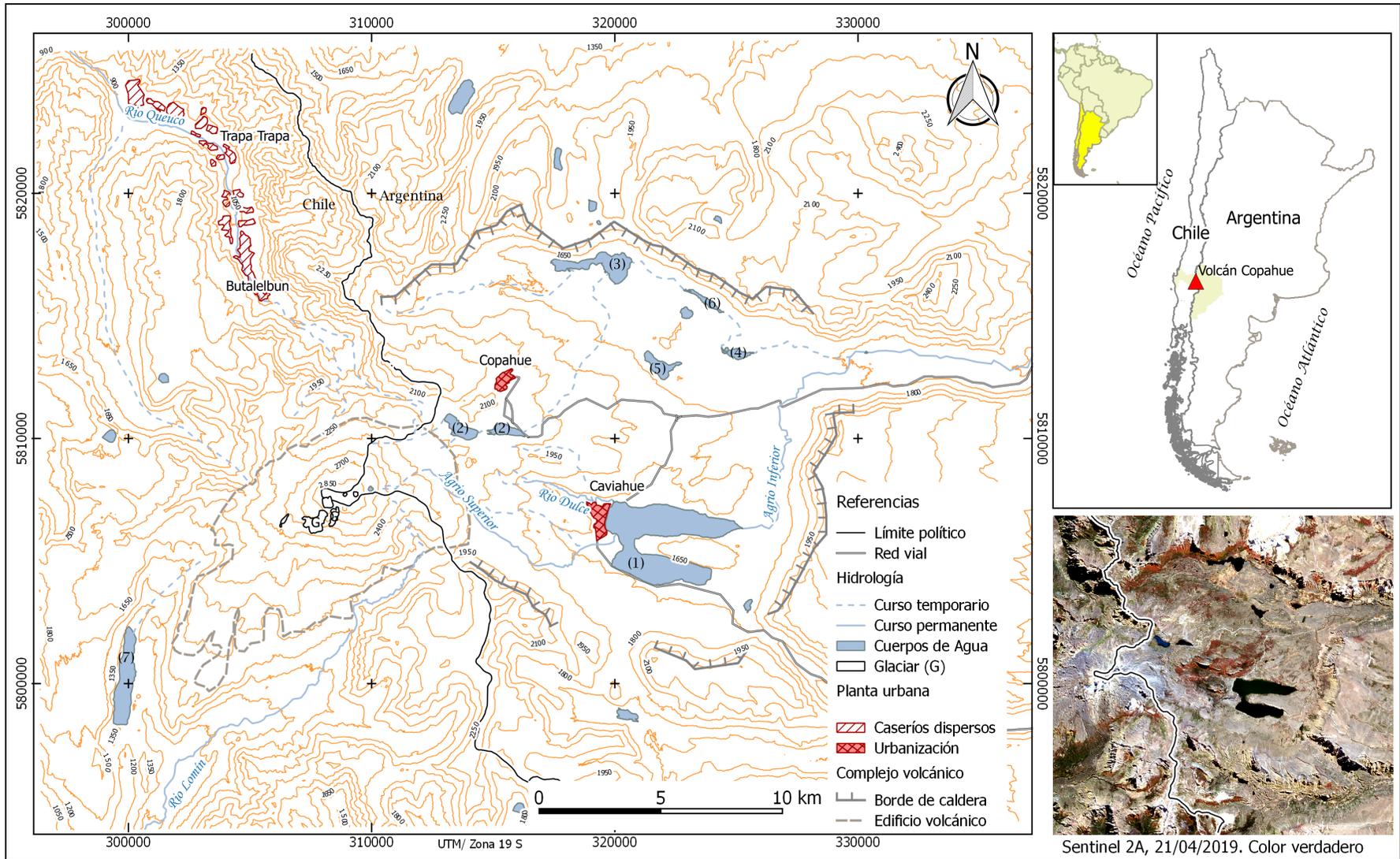


Figura 3.1: Ubicación del área de estudio. (1) Lago Caviahue, (2) Lagunas Las Mellizas, (3) Lago Trolope, (4) Laguna del Rincón, (5) Laguna la Achacosa, (6) Laguna El Escorial, (7) Lago El Barco

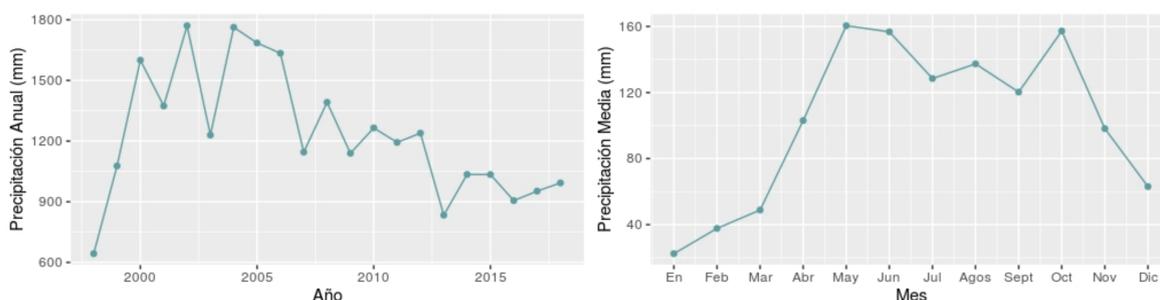


Figura 3.2: Izquierda, serie precipitaciones anuales para el período de 1998 a 2018. Derecha, media de los valores mensuales precipitados para el período de 1998 a 2018. Fuente Tropical Rainfall Measuring Mission

3.2. Clima

La región de estudio presenta un clima húmedo frío, con vientos predominantes hacia el Este [19, 27]. Las precipitaciones ocurren principalmente en forma de nieve entre los meses de Abril y Octubre, y oscilan entre los 600 y 2000 mm año⁻¹ (Fuente Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM, Figura 3.2). Al respecto, la serie temporal de precipitaciones anuales entre los años 1998 y 2018, muestra una merma en las desde 2006 en adelante (Figura 3.2). Dicha disminución se encuentra en consonancia con las extremas sequías que asolan la región [68, 69] En tanto, la temperatura media anual es de 7° C, con un máximo de 25° C durante el verano y un mínimo de -14°C en los meses de invierno [19].

3.3. Hidrología

El sistema hidrológico del área se compone de cursos, efímeros y permanentes, que alimentan a una serie de cuerpos de agua. El mismo es alimentado por aguas hidrotermales asociadas al que se mezclan con aguas por fusión de las cubiertas níveo-glaciár [26, 70].

Los cursos de agua integran una extensa red de drenaje con diseño dendrítico y fuerte control estructural, evidenciado en cambios bruscos de la dirección de cauces (Figura 3.1). En dicha red se encuentran cinco ríos principales: Agrío Superior, Agrío Inferior, Dulce, Lomín y Queuco.

Los ríos Agrío Superior y Dulce nacen en la ladera oriental del volcán Copahue, y fluyen hacia el Este 12 y 6 km, respectivamente, hasta desembocar con el lago Caviahue. En tanto, el río Agrío Inferior nace del brazo más septentrional del lago, y fluye hacia el Norte hasta el borde oriental de la caldera. El Río Lomín nace en el flanco Sureste del volcán y discurre en dirección Suroeste unos 8 km dentro del área de interés. Finalmente, el Río Queuco es alimentado por tributarios de las laderas Noroccidental y Occidental, desde dónde avanza hacia el Noroeste.

Respecto a los lagos, el Caviahue al centro de la caldera es el de mayor tamaño. El mismo se divide en dos brazos, adquiriendo una forma de alas. Le siguen en tamaño los lagos El Barco, al suroeste del volcán, y el Trolope, recostado en el borde interno septentrional de la caldera.

Dentro de la caldera, se encuentran además las lagunas Las Mellizas, La Achacosa, Del



Figura 3.3: Fotografía tomada desde las orillas del lago Caviahue (Argentina). En el fondo se observa el volcán Copahue. Modificado de Sruoga y Consoli, 2011

Rincón y El Escorial.

3.4. El Volcán Copahue

El volcán Copahue ($37^{\circ}51'08''\text{Sur}-71^{\circ}10'3.9''\text{este}$) se emplaza en el límite argentino-chileno, sobre el borde occidental de la gran caldera Caviahue (Figuras 3.1 y 3.3). Copahue es un estratovolcán andesítico a basáltico-andesítico poligenético [18], con una base elíptica de 22 km en su semieje mayor (NE) y 8 km en el menor (NO). Su edificio volcánico se eleva unos 1350 m por encima del basamento circundante, alcanzando una altura máxima de 2990 m sobre el nivel del mar [71, 72].

La cima del Copahue se encuentra coronada por nueve cráteres alineados la mayoría de ellos inactivos, excepto por el cráter más oriental que concentra la actividad moderna del volcán [18]. El cráter activo de ~ 120 m de diámetro, aloja un lago hiper-ácido (pH 0.3-0.8) alimentado con aguas de fusión y del sistema hidrotermal [71, 73].

La caldera Caviahue (o Agrio) es una gran depresión de forma aproximadamente elíptica en planta, de unos 20 km x 15 km [74]. Se encuentra limitada por escarpas abruptas con un contorno dado por la curva de nivel de 2000 m sobre el nivel del mar [18].

El volcán Copahue es un importante centro volcánico por los numerosos eventos, empero de baja intensidad, que han tenido lugar [17, 20, 21, 75]. Dicha actividad motivó numerosas investigaciones centradas principalmente en el estudio de: la actividad hidrotermal (ej. [71, 73, 76, 77]), productos volcánicos y eventos eruptivos (ej. [20, 22, 78]), geoquímica del complejo volcánico y del sistema hidrotermal (ej. [79, 80]), deformación asociada eventos eruptivos o ascenso de magma (ej. [74, 81]), naturaleza de los depósitos (ej. [17, 30]), actividad neotectónica (ej. [82, 83]), caracterización geomorfológica ([18]) y riesgos asociados a la actividad volcánica ([23, 27]), entre otros.

3.4.1. Marco Geológico

El volcán y la caldera integran el complejo volcánico Copahue-Caviahue, en la ZVS generada por la subducción de la Placa de Nazca debajo de la Sudamericana [19, 84, 85]. Dicho complejo se ubica a ~ 30 km al Este del arco volcánico andino actual, en la transición entre los Andes Centrales y los Andes Patagónicos [19].

El complejo forma parte del lineamiento volcánico de Mandolegüe (~ 70 km largo), dispuesto en la intersección entre los sistemas de fallas de Liqueñe-Ofqui y de Antñir-Copahue [86]. En relación a dichos sistemas, se encuentran lineamientos y grabens que dan lugar al depocentro de la caldera [18, 83].

El volcán Copahue representa una de las expresiones más recientes de la actividad volcánica regional, desarrollada durante los últimos 20 Ma^a [21]. La actividad volcánica temprana corresponde al basamento sobre el que se construye el edificio volcánico de Copahue (~ 4 -2 Ma, [87]).

Se reconocen tres estadios de actividad para el edificio volcánico de Copahue: 1) pre-glacial, 2) syn-glacial y 3) post-glacial [29]. El estadio pre-glacial marca el inicio de la actividad volcánica hace unos 1-2 Ma y es el más importante en términos de volumen, puesto que durante el mismo se construyó el cono [21, 28]. En el estadio syn-glacial se formaron varios centros efusivos alineados en fracturas, que se fueron amalgamando [21, 87]. En tanto, la actividad post-glacial se concentra exclusivamente en el cráter activo oriental.

3.4.2. Estratigrafía

La columna estratigráfica inicia con el basamento del edificio volcánico, representado por las Formaciones^b Cola de Zorro, Riscos Bayos y Las Mellizas.

La Formación Cola de Zorro (1.5 km en espesor) está dada por de coladas de lava con brechas autoclásticas, depósitos piroclásticos^c y epiclásticos^d, e intrusivos [28, 86]. Dicha formación aflora en proximidad a la caldera Caviahue (Figura 3.4).

La Formación Riscos Bayos es una delgada capa de depósitos piroclásticos, localizada en los bordes externos de la caldera [86] de edad 2.05 ± 0.05 Ma (Método de datación ^{40}K - ^{40}Ar , [88]; Figura 3.4). Su génesis se vincularía a la formación de la caldera y estaría asociada a la Formación Las Mellizas [18, 89].

La Formación Las Mellizas datada en 2.6 ± 0.06 Ma (^{40}K - ^{40}Ar , [88]), corresponde a capas de lavas andesíticas que se intercalan con ignimbritas^e dacíticas [28]. La misma compone la mayoría de los afloramientos rocosos dentro de la caldera (Figura 3.4).

Por encima de las formaciones mencionadas se encuentran los niveles rocosos que registran la actividad volcánica de Copahue, iniciada en el borde occidental de la caldera hace unos 2-1 Ma [28, 88]. La mismas fueron divididas en tres secuencias pre-glacial, syn-glacial y post-glacial [85].

^aMillones de años

^bConjunto de cuerpos rocosos con propiedades (composición y estructura) comunes

^cAdjetivo. Fragmento de roca incandescente expelido por un volcán

^dDepósitos de material alterado en superficie

^eRoca volcánica dura generada por colapso de columnas eruptivas

La secuencia pre-glacial (~1 km de espesor) está dada por lavas andesíticas que se intercalan con depósitos piroclásticos [28, 85]. Para dicha secuencia las edades ^{40}K - ^{40}Ar disponibles son de 1.23 ± 0.18 a 0.76 ± 0.14 Ma [15, 88].

La secuencia syn-glacial (~1 km de espesor; <0.76 Ma), que suprayace a la pre-glacial, está dada por lavas que se intercalan con depósitos glaciales [85] (Figura 3.4)).

La secuencia post-glacial agrupa los niveles más recientes del volcán, luego de la retracción glacial en el área y por lo tanto son anteriores a los 20-30 Ka^f [86]. La misma se compone de lavas que se intercalan con flujos piroclásticos, depósitos de tefra y de lahares [28]. Las acumulaciones de tefra y de lahares, de los ciclos 1992-2000, son especialmente importantes alrededor en la boca oriental del cráter activo [85] (Figura 3.4)).

Es importante destacar que la estratigrafía no está completa y es fragmentaria, las edades son discutidas y no existe consenso sobre el origen de muchas de las unidades.

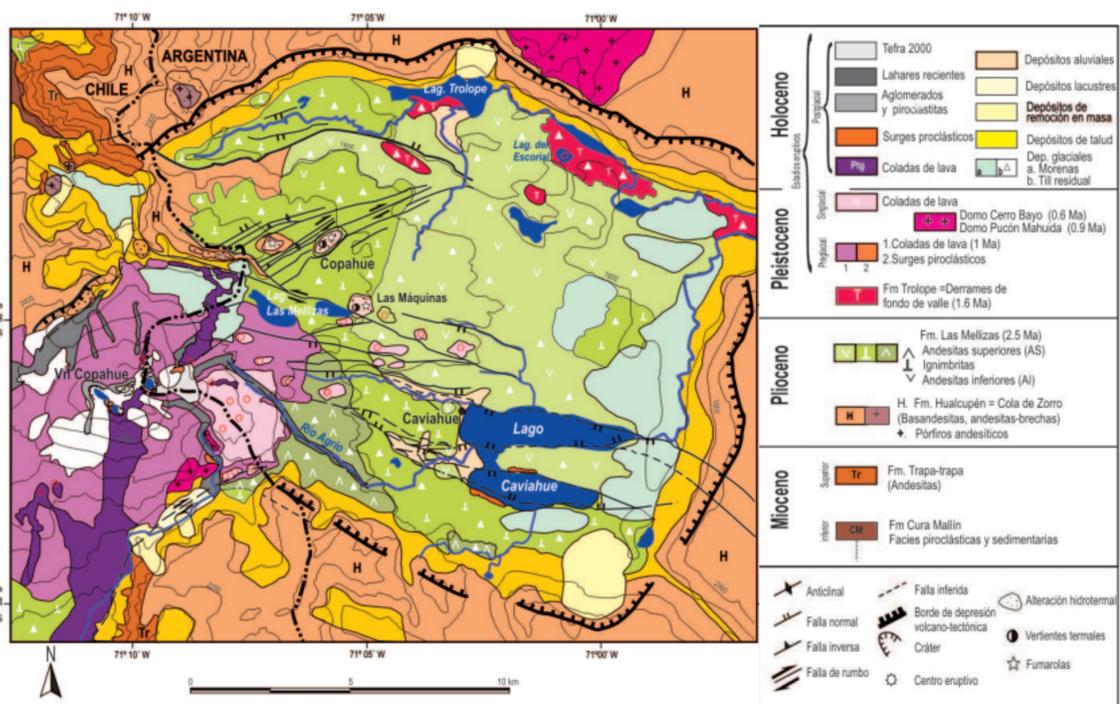


Figura 3.4: Mapa geológico del volcán Copahue. En color gris oscuro se muestra la localización de depósitos asociados a lahares. Modificado de Sruoga y Consoli, 2011

3.4.3. Historia Eruptiva Moderna

La historia eruptiva moderna del volcán Copahue registra aproximadamente 15 ciclos eruptivos desde el siglo XVIII: 1750, 1759, 1867, 1937, 1944, 1960, 1961, 1992, 1993, 1994, 1995, 2000 y 2012-2019 [21, 75, 78, 90]. Casi todos los eventos anteriores a la erupción de 1992 están pobremente caracterizados o sólo disponen de registros orales [21, 73].

Desde 1992 a la actualidad, los eventos eruptivos ocurridos tuvieron índices de explosividad volcánica (VEI, del inglés *Volcanic Explosivity Index*) menor o igual a 2 [27]. En su

^fMiles de años

mayoría resultaron de la despresurización del sistema hidrotermal, por interacción de aguas superficiales con magmas en ascenso o erupciones hidromagmáticas [20, 27, 73]. Los principales eventos entre 1992 y 1995 estuvieron acompañados de columnas cenizas, eyección de material incandescente y lahares [21].

■ Ciclo 1992-1995

La erupción de 1992 que comenzó en el mes de Julio, estuvo caracterizada por tres pulsos eruptivos freáticos-freatomagmáticos de VEI 2 [75]. En la misma se produjeron columnas eruptivas de entre 100-700 m, dispersión de tefras^g hasta 20 km desde de la fuente, caída de bloques y bombas que llegaron hasta el 1 km de distancia, lahares [75] y al menos tres jökulhlaups^h [24]. El total de material eyectado se estimó en 64000 m³ [75], cuyos depósitos cubrieron 88 km² (2 de Agosto), 23 km² (6 de Agosto) y 1 km² (31 de Julio) [24].

Los lahares de 1992 estuvieron conformados por una mezcla de hielo y fragmento sólidos [75] correspondientes a bombas de escoria removilizadas [17] que generaron un depósito de más de 1 m en espesor [24]. Uno de ellos alcanzó más de 4 km de largo y se desplazó sobre la nieve siguiendo el cauce del Río Agrio [75]. Los depósitos de lahares de la erupción de 1992 se ubican en los márgenes de los ríos Lomín y Agrio Superior [75].

Las erupciones de 1994 y 1995 se caracterizaron por la emisión de cenizas, detritos de rocas alteradas y piroclastos [26]. En Septiembre de 1995 la actividad volcánica desencadenó un lahar que recorrió más de 8 km a lo largo del cauce del río Agrio, formado por la mezcla entre material incandescente y de aguas calientes [21].

■ Erupción del año 2000

La erupción del año 2000 (VEI 1-2) fue de tipo freatomagmática con emisión de cenizas, bombas y fragmentos de sulfuros, que generaron acumulaciones mayores a 15 cm en espesor hacia el Este del volcán [21, 91].

Según el reporte de Naranjo et al. (2004) este ciclo, el de mayor duración hasta el momento, comprende cinco estadios. En el primero (1-11 de Julio) se reportaron flujos piroclásticos en los flancos Sur y Oeste, además de lahares en el río Agrio Superior (7 de Julio) [92] que transportaron bloques de hielo de ≤ 20 cm en diámetro [91]. Durante el segundo estadio (12-28 Julio) se generaron grandes columnas eruptivas, una de las cuales alcanzó más de 3000 m por encima del borde del cráter [91]. Las plumas se desplazaron unos 200 km desde la fuente, en sentidos NNE y ESE [91]. El tercero (29 de Julio-8 de Agosto) estuvo caracterizado por actividad sísmica, sin evidencia de actividad volcánica superficial. Durante la cuarta fase (9 de Agosto-4 de Septiembre) se produjo actividad explosiva, con columnas de ≥ 1500 m en altura por encima del cráter [91]. La quinta fase (4 de Septiembre-31 de Octubre) marca el descenso de la actividad volcánica, con escasas explosiones y sismos de baja intensidad.

■ Ciclo 2012-2019

En el año 2012 y luego de 12 años de inactividad, se inició un nuevo ciclo que perdura hasta

^gTodos los productos volcánicos que se expulsan por la chimenea volcánica, que no sean lava. Sinónimo de piroclasto.

^hInundación por rápido derretimiento del casquete de hielo

la actualidad. El inicio estuvo marcado por eventos freatomagmáticos de corta duración y $VEI \leq 2$, con emisión de columnas de vapor y fragmentos de roca (Figura 3.5.a) [20, 22]. El total de material eyectado fue estimado en $5.000.000 \text{ m}^3$ de roca desalojada [20]. En los alrededores de la boca eruptiva se generaron depósitos de 40 cm de espesor con fragmentos de 2 mm -2 m de diámetro [20].

El evento fue sucedido por emisiones intermitentes de columnas de vapor y cenizas, e intensa actividad sísmica entre los años 2013 a 2019 [72, 90]. No se han reportado lahares para el ciclo.



Figura 3.5: a) Erupciones freáticas en el cráter activo (17/Julio/2012). Crédito: Nicolas Sieburger. b) Foto del cráter activo. Modificada de Augusto y Varekamp, 2016

3.5. Caracterización de la amenaza de lahares en Copahue

En base a los eventos eruptivos recientes las amenazas en el volcán Copahue están dadas por derrames de lavas, caídas de tefra, flujos piroclásticos, flujos de barro, emisiones de gases y lahares [17, 23, 30, 75]. Aquí nos ocuparemos exclusivamente de la amenaza dada por lahares puesto que constituye el fenómeno de interés para la presente tesis.

La caracterización de la amenaza de lahares en el volcán Copahue debe ser abordada atendiendo a: disponibilidad de materiales no consolidados, presencia de fuentes de agua y mecanismos desencadenantes.

Respecto a los materiales no consolidados, existen acumulaciones importantes de tefras provenientes de erupciones históricas. Las mismas se ubican en el flanco norte y bordeando el cráter activo (color gris claro, Figura 3.4). Las capas en torno al cráter activo son especialmente potentes y empinadas, con unos 250 m de altura (Figura 3.5. b)[18].

Otra fuente de material lo constituyen las rocas disgregadas por lixiviación y/o fracturación. Los procesos de lixiviación se asocian al sistema hidrotermal, y tendrían un mayor impacto en el flanco nor-oriental, disolviendo las rocas a una tasa anual equivalente a generar una perforación de 1 km de profundidad con diámetro de 2.5 m [19, 23, 26]. La lixiviación es clave en la generación de flujos de detritos ya que, por una lado, genera porosidad y disgrega los materiales, y por otro, transforma los minerales silicatados en formas arcillosas menos resistentes [4]. En tanto, la fracturación mecánica por crioclastía coadyuva a liberar materiales.

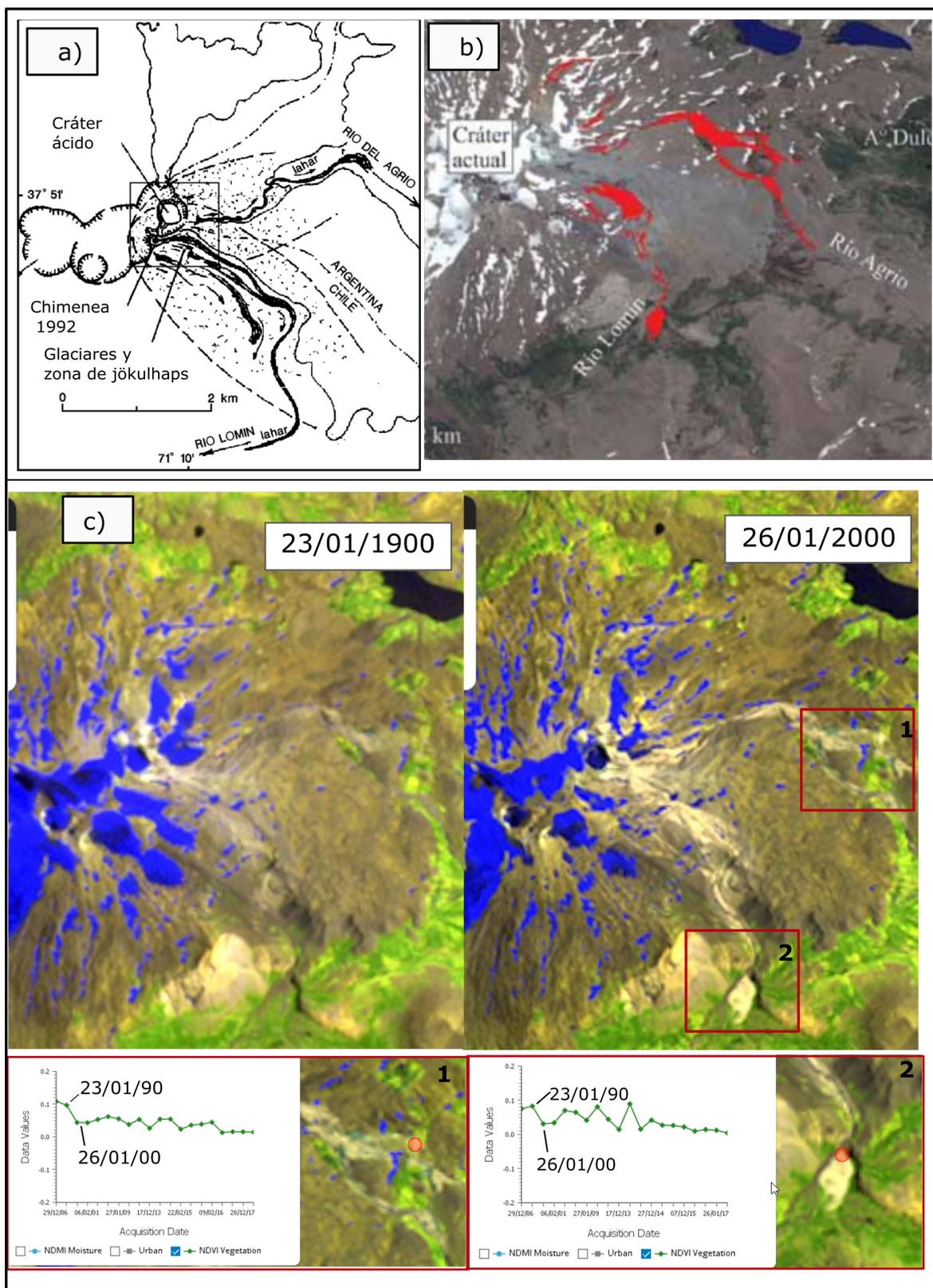


Figura 3.6: a) Lahares documentados en 1992 por Delpino y Bermúdez. Reporte del *Global Volvanism Program*, 1992. b) Depósitos asignados a corrientes piroclásticas. Modificado de Petrinovic et al., 2014. b) Combinaciones RGB: Infrarrojo Medio Largo, Infrarrojo Cercano, Verde. Izquierda, antes de los evento de 1992 y derecha, posterior. Los cambios de coloración en cauces de los ríos Agrío Superior y Lomín, indican nuevos depósitos entre las fechas. Abajo, gráficos de índices de vegetación normalizados en dos puntos, muestran disminuciones del índice entre las fechas. Fuente: Esri Change Matters Application

Además de las acumulaciones ya disponibles, durante erupciones se pueden adicionar materiales por dispersión y caída de piroclastos, que pueden ser re-movilizados por flujos. A modo de ejemplo durante la erupción de 1992 se generaron acumulaciones de tefra de hasta 20 cm en los flancos del volcán [24]. La disposición de estos materiales está controlada por los vientos predominantes de la región (intensidad, dirección) y la altura de la columna eruptiva. Al respecto, la predominancia de los vientos que soplan desde el oeste permite inferir que las acumulaciones más potentes ante una eventual erupción, se darían del lado argentino [19].

El segundo aspecto a considerar es la disponibilidad de agua para movilizar los materiales. Las fuentes de agua están dadas por las acumulaciones níveas estacionales, glaciares y el lago del cráter volcánico; se descartan el agua de escorrentía fluvial porque las precipitaciones ocurren en forma de nieve. Las acumulaciones de nieve alcanzan espesores importantes durante los meses de abril y octubre (Figura 3.2), llegando a cubrir el volcán por completo. En tanto los glaciares se ubican en el flanco sur y bordeando el cráter activo del volcán. Por su parte, el lago presenta volúmenes variables de agua dependiendo del estadio de actividad del volcán [70]. Para 1997, el volumen se estimaba en $1.00 \times 10^6 \text{ m}^3$ [93]. Es importante considerar también las contribuciones del sistema hidrotermal, el cual saturaría de agua las rocas favoreciendo la generación de lahares.

Respecto a los mecanismos desencadenantes, los mismos pueden ser divididos en aquellos procesos potenciales, observados en otros volcanes del mundo, y los procesos que han operado en el volcán Copahue. Entre los potenciales mecanismos se incluyen la generación de lahares por colapso del flanco oriental [23], por actividad sísmica, por derrames del lago del cráter, entre otros. Mientras que en ejemplos históricos del volcán la generación de lahares estuvo íntimamente ligada a eventos eruptivos, desencadenados por derretimiento de masas de hielo (lahares syn-eruptivos). Una evaluación objetiva de los mecanismos desencadenantes, permite otorgar una mayor significación a los procesos documentados ya que poseen una mayor probabilidad de ocurrencia.

El derretimiento de masas de hielo por interacción con materiales volcánicos fue documentado durante la erupción de 1992 [24] y explicaría la génesis de los lahares de los ciclos 1992 (Figura 3.6. a), 1995 y 2000 [23, 75]. Dado que en eventos recientes el estilo eruptivo del volcán fue predominantemente de tipo freático-freatomagmático sin reportes de lava, es posible asumir que el derretimiento ocurriría por flujos piroclásticos y/o caída de material incandescente.

El último factor a considerar corresponde a la determinación de las cuencas en dónde estos flujos podrían ocurrir y los puntos en dónde la inundación podría iniciarse. Nuevamente, el análisis debe estar sujeto al registro geológico de eventos históricos. Se reportan depósitos de lahares en el cauce de los Ríos Agrio Superior y Lomín generados durante los eventos eruptivos de los años 1992, 1995 y 2000 (Figura 3.4) [18, 28, 75, 85, 94]. Otros depósitos de lahares se encontrarían en los flancos sur y occidental (Figura 3.4).

Sobre los depósitos asignados a lahares en los Ríos Agrio, Lomín y sobre el flanco norte (Figura 3.4), se ha propuesto un origen por corrientes piroclásticas con edades probables de 1963-1964 y 1976 ([17, 30], Figura 3.6.b). No obstante Baez (2015) afirma que aquellos depósitos en los márgenes del Río Agrio se deben a lahares y reconoce otras secuencias del mismo tipo más antiguas debajo del depósito de 1992. En tanto, composiciones de imágenes satelitales Landsat de enero de 1990 y enero de 2000 muestran un cambio de coloración en los cauces de los cauces Agrio y Lomín sugestivos de la generación de nuevos depósitos

de lahares durante las fechas, mientras que los cambios en el flanco norte no están claros (Figura 3.6.c) .

En base a registros del pasado y caracterizaciones topográficas, se han elaborado mapas de peligros volcánicos que comprimen la información geológica y delimitan áreas de amenaza. Aquí se toman como referencia dos mapas de amplia difusión: el mapa de Delpino y Bermúdez de 1993 (Figura 3.7.a) [75] y el del Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile (SERNAGEOMIN) del año 2000 (Figura 3.7.b, escala 1:100.000).

El mapa de Delpino y Bermúdez (1993) fue elaborado en base a los eventos registrados durante la erupción de 1992. En el mismo los autores delimitaron para la Argentina una zona de 5 km de radio alrededor del cráter activo que podría ser afectada por lahares (color naranja claro y oscuro). Los cauces amenazados corresponden a los Ríos Agrio, Dulce y Lomín (color púrpura) y los arroyos afluentes del Río Agrio y el lago homónimo.

La versión del SERNAGEOMIN incorpora eventos recientes y nuevos estudios estratigráficos. En el mismo se indican como áreas amenazadas por lahares de peligro alto, a los cauces de los Ríos Agrio, Lomín y Queuco. Se incluyen también el valle que conecta al volcán con el lago El Barco y el arroyo que conecta las lagunas Las Mellizas con el lago Trolope. A diferencia del mapa de 1993, el arroyo afluente al Río Agrio no está incluido.

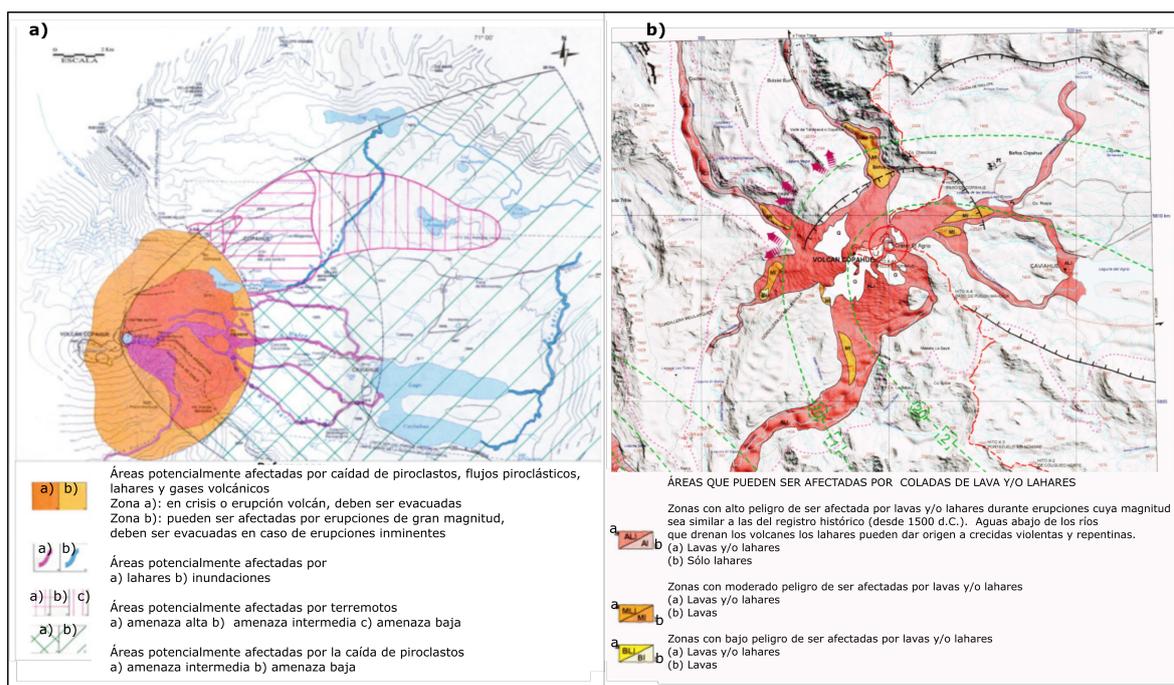


Figura 3.7: Mapas de amenazas. a) Mapa de Delpino y Bermudez (1993). b) Mapa de Naranjo et al. (2000) para el SERNAGEOMIN

4.1. Topografía digital

En la creación de los MDS se emplearon las bandas pancromáticas nivel L1A de escenas SPOT-5 y SPOT-7, adquiridas sobre el volcán Copahue. Las imágenes SPOT-5 (~ 5.6 m de resolución horizontal) son siete escenas individuales adquiridas los días 05, 07, 11 y 12 de diciembre de 2014, y 07, 12 y 16 de enero de 2015. Las mismas fueron combinadas en seis pares estéreo (C1 a C5) según dos criterios: (a) las fechas de adquisición son lo más cercanas posible, a fin de disminuir el ruido por cambios en cubiertas de nieve, vegetación o cenizas, y (b) la diferencia absoluta entre los ángulos de visión de las escenas es $\geq 24^\circ$, necesaria para crear un modelo de estereogramétrico. Las imágenes SPOT-7 corresponden a un triplete estéreo adquirido en febrero de 2018, de ~ 1.5 m de resolución horizontal conformado por escenas Forward, Nadir y Backward. Tanto las imágenes SPOT-5 como las SPOT-7 fueron procesadas en el programa AMES Stereo Pipeline (ASP) versión 2.6.1 [96]. Para la corrección de los modelos se emplearon los programas IDL+Envi y SAGA Gis.

4.1.1. Pruebas en AMES Stereo Pipeline

Con la finalidad de definir una metodología, se estudiaron diferentes secuencias de procesamiento con el primer tile del triplete SPOT-7. Primero, se definió una secuencia básica de procesamiento con algunas pruebas iniciales. Luego se efectuaron once pruebas repartidas en tres rondas de ensayos, con modificaciones a dicha metodología. De cada ronda de ensayos, se fueron escogiendo los mejores parámetros y opciones para construir una metodología adecuada de procesamiento (ver Código en Anexo B).

La secuencia de procesamiento básica cuenta con seis pasos. Primero, se efectúa una proyección de las imágenes sobre un MDS de baja resolución (herramienta *map_project*, detalles en Tabla 2.1). Segundo, se genera una nube de punto a partir de las imágenes proyectadas,

que ingresan en orden Nadir-Backward-Forward (NBF; herramienta *stereo* detalles en Tabla 2.1). Tercero y cuarto, se repite el paso dos pero con las imágenes ordenadas Backward-Nadir-Forward (BNF) y Forward-Nadir-Backward (FNB), respectivamente. Quinto, se fusionan las tres nubes en un única (herramienta *pc_merge*, detalles en Tabla 2.1). Finalmente, se genera un MDS a partir de una nube de puntos fusionada (herramienta *point2dem*, detalles en Tabla 2.1). Los pasos tres a cinco producen nubes de puntos distintas porque la correlación es sensible al orden de las imágenes.

En la primera ronda de ensayos se analizaron qué MSD de proyección proveen mejores resultados: uno creado con las imágenes o un producto ya disponible. Así se efectuaron dos pruebas, T01 y T02, con la secuencia básica. No obstante, en T01 las imágenes se proyectaron sobre un MDS de 90 m creado con el mismo tile, y en T02 se utilizó SRTM 90 m (versión 3) (Figura 4.1, Tabla 4.1). El MDS de 90 m se creó a partir de una nube de puntos sin fusionar, obtenida con las imágenes ordenadas NBF.

En la segunda ronda se estudiaron combinaciones de Ventana de Correlación (VC) y Ventana de Refinamiento Sub-píxel (VSb-px), que controlan la etapa de correlación, mediante cinco pruebas (T03 a T07). Los tamaños de VC y VSb-px probados son 11x11, 15x15 y 21x21 píxeles (Figura 4.1, Tabla 4.1). Aquí, se efectuó un ajuste de las efemérides ó “cámaras” (herramienta *bundle_adjust* en Tabla 2.1), antes de los pasos de la secuencia básica. Además, las imágenes fueron proyectadas sobre SRTM 90 m.

En las últimas pruebas (T08 a T11), el procesamiento incluyó: ajuste de efemérides, proyección sobre SRTM 30 m (versión 3) y una combinación de VC y VSb-px de 15x15 y 21x21 píxeles, respectivamente (Figura 4.1, Tabla 4.1). En las pruebas T08 y T11, el ajuste se efectuó sin puntos de control en el terreno (GCP) y la proyección se realizó sin y con el modelo de ajuste, respectivamente. Mientras, en T09 y T10 se efectuaron ajustes de cámaras con GCP creados manualmente, seguido de proyecciones sin y con el modelo de ajuste. Como GCP se escogieron 8 puntos en intersecciones de carreteras y puentes, cuyas coordenadas fueron tomadas de Google Earth y sus elevaciones de SRTM 30 m.

4.1.2. Modelos con SPOT-5 y SPOT-7

En base a los ensayos, se estableció una metodología de procesamiento para el triplete SPOT-7 en siete pasos empleando los mismos parámetros-opciones que la prueba T08 (Figura 4.2, ver Código en Anexo C). En un principio, se aplicó dicha metodología a cada tile del triplete generando 8 modelos, con el objetivo de fusionarlos en un único modelo final. Dicha aproximación falló ya que, sistemáticamente, se presentaron los siguientes problemas: (i) modelos con desplazamientos en sentidos horizontal y vertical (elevaciones negativas), (ii) inconsistencias entre las nubes de puntos, que conducen a una mala representación de la topografía, y (iii) la correlación. Dado que los últimos dos problemas no pudieron ser corregidos, se optó por aplicar la metodología a las escenas completas (no a los tiles). Si bien la última aproximación implicó triplicar el tiempo de procesamiento, permitió crear un MDS de 5 m.

La metodología de SPOT-7 fue adaptada al caso de los pares SPOT-5, con un procesamiento que incluye dos instancias (Figura 4.2, ver Código en Anexo C). En la primera instancia, cada par fue procesado individualmente. En la generación de las nubes de puntos, se ingresó primero la escena de menor ángulo de visión (cercana al Nadir). Como resultado se obtuvieron cuatro nubes de puntos y sus correspondientes MDS (15 m), exceptuando el par C4 para

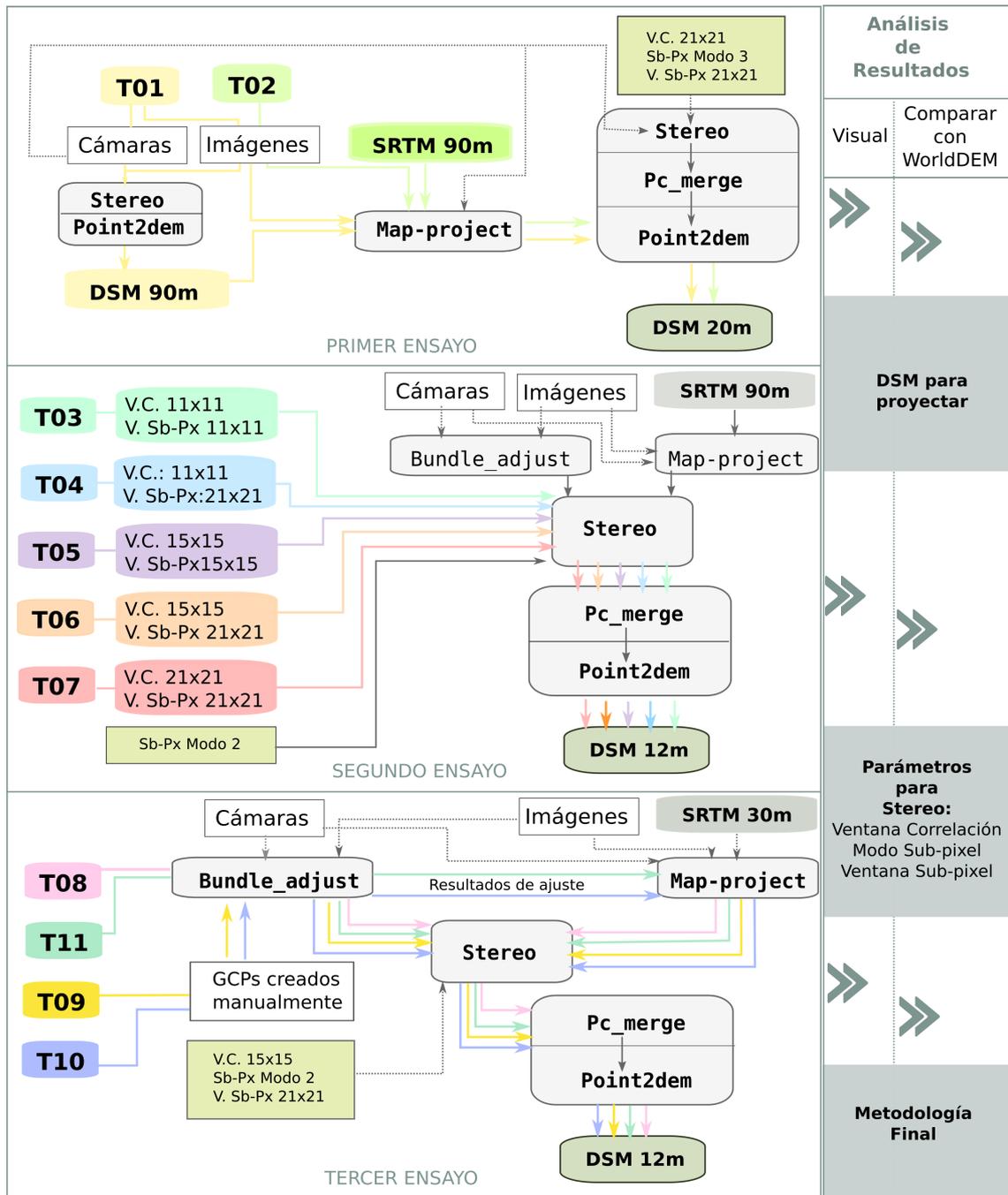


Figura 4.1: Ensayos llevados a cabo en ASP. A la derecha se muestran las secuencias de procesamiento, identificando con colores las opciones/pasos exclusivos de cada prueba. A la izquierda, se muestran las opciones y parámetros seleccionados como apropiados para la ronda de ensayos siguiente

el cual la correlación falló. En la segunda etapa, se combinaron distintas nubes de puntos, con la finalidad de disminuir el ruido. Para lo cual, las nubes de puntos fueron alineadas y luego fusionadas. Así, se generaron tres nubes de puntos según las combinaciones C1-C2-C3, C1-C2-C5 y C1-C3-C2-C5, y sus correspondientes MDS (15 m).

Tabla 4.1: Secuencias de procesamiento en AMES Stereo Pipeline. *DSM 90 m* se refiere al modelo creado en base a las imágenes, *RA* a los resultados de ajuste, *Modo* al algoritmo de refinamiento sub-pixel y *RS* a la resolución horizontal del modelo final en metros

Test	Ajuste cámaras		Proyección				Generación de PC			RS(m)
	✓/✗	GCP	RA	DSM 90 m	SRTM 90 m	SRTM 30 m	VC	Modo	VSb- px	
T01	✗			✓			21	3	21	20
T02					✓					
T03	✓	✗	✗				11	2	11	12
T04							11		21	
T05							15		15	
T06							15		21	
T07							21		21	
T08	✓	✗	✗				15	2	21	
T09		✓	✗							
T10		✓	✓							
T11		✗	✓							

4.1.3. Evaluación de calidad

Todos los MDS generados (prueba, finales) fueron evaluados cualitativa y cuantitativamente. La evaluación cualitativa corresponde a la inspección visual de los productos en términos de ruido, representación del relieve y comparaciones entre ellos. Mientras, en el análisis cuantitativo fueron comparados con WorldDEMTM 12 m (*error medio* ± *desvío*: 1.37 ± 0.94 m, error lineal con 90 % de confianza 2.06 m, raíz del error medio cuadrado: 1.68 m; validación con altímetro ICESat, ver Anexo A) proveído por la Empresa Airbus Space & Defence.

En la comparación, todos los modelos fueron llevados a alturas elipsoidales sobre el datum WGS84 (del inglés *World Geodetic System 1984*). Para comparaciones con SPOT-5, se redujo la resolución de WorldDEM a 15 m con el método de interpolación bilinear. Con SPOT-7 (pruebas, final), de las nubes fusionadas se crearon MDS de 12 m de resolución. Luego, se computó la diferencia de altura Δh entre WorldDEM y cada modelo ($\Delta h = h_{WorldDEM} - h_{DSM}$).

De la diferencia de altura se obtuvieron la media ($\overline{\Delta h}$), la media absoluta ($|\overline{\Delta h}|$), el desvío estándar (σ ; Ec. 4.1), la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE, del inglés *Root-Mean-Square Error*; Ec. 4.2) e histogramas [31, 97].

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_1^n (\Delta h_n - \overline{\Delta h})^2}{n}} \quad (4.1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (\Delta h)^2}{n}} \quad (4.2)$$

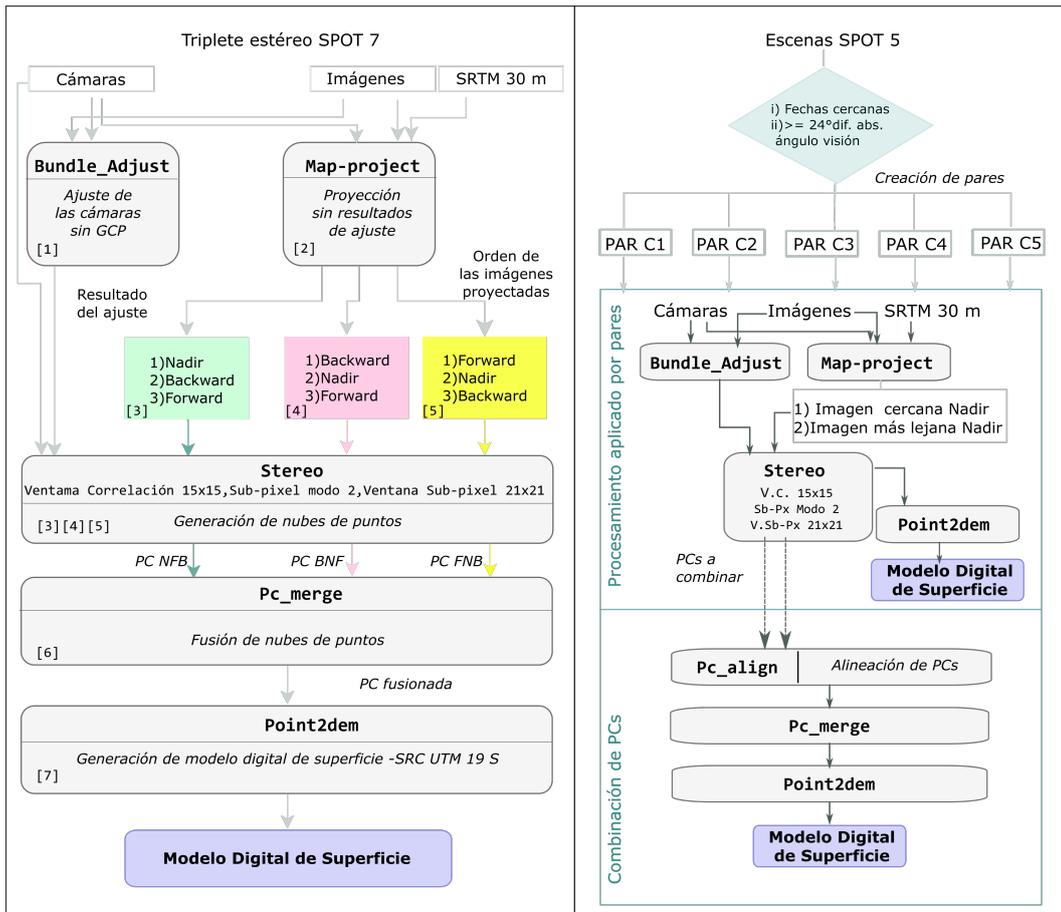


Figura 4.2: Metodologías de procesamiento para la generación de modelos digitales de superficie con SPOT-7 (izquierda) y SPOT-5 (derecha). En negrita se indican las herramientas del programa AMES Stereo Pipeline utilizadas y sus parámetros

4.1.4. Correcciones

En base a los análisis de calidad, se escogió el modelo SPOT-7 como adecuado para aplicaciones posteriores. Por lo cual, fue corregido mediante dos operaciones: (i) aplanado de cuerpos de aguas y (ii) relleno de vacíos.

La operación de aplanado se llevó a cabo en el programa IDL+ENVI y consistió en copiar el valor mínimo dentro de cada cuerpo de agua, a todos los pixeles comprendidos en ellos. Para asistir al aplanado se creó una máscara binaria de cuerpos de agua con información oficial del estado argentino (Insituto Geográfico Nacional IGN,[98]) y chileno (Sistema Nacional de Coordinación de Información Territorial SNIT, [99]).

En tanto, el relleno de vacíos se efectuó con la herramienta *close gaps* del programa SAGA GIS.

4.2. Simulaciones con LAHARZ

Las simulaciones de área inundada por lahares se realizaron con la herramienta LAHARZ_py [45], que corre en el programa ArcMap (ArcGIS). En las mismas se emplearon cinco MDS: SRTM 30 m (versión 3), AW30M 30 m, ASTER 30 m, WorldDEM 12 m y SPOT-7 5 m (Tabla 4.2). En tanto los modelos SPOT-5 fueron descartados por sus bajas calidades (ver Resultados).

4.2.1. Análisis de sensibilidad

En el análisis de sensibilidad de LAHARZ, se efectuaron simulaciones de áreas por inundación de lahares con puntos de inicio y volúmenes comunes sobre los MDS AW30M, ASTER, SRTM y WorldDEM (Tabla 4.2).

Se definieron cuatro puntos de inicio sobre cauces con reportes de depósitos (*PS*: punto sensibilidad, Figura 4.3). Sus ubicaciones coinciden con caídas de pendientes, cambio de dirección del cauce, confluencia de arroyos o combinaciones de las anteriores (Tabla 4.3). Para los mismos las relaciones H/L (caída vertical/escorrentía horizontal) se encuentran en el rango de 0.2-0.3 (Tabla 4.3).

Respecto a los volúmenes, se tomaron ocho valores comunes a todos los puntos entre 1.00×10^4 m³ y 2.00×10^6 m³. Desde PS1 y PS3 se simularon cinco volúmenes más entre 5.00×10^6 m³ y 3.00×10^7 m³, para estudiar la posibilidad de alcanzar las ciudades de Cavihue y Copahue.

Las áreas inundadas resultantes fueron comparadas en formato ráster. La resolución de las áreas para WorldDEM se redujeron a 30 m por el método del vecino más cercano. Finalmente se obtuvo el porcentaje de pixeles detectados conjuntamente a iguales volúmenes y punto de inicios.

Tabla 4.2: Características de los modelos digitales de elevación utilizados en simulaciones preliminares. *RS*: resolución, *Adq.*: período de adquisición de los datos

DSM	Tipo	RS (m)	Acq.	Desarrollo	Fuente	Notas
AW30M	Óptico	30	2006-2011	JAXA	https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/	Libre
ASTER	Óptico	30	2000-2008	NASA, METI	https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp	Libre
SRTM	SAR banda C	30	2000	NASA, DRL, AGN, ASI	https://earthexplorer.usgs.gov/	Libre
WorldDEM	SAR banda X	12	2011-2015	DRL, Airbus	https://worlddem-database.terrasar.com/	Comercial
SPOT-7	Óptico	5	2018	Viotto	-	-

Tabla 4.3: Parámetros para simulaciones con LAHARZ. Sistema de coordenadas (X,Y) UTM -Zona 19 Sur. V: volumen, H/L: caída vertical/distancia de escorrentía horizontal.

	Punto	Coordenadas		H/L	Notas
		X	Y		
<i>Sensibilidad</i>	PS1	312837,00	5808350,60	0,20	Cambio dirección en Agrio Superior
	PS2	311844,60	5805997,20	0,33	1 ^{ra} caída pendiente en Lomín
	PS3	311661,93	5809616,45	0,30	Caída de pendiente, confluencia de arroyos
	PS4	309531,10	5810079,40	0,20	Caída de pendiente, confluencia de arroyos
<i>Escenario</i>	PA1	311666,01	5808500,78	0,36	Río Agrio Superior
	PA2	311447,59	5808786,32	0,31	Afluente al río Agrio Superior
	PL1	310876,10	5807535,19	0,34	Afluente del río Lomín
	PL2	310747,09	5807481,20	0,33	Afluente del río Lomín
	PLM	310664,06	5808519,99	0,33	Afluente a Laguna Las Mellizas Sup.
	PQ1	309651,18	5809331,17	0,28	Afluente al río Queuco
	PQ2	308599,12	5809715,37	0,25	Afluente al río Queuco
	PQ3	308231,22	5809287,34	0,23	Afluente al río Queuco
PQ4	307259,43	5809111,88	0,20	Afluente al río Queuco	

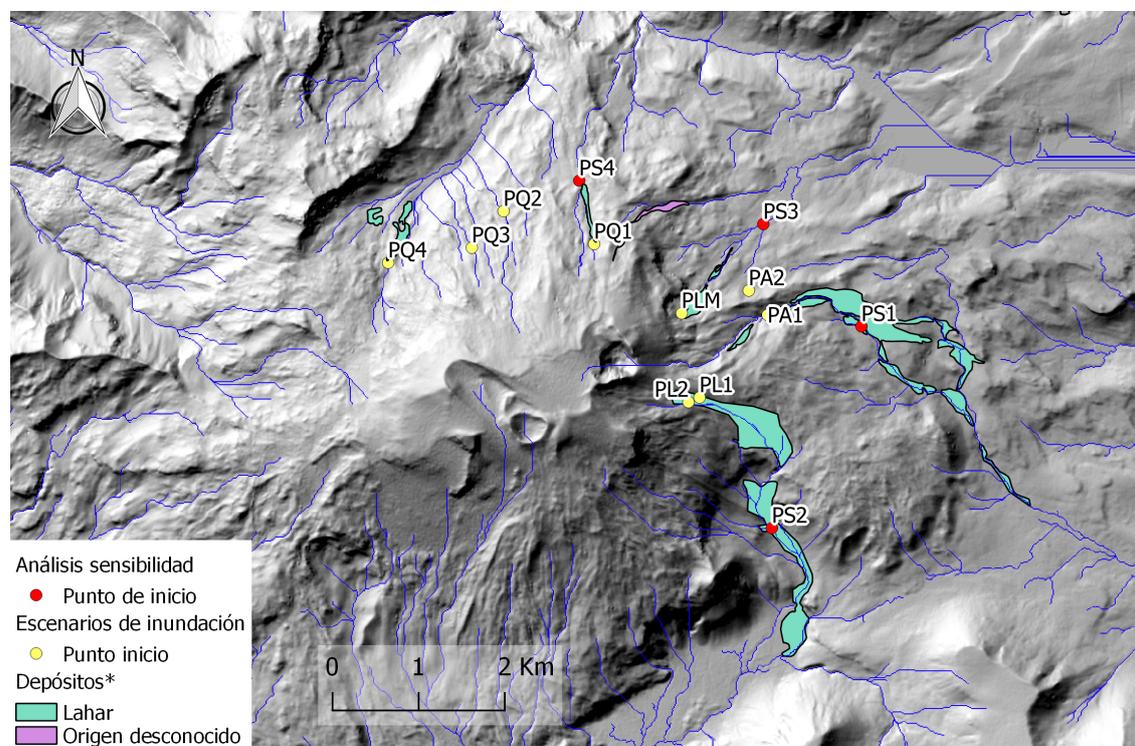


Figura 4.3: Localización de los puntos de inicio para el análisis de sensibilidad (amarillo) y el escenario de inundación (rojo)

4.2.2. Escenarios de inundación de lahares

Se asume como escenario de generación al más probable desde el punto de vista del registro geológico y ejemplos históricos, con lahares syn-eruptivos coetáneos a erupciones de VEI 1-2. Para asegurar una adecuada provisión de agua, las erupciones tendrían lugar durante los meses de abril y octubre con la máxima cobertura de hielo. En dicho escenario el agua es liberado por fusión de la cubierta de nieve, por interacción con columnas piroclásticas y/o de vapor.

De acuerdo con la sensibilidad del método LAHARZ a la resolución, en las simulaciones finales se emplearon los Modelo Digital de Superficies (MDSs) WorldDEM (12 m) y SPOT-7 (5 m).

Se definieron nueve puntos de inicios en los flancos oriental, norte y occidental del volcán (Figura 4.3, Tabla 4.2). Ellos se ubicaron sobre los cauces o afluentes de los ríos Agrio (*PA*), Lomín (*PL*) y Queuco (*PQ*), y la laguna Las Mellizas Superior (*PLM*). A excepción de PA2, los puntos coinciden con la primera intersección (aguas arriba) entre cauces y sus respectivos depósitos de lahares. Es importante destacar que mediante análisis de imágenes satelitales sólo pudo observarse los depósitos asignados a lahares en PA1, PL1, PL2, PLM, PQ1 y PQ4, mientras que para PQ2 y PQ3 se emplearon depósitos señalados en mapas [19, 28, 85]. Respecto al punto PA2, fue posicionado en un área de amenaza por lahares según los mapas de peligros volcánicos de 1993 y 2000 (Figura 3.7, [75, 100]) y sus coordenadas coinciden con la primera gran caída de pendiente; no hay reporte de lahares para el mismo.

Los volúmenes simulados corresponden a 10^x m^3 con x de 4.00 a 7.50 e incrementos de $\Delta x=0.35$, que resultan en $1.00 \times 10^4 \text{ m}^3$, $2.24 \times 10^4 \text{ m}^3$, $5.01 \times 10^4 \text{ m}^3$, $1.12 \times 10^5 \text{ m}^3$, $2.51 \times 10^5 \text{ m}^3$, $5.62 \times 10^5 \text{ m}^3$, $1.26 \times 10^6 \text{ m}^3$, $2.82 \times 10^6 \text{ m}^3$, $6.31 \times 10^6 \text{ m}^3$, $1.41 \times 10^7 \text{ m}^3$ y $3.16 \times 10^7 \text{ m}^3$. El incremento de volumen (Δx) se escogió considerando los errores estadísticos intrínsecos para el cálculo de las áreas planimétricas (0,28) y transversales (0,344) [5, 66], tomando un valor representativo de ambos igual a 0.35. El uso de incrementos que consideran el error del método permite visualizar las barras de error en forma de zonas de peligro anidadas, es decir que el área inundada para cada volumen es igual a la que se simuló \pm las áreas de peligro mayor y menor [66].

Conforme a las áreas planimétricas, se determinaron los volúmenes necesarios para alcanzar las comunidades argentinas de Copahue y Caviahue, y el centro de aguas termales Las Máquinas. Como así también para los asentamientos chilenos sobre el margen del Río Queuco (Butalebún, Trapa Trapa, Queuco, Cañicu, etc.) y la comunidad El Barco en las riberas del Río Lomín.

5.1. Topografía digital

5.1.1. Pruebas en AMES Stereo Pipeline

Los once MDS creados durante la etapa de pruebas con el primer tile de SPOT-7, resultaron en modelos de calidad variable dependiendo el tipo de procesamiento aplicado.

Así, se obtuvo un mejor resultado al proyectar las imágenes sobre SRTM 90 m (T02) que al hacerlo sobre un MDS 90 m creado con las imágenes (T01). En términos estadísticos, se observó una disminución de los desvíos (σ) y las raíces del error cuadrático medio (RMSE) de ~ 11 m a ~ 9 m, mientras las medias $\overline{\Delta h}$ permanecieron en ~ 2.8 m (Tabla 5.1). Ambos modelos presentaron Δh histogramas de distribuciones normales y similares (Figura 5.1). La mejora en los parámetros estadísticos estuvo acompañada de una superficie más suave para T02 (Figura 5.1.b).

En tanto, las pruebas con ajuste de efemérides seguido de proyecciones sobre SRTM 90 m (T03 a T07, Figuras 5.1.c,5.1.d,5.1.e,5.1.f,5.1.g), mostraron similares valores en las diferencias de alturas referidas a WorldDEM ($\overline{\Delta h} \leq 12.5$ m, $\sigma \sim 10.4$ m y RMSE ~ 16 m; Tabla 5.1). Estos resultados sugieren que las variaciones implementadas en las Ventanas de Correlación y Refinamiento Sub-pixel, tuvieron baja influencia la representación de la topografía. En términos generales, se observó que valores muy pequeños de ambas ventanas producen texturas micro-rugosas, mientras valores grandes no preservan rasgos topográficos pequeños. Luego, una combinación de tamaños de ventanas de correlación y de refinamiento sub-pixel de 15x15 y 21x21 pixeles respectivamente (prueba T06) es la más adecuada, porque preserva pequeños rasgos topográficos sin incrementar significativamente el ruido y resulta en una disminución del error en términos de $\overline{\Delta h}$ y RMSE.

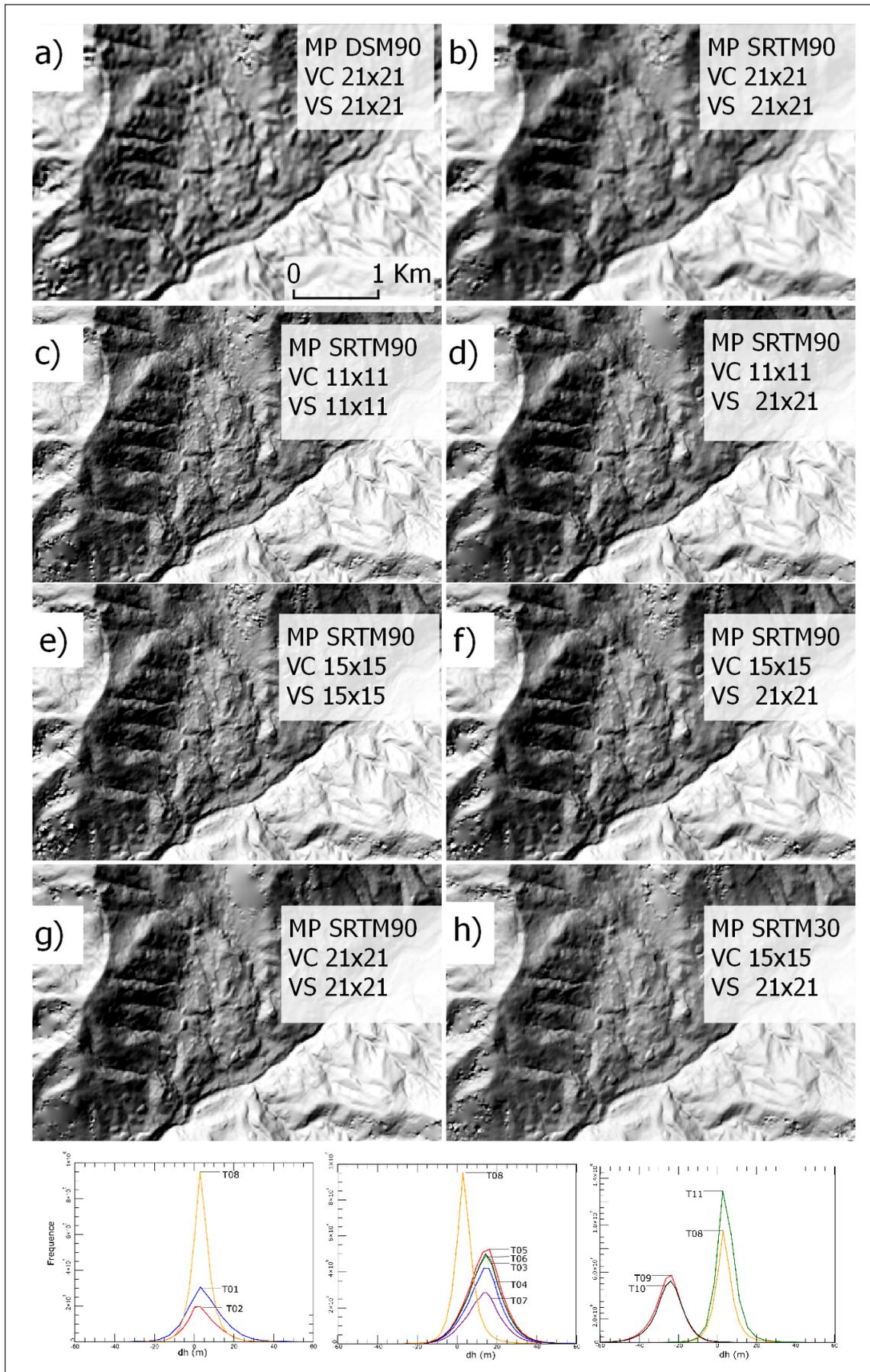


Figura 5.1: Pruebas en AMES Stereo Pipeline. a) T01, b) T02, c) T03, d) T04, e) T05, f) T06, g) T07 y h) T08. Abajo, los histogramas de las diferencias para todas las pruebas

Tabla 5.1: Comparación entre WorldDEM y los modelos digitales en base al primer tile de SPOT-7

MDS	$\overline{\Delta h}(m)$	σ (m)	RMSE (m)	MDS	$\overline{\Delta h}(m)$	σ (m)	RMSE (m)
T01	2,80	10,81	11,17	T08	2,27	6,50	6,89
T02	2,73	8,77	9,18	T09	-26,82	8,50	28,13
T03	12,40	10,26	16,09	T10	-26,10	8,60	27,48
T04	12,51	10,34	16,02	T11	2,40	6,70	7,18
T05	12,37	10,17	16,23				
T06	12,34	10,08	15,97				
T07	12,34	10,14	15,97				

En las últimas pruebas (T08 a T11), las diferencias de altura referidas a WorldDEM fueron variables, con oscilaciones de la media entre -27 y 2 m (Tabla 5.1). Así, las mayores diferencias absolutas se obtuvieron en aquellos modelos en los el ajuste fue llevado a cabo con puntos de control (T09, T10). Estos resultados sugieren que los puntos implementados son de baja precisión, puesto que no corresponden a mediciones relevadas con estaciones GPS diferencial. Por otra parte, el uso de los modelos de ajuste durante la proyección de las imágenes (T10, T11) modifica sutilmente las diferencias.

Finalmente, el modelo generado en la prueba T08 resultó en el más similar a WorldDEM con $\overline{\Delta h}$ 2.27 m, σ 6.50 m y RMSE 6.89 m (Figura 5.1.h, Tabla 5.1). Esto sugiere que la mejor metodología de todas las implementadas es aquella en la que: (1) se realiza un ajuste sin puntos de control, (2) la proyección se efectúa sobre SRTM 30 m, sin el modelo de ajuste y (3) se implementan las ventanas de correlación y refinamiento sub-píxel de 15x15 y 21x21 píxeles respectivamente.

5.1.2. Modelos con SPOT-5 y SPOT-7

Los MDS creados se denominan aquí según el par (C1, C2, C3, C5), combinaciones de pares (C123, C125, C1235) o triplete (SPOT-7) del que derivan. Los MDS SPOT-5 y SPOT-7 se muestran en la Figura 5.2. La Tabla 5.2 compila las estadísticas de resumen de Δh . Las distribuciones espaciales de la variable Δh y sus histogramas asociados en la Figura 5.3.

El análisis cualitativo muestra que los MDS SPOT-5 resultan comparativamente de inferior calidad que el MDS SPOT-7, puesto que los primeros exhiben patrones asociados a ruido más extendidos y/o una mala representación del relieve (Figuras 5.2). Así los MDS SPOT-5, especialmente C1, C2, C3 y C5, poseen micro/macro-rugosidades y/o patrones de rayas. Respecto a los rasgos topográficos, todos los MDS SPOT-5 exhiben una pobre representación del relieve y, contrariamente a lo esperado, la calidad disminuye al combinar pares de escenas. A modo de ejemplo, los cráteres y rasgos de las laderas del volcán Copahue son apreciables en los MDS C1, C3 y C5 pero no en los C1235, C123 y C125.

El análisis cuantitativo revela que la similitud entre WorldDEM y el MDS SPOT-7 es mayor a la que existe entre el primero y los MDS SPOT-5. Las distribuciones de dichas diferencias se muestran con una paleta de color, en azul zonas deprimidas y en rojo sobre-elevadas respecto a WorldDEM (Figura 5.3).

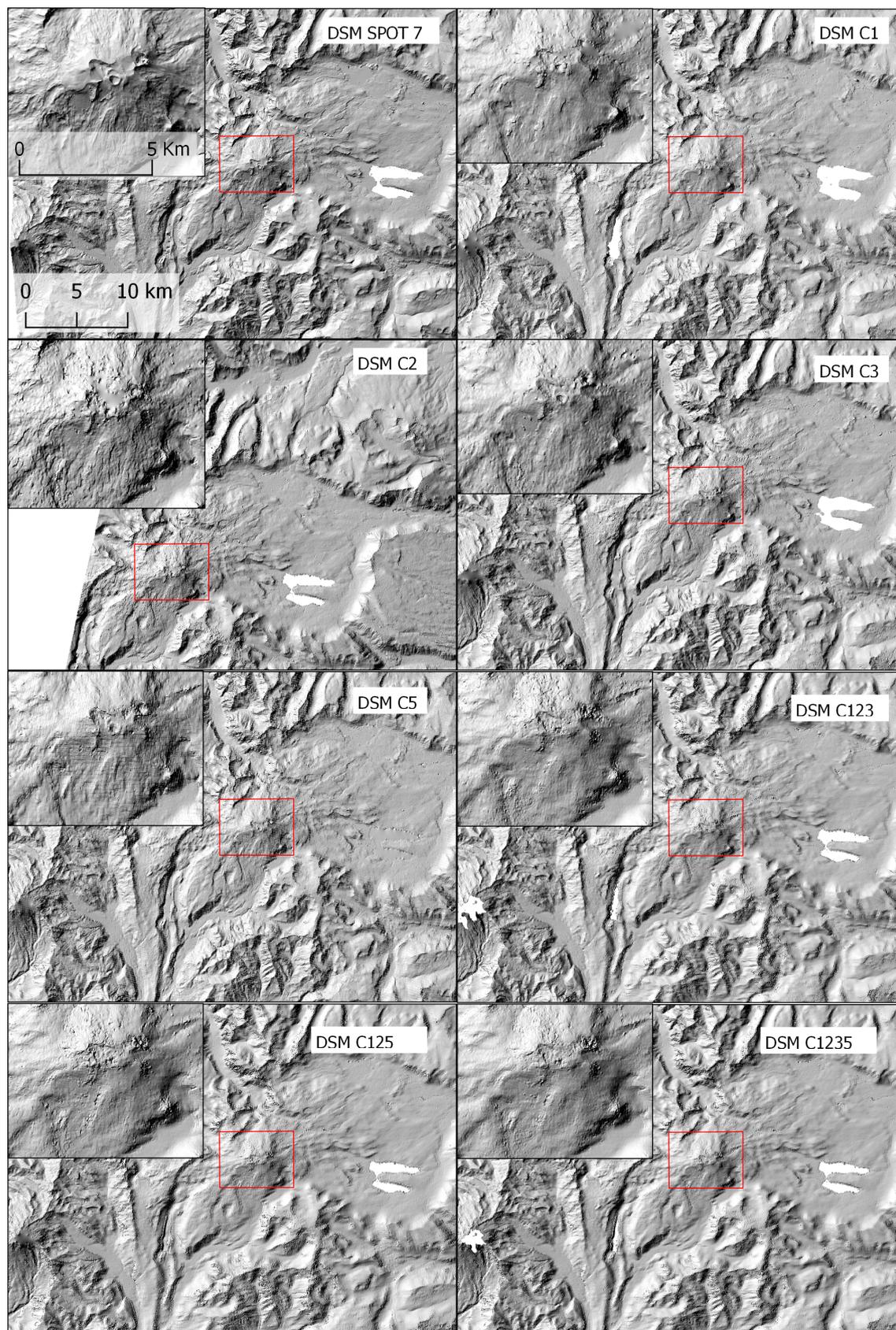


Figura 5.2: Modelos digitales de superficie con SPOT-5 (15 m de resolución) y SPOT-7, (re-muestreado a 12 m). Todos ellos carecen de correcciones. El rectángulo rojo muestra la posición del volcán Copahue

Tabla 5.2: Estadísticas de resumen de la diferencia (Δh) entre los modelos creados y el modelo de referencia

Imágenes	MDS	Min (m)	$\overline{\Delta h}(m)$	Max(m)	$\sigma(m)$	RMSE (m)	Notas	
SPOT-5	C1	-242,35	33,49	467,57	94,71	100,20	S/ combinar	
	C2	-481,71	-121,38	176,46	53,09	132,45		
	C3	-97,90	83,80	289,41	28,168	92,16		
	C5	-293,52	-93,20	119,68	51,02	104,94		
		C125	-365,50	-61,57	225,29	38,60	36,26	Combinados
		C123	-333,76	-17,40	276,55	34,46	38,46	
	C1235	-323,40	-20,83	262,93	29,82	36,26		
SPOT-7	SPOT-7	-338,60	0,67	363,73	4,82	4,82		

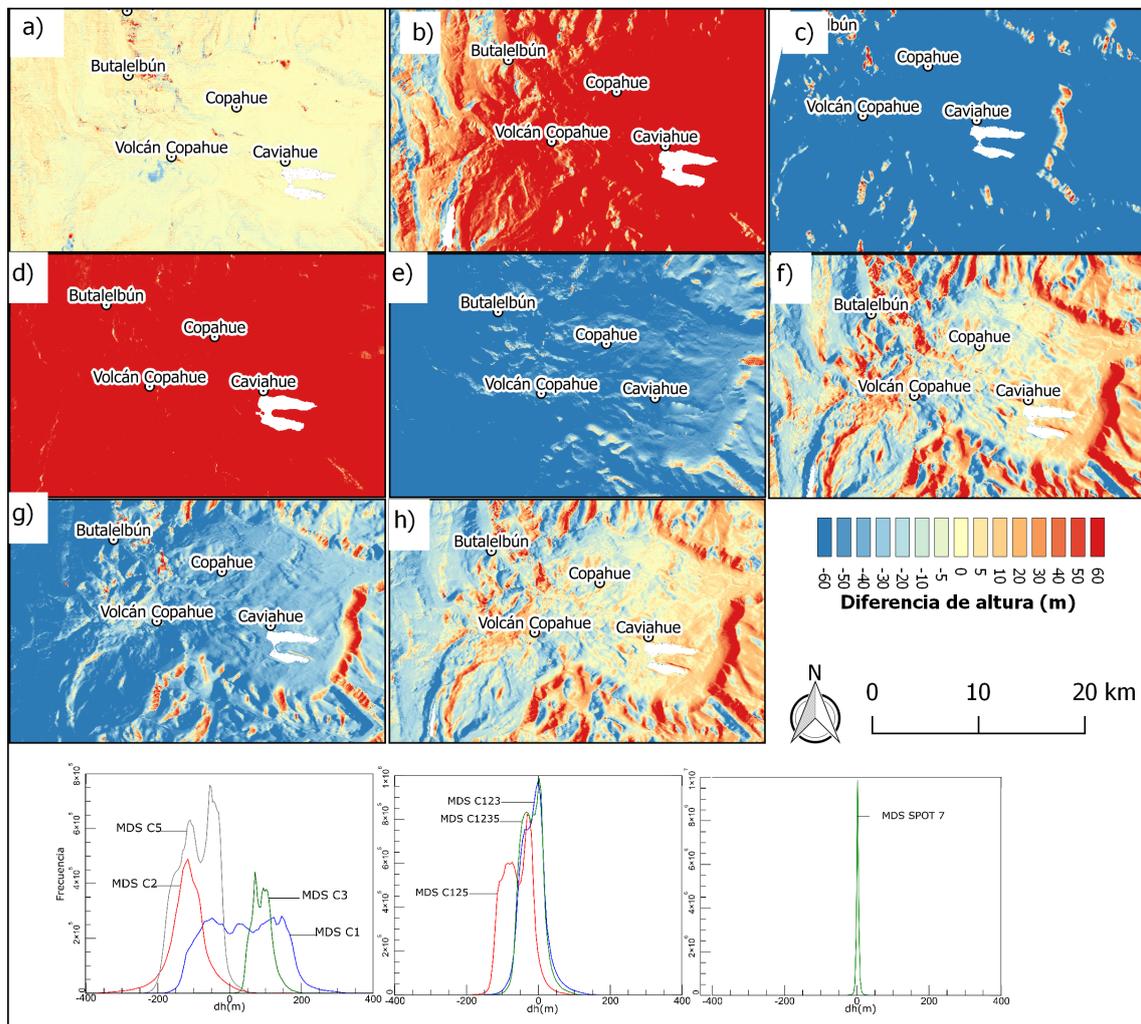


Figura 5.3: Distribuciones espaciales de las diferencias de altura para (a) SPOT-7, (b) C1, (c) C2, (d) C3, (e) C5, (f) C123, (g) C125 y (h) C1235, respecto de WorldDEM. Abajo, sus histogramas

Las diferencias entre el MDS SPOT-7 respecto del WorldDEM son <1 m, con $\overline{\Delta h} \sim 0.70$ m, desvío estándar σ y raíz cuadrada del error cuadrático medio RMSE, ambas de ~ 5 m (Tabla 5.2, Figura 5.3.a). En laderas de cara al Sur-este y Este el desnivel absoluto respecto

a WorldDEM puede alcanzar los 5 m, posiblemente en respuesta al fenómeno de acortamiento que suelen afectar a los modelos interferométricos como WorldDEM. En el flanco sur del volcán, se individualiza un sector con ~ 20 m por debajo de WorldDEM, coincidente con la ubicación de las cubiertas glaciales y nivales asociadas. Tal diferencia resulta lógica si se considera que las elevaciones registradas en el área por WorldDEM resultan de adquisiciones realizadas entre 2011-2015, y representan entonces una altura promedio de las cubiertas nivales y glaciales. En tanto el triplete SPOT-7 se adquirió en 2018 durante un mes con predominio de ablación glacial y ausencia de cubierta nival. Entonces la diferencia en elevación refleja el derretimiento estacional de la cubierta nival y posiblemente el retroceso de glaciares, fenómeno documentado en el área [101].

Las diferencias entre los modelos SPOT-5 respecto de WorldDEM superan en todos los casos los 20 m en valor medio absoluto, con desvíos estándares σ y raíces cuadradas del error cuadrático medio RMSE entre 25-100 m (Tabla 5.2). La magnitud de los desvíos σ se debe a una fuerte alternancia de valores positivos a negativos en la distribución de $\overline{\Delta h}$ (Figura 5.3). De este modo se observan tres tipos las fluctuaciones: las que afectan predominantemente las laderas como en los MDS C2, C3, C123 y C1235; las que generan gradientes latitudinales en los MDS C1 y C5, y combinaciones de las anteriores en los MDS C125, C123 y C1235.

Aquellas fluctuaciones que se localizan en laderas podrían ser explicados por fenómenos de acortamiento de WorldDEM, en tanto que los gradientes latitudinales podrían deberse a una deficiente caracterización de las efemérides satelitales SPOT-5 sumado a la ausencia de puntos de control en el terreno.

Las distribuciones espaciales de la variable Δh proveen un marco de referencia para el análisis de los histogramas asociados (Figura 5.3). Así el histograma Δh del MDS SPOT-7 es estrecho, con distribución normal y su media cercana a cero que se corresponde con el mapa de las diferencias Δh (Figura 5.3.a). En tanto, los histogramas $\overline{\Delta h}$ de los MDS SPOT-5 son más anchos y multi-modales con dos a tres modas, en respuesta a las fuertes desniveles observados en las distribuciones espaciales de $\overline{\Delta h}$ (Figura 5.3). Luego, a modelos con elevados gradientes latitudinales $\overline{\Delta h}$ como C3 y C5 se asocian histogramas con modas acentuadas. En términos generales, los MDS C123 y C1235 poseen histogramas más uniformes que los C1, C2, C3 y C5 indicando una disminución en los gradientes latitudinales (Figura 5.3).

En suma, un modelo puede ser considerado de alta calidad si presenta media $\overline{\Delta h}$, desvío estándar σ , raíz cuadrática del error cuadrado medio y rango máximo-mínimo pequeños, además de distribuciones normales de una moda ([102] en [97]) y una buena representación del relieve. Dado las altas precisiones del modelo WorldDEM (*error medio* $\pm \sigma$: 1.37 ± 0.94 m, error lineal con 90% de confianza 2.06 m, raíz del error medio cuadrado: 1.68 m, ver Anexo A) y considerando los aspectos anteriores, el MDS SPOT-7 ($\overline{\Delta h} \pm \sigma$: 0.67 ± 4.82 m, RMSE: 4.82 m, Rango: 762.30 m; medidos respecto a WorldDEM) es el más preciso en sentido vertical y el de mayor calidad. En el otro extremo, los modelos SPOT-5 presentan una menor precisión. Por lo tanto, solamente el modelo SPOT-7 resulta óptimo para aplicaciones posteriores.

Finalmente, los valores de $\overline{\Delta h}$ se asumen representativos para el MDS SPOT-7 sin corregir y la versión corregida dado que los píxeles modificados representan menos del 5% de los originales.

5.1.3. Discusión

El estudio de diferentes metodologías de procesamiento, es indispensable para generar modelos topográficos adecuados. Esto es especialmente cierto para el programa AMES Stereo Pipeline, puesto que está dotado de múltiples herramientas y opciones.

Las pruebas iniciales con el primer tile de SPOT-7 permitieron definir una secuencia de procesamiento, que resultó exitosa al aplicarla en la generación del modelo topográfico final con SPOT-7. No obstante, es importante destacar que dicha metodología podría proveer resultados aún mejores, si se dispone de puntos de control relevados en campo con GPS.

En el caso de SPOT-5, la adaptación y aplicación de dicha metodología no resultó exitosa. Los beneficios de los pasos ajuste de efemérides y proyección de las imágenes sobre un modelo topográfico, son conocidos [103]. Luego no se cree que los mismos sean los responsables de dichos resultados. Más aún, tampoco pueden ser explicados por las Ventanas de Correlación y Refinamiento Sub-pixel escogidas, puesto que mostraron tener un efecto más importante en la apariencia del modelo que sobre los parámetros estadísticos (Sección 5.1.1, pruebas T03 a T07). De cualquier modo, deberían efectuarse un mayor número de pruebas para comprobar que otra metodología se desempeñe mejor con las escenas SPOT-5.

Es importante destacar que no sólo la metodología influye, sino también la calidad del material de partida. Así, para el caso de las escenas SPOT-5 debe considerarse que: (i) no fueron adquiridas simultáneamente, y (ii) los datos originales no se superponen geográficamente. El primer punto implica que cambios de cobertura, a pesar de que al momento de combinar las escenas estas eran los más cercanas posibles. Estos cambios se observaron sobre el cráter activo del volcán y estarían relacionados con la emisión de pequeñas plumas de vapor durante esas fechas. Es más, dichas escenas fueron adquiridas en consecuencia a tal actividad registrada durante Diciembre/2014 y Enero/2015. La presencia de plumas permitiría explicar la pobre representación del edificio volcánico de Copahue, ya que deriva en una mala correlación de las escenas. Respecto al segundo aspecto, este debería ser solucionado mediante la realización del ajuste de efemérides. No obstante, si las últimas no son lo suficientemente exactas, tampoco lo serán los modelos de ajuste.

Luego, una combinación de una metodología no completamente satisfactoria al caso de aplicación y de una mala calidad del producto de partida, difícilmente puede conducir a un resultado exitoso. Esto no desmerece la metodología en sí, dado que sus buenos resultados quedaron demostrados con los modelos topográficos de SPOT-7.

Una última consideración debe hacerse sobre el modo de analizar los resultados, en especial a los modelos SPOT-7. En la Sección 5.1.2, la calidad del modelo de 5 m de resolución es evaluada indirectamente mediante otro de 12 m. Esto es necesario puesto que es el tamaño de pixel de la referencia, WorldDEM. Cuando se comparan modelos topográficos de distintas resoluciones, el de mayor resolución siempre es llevado al de menor. Dicho procedimiento está estandarizado y es común cuando se realizan otro tipo de validaciones, por ejemplo con las mediciones del altímetro ICESat [104, 105]. No obstante, el modelo SPOT-7 de 12 m de resolución indefectiblemente diferirá en propiedades al de 5 m, aunque es una buena aproximación a su calidad.

5.2. Simulaciones de áreas inundadas por lahares

5.2.1. Análisis de sensibilidad

Las áreas de inundación por lahares con LAHARZ obtenidas para los modelos WorldDEM, AW30M, SRTM y ASTER, con inicio en los puntos PS1, PS2, PS3 y PS4, se muestran en las Figuras 5.4, 5.5, 5.6 y 5.7.

Según las formulaciones de LAHARZ a cada volumen (V) ingresado le corresponden un único par de áreas planimétrica (B) y transversal (A). Por lo tanto, a iguales volúmenes las superficies ocupadas de los flujos simulados serán numéricamente equivalentes para distintos modelos topográficos. No obstante, una equivalencia numérica no implica que dichas áreas sean iguales en morfología. De este modo, las áreas planimétricas (B) resultantes revelaron diferencias en longitud, ancho y dirección.

Las diferencias en longitud se encuentran en todos los casos analizados, de modo que las áreas más extensas se obtienen de WorldDEM y de ASTER las más cortas (siempre que las trayectorias de los flujos coinciden). SRTM y AW30M, por otra parte, generan áreas de extensiones intermedias y prácticamente iguales entre sí. La magnitud de las diferencias es variable, dependiendo del volumen y el punto de inicio.

Para flujos que parten de los puntos PS1 y PS3, las áreas simuladas con SRTM, AW30M y WorldDEM tienen diferencias de longitud despreciables (<150 m). En tanto las áreas simuladas con ASTER cuyos flujos inician en PS1 y PS3, resultan 1 y 3 km más cortas respectivamente (Figura 5.5); además desde PS3 los flujos divergen respecto a la trayectoria de las obtenidas para los restantes modelos (Figuras 5.4 y 5.5). En tanto, las áreas planimétricas obtenidas con WorldDEM que inician en PS2 y PS4, superan en 2 a 3 km a las restantes, y con SRTM ó AW30M en ~ 1 km a las de ASTER (Figuras 5.6 y 5.7).

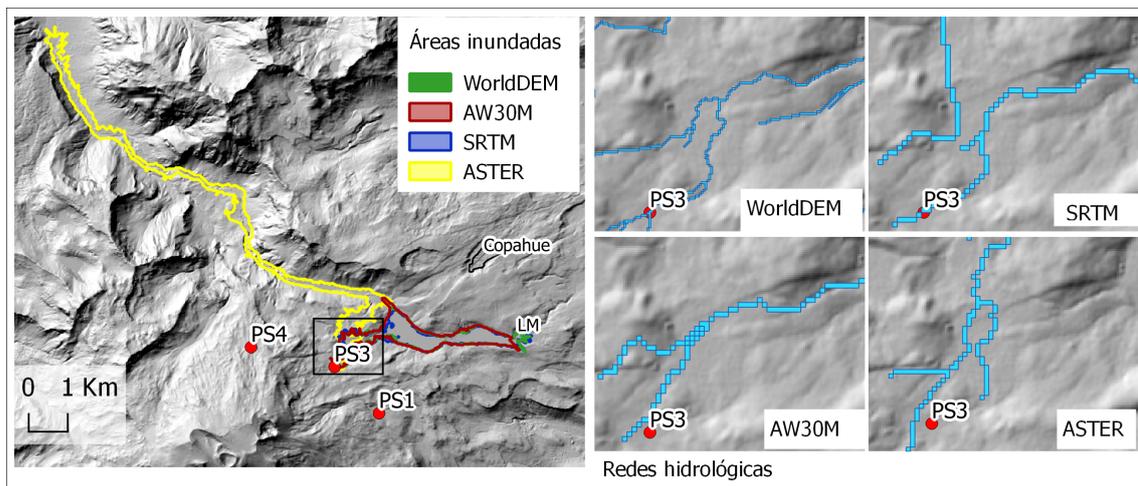


Figura 5.4: Áreas inundadas que inician en el punto PS3, con los modelos ASTER, AW30M, SRTM y WorldDEM (Volumen 1.00×10^6 m³)

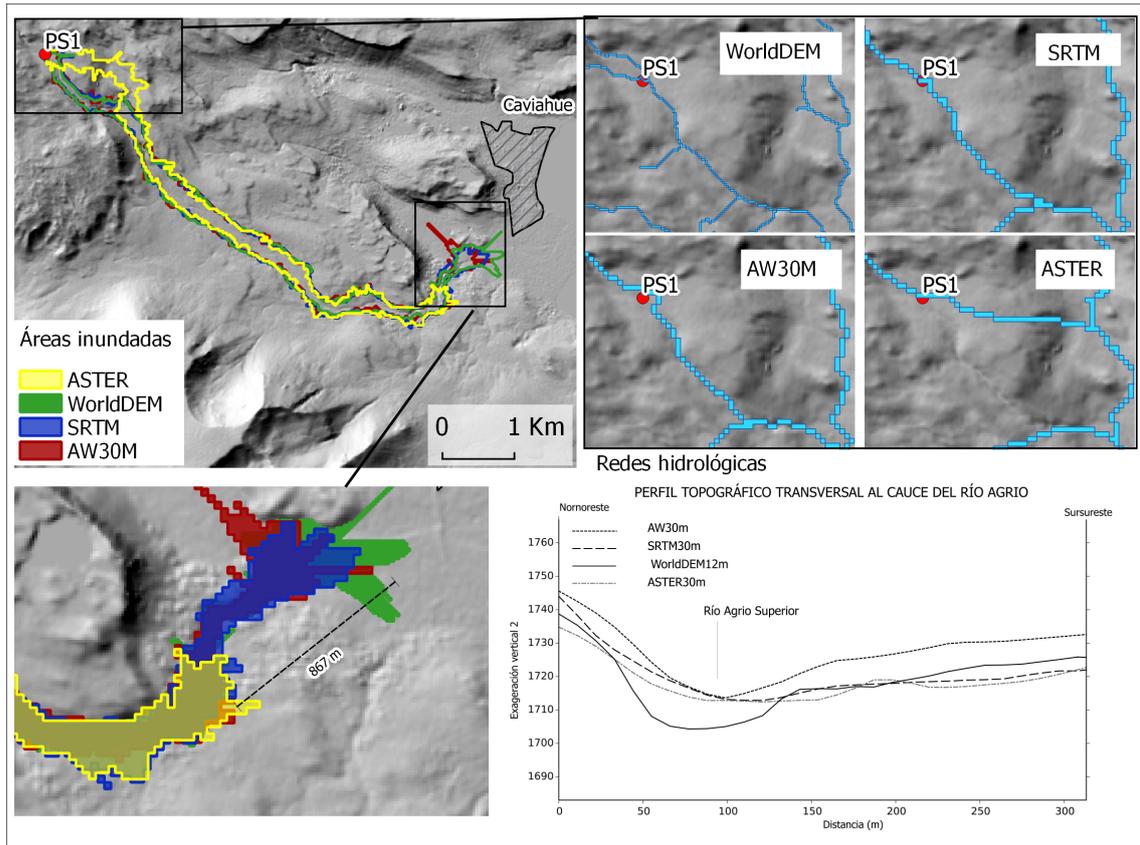


Figura 5.5: Áreas inundadas que inician en el punto PS1, con los modelos ASTER, AW30M, SRTM y WorldDEM (Volumen: $8.00 \times 10^5 \text{ m}^3$)

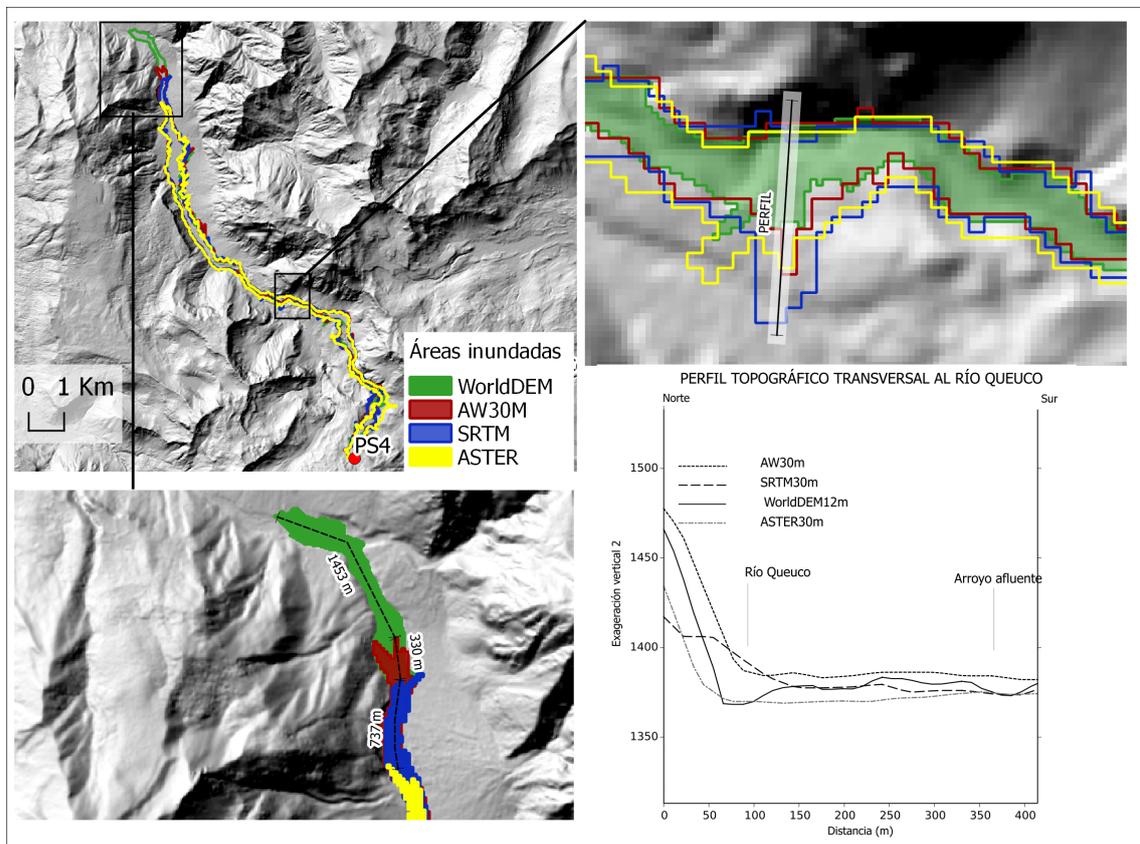


Figura 5.6: Áreas inundadas que inician en el punto PS4, con los modelos ASTER, AW30M, SRTM y WorldDEM (Volumen: $8.00 \times 10^5 \text{ m}^3$)

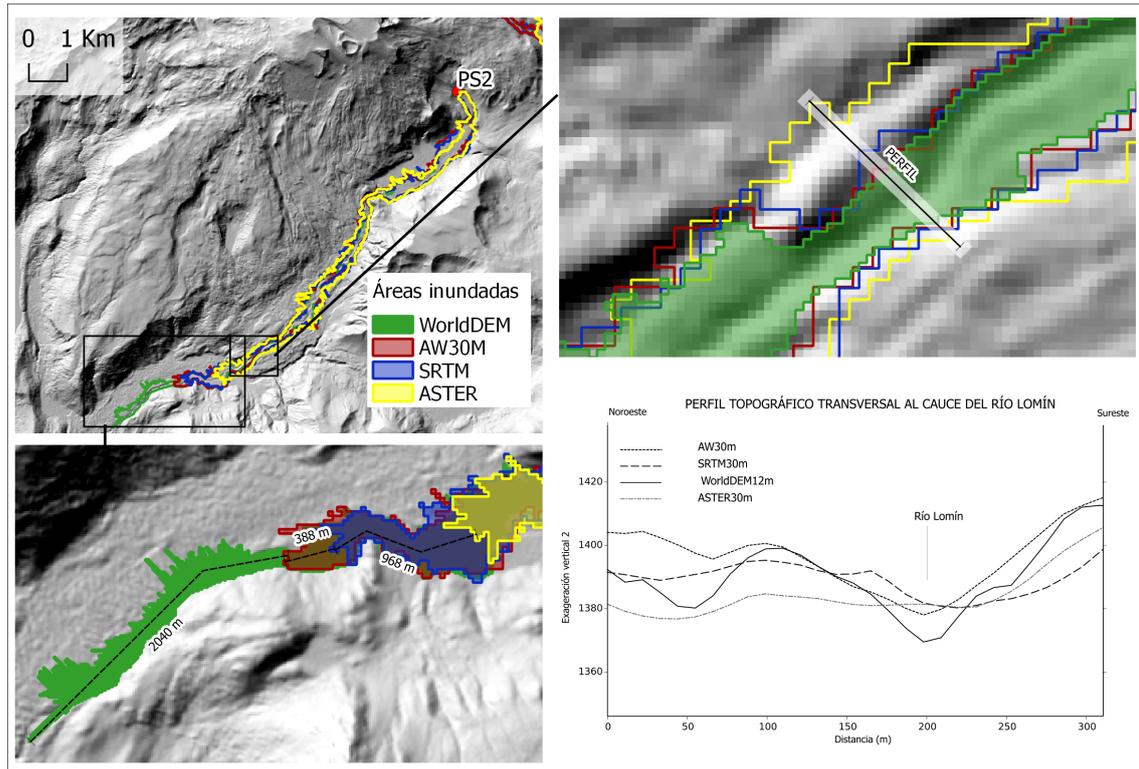


Figura 5.7: Áreas inundadas que inician en el punto PS2, con los modelos ASTER, AW30M, SRTM y WorldDEM (Volumen: $2.00 \times 10^6 \text{ m}^3$)

Las diferencias en ancho tienen una tendencia contraria a la observada en las longitudes: flujos más angostos se obtienen con WorldDEM, con SRTM y AW30M intermedios, y los más anchos con ASTER. Así las áreas para WorldDEM son 100 m a 300 m más estrechas que las de ASTER y casi 100 m más angostas que SRTM y AW30M. Se debe considerar que este comportamiento es variable y depende en última instancia de la sección analizada. Como regla general mientras mayor es la longitud de un flujo menor resulta su ancho. Por lo tanto, aquellas simulaciones con inicio en los puntos PS2 y PS4 producen flujos sobre WorldDEM mucho más angostos (y más largos) en relación a los restantes modelos, que en otros puntos.

Las diferencias en ancho se deben a la interacción entre el tamaño de pixel y la morfología de los valles. Por un lado las secciones transversales de valle son representadas en modelos de 30 m en resolución con menos de la mitad de los pixeles que en el modelo de 12 m y consecuentemente son más someros. Esa diferencia determina que al rellenarlas LAHARZ con iguales áreas transversales A, las mismas resulten aproximadamente 60 m más anchas para los modelos de 30 m que para el de 12 m. No obstante, esta diferencia lógica puede incrementarse hasta 300 m cuando las secciones transversales de los valles difieren considerablemente. Una menor profundidad sistemática en cauces y valles genera flujos de secciones más anchas y por ende de menor extensión (Figuras 5.5, 5.7 y 5.6).

Las divergencias en las trayectorias de los flujos simulados con ASTER responden a diferencias en las redes de drenaje. En el punto de inicio PS1, los arroyos afluentes del Río Agrío Superior se confunden entre sí (Figura 5.5) y en PS2 los arroyos siguen direcciones opuestas respecto a las redes hidrológicas de los modelos WorldDEM, AW30M y SRTM (Figura 5.4).

En suma, los resultados del análisis de sensibilidad muestra que el método LAHARZ es

altamente sensible a la resolución del modelo topográfico. A menores resoluciones, los volúmenes se consumen más rápido generando áreas planimétricas más anchas y menos extensas. Tal efecto explica las diferencias encontradas entre WorldDEM y los restantes modelos. Así mismo los resultados están condicionados por la calidad del modelo topográfico y por ende, por la forma en que las características topográficas son representadas. El MDS ASTER produce flujos que se mueven en direcciones distintas y/o son menos extensos producto de una la calidad del modelo. Las áreas inundadas obtenidas con este MDS coincidieron en un 44 %, 43 % y 37 % con las obtenidas utilizando SRTM, AW30M y WorldDEM, respectivamente. En contraste, las áreas de inundación simuladas con SRTM y AW30M coincidieron en un casi 80 %. Finalmente, las simulaciones con WorldDEM resultaron en áreas inundadas que coincidieron en casi un 70 % con los resultados obtenidos con AW30M y SRTM, respectivamente.

5.2.2. Escenario de inundación

La presente sección trata de las simulaciones de áreas inundadas por lahares desde el volcán Copahue, cuyas simulaciones con LAHARZ inician en depósitos ó, en el caso del punto PA2, la primera caída de pendiente (Figura 4.3). Las mismas fueron llevadas a cabo con los modelos WorldDEM y SPOT-7.

De acuerdo con los resultados, las simulaciones con ambos modelos topográficos se consideran equivalentes por: (i) concordancia en morfologías de las áreas inundadas, y (ii) las diferencias en extensión y ancho son despreciables, rondando los 200 y 50 m respectivamente. Por tal motivo, las áreas de inundación que se muestran corresponden a una combinación de los resultados para cada modelo.

Antes de analizar los resultados, debe considerarse que para un cierto volumen, el área inundada está dada por la calculada para el volumen y su error corresponde a las áreas para los volúmenes inmediatamente superior e inferior [66].

Las áreas inundadas que inician en los puntos PA1 y PA2 (flanco oriental), afectan a los Ríos Agrio Superior e Inferior, incluyendo el Lago Agrio (Figura 5.8.a). A volúmenes inferiores a $1.00 \times 10^5 \text{ m}^3$, las áreas inundadas se localizan sobre las laderas del volcán en respuesta a una morfología cóncava. Con un volumen de $1.26 \times 10^6 \text{ m}^3$, las áreas de inundación alcanzan el extremo sur de la comunidad de Caviahue. No obstante, tal área corresponde también al error superior del área de $5.62 \times 10^5 \text{ m}^3$. Luego, con lahares cuyo volumen oscilen entre $5.62 \times 10^5 \text{ m}^3$ y $1.26 \times 10^6 \text{ m}^3$, la comunidad sería inundada por lahares. Superado los $1.26 \times 10^6 \text{ m}^3$, las áreas llegan al Lago Agrio y el Río Agrio Inferior.

Las áreas inundadas iniciadas en el punto PLM afectan el sistema conformado por las lagunas Las Mellizas hasta alcanzar el Lago Del Rincón (Figura 5.8.e). Volúmenes de flujo inferiores a $1.00 \times 10^5 \text{ m}^3$, abandonan la ladera del volcán y se aproximan a la laguna Las Mellizas Superior (Figura 5.8.g). Ambas lagunas se ven inundadas si el volumen incrementa hasta alcanzar los $1.00 \times 10^6 \text{ m}^3$. Superado dicho umbral el complejo de aguas termales Las Máquinas, unos 5 km al NE del punto de inicio en línea recta, sería inundado por lahares. En tanto se requieren volúmenes superiores a $1.00 \times 10^7 \text{ m}^3$ para alcanzar el Lago Trolope y el borde septentrional de la caldera. El centro turístico de Copahue no está incluido dentro de las áreas afectadas, por encontrarse unos 100 m sobre-elevada respecto al cauce del arroyo Blanco.

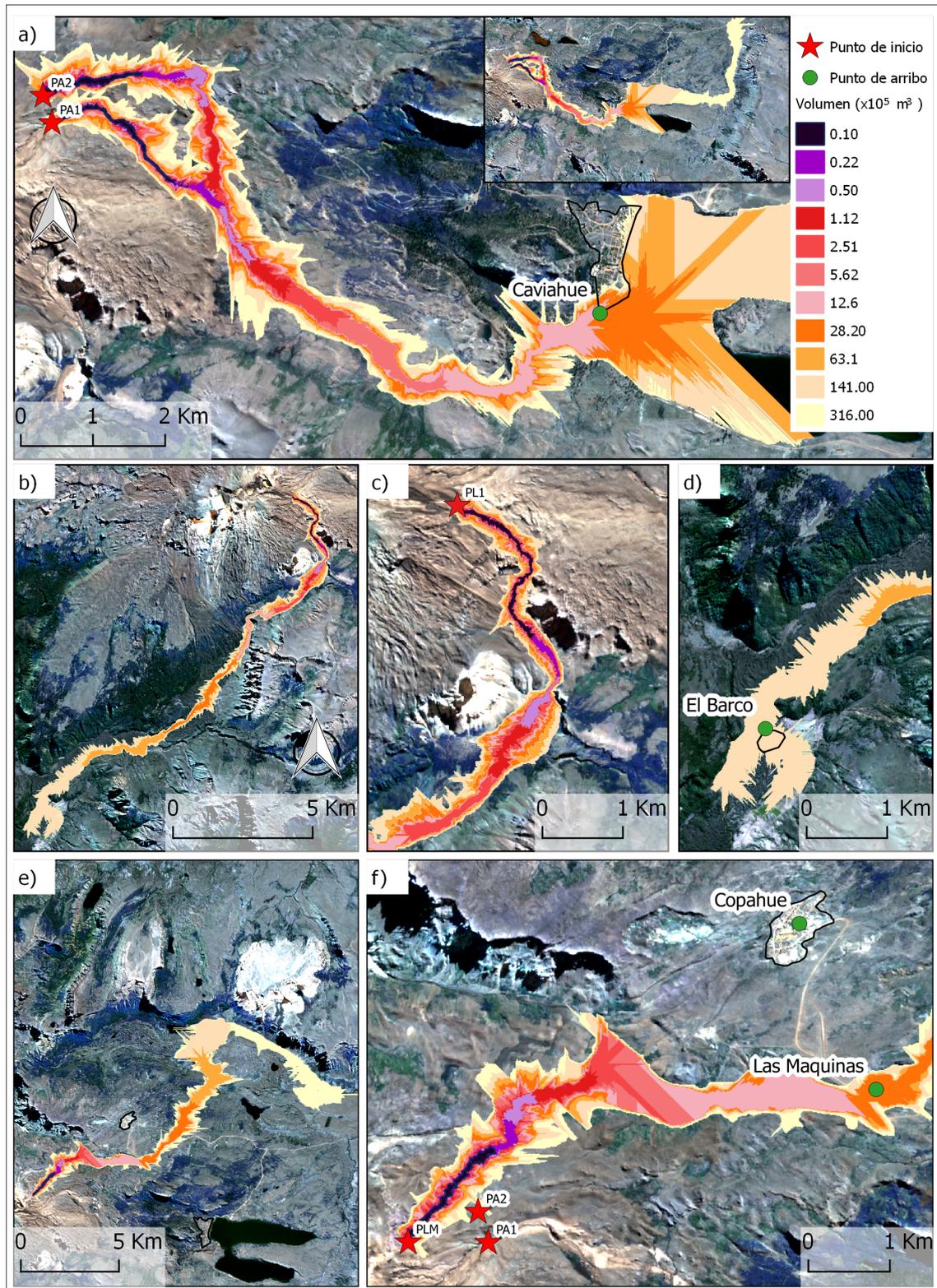


Figura 5.8: Áreas de inundación de lahares con LAHARZ. (a) Punto de inicio PA1 y PA2. (b), (c) y (d) Punto de inicio PL1. (e) y (f) Punto de inicio PLM

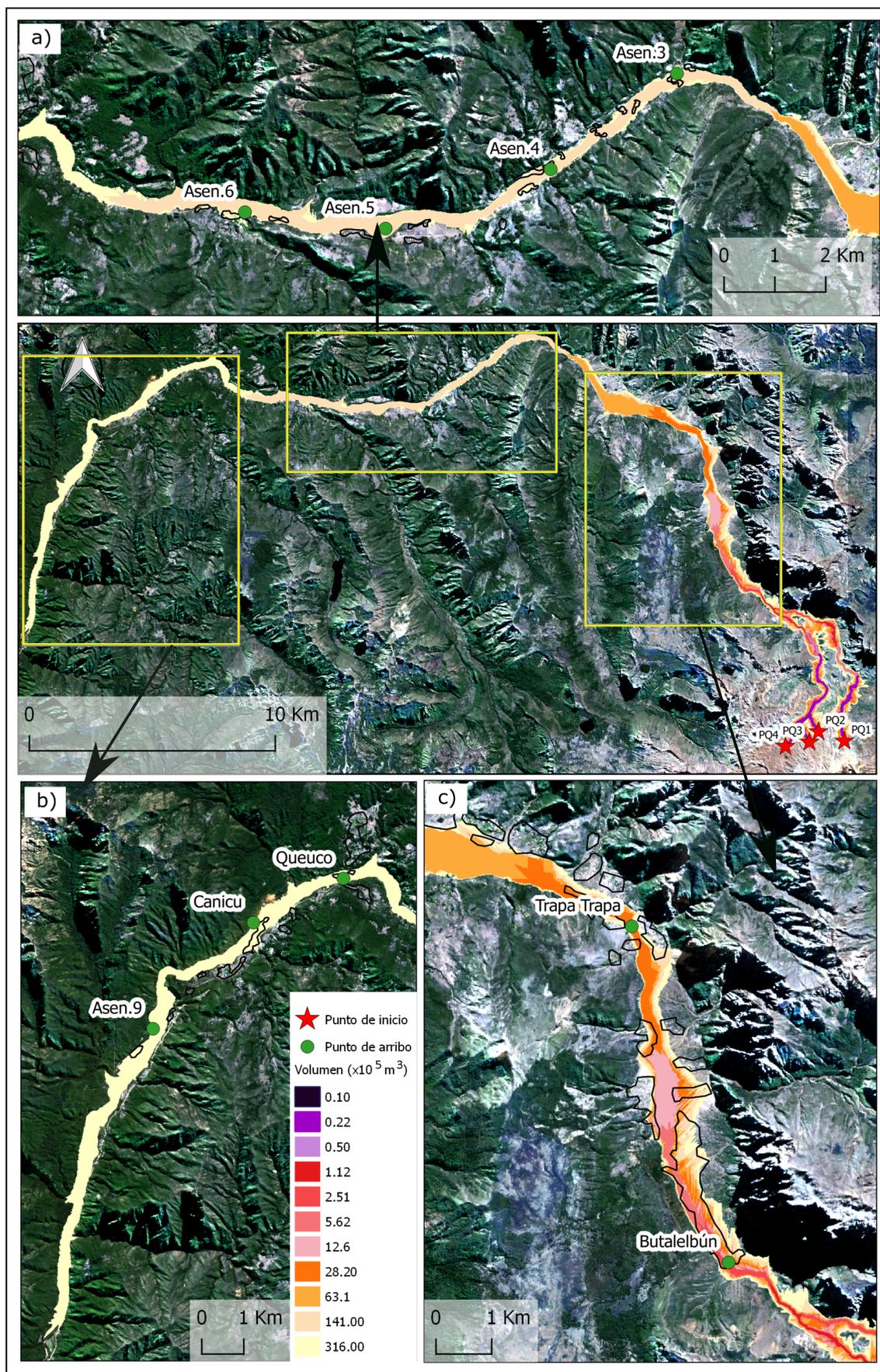


Figura 5.9: Áreas de inundación que inician en los puntos PQ1, PQ2, PQ3 y PQ4. Todas ellas fluyen por el valle del Río Queuco

En tanto, las áreas de inundación que inician en el punto PL1 resultan equivalentes a las que lo hacen en PL2. Todas ellas fluyen hacia el cauce del Río Lomín avanzando en dirección suroeste (Figura 5.8.b). A volúmenes inferiores a $1.00 \times 10^5 \text{ m}^3$, las áreas de inundación se aproximan a la base del volcán. Para alcanzar el poblado El Barco, se requerirían lahares de volúmenes entre $6.31 \times 10^7 \text{ m}^3$ y $1.40 \times 10^7 \text{ m}^3$.

Finalmente, las áreas de inundación que inician en los puntos PQ1, PQ2, PQ3 y PQ4, afectan el valle del Río Queuco (Figura 5.9). Volúmenes pequeños del orden $1.00 \times 10^5 \text{ m}^3$ inundan las nacientes del río, debido a que en dicho sector el volcán presenta una morfología convexa. El asentamiento de Butalelbún sería alcanzado e inundado por volúmenes entre $1.12 \times 10^5 \text{ m}^3$ y 2.51 m^3 (Figura 5.9.c). En tanto, Trapa Trapa es alcanzada con volúmenes entre $1.26 \times 10^5 \text{ m}^3$ y $2.82 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Figura 5.9.c). Asentamientos más distales (Asen.3, Asen.4, Asen.5 y Asen.6) serían inundados con volúmenes que rondan los $1.40 \times 10^7 \text{ m}^3$. En tanto Quenicu, Cañicu y el asentamiento siguiente (Asen.9) se inundarían si supera el último valor.

5.2.2.1. Validación de resultados

Las comparaciones entre las áreas de inundación y los depósitos de lahares, proveen una referencia para evaluar la calidad de las simulaciones en términos de trayectorias y morfología. En tanto las simulaciones no deben ser tomadas como indicadores del volumen del depósito, puesto que: (i) tales determinaciones requieren de información de campo, (ii) es probable que los depósitos hayan sufrido re-trabajo por otros fenómenos y en todo caso no representan los volúmenes al momento del depósito, que serían mayores a los actuales, y (iii) los volúmenes simulados representan la mezcla de agua y sólidos, que supera a la del depósito. Respecto a los últimos puntos, sí resultan adecuadas las comparaciones para establecer los volúmenes de flujo que habrían generado tales depósitos.

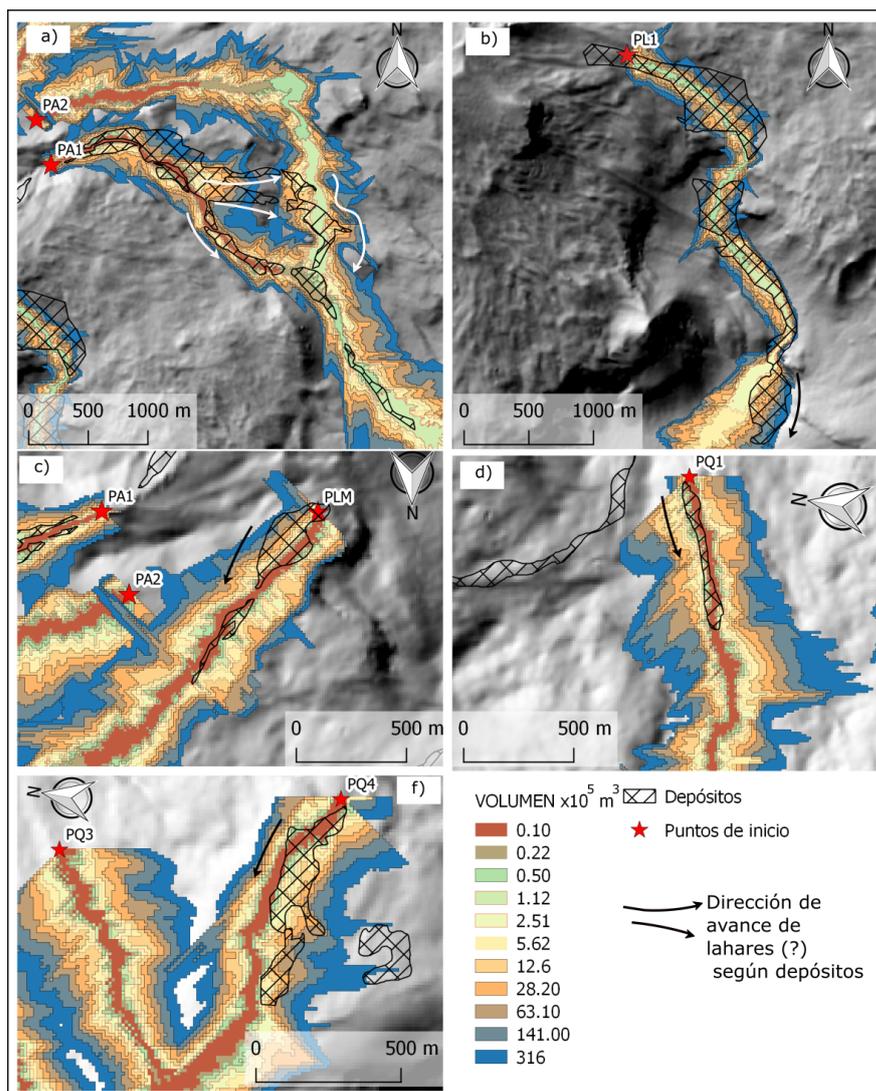
Los flujos simulados presentan discrepancias en morfología y trayectoria respecto a la de los depósitos delimitados con foto-intrepetación (Figura 5.10), excluyendo las simulaciones desde los flujos PQ2 y PQ3 cuyos depósitos no fueron identificados por el último método. En términos generales, las diferencias son menores para áreas que inician en los puntos PLM, PQ1, PQ4 y PL1 (equivalente a PL2), e importantes para las que lo hacen en PA1 y PA2.

Las simulaciones en el punto PQ1 son las que más se ajustan en términos de forma y trayectoria a la de los flujos simulados (Figura 5.10.e). La extensión del depósito es menor a la del flujo de $1 \times 10^4 \text{ m}^3$, sugiriendo que el mismo podría haber sido depositado por un lahar de tal magnitud.

Los depósitos localizados en el punto PLM coinciden en trayectoria y parcialmente en forma, a las áreas inundadas por lahares de LAHARZ (Figura 5.10.c). Los primeros tienen una extensión menor a la del flujo de $1 \times 10^4 \text{ m}^3$, pero cubren un área cercana a aquella inundada por el de $2.51 \times 10^5 \text{ m}^3$. Estos resultados permiten inferir que dichos depósitos podrían haber sido generados por flujos de dimensiones en el orden de 10^5 m^3 .

En el punto PQ4 los depósitos están ligeramente desplazados hacia el oeste respecto a las simulaciones, y sus extensiones y áreas son mucho menores a las respectivas del flujo de $1 \times 10^4 \text{ m}^3$. Luego, lahares del orden 10^4 m^3 podrían haber generado estos depósitos.

Las simulaciones desde PL1 y PL2 discrepan con la morfología que los depósitos exhiben a la salida del volcán, en donde las áreas inundadas con LAHARZ se ubican al oeste de



dichas acumulaciones (Figura 5.10.b). Sólo volúmenes superiores a $6.31 \times 10^6 \text{ m}^3$ inundan por completo dicho sector y cubren el depósito. En tanto la extensión de éste último es aproximadamente equivalente a la del flujo simulado para un volumen de $2.51 \times 10^5 \text{ m}^3$ y su área planimétrica supera al área de inundación del volumen de $3.16 \times 10^7 \text{ m}^3$. No obstante, se descarta que dicho depósito haya sido generado por un flujo del orden de 10^7 m^3 en magnitud, puesto que: (i) si hubiese ocurrido un lahar de tal magnitud, el mismo estaría mejor documentado, y (ii) el área delimitada por foto-interpretación no está ajustada a la realidad, pudiendo estar sobre-dimensionada. Luego, estas acumulaciones podrían haber sido generados por flujos de magnitudes de 10^5 m^3 en volumen.

Las trayectorias de los flujos simulados desde los punto PA1 y, especialmente, PA2 no coinciden por completo con la morfología del depósito en el cauce del Río Agrio. Así, las formas de las acumulaciones sugerirían que los flujos habrían desbordado desde el arroyo principal al más oriental, encauzándose nuevamente en el Río Agrio Superior (ver flechas en Figura 5.10.a). Mientras que los flujos simulados desde PA1 y PA2 se mantienen siempre sobre sus cauces. Las diferencias entre los flujos simulados desde PA2 y los depósitos es aún mayor que respecto a flujos simulados desde PA1, sugiriendo que las simulaciones desde PA2 no reproducen el comportamiento de flujos pasados.

Asumiendo como PA1 el punto de inicio más probable, la máxima extensión de los depósitos sobre el Río Agrio se encuentra a mitad camino entre los flujos 5.01×10^4 y $1.12 \times 10^5 \text{ m}^3$ simulados desde el mencionado punto. No obstante, su área mínima (basada en fotointerpretación) de 1.37 km^2 supera 500 a 300 veces a las correspondientes áreas planimétricas de inundación para esos volúmenes y es mucho mayor que la del máximo volumen simulado. Sin embargo, si dichas acumulaciones hubiesen sido generadas por lahares de dimensiones superiores en orden de magnitud a 10^7 m^3 , los mismos hubiesen alcanzado la ciudad de Cavihue. Dado que no hay registros modernos de que lahares hayan arribado a la comunidad y considerando que dimensiones superiores 10^7 m^3 son extraordinarias, parece poco probable que atribuir tales volúmenes al flujo responsable de dichos depósitos. Se asume para la generación de este flujos volúmenes de orden magnitud de 10^5 m^3 .

Las diferencias encontradas entre simulaciones que inician desde los puntos PA1 y PL1 (equivalente a PL2), y los depósitos podrían deberse a que los modelos topográficos no representen adecuadamente el relieve en ese sector respecto a la realidad de campo. Otra alternativa, es que flujos y/u otros procesos hayan generado modificaciones en el relieve de dicho sector, por ejemplo por acumulación de los depósitos, que se reflejan en los modelos y le impiden a las simulaciones mostrar el mismo comportamiento que los lahares del pasado.

5.2.3. Discusión

El análisis de sensibilidad sugiere que el método LAHARZ es sensible a la resolución horizontal del modelo topográfico, lo cual resulta lógico si se considera que éste último controla la morfología y la trayectoria de los flujos resultantes. En ese sentido, Iverson et al. (1998) señalaron que los modelos topográficos a utilizar, deberían tener resoluciones menor o iguales a 30 metros para obtener resultados fiables. No obstante, y sabiendo de antemano que a mayor tamaño de pixel menor es la pendiente general y más suavizada se encuentra la topografía [106], cabe preguntarse cuáles serán las magnitudes de diferencia encontradas al simular flujos con LAHARZ utilizando distintos modelos. La respuesta a esta pregunta parece depender del valle analizado.

En términos generales, diferencias menores o iguales a 500 m en extensión e inferiores a 100 m en ancho son despreciables, especialmente si se considera la habilidad de los lahares para desplazarse decenas de kilómetros desde la fuente [1, 2]. Por otra parte, diferencias de longitud que rondan o superan el kilómetro son significativas, puesto que son del mismo orden de magnitud que el desplazamiento de los lahares. Una diferencia kilométrica en las áreas inundadas que inicien en el mismo punto y a igual volumen, determina que el flujo alcance o no un poblado según el modelo topográfico a utilizar. Luego, influye en la determinación del nivel de amenaza con LAHARZ. Así, podría suceder que para un sector, se considere un nivel de amenaza menor que el que le correspondería por utilizar otro modelo topográfico.

Diferencias kilométricas en la extensión de los flujos simulados con LAHARZ ocurren cuando, sistemáticamente, los perfiles transversales de los valles son más someros y más anchos (ej. Valle del Río Queuco, Figura 5.6). Tal situación da lugar a simulaciones de sección transversal mayor, que “consumen” el volumen simulado más rápidamente. Esta situación se observó al emplear los modelos topográficos de 30 m de resolución ASTER, SRTM y AW30M, frente al modelo WorldDEM de 12 m. Curiosamente, en las simulaciones del escenario de inundación (Sección 5.2.2), al emplear el modelo topográfico SPOT-7 con pixel inferior a la mitad del de WorldDEM, las diferencias en ancho y largo resultaron despreciables.

En tanto, la calidad de los modelos topográficos es clave y podría ser recomendable que se empleen varios en simultáneo para definir mejor las trayectorias probables con LAHARZ. Así, en el análisis de sensibilidad, la combinación de cuatro modelos topográficos permitió observar que el uso de ASTER puede conducir a: (i) flujos que divergen en trayectoria (ej. simulaciones con punto de inicio PS3, Figura 5.4), y (ii) áreas varios kilómetros más cortas. Por tener iguales resoluciones SRTM, AW30M y ASTER, y considerando la ausencia de eventos volcánicos importantes en Copahue entre los años en los que se realizaron sus respectivas adquisiciones, los mismos deberían dar lugar a flujos concordantes entre sí. No obstante, los resultados muestran un nivel de acuerdo general inferior al 50% entre las simulaciones con ASTER y los modelos de resolución equivalente. En el otro extremo, SRTM y AW30M muestran un acuerdo cercano al 80%. Luego, parece que el uso del producto ASTER no es adecuado para simulaciones de amenaza, al menos en zonas con importante relieve.

La variación en la localización de los puntos de inicio sobre un mismo cauce y a igual volumen, conduce áreas de inundación que difieren en extensión [11]. Por ejemplo, las áreas de inundación en el Río Agrio Superior que inician en los puntos PS1 (Sección 5.2.1) y PA1 (Sección 5.2.2), para un volumen de $1.00 \times 10^4 \text{ m}^3$ y simuladas con WorldDEM, difieren 500 m en extensión. No obstante, ambos puntos de inicio tienen similar relación H/L (caída vertical/ escorrentía horizontal, Tabla 4.3). Luego, la definición de los puntos de inicio según la relación H/L, como sugirieron los creadores de LAHARZ, genera incertidumbre porque la forma del Copahue se aparta a la de un cono. Bajo este contexto, el uso del registro geológico en la localización de puntos de inicio, brinda resultados más ajustado al comportamiento real de los lahares.

Las áreas de inundación obtenidas con puntos de inicio basados en registro geológico (Sección 5.2.2), muestran que los asentamientos urbanos analizados, excepto el poblado Copahue, podrían ser alcanzados por lahares con volúmenes entre 10^4 m^3 y 10^7 m^3 en orden de magnitud.

Es importante destacar que dichos volúmenes dependen de, y deben ser evaluados según, los escenarios que podrían generar lahares. Como se mencionó en la Sección 3.5, se descarta como mecanismo desencadenante las precipitaciones, dado que ocurren en forma de nieve. En tanto, se ha señalado como amenaza el potencial colapso del flanco oriental del volcán por disolución de la roca, que podría desencadenar lahares [23, 26, 94]. No obstante, la ausencia de registros geológicos compatibles con tal escenario sumado a la escasez de información (volumen de roca afectada por disolución), impide una correcta parametrización del mismo al momento de efectuar simulaciones. Por otra parte, sólo se han observado lahares desencadenados durante erupciones (lahares syn-eruptivos), que ocurrieron entre abril y octubre (máxima disponibilidad de agua). En este escenario el agua fue liberada por fusión de la cubierta de nieve-glaciar, al entrar en contacto con materiales volcánicos [23, 24, 75, 91].

El volumen de los lahares syn-eruptivos en Copahue, dependen entonces del espesor de la cubierta de nieve-glaciar. Al respecto, series temporales de precipitación para un período de 30 años hasta 2018, muestran un descenso del aporte níveo a valores cercanos a los 900 mm (Figura 3.2). Así mismo, se ha documentado un retroceso de los glaciares a tasas elevadas [101]. Bajo dicho contexto, parece poco probable que un futuro cercano ocurran lahares de dimensiones del orden de 10^6 m^3 a 10^7 m^3 , los cuales requieren 2.00×10^5 a $2.00 \times 10^6 \text{ m}^3$ de agua para proporciones sólidos-agua 4:1 (fase de flujos de detritos) [2]. En tanto, volúmenes de 10^4 a 10^5 m^3 resultan más plausibles, ya que requieren 2.00×10^3 a $2 \times 10^4 \text{ m}^3$ de agua. Para

ilustrar con un ejemplo conocido, una pileta olímpica puede contener unos $2.50 \times 10^3 \text{ m}^3$.

Las extensiones de los áreas de inundación para volúmenes del orden 10^4 m^3 a 10^5 m^3 , podrían explicar la extensión de la mayoría de los depósitos.

Cabe destacar que la morfología de las áreas de inundación, no siempre se ajusta a la de los depósitos delimitados con foto-interpretación. Así, las acumulaciones sobre el Río Agrio difieren en forma a las áreas de inundación cuyos puntos de inicio son PA1 y PA2 (Figura 5.10). Al respecto, los depósitos observados en imágenes satelitales entre las fechas de Enero/1990 y Enero/2000 (Figura 3.6), muestra un desborde del flujo hacia el arroyo más oriental (Figura 5.10). Tomando como PA1 el punto más probable de inicio, los flujos simulados con LAHARZ se mantienen siempre en el mismo cauce y sólo ocurren desbordes cuando los volúmenes son muy grandes, empero nunca alcanzan el arroyo oriental.

Las diferencias entre simulaciones y acumulaciones en el cauce del Río Agrio pueden ser explicadas por cambios o modificaciones en el relieve, probablemente generadas por los mismo flujos de los años 1992-1995. Es probable que los depósitos, cuyos espesores máximos rondan el medio metro [94], sean reproducidos por los modelos topográficos e impidan la conexión entre los arroyos. Otro tanto puede señalarse en el cauce del Río Lomín, en donde las acumulaciones por lahares de los ciclos 1992-1995 y 2000 obstaculizarían las simulaciones desde PL1 y PL2 generando flujos que están desplazados hacia el Oeste.

Si se asumen como las dimensiones más probables lahares del orden o inferiores a 10^5 m^3 , las áreas inundadas se aproximarían a la comunidad de Copahue el nivel de amenaza es intermedio a bajo para la . dichos sino que generarían inundaciones que afectarían el flanco oriental y parte del cauce del Río Agrio Superior. No obstante, un aumento del volumen de agua en el cauce bastaría para desencadenar crecidas aguas abajo que podrían aproximarse a la ciudad. Lo mismo podría suceder en el complejo de aguas termales Las Máquinas que si bien, no sería alcanzado por lahares de tales dimensiones podría verse inundado por crecidas asociadas. En tanto, la comunidad chilena El Barco presenta una amenaza baja ya que se encuentra lejos de la fuente y las crecidas no lo afectarían.

La situación en el valle del Río Queuco es compleja. Primero, todos los flujos simulados desde las laderas nor-occidentales a occidentales fluirían hacia el mismo. Segundo, se encuentra un gran número de asentamientos ubicados a escasos metros del río. Tercero, se requerirían volúmenes del orden de 10^4 a 10^5 m^3 para ingresar al valle desde los puntos de inicio. Volúmenes dentro de dicho rango alcanzarían la comunidad de Butalebún y permitirían suponer que un grado de amenaza superior para la misma. En tanto, el asentamiento de Trapa Trapa podría verse afectado debido al posible desplazamiento del volumen de agua. Para asentamientos más distales la amenaza sería baja, ya que que requerían lahares de magnitudes superiores a 10^6 m^3 para ser alcanzados, dimensiones que superan con creces el volumen considerado como más plausible en el contexto ambiental de Copahue.

Dado la posibilidad de ser alcanzada por lahares de dimensiones pequeñas ($<10^5 \text{ m}^3$), la precariedad de los asentamientos en Butalebún y Trapa Trapa [67] y su proximidad al Río Queuco, si el fenómeno es llevado a cabo los efectos podrían ser devastadores. También se prevean daños importantes en la comunidad de Trapa Trapa.

Puesto que eventos de grandes dimensiones son pocos frecuentes a nivel mundial [5], mientras más alejados se encuentren dichos menor sería el nivel de amenaza por lahares.

CAPÍTULO 6

Conclusiones

Sobre la confección de los modelos digitales de elevación con imágenes SPOT 5 y SPOT 7 se concluye que AMES Stereo Pipeline es un programa avanzado para la aplicación de la técnica de fotogrametría que se adapta a las necesidades del usuario. Dada la gran cantidad de herramientas con las que cuenta el programa, se deben probar combinaciones para encontrar un procedimiento que permita crear productos cartográficos de alta precisión. La secuencia de procesamiento probada con el triplete SPOT 7 que incluye: ajuste de cámaras (efemérides satelitales), proyección de imágenes sobre SRTM 30 m en tamaño de pixel (sin resultados de ajuste), creación de tres nubes de puntos y su posterior fusión, resultó en modelos con diferencias en elevación menores a un metro respecto al modelo WorldDEM. Estos valores podrían mejorarse si se dispusiesen de puntos de control relevados a campo, con estaciones totales GPS. La adaptación de dicha secuencia a escenas SPOT 5 no produjo modelos topográficos adecuados. Esto podría deberse a que los pares estereos SPOT 5 están conformados por escenas adquiridas en distintos días, cuya calidad es comparativamente inferior a las imágenes SPOT 7.

El análisis de sensibilidad del método LAHARZ, determinó que el mismo es altamente sensible a la calidad y la resolución de los modelos digitales del terreno. La calidad del modelo controla las trayectorias de los flujos, así un modelo con defectos en la representación del terreno como ASTER provoca flujos discordantes con los que se obtienen usando otros modelos. El tamaño de pixel, por otra parte, controla la extensión del flujo simulado. Variaciones de la resolución horizontal pueden provocar diferencias de hasta unos dos kilómetros en los flujos simulados. Esta situación se observa cuando se compara los resultados obtenidos entre modelos de 30 m de resolución y el de 12 m, pero no al contrastar los resultados del modelo de 12 m y el de 5 m.

Como la morfología del volcán Copahue no es cónica, la implementación de la herramienta *cono de energía H/L* (caída vertical/escorrentía horizontal) de LAHARZ en la definición del punto de inicio genera incertidumbre. Es recomendable entonces utilizar puntos basados en registro geológico que proveen resultados más ajustados a la realidad.

En principio todos los centros poblados, exceptuando la comunidad de Copahue, podrían ser alcanzados por lahares cuyas dimensiones se encuentren en un rango de 10^4 a 10^7 m³. No obstante, la integración entre el escenario de generación de lahares plausible (lahares syn eruptivos por erupciones de índice de explosividad menor o igual a 2), los volúmenes requeridos para alcanzar los centros poblados, registros geológicos y la disponibilidad de agua, permite asumir como el orden más verosímil 10^5 m³. Tales volúmenes bastarían para alcanzar las comunidades sobre los márgenes del Río Queuco (Butalelbún y Trapa Trapa) y el centro Las Máquinas, pero no a Caviahue, El Barco, Canicú ni Queuco.

El alcance de esta investigación está limitada por la ausencia de trabajo de campo. Para determinar los vínculos entre las simulaciones y la realidad es necesario: (i) cuantificar el volumen de agua disponible para la generación de lahares, (ii) evaluar la cantidad de material no cosolidado y su composición, a fin de determinar volúmenes y comportamiento posibles de lahares y (iii) mejorar la caracterización de los depósitos por lahares.

A futuro sería interesante utilizar otros métodos para simular el comportamiento de lahares a fin de contrastar resultados con el programa LAHARZ, y considerar otros escenarios de generación de lahares tal como el potencial colpaso del flanco oriental del volcán, señalado por algunos autores [23, 26].

Referencias bibliográficas

- [1] V. Manville, J. J. Major, and S. A. Fagents, “Modeling lahar behavior and hazards,” *Modeling Volcanic Processes The Physics and Mathematics of Volcanism*, pp. 300–330, 2013.
- [2] J. W. Vallance and R. M. Iverson, “Lahars and their deposits,” in *The Encyclopedia of Volcanoes (Second Edition)*. Elsevier, 2015, pp. 649–664.
- [3] J. W. Vallance, “Volcanic debris flows,” in *Debris-flow hazards and related phenomena*. Springer, 2005, pp. 247–274.
- [4] R. M. Iverson, M. E. Reid, and R. G. LaHusen, “Debris-flow mobilization from landslides,” *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, vol. 25, no. 1, pp. 85–138, 1997.
- [5] R. M. Iverson, S. P. Schilling, and J. W. Vallance, “Objective delineation of lahar-inundation hazard zones,” *Geological Society of America Bulletin*, vol. 110, no. 8, pp. 972–984, 1998.
- [6] J. M. Londoño, “Aspectos relevantes de la actividad del Volcán Nevado del Ruiz 1985-2008,” *Glaciares, nieves y hielos de América Latina. Cambio climático y amenazas*, p. 261, 2010.
- [7] T. C. Pierson, R. J. Janda, J.-C. Thouret, and C. A. Borrero, “Perturbation and melting of snow and ice by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, and consequent mobilization, flow and deposition of lahars,” *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 41, no. 1-4, pp. 17–66, 1990.
- [8] K. M. Scott, J. W. Vallance, N. Kerle, J. Luis Macías, W. Strauch, and G. Devoli, “Catastrophic precipitation-triggered lahar at Casita volcano, Nicaragua: occurrence, bulking and transformation,” *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, vol. 30, no. 1, pp. 59–79, 2005.
- [9] J. W. Vallance, “Lahars,” *Encyclopedia of Volcanoes*, pp. 601–616, 2000.

- [10] R. M. Iverson, "The physics of debris flows," *Reviews of geophysics*, vol. 35, no. 3, pp. 245–296, 1997.
- [11] A. Castruccio and J. Clavero, "Lahar simulation at active volcanoes of the southern andes: implications for hazard assessment," *Natural hazards*, vol. 77, no. 2, pp. 693–716, 2015.
- [12] E. Muñoz-Salinas, M. Castillo-Rodríguez, V. Manea, M. Manea, and D. Palacios, "Lahar flow simulations using LAHARZ program: application for the Popocatepetl volcano, Mexico," *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 182, no. 1-2, pp. 13–22, 2009.
- [13] L. Capra, G. Norini, G. Gropelli, J. L. Macías, and J. L. Arce, "Volcanic hazard zonation of the Nevado de Toluca volcano, México," *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 176, no. 4, pp. 469–484, 2008.
- [14] R. Worni, C. Huggel, M. Stoffel, and B. Pulgarín, "Challenges of modeling current very large lahars at Nevado del Huila Volcano, Colombia," *Bulletin of Volcanology*, vol. 74, no. 2, pp. 309–324, Mar 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s00445-011-0522-8>
- [15] C. R. Stern and R. Kilian, "Role of the subducted slab, mantle wedge and continental crust in the generation of adakites from the Andean Austral Volcanic Zone," *Contributions to mineralogy and petrology*, vol. 123, no. 3, pp. 263–281, 1996.
- [16] A. Rivera and F. Bown, "Recent glacier variations on active ice capped volcanoes in the Southern Volcanic Zone (37–46 S), Chilean Andes," *Journal of South American Earth Sciences*, vol. 45, pp. 345–356, 2013.
- [17] I. A. Petrinovic, G. Páez, C. Balbis, S. Guzmán, G. Villarosa, R. Carniel *et al.*, "Depósito de corriente piroclástica reciente (1963-64 AD?-1976 AD?) del volcán Copahue (I): evidencias geológicas de campo y edad radiocarbónica," *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, vol. 71, no. 1, pp. 139–142, 2014.
- [18] E. F. González Díaz, "Geomorfología de la región del volcán Copahue y sus adyacencias (centro-oeste del Neuquén)," *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, vol. 60, no. 1, pp. 72–87, 2005.
- [19] M. Agosto, "Estudio geoquímico de los fluidos volcánicos e hidrotermales del Complejo Volcánico Copahue Caviahue y su aplicación para tareas de seguimiento," Ph.D. dissertation, PhD thesis, 270 pp., Universidad de Buenos Aires, 2011.
- [20] I. A. Petrinovic, G. Villarosa, S. P. Guzmán, G. N. Páez, V. Outes, C. Manzoni, A. Delmónico, C. Balbis, R. Carniel, I. R. Hernando *et al.*, "La erupción del 22 de diciembre de 2012 del volcán Copahue, Neuquén, Argentina: caracterización del ciclo eruptivo y sus productos," *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, vol. 71, no. 2, pp. 161–173, 2014.
- [21] A. Caselli, M. Velez, M. Agosto, C. Liccioli, and O. Vaselli, "Prehistoric to historic volcanic activity at copahue volcano," in *Copahue Volcano*. Springer, 2016, pp. 49–59.

- [22] A. Caselli, M. Agosto, M. Velez, P. Forte, C. Bengoa, R. Daga, J. Albite, and B. Cappaccioni, "The 2012 eruption," in *Copahue Volcano*. Springer, 2016, pp. 61–77.
- [23] A. Caselli, C. Liccioli, and F. Tassi, "Risk assessment and mitigation at Copahue volcano," in *Copahue Volcano*. Springer, 2016, pp. 239–254.
- [24] Global Volcanism Program, "Report on Copahue (Chile-Argentina): Small explosions and mudflows; strong sulfur odors," *Bulletin of the Global Volcanism Network*, vol. 17, no. 7, 1992. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5479/si.GVP.BGVN199207-357090>
- [25] A. Bermúdez and D. Delpino, "Mapa de los peligros potenciales en el area del Volcán Copahue, Sector Argentino: Neuquén, Argentina," *Province of Neuquen Geological Survey, scale*, vol. 1, no. 50, p. 000, 1995.
- [26] J. C. Varekamp, A. P. Ouimette, S. W. Herman, A. Bermúdez, and D. Delpino, "Hydrothermal element fluxes from Copahue, Argentina: a "beehive" volcano in turmoil," *Geology*, vol. 29, no. 11, pp. 1059–1062, 2001.
- [27] A. T. Caselli and M. L. Velez, "Riesgo Volcánico," in *Geología y Recursos Naturales de la provincia del Neuquén*, H. Leanza, C. Arregui, O. Carbone, J. Danieli, and J. Valleés, Eds. Buenos Aires: Asociación Geológica Argentina, 2011, pp. 601–608.
- [28] P. Sruoga and V. Consoli, "Volcán Copahue," in *Relatorio XVIII Congreso Geológico Argentino*, vol. 2, no. 6, 2011.
- [29] D. Melnick and A. Folguera, "Geología del Complejo volcánico Copahue-Caldera del Agrio, un sistema transtensional activo desde el Plioceno en la transición de los Andes Patagónicos a los Andes Centrales (38 S-71 O)," in *Congreso Latinoamericano de Geología*, no. 10, 2001.
- [30] C. Balbis, I. Petrinovic, and S. Guzmán, "A contribution to the hazards assessment at Copahue volcano (Argentina-Chile) by facies analysis of a recent pyroclastic density current deposit," *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 327, pp. 288–298, 2016.
- [31] Z. Li, C. Zhu, and C. Gold, *Digital terrain modeling: principles and methodology*. CRC press, 2004.
- [32] P. F. Fisher and N. J. Tate, "Causes and consequences of error in digital elevation models," *Progress in physical Geography*, vol. 30, no. 4, pp. 467–489, 2006.
- [33] E. M. Quirós Rosado, "Introducción a la fotogrametría y cartografía aplicadas a la ingeniería civil," 2014.
- [34] M. Méndez-Morales and D. Jiménez-Monge, "Generación de modelos de elevación digital (dem) a partir del análisis fotogramétrico utilizando imágenes carta-2005," *Revista Tecnología en Marcha*, vol. 26, no. 4, pp. ág–26, 2013.
- [35] P. Euillades, M. Vénere, A. Clause, L. Vives, M. Varni, and E. Usunoff, "Modelos digitales de elevacion para simulación computacional de inundaciones: Interferometria vs cartografía," *Mecánica Computacional*, no. 1, pp. 2267–2277, 2002.

- [36] H. A. Zebker, J. Villasenor *et al.*, “Decorrelation in interferometric radar echoes,” *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, vol. 30, no. 5, pp. 950–959, 1992.
- [37] T. G. Farr, P. A. Rosen, E. Caro, R. Crippen, R. Duren, S. Hensley, M. Kobrick, M. Paller, E. Rodriguez, L. Roth *et al.*, “The shuttle radar topography mission,” *Reviews of geophysics*, vol. 45, no. 2, 2007.
- [38] U. S. G. Survey, “The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Collection User Guide,” USGS, Tech. Rep., 2015. [Online]. Available: https://lpdaac.usgs.gov/sites/default/files/public/measures/docs/NASA_SRTM_V3.pdf
- [39] A. Mouratidis, P. Briole, and K. Katsambalos, “SRTM 3 "DEM (versions 1, 2, 3, 4) validation by means of extensive kinematic GPS measurements: a case study from North Greece,” *International Journal of Remote Sensing*, vol. 31, no. 23, pp. 6205–6222, 2010.
- [40] J. Collins, G. Riegler, H. Schrader, and M. Tinz, “Applying terrain and hydrological editing to TANDEM-X Data to create a consumer-ready WORLDDDEM Product,” *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 40, no. 7, p. 1149, 2015.
- [41] T. Tachikawa, M. Kaku, A. Iwasaki, D. Gesch, M. Oimoen, Z. Zhang, J. Danielson, T. Krieger, B. Curtis, J. Haase *et al.*, “Aster global digital elevation model version 2—summary of validation results august 31, 2011,” 2011.
- [42] Earth Observation Research Center (EORC), “ALOS Global Digital Surface Model (DSM)-ALOS World 3D-30m Version 2.1. Product Description,” Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), Tech. Rep., 2018. [Online]. Available: https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/aw3d30v21_format_e.pdf
- [43] T. Tadono, H. Nagai, H. Ishida, F. Oda, S. Naito, K. Minakawa, and H. Iwamoto, “Generation of the 30 m-mesh Global Digital Surface Model by ALOS PRISM.” *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, vol. 41, 2016.
- [44] G. A. Smith and W. J. Fritz, “Volcanic influences on terrestrial sedimentation,” *Geology*, vol. 17, no. 4, pp. 375–376, 1989.
- [45] S. P. Schilling, “Laharz_py: Gis tools for automated mapping of lahar inundation hazard zones,” US Geological Survey, Tech. Rep., 2014.
- [46] E. Aristizábal, H. Martínez, and J. I. Vélez, “Una revisión sobre el estudio de movimientos en masa detonados por lluvias,” *Rev. Acad. Colomb. Cienc*, vol. 34, no. 131, pp. 209–227, 2010.
- [47] R. M. Iverson, “Elements of an improved model of debris-flow motion,” *AIP Conference Proceedings*, vol. 1145, pp. 9–16, 2009.
- [48] M. Jakob, O. Hungr, and D. M. Jakob, *Debris-flow hazards and related phenomena*. Springer, 2005, vol. 739.

- [49] R. I. Tilling, "Volcanic hazards and their mitigation: progress and problems," *Reviews of Geophysics*, vol. 27, no. 2, pp. 237–269, 1989.
- [50] J. C. Carracedo, "Peligros asociados a megadeslizamientos y lahares." *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, vol. 23, no. 1, p. 66, 2015.
- [51] B. Pulgarín, C. E. Cardona, C. C. Santacoloma, A. Agudelo, M. Calvache, and M. L. Monsalve, "Erupciones del volcan Nevado del Huila (Colombia) en febrero y abril de 2007 y cambios en su masa glaciaria," *Glaciares, nieves y hielos de América Latina. Cambio climático y amenazas*, p. 279, 2010.
- [52] T. C. Pierson, "An empirical method for estimating travel times for wet volcanic mass flows," *Bulletin of Volcanology*, vol. 60, no. 2, pp. 98–109, 1998.
- [53] K. Yano and A. Daido, "Fundamental study on mud-flow," *Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute*, vol. 14, no. 2, pp. 69–83, 1965.
- [54] J. J. Major and T. C. Pierson, "Debris flow rheology: Experimental analysis of fine-grained slurries," *Water resources research*, vol. 28, no. 3, pp. 841–857, 1992.
- [55] M. Arattano, L. Franzi, and L. Marchi, "Influence of rheology on debris-flow simulation," *Natural Hazards and Earth System Science*, vol. 6, no. 4, pp. 519–528, 2006.
- [56] J. E. Costa, "Hydraulic modeling for lahar hazards at Cascades volcanoes," *Environmental & Engineering Geoscience*, vol. 3, no. 1, pp. 21–30, 1997.
- [57] V. Manville, "Palaeohydraulic analysis of the 1953 Tangiwai lahar; New Zealand's worst volcanic disaster," *Acta Vulcanologica*, vol. 16, no. 1/2, pp. 1000–1015, 2004.
- [58] J. L. Carrivick, V. Manville, and S. J. Cronin, "A fluid dynamics approach to modelling the 18th March 2007 lahar at Mt. Ruapehu, New Zealand," *Bulletin of Volcanology*, vol. 71, no. 2, pp. 153–169, 2009.
- [59] T. Takahashi, *Mechanics and Simulation of Snow Avalanches, Pyroclastic Flows and Debris Flows*. John Wiley and Sons, Ltd, 2009, pp. 9–43. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781444304275.ch2>
- [60] E. B. Pitman and L. Le, "A two-fluid model for avalanche and debris flows," *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 363, no. 1832, pp. 1573–1601, 2005.
- [61] S. A. Fagents and S. M. Baloga, "Toward a model for the bulking and debulking of lahars," *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 111, no. B10, 2006.
- [62] J. L. Carrivick, V. Manville, A. Graettinger, and S. J. Cronin, "Coupled fluid dynamics-sediment transport modelling of a Crater Lake break-out lahar: Mt. Ruapehu, New Zealand," *Journal of hydrology*, vol. 388, no. 3-4, pp. 399–413, 2010.
- [63] P. Ruiz-Cubillo, P. Vega-Salas, R. Barrantes-Jiménez, and L. G. Loría-Salazar, "Modelación de lahares generados por el volcán turrialba y su posible afectación a la red vial nacional," Programa Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR, Tech. Rep., 2015.

- [64] C. Huggel, A. Kääb, W. Haeblerli, and B. Krummenacher, “Regional-scale gis-models for assessment of hazards from glacier lake outbursts: evaluation and application in the swiss alps,” *Natural Hazards and Earth System Science*, vol. 3, no. 6, pp. 647–662, 2003.
- [65] S.-K. Lee, C.-W. Lee, and S. Lee, “A comparison of the Landsat image and LAHARZ-simulated lahar inundation hazard zone by the 2010 Merapi eruption,” *Bulletin of Volcanology*, vol. 77, no. 6, p. 46, 2015.
- [66] J. P. Griswold and R. M. Iverson, *Mobility statistics and automated hazard mapping for debris flows and rock avalanches*. US Department of the Interior, US Geological Survey, 2008.
- [67] N. Messer, “La bella y dura realidad pehuenche,” *Revista Nos*, no. 252, pp. 18–24, 2016. [Online]. Available: <https://www.revistanos.cl/2016/10/octubre-2016/>
- [68] J. R. Hernández and O. P. Barrientos, “Cambio climático local: la región del bío bío en chile en contexto global,” *Revista Brasileira de Ciências Ambientais (Online)*, no. 17, pp. 7–16, 2010.
- [69] M. S. Revillod Rodríguez, “Estudio de sequías en la xvi, viii y ix región mediante observaciones geodésicas en el período 2010-2015,” Ph.D. dissertation, Universidad de Concepción, 2018.
- [70] M. Augusto and J. Varekamp, “The Copahue volcanic-hydrothermal system and applications for volcanic surveillance,” in *Copahue Volcano*. Springer, 2016, pp. 199–238.
- [71] A. Caselli, C. Dapeña, M. Augusto, and A. Delgado Huertas, “Geothermal Copahue volcano system, Argentina. New stable isotope and geochemical data,” in *Proceedings of the Vth South American Symposium on Isotope Geology, Uruguay*, 2006, pp. 332–336.
- [72] G. Tamburello, M. Augusto, A. Caselli, F. Tassi, O. Vaselli, S. Calabrese, D. Rouwet, B. Capaccioni, R. Di Napoli, C. Cardellini *et al.*, “Intense magmatic degassing through the lake of Copahue volcano, 2013–2014,” *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 120, no. 9, pp. 6071–6084, 2015.
- [73] M. R. Augusto, A. Caselli, R. Daga, J. Varekamp, A. Trinelli, M. D. S. Afonso, M. L. Velez, P. Euillades, and S. R. Guevara, “The crater lake of Copahue volcano (Argentina): geochemical and thermal changes between 1995 and 2015,” *Geological Society, London, Special Publications*, vol. 437, no. 1, pp. 107–130, 2017.
- [74] M. L. Velez, P. Euillades, A. Caselli, M. Blanco, and J. M. Díaz, “Deformation of Copahue volcano: Inversion of InSAR data using a genetic algorithm,” *Journal of Volcanology and geothermal research*, vol. 202, no. 1-2, pp. 117–126, 2011.
- [75] D. Delpino and A. Bermúdez, “La actividad del volcán Copahue durante 1992. Erupción con emisiones de azufre piroclástico. Provincia de Neuquén-Argentina,” in *Congreso Geológico Argentino*, no. 12, 1993, pp. 292–301.
- [76] J. Varekamp, A. Ouimette, S. Herman, K. Flynn, A. Bermudez, and D. Delpino, “Naturally acid waters from Copahue volcano, Argentina,” *Applied Geochemistry*, vol. 24, no. 2, pp. 208–220, 2009.

- [77] J. Varekamp, A. Ouimette, and R. Kreulen, "The magmato-hydrothermal system of Copahue volcano, Argentina," in *Proc. 11th Intl Conf. on Water-Rock Interaction, WRI-11*, vol. 1. Balkema Publishers Leiden, 2004, pp. 215–218.
- [78] R. Daga, A. Caselli, S. Ribeiro Guevara, and M. Agosto, "Tefras emitidas durante la fase inicial hidromagmática (julio de 2012) del ciclo eruptivo 2012-actual (2016) del volcán Copahue (Andes del sur)," *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, vol. 74, no. 2, pp. 191–206, 2016.
- [79] J. C. Varekamp, J. M. deMoor, M. D. Merrill, A. S. Colvin, A. R. Goss, P. Z. Vroon, and D. R. Hilton, "Geochemistry and isotopic characteristics of the Caviahue-Copahue volcanic complex, Province of Neuquén, Argentina," *SPECIAL PAPERS-GEOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA*, vol. 407, p. 317, 2006.
- [80] M. Agosto, F. Tassi, A. Caselli, O. Vaselli, D. Rouwet, B. Capaccioni, S. Caliro, G. Chiodini, and T. Darrah, "Gas geochemistry of the magmatic-hydrothermal fluid reservoir in the Copahue-Caviahue Volcanic Complex (Argentina)," *Journal of volcanology and geothermal research*, vol. 257, pp. 44–56, 2013.
- [81] P. Lundgren, M. Nikkhoo, S. V. Samsonov, P. Milillo, F. Gil-Cruz, and J. Lazo, "Source model for the Copahue volcano magma plumbing system constrained by InSAR surface deformation observations," *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 122, no. 7, pp. 5729–5747, 2017.
- [82] E. Rojas Vera, A. Folguera, M. Spagnuolo, M. Gímenez, F. Ruiz, P. Martínez, and V. A. Ramos, "La neotectónica del arco volcánico a la latitud del volcán Copahue (38°S), Andes de Neuquén," *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, vol. 65, no. 1, pp. 204–214, 2009.
- [83] A. Folguera, V. A. Ramos, R. L. Hermanns, and J. Naranjo, "Neotectonics in the foothills of the southernmost central Andes (37°–38° S): Evidence of strike-slip displacement along the Antañir-Copahue fault zone," *Tectonics*, vol. 23, no. 5, 2004.
- [84] F. Bonali, C. Corazzato, F. Bellotti, and G. Groppelli, "Active tectonics and its interactions with Copahue volcano," in *Copahue Volcano*. Springer, 2016, pp. 23–45.
- [85] D. Melnick, A. Folguera, and V. Ramos, "Structural control on arc volcanism: the Copahue-Agrío complex, South-Central Andes (37°50' S)," *Journal of South American Earth Sciences*, vol. 22, pp. 66–88, 2006.
- [86] A. Folguera, E. R. Vera, L. Vélez, J. Tobal, D. Orts, M. Agosto, A. Caselli, and V. Ramos, "A review of the geology, structural controls, and tectonic setting of Copahue volcano, Southern Volcanic Zone, Andes, Argentina," in *Copahue Volcano*. Springer, 2016, pp. 3–22.
- [87] A. Folguera and V. Ramos, "Control estructural del volcán Copahue (38 S-71 O): implicancias tectónicas para el arco volcánico cuaternario (36-39)," *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, vol. 53, no. 3, pp. 229–244, 2000.
- [88] E. Linares, H. A. Osters, and L. Mas, "Cronología potasio-argón del complejo efusivo Copahue-Caviahue, Provincia del Neuquén," *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, vol. 54, no. 3, pp. 240–247, 1999.

- [89] L. Mazzoni and D. T. Licitra, "Significado estratigráfico y volcanológico de depósitos de flujos piroclásticos neógenos con composición intermedia en la zona del lago Caviahue, Provincia del Neuquén," *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, vol. 55, no. 3, pp. 247–249, 2000.
- [90] Observatorio Volcanológico De los Andes del Sur -Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin). Reportes Especiales de Actividad Volcánica (REAV) Región Del Bio Bio, volcán Copahue. [Online]. Available: <http://sitiohistorico.sernageomin.cl/volcan.php?pagina=20&iId=54>
- [91] Global Volcanism Program, "Report on Copahue (Chile-Argentina): Frequent ash explosions and acidic mudflows starting on July 1," *Bulletin of the Global Volcanism Network*, vol. 25, no. 6, 2000. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5479/si.GVP.BGVN200006-357090>
- [92] J. A. Naranjo and E. Polanco, "The 2000 AD eruption of Copahue volcano, southern Andes," *Revista geológica de Chile*, vol. 31, no. 2, pp. 279–292, 2004.
- [93] G. B. Pasternack and J. C. Varekamp, "Volcanic lake systematics i. physical constraints," *Bulletin of volcanology*, vol. 58, no. 7, pp. 528–538, 1997.
- [94] A. D. Baez, "Estudio de los depósitos post-glaciares del volcán Copahue: análisis de la peligrosidad," Ph.D. dissertation, Universidad Nacional de Río Negro, 2015. [Online]. Available: <https://rid.unrn.edu.ar/jspui/handle/20.500.12049/532>
- [95] Esri, "Esri Change Matters Landsat Viewer," *Aplicación*. [Online]. Available: <https://livingatlas2.arcgis.com/landsatviewer/>
- [96] R. Beyer, O. Alexandrov, and S. McMichael, "NeoGeographyToolkit/StereoPipeline: NASA Ames Stereo Pipeline 2.6.1," 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1345235>
- [97] J. DeWitt, T. Warner, and J. Conley, "Comparison of DEMs derived from USGS DLG, SRTM, a statewide photogrammetry program, ASTER GDEM and LiDAR: implications for change detection," *GIScience & Remote Sensing*, vol. 52, no. 2, pp. 179–197, 2015.
- [98] Instituto Geográfico Nacional- Argentina, "Catálogo de objetos geográficos-capas sig." [Online]. Available: <http://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/InformacionGeoespacial/CapasSIG>
- [99] Sistema Nacional de Coordinación de Información Territorial-Chile, "Infraestructura de datos geospaciales." [Online]. Available: <http://www.ide.cl/index.php/informacion-territorial/descargar-informacion-territorial>
- [100] J. Naranjo, H. Moreno, E. Polanco, and S. Young, "Mapa de peligros de los volcanes del Alto Biobío, Regiones del Biobío y de la Araucanía. Escala 1: 100.000. Servicio Nacional de Geología y Minería," *Documentos de Trabajo*, vol. 15, 2000.
- [101] P. F. Zenteno Soto, "Variaciones recientes de los glaciares en la zona centro sur de Chile y su relación con los cambios climáticos y la actividad volcánica," 2009.

- [102] C. Daniel and K. Tennant, "Dem quality assessment," *Digital elevation model technologies and applications: the DEM users manual*, pp. 395–440, 2001.
- [103] R. A. Beyer, O. Alexandrov, and S. McMichael, "The Ames Stereo Pipeline: NASA's open source software for deriving and processing terrain data," *Earth and Space Science*, vol. 5, no. 9, pp. 537–548, 2018.
- [104] H. Duong, R. Lindenbergh, N. Pfeifer, and G. Vosselman, "ICESat full-waveform altimetry compared to airborne laser scanning altimetry over the Netherlands," *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, vol. 47, no. 10, pp. 3365–3378, 2009.
- [105] B. Wessel, M. Huber, C. Wohlfart, U. Marschalk, D. Kosmann, and A. Roth, "Accuracy assessment of the global TanDEM-X Digital Elevation Model with GPS data," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 139, pp. 171–182, 2018.
- [106] D. M. Wolock and G. J. McCabe, "Differences in topographic characteristics computed from 100- and 1000-m resolution digital elevation model data," *Hydrological Processes*, vol. 14, no. 6, pp. 987–1002, 2000. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/%28SICI%291099-1085%2820000430%2914%3A6%3C987%3A%3AAID-HYP980%3E3.0.CO%3B2-A>
- [107] J. H. González, M. Bachmann, R. Scheiber, and G. Krieger, "Definition of ICESat selection criteria for their use as height references for TanDEM-X," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 48, no. 6, pp. 2750–2757, 2010.
- [108] C. C. Carabajal and D. J. Harding, "ICESat validation of SRTM C-band digital elevation models," *Geophysical research letters*, vol. 32, no. 22, 2005.

Validaciones con el altímetro ICESat

La misión ICESat (del inglés *Ice, Cloud, and land Elevation Satellite*) desarrollada por la agencia espacial estadounidense, entre los años 2003 y 2009. La misma tuvo como objetivos la medición del balance de masas de las capas de hielo, alturas de nubes y aerosoles, como así también estudios de la topografía terrestre y las características de la vegetación [107].

El satélite ICESat portaba el instrumento *Geoscience Laser Altimeter System*, un láser que emitía pulsos y colectaba sus ecos en una huella elíptica. Los ecos colectados dentro de la última eran ponderados según una función Gaussiana, lo cual implica que los ecos procedentes del centro tienen una mayor contribución a la medición final que los laterales [104, 107].

Las mediciones del altímetro se utilizan en validaciones mundiales de MDEs, por sus elevadas precisiones en sentido vertical: 0.1 m en suelo desnudo y ~ 1 m en terreno escarpado, vegetado y/o urbanizado [108]). Con el objetivo de conocer los errores de los modelos topográficos dentro del área de estudio, se validaron WorldDEM, SRTM, ASTER y AW30M.

A.1. Materiales y métodos

En las validaciones se empleó una base de datos de elevaciones ICESat con 3513 mediciones, utilizando todas las campañas disponibles dentro del área de estudio. De dicha base se eliminaron puntos localizados en áreas con gran densidad ($> 30\%$) de vegetación y/o urbanización, empleando una máscara provista por Airbus Defence and Space. Así mismo, se descartaron puntos sobre pendientes pronunciadas ($> 10^\circ$) y sobre cuerpos de agua. La operación de filtrado descrita asegura que la base de datos sólo contenga mediciones de alta precisión.

Dado que cada elevación reportada por ICESat resulta de las contribuciones de múltiples ecos en la huella elíptica (92 m Norte-Sur, 52 m Este-Oeste) [104, 108], se crearon nuevos conjuntos de datos comparables a partir de los MDS originales. Esto es, se recreó la función Gaussiana del altímetro efectuando, en cada modelo, promedios ponderados por las

distancias dentro de ventanas móviles.

En los MDS de 30 m en resolución ASTER, AW30M y SRTM se empleó una ventana de 3x3 píxeles, con peso del 50% para el píxel central y del 6,25% a cada píxel vecino (Eq. A.1). En el modelo WorldDEM de 12 m se empleó una ventana de 5x5 píxeles con un 33% para el píxel central, de 4% a cada uno de los primeros ocho vecinos y de 2.8% a cada uno de los doce píxeles más externos (obviando los píxeles de los bordes). Así, en los modelos resultantes cada elevación resultó de la contribución del valor original y sus vecinos.

$$P_{ij} = 0,5 * p_{cij} + 0,5 * \left(\frac{\sum_1^8 pk_1}{8} \right) \quad (A.1)$$

$$P_{ij} = \frac{1}{3} * \left(p_{cij} + \frac{\sum_1^8 pk_1}{8} + \frac{\sum_1^{12} pk_2}{12} \right) \quad (A.2)$$

Con P_{ij} píxel interpolado a la fila i y la columna j , p_{cij} el píxel central dentro de la ventana, pk_1 los primeros ocho píxeles y pk_2 los siguientes doce píxeles.

Luego de efectuar la ponderación, los modelos se llevaron a alturas elipsoidales (WGS 84, del inglés *World Geodetic System-1984*). A continuación, se obtuvo la diferencia entre las mediciones ICESat y los modelos topográficos según $\Delta h_m = h(ICESat)_m - h(DMS)_m$ (Δh : diferencia de altura por cada punto m , $h(ICESat)_m$ elevación elipsoidal relevada por el altímetro, $h(DMS)_m$ elevación elipsoidal de cada modelo). Las diferencias absolutas $\Delta h_m > 20$ m se consideraron como valores atípicos (del inglés *outliers*) y fueron excluidas de estudios subsiguientes, dejando un total de 3444 puntos de comparación comunes a todos los modelos.

En el análisis estadístico se obtuvieron los errores mínimos, máximos y medios (EM ; Eq. A.3), desvíos estándares (σ , Eq.A.4) y las raíces cuadradas de los errores cuadráticos medios ($RMSE$, Eq.A.5). Así mismo se obtuvieron otros parámetros estadísticos que son apropiados para distribuciones no normales [105]: el cuantil al 50% ($Q50$, median), el desvío mediano absoluto (MAD ; Eq. A.6), la mediana normalizada ($NMAD$, Eq. A.7) y el error lineal al percentil 90 ($LE90$, Eq. A.8). El $NMAD$ es un estimador del desvío estándar σ para distribuciones de cola pesada y si los errores se distribuyen normalmente ambos parámetros son iguales, de lo contrario σ será mayor que $NMAD$ [105]. El valor del $LE90$, calculado como el percentil 90 de las diferencias absolutas ordenadas, significa que con un 90% de confianza los errores son menores o iguales al $LE90$ [105].

$$EM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta h_i \quad (A.3)$$

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (EM - \Delta h_i)^2} \quad (A.4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta h_i)^2} \quad (A.5)$$

$$MAD = median(|\Delta h_i - Q50|) \quad (A.6)$$

$$NMAD = 1,4826 * MAD \tag{A.7}$$

$$LE90 = Q_{|\Delta h_i|}(0,9) \tag{A.8}$$

A.2. Resultados

Los resultados se presentan en la Tabla A.1 y la Figura A.1 muestra los histogramas de las diferencias de altura de ICESat con respecto a los conjuntos de datos.

Los errores absolutos ($|EM| \pm \sigma$) son 1.37 ± 0.94 m para WorldDEM, 3.07 ± 2.17 m para AW30M, 2.37 ± 4.45 m para ASTER y 2.88 ± 2.34 m para SRTM. Las precisiones verticales absolutas en términos del error lineal con 90% de confianza (LE90) 2.06 para WorldDEM, 5.78 m para SRTM, 6.05 m para AW30M y 8.12 m para ASTER. Los valores de MAD son 0.27 m para WorldDEM, 1.19 m para SRTM, 1.25 m para AW30M y 2.71 m para ASTER. La raíces cuadrada del error medio cuadrático son 1.66 m para WorldDEM, 3.70 m para SRTM, 3.75 m para AW30M y 5.04 para ASTER. Los errores lineales al percentil 90 son 2.06 m para WorldDEM, 5.78 m para SRTM, 6.05 m para AW30M y 8.12 m para ASTER. Los desvíos medianos absolutos son 0.27 m para WorldDEM, 1.19 m para SRTM, 1.25 m para AW30M y 2.71 m para ASTER. Los errores absolutos normalizados son de 0.40 m para WorldDEM, 1.76 m para SRTM, 1.85 para AW30M y 4.02 m para ASTER.

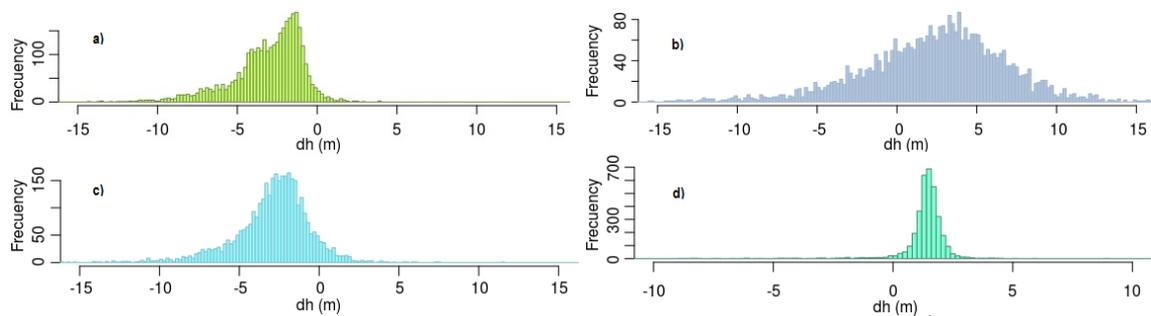


Figura A.1: Distribuciones de los errores. a) Histograma para AW30M. b) Histograma para ASTER. c) Histograma para SRTM. d) Histograma para WorldDEM

Tabla A.1: Parámetros estadísticos para las diferencias entre ICESat y los modelos creados.s. P: puntos

	Min	EM	Max	Q50	σ	RMSE	MAD	NMAD	LE90	P
AW30M	-16.61	-3.07	3.95	-2.62	2.17	3.75	1.25	1.85	6.05	3444
ASTER	-19.79	2.37	16.50	2.76	4.45	5.04	2.71	4.02	8.12	
SRTM	-19.96	-2.88	11.42	-2.61	2.34	3.70	1.19	1.76	5.78	
WorldDEM	-13.01	1.37	5.90	1.46	0.94	1.66	0.27	0.40	2.06	

Pruebas en AMES Stereo Pipeline

Listing B.1: Secuencias de pruebas automáticas del primer tile de SPOT 7 con AMES Stereo Pipeline. Se muestran partes del código por la extensión del mismo

```

1000 #!/bin/bash
      export PATH=/home/student/StereoPipeline-2.6.1-2019-03-01-x86_64-Linux/
      bin/:$PATH
1002
      #-----Definición de variables-----#
1004 forward=(IMG_SPOT7_P_201804191429554_SEN_TRISTEREOTESTING) #Prefijo
      archivo de imágenes forward
      cam_f=(RPC_SPOT7_P_201804191429554_SEN_TRISTEREOTESTING.XML) #Archivo cá
      mara para imágenes forward
1006 nadir=(IMG_SPOT7_P_201804191430209_SEN_TRISTEREOTESTING) #Prefijo de las
      imágenes nadir
      cam_n=(RPC_SPOT7_P_201804191429554_SEN_TRISTEREOTESTING.XML) #Archivo cá
      mara para imágenes nadir
1008 backward=(IMG_SPOT7_P_201804191431006_SEN_TRISTEREOTESTING) #Prefijo imá
      genes backward
      cam_b=(RPC_SPOT7_P_201804191431006_SEN_TRISTEREOTESTING.XML) #Cámara imá
      genes backward
1010
      #####
1012 #-----Pruebas T01, T02-----#
      #####
1014
      # T01: Creación DEMs (30-90 m), Elección del mejor
1016 cd ~/Copahue/run1
1018 stereo -t rpc --threads=0 ~/Copahue/${forward}_RIC1.TIF ~/Copahue/${
      nadir}_RIC1.TIF ~/Copahue/${backward}_RIC1.TIF ~/Copahue/${cam_f} ~/
      Copahue/${cam_n} ~/Copahue/${cam_b} 1_st_noDEM/out
1020 cd ~/Copahue/run1
1022 resolucion=(0.0002777777777777, 0.0008333333333333)
      res=(30, 90)

```

```

1024 for index in ${!resolucion[*]}; do
1026 # DEM sin filtro (_nf)
point2dem --dem-hole-fill-len 200 --t_srs epsg:4326 --tr ${resolucion[
    $index]} --threads 0 --nodata-value -9999 1_st_noDEM/out-PC.tif -o 1
    _st_noDEM/S7_${res[$index]}_nf --orthoimage 1_st_noDEM/out-L.tif
1028
# DEM con filtro de media (_mn)
1030 point2dem --dem-hole-fill-len 200 --t_srs epsg:4326 --tr ${resolucion[
    $index]} --threads 0 --nodata-value -9999 --search-radius-factor 10 --
    filter mean 1_st_noDEM/out-PC.tif -o 1_st_noDEM/S7_${res[$index]}_mn
    --orthoimage 1_st_noDEM/out-L.tif
1032 #DEM con filtro de promedio ponderado (_wa)
point2dem --dem-hole-fill-len 200 --t_srs epsg:4326 --tr ${resolucion[
    $index]} --threads 0 --nodata-value -9999 --search-radius-factor 10 --
    filter weighted_average 1_st_noDEM/out-PC.tif -o 1_st_noDEM/S7_${res[
    $index]}_wa --orthoimage 1_st_noDEM/out-L.tif
1034
#DEM filtro de mediana (_md)
1036 point2dem --dem-hole-fill-len 200 --t_srs epsg:4326 --tr ${resolucion[
    $index]} --threads 0 --nodata-value -9999 --median-filter-params 11
    40.0 1_st_noDEM/out-PC.tif -o 1_st_noDEM/S7_${res[$index]}_md --
    orthoimage 1_st_noDEM/out-L.tif
1038 #DEM con filtro de mediana (_md) y media ponderada (_wa)
point2dem --dem-hole-fill-len 200 --t_srs epsg:4326 --tr ${resolucion[
    $index]} --threads 0 --nodata-value -9999 --median-filter-params 11
    40.0 --search-radius-factor 10 --filter weighted_average 1_st_noDEM/
    out-PC.tif -o 1_st_noDEM/S7_${res[$index]}_md_wa --orthoimage 1
    _st_noDEM/out-L.tif
1040
done
1042
# T01 'run1' Proyec. sobre DEM90 s/ filtro; T02: 'run2' Proyec. SRTM 90 m
1044
# Definición de variables
1046 DEM=(~/Copahue/run1/1_st_noDEM/S7_90_nf-DEM.tif , ~/Copahue/srtm_90_v4.tif
    )
run=(run1 , run2)
1048
for index in ${!DEM[*]}; do
1050 cd ~/Copahue/
# Proyección sin GCP de Forward
1052 mapproject -t rpc --threads 0 --tr 0.00001589 ${DEM[$index]} ${forward}
    _R1C1.TIF $cam_f ${run[$index]}/2_map/forward_mp.tif |tee ${run[$index
    ]}/2_map/mp.forward
# Proyección sin GCP de Nadir
1054 mapproject -t rpc --threads 0 --tr 0.00001589 ${DEM[$index]} ${nadir}
    _R1C1.TIF $cam_n ${run[$index]}/2_map/nadir_mp.tif |tee ${run[$index
    ]}/2_map/mp.nadir
# Proyección sin GCP de Backward
1056 mapproject -t rpc --threads 0 --tr 0.00001589 ${DEM[$index]} ${backward}
    _R1C1.TIF $cam_b ${run[$index]}/2_map/backward_mp.tif |tee ${run[
    $index]}/2_map/mp.backward
1058 cd ~/Copahue/${run[$index]}
# Generación de PC Nadir-backward-forward

```

```

1060 stereo -t rpcmaprpc --threads 0 2_map/nadir_mp.tif 2_map/backward_mp.
      tif 2_map/forward_mp.tif ~/Copahue/${cam_n} ~/Copahue/${cam_b} ~/
      Copahue/${cam_f} 3_stereo_nbf/out ${DEM[$index]} |tee 3_stereo_nbf/st
      .mp
1062 #Generación de PC Forward-nadir-backward
      stereo -t rpcmaprpc --threads 0 2_map/forward_mp.tif 2_map/nadir_mp.tif
      2_map/backward_mp.tif ~/Copahue/${cam_f} ~/Copahue/${cam_n} ~/Copahue
      /${cam_b} 3_stereo_fnb/out ${DEM[$index]} |tee 3_stereo_fnb/st.mp
1064 # Generación de PC Backward-nadir-forward
1066 stereo -t rpcmaprpc --threads 0 2_map/backward_mp.tif 2_map/nadir_mp.tif
      2_map/forward_mp.tif ~/Copahue/${cam_b} ~/Copahue/${cam_n} ~/
      Copahue/${cam_f} 3_stereo_nbf/out ${DEM[$index]} |tee 3_stereo_nbf/st.
      mp
1068 # Fusión de PC
      cd ~/Copahue/${run[$index]}
1070 pc_merge -o 4_merge_pc/out-PC-merge.tif 3_stereo_nbf/out-PC.tif 3
      _stereo_fnb/out-PC.tif 3_stereo_bnf/out-PC.tif
1072 #Fusión de imágenes
      pc_merge -o 4_merge_pc/out-L-merge.tif 3_stereo_nbf/out-L.tif 3
      _stereo_fnb/out-L.tif 3_stereo_bnf/out-L.tif
1074 #Creación de DEM
1076 point2dem --dem-hole-fill-len 100 --t_srs epsg:32719 --tr 3 --threads 0
      --nodata-value -9999 4_merge_pc/out-PC-merge.tif --orthoimage 4
      _merge_pc/out-L-merge.tif -o 5_dem/Copahue_UTM19S_WGS84_3_${run[
      $index]}
1078 done
1080 #####
      #-----Pruebas T03 a T07-----#
1082 #####
      SRTM90=(~/Copahue/srtm_90_v4.tif)
1084
      cd ~/Copahue/
1086 #PASO 1: ajuste cámaras s/ GCP
      bundle_adjust -t rpc ${forward}_RIC1.TIF ${nadir}_RIC1.TIF ${backward}
      _RIC1.TIF ${cam_f} ${cam_n} ${cam_b} -o ~/Copahue/run3/1_ba/out --tif
      -compress Deflate --threads 18 --max-iterations 500 |tee ba.report
1088
      #PASO 2: proyección s/ ajustes sobre SRTM90
1090 mapproject -t rpc --threads 20 --tr 0.00001589 $SRTM90 ${forward}_RIC1.
      TIF $cam_f ~/Copahue/run3/2_map/forward_mp.tif |tee ~/Copahue/run3/2
      _map/map.forward.report
      # Se repite con nadir y backward
1092 stereo.file=(st.t03.md, st.t04.md, st.t05.md, st.t06.md, st.t07.md) #
      configuraciones pa/ el programa stereo
1094 test=(t03, t04, t05, t06, t07)
      # T03: Vent.Corr.11x11,Subpx 2, Vent.Subpx 11x11
1096 # T04: Vent.Corr. 11x11, Subpx 2, Vent.Subpx 21x21
      # T05: Vent.Corr. 15x15,Subpx 2, Vent.Subpx 15x15
1098 # T06: Vent.Corr. 15x15,Subpx 2, Vent.Subpx 21x21
      # T07: Vent.Corr. 21x21,Subpx 2, Vent.Subpx 21x21

```

```

1100 for index in ${!stereo.file[*]}; do
1102 cd ~/Copahue/run3 #se sitúa en la carpeta
rm stereo.default #borra el archivo default
1104 cp ${stereo.file[$index]} stereo.default #crea archivo con parámetros
    deseados

1106 #PASO 3: Generación PC nadir-backward-forward
#PASO 4: Generación PC forward-nadir-backward
1108 #PASO 5: Generación PC backward-nadir-forward
#PASO 6: Fusión de PCs e
1110 #PASO 7: Fusión de imágenes
#PASO 8: Generación de DEM
1112
done
1114
#####
1116 #-----Pruebas T08 a T11-----#
#####
1118 #####T08:
#PASO 1: ajuste s/ GCP
1120 #PASOS 2 a 8

1122 #####T11:
#PASO 1: ajuste s/ GCP
1124 #PASO 2: proyección nadir, backward y forward c/ ajuste sobre SRTM 30
mapproject -t rpc --bundle-adjust-prefix run4/1_ba/out --threads 0 --tr
    0.00001589 $SRTM30 ${forward}_R1C1.tif $cam_f run7/2_map/forward_mp.
    tif 2>&1 | tee run7/2_map/map.forward.report
1126 #PASO 3 a 8

1128 #####T09:
#PASO 1: ajuste c/ GCP
1130 bundle_adjust -t rpc ${forward}_R1C1.TIF ${nadir}_R1C1.TIF ${backward}
    _R1C1.TIF ${cam_f} ${cam_n} ${cam_b} run5/ground_control_points.gcp --
    datum WGS_1984 --use-lon-lat-height-gcp-error -o run5/1_ba/out --
    tif-compress Deflate --threads 18 --max-iterations 500 2>&1 | tee
    run5/1_ba/ba_GCP.report
#PASO 2: proyección s/ resultado de ajuste
1132 #PASO 3 a 8

1134 #####T10:
#PASO 1: ajuste c/ GCP
1136 #PASO 2: proyección c/ resultado de ajuste
#PASO 3 a 8

```

Metodologías para AMES Stereo Pipeline

C.1. Secuencia de procesamiento SPOT 5

Listing C.1: en Ubuntu

```

1000 #!/bin/bash
      export PATH=~/.StereoPipeline-2.6.1-2019-03-01-x86_64-Linux/bin/:$PATH
1002 #----- Definición de variables -----
      MASTER=(20141207 20141211 20141212 20150116 20150107)
1004 SLAVE=(20141205 20141207 20141205 20150107 20150112)
      todas=(20141211 20141212 20141207 20141211 20141205 20150116 20150112
              20150107)
1006 folder=(~/DATADISK_LINUX/Copahue/spot5)
      SRTM30=(~/Copahue/SRTM/SRTM_voidfilled_30m.tif)
1008 C=(C1 C2 C3 C4 C5 C6) #pares

1010 cd ${folder}

1012 for index in ${!todas[*]}, do
      #Agrega un modelo RCP a las cámaras
1014 add_spot_rpc --threads 4 images/METADATA_${todas[$index]}.DIM --min-
              height 0 --max-height 3500
      done
1016
      #####
1018 #----- Crea un DEM por cada par disponible -----#

1020 for index in ${!MASTER[*]}; do
      cd ~/Copahue/images
1022 #Ajuste de cámaras
      bundle_adjust -t rpc IMAGERY_${MASTER[$index]}.TIF IMAGERY_${SLAVE[
              $index]}.TIF METADATA_${MASTER[$index]}.DIM METADATA_${SLAVE[$index]}.
              DIM -o ~/Copahue/run3/${C[$index]}/1_ba/out --tif-compress Deflate --
              threads 4 --max-iterations 500 --datum WGS_1984 --num-passes 2
1024

```

```

#Proyección sobre SRTM 30m s/ ajuste
1026 mapproject -t rpc --threads 0 --tr 0.0000512747 $$SRTM30 IMAGERY_${
    MASTER[ $index ]}.TIF METADATA_${MASTER[ $index ]}.DIM ~/Copahue/run3/${C[
    $index ]}/2_mp/IMAGERY_${MASTER[ $index ]}_PROJ.TIF

1028 mapproject -t rpc --threads 0 --tr 0.0000512747 $$SRTM30 IMAGERY_${
    SLAVE[ $index ]}.TIF METADATA_${SLAVE[ $index ]}.DIM ~/Copahue/run3/${C[
    $index ]}/2_mp/IMAGERY_${SLAVE[ $index ]}_PROJ.TIF

1030 cd ${folder}
#Crea Nube de puntos
1032 stereo -t rpcmaprpc --threads 0 --bundle-adjust-prefix ~/Copahue/run3/${
    C[ $index ]}/1_ba/out --tif-compress Deflate ~/Copahue/run3/${C[ $index
    ]}/2_mp/IMAGERY_${MASTER[ $index ]}_PROJ.TIF ~/Copahue/run3/${C[ $index
    ]}/2_mp/IMAGERY_${SLAVE[ $index ]}_PROJ.TIF images/METADATA_${MASTER[
    $index ]}.DIM images/METADATA_${SLAVE[ $index ]}.DIM run3/${C[ $index ]}/3
    _st/out $$SRTM30 2>&1 | tee run3/${C[ $index ]}/3_st/st.16jul2019

1034 point2dem --dem-hole-fill-len 200 --t_srs epsg:32719 --tr 15 --threads 0
    --nodata-value -9999 run3/${C[ $index ]}/3_st/out-PC.tif --orthoimage C6
    /3_st/out-L.tif -o dem/Cop_UTM19S_WGS84_15_${C[ $index ]} 2>&1 | tee
    dem/dem.log

1036 done

1038 #####
#----- Combinación C1-C2-C3

1040 cd ${folder}
#Alineación PCs
1042 n_align --datum WGS_1984 --save-transformed-clouds run3/C1/3_st/out-PC.
    tif run3/C2/3_st/out-PC.tif run3/C3/3_st/out-PC.tif -o run3/pc_merge/
    out-1

1044 cd ~/Copahue/run3
#Fusión PCs
1046 pc_merge -o pc_merge/out-PC-C123.tif pc_merge/out-1-trans_cloud -0.tif
    pc_merge/out-1-trans_cloud -1.tif pc_merge/out-1-trans_cloud -2.tif

1048 #DEM de 15 m de resolución
point2dem --dem-hole-fill-len 200 --t_srs epsg:32719 --tr 15 --threads 0
    --nodata-value -9999 pc_merge/out-PC-C123.tif -o dem/
    Cop_UTM19S_WGS84_15_C123

1050 #----- C1-C2-C5

1052 cd ${folder}
n_align --datum WGS_1984 --save-transformed-clouds run3/C1/3_st/out-PC.
    tif run3/C2/3_st/out-PC.tif run3/C5/3_st/out-PC.tif -o run3/pc_merge/
    out-2

1054 cd ~/Copahue/run3
#Fusión de PCs
1056 pc_merge -o pc_merge/out-PC-mergec125.tif pc_merge/out-2-trans_cloud -0.
    tif
1058 pc_merge/out-2-trans_cloud -1.tif pc_merge/out-2-trans_cloud -2.tif

1060 #Creación DEM 15 m
1062 point2dem --dem-hole-fill-len 200 --t_srs epsg:32719 --tr 15

```

```

1064 --threads 0 --nodata-value -9999 pc_merge/out-PC-mergec125.tif
--o dem/Cop_UTM19S_c125_2>&1 | tee dem/dem.log

1066 # ----- C1-C2
cd ${folder}
1068 n_align --datum WGS_1984 --save-transformed-clouds run3/C1/3_st/out-PC.
tif
run3/C2/3_st/out-PC.tif -o run3/pc_merge/out-5
1070
cd ~/Copahue/run3
1072 pc_merge -o pc_merge/out-PC-mergec12.tif pc_merge/out-5-trans_cloud -0.
tif
pc_merge/out-5-trans_cloud -1.tif
1074 2>&1 | tee pc_merge/merge.pc.log

1076 point2dem --dem-hole-fill-len 200 --t_srs epsg:32719 --tr 15
--threads 0 --nodata-value -9999 pc_merge/out-PC-mergec12.tif
1078 --o dem/Cop_UTM19S_WGS84_15_5 2>&1 | tee dem/dem.log

1080 # ----- C5-C1
1082 cd ${folder}
n_align --datum WGS_1984 --save-transformed-clouds run3/C1/3_st/out-PC.
tif
1084 run3/C5/3_st/out-PC.tif -o run3/pc_merge/out-6

1086 cd ${folder}/run3
pc_merge -o pc_merge/out-PC-mergec15.tif pc_merge/out-6-trans_cloud -0.
tif
1088 pc_merge/out-6-trans_cloud -1.tif
2>&1 | tee pc_merge/merge.pc.log
1090
point2dem --dem-hole-fill-len 200 --t_srs epsg:32719 --tr 15
1092 --threads 0 --nodata-value -9999 pc_merge/out-PC-mergec15.tif
--o dem/Cop_UTM19S_WGS84_15_9 2>&1 | tee dem/dem.log

```

C.2. Secuencia de procesamiento SPOT 7

Listing C.2: en Ubuntu

```

1000 #!/bin/bash
export PATH=/home/StereoPipeline-2.6.1-2019-03-01-x86_64-Linux/bin/:$PATH
1002
cd ~/Copahue/DS_SPOT7_20180419/PROD_SPOT7_001
1004 #Ajuste cámaras
bundle_adjust -t rpc SPOT7/IMG_F.tif SPOT7/IMG_N.tif SPOT7/IMG_B.tif
SPOT7/cam_f.XML SPOT7/cam_n.XML SPOT7/cam_b.XML -o ~/Copahue/run21/1
_ba/out --tif-compress Deflate --threads 18 --max-iterations 500 2>&1
| tee ~/Copahue/run21/1_ba/bundle_adjust.16jul2019
1006
#Proyección SRTM 30 m s/ resultado ajuste
1008 cd ~/Copahue/SPOT7
mapproject -t rpc --threads 0 --tr 0.00001589 ~/Copahue/SRTM_30_WGS84.
tif IMG_F.tif cam_f.XML ~/Copahue/run21/2_mp/forward_mp_1.5m.tif 2>&1
| tee ~/Copahue/run21/2_mp/map.f

```

```

1010 mapproject -t rpc --threads 0 --bundle-adjust-prefix ~/Copahue/run21/1
      _ba/out --tr 0.00001589 ~/Copahue/SRTM_30_WGS84.tif IMG_N.tif cam_n.
      XML ~/Copahue/run21/2_mp/nadir_mp_1.5m.tif 2>&1 | tee ~/Copahue/run21
      /2_mp/map.n
1012 mapproject -t rpc --bundle-adjust-prefix ~/Copahue/run21/1_ba/out --
      threads 0 --tr 0.00001589 ~/Copahue/SRTM_30_WGS84.tif IMG_B.tif cam_b
      .XML ~/Copahue/run21/2_mp/backward_mp_1.5m.tif 2>&1 | tee ~/Copahue/
      run21/2_mp/map.b
1014
1016 cd ~/Copahue/run21
      #Nadir-backward-forward
1018 stereo -t rpcmaprpc --threads 0 --bundle-adjust-prefix 1_ba/out 2_mp/
      nadir_mp_1.5m.tif 2_mp/backward_mp_1.5m.tif 2_mp/forward_mp_1.5m.tif
      ~/Copahue/SPOT7/cam_n.XML ~/Copahue/SPOT7/cam_b.XML ~/Copahue/SPOT7/
      cam_f.XML 3_st_nbf/out ~/Copahue/SRTM_30_WGS84.tif 2>&1 | tee 3
      _st_nbf/st.mapproject.16jul2019
1020 #Forward-nadir-backward
      stereo -t rpcmaprpc --threads 0 --bundle-adjust-prefix 1_ba/out 2_mp/
      forward_mp_1.5m.tif 2_mp/nadir_mp_1.5m.tif 2_mp/backward_mp_1.5m.tif
      ~/Copahue/SPOT7/cam_f.XML ~/Copahue/SPOT7/cam_n.XML ~/Copahue/SPOT7/
      cam_b.XML 3_stereo_fnb/out ~/Copahue/SRTM_30_WGS84.tif 2>&1 | tee
      3_stereo_fnb/st.mapproject.16jul2019
1022 #Backward-nadir-forward
1024 stereo -t rpcmaprpc --threads 0 --bundle-adjust-prefix 1_ba/out 2_mp/
      backward_mp_1.5m.tif 2_mp/nadir_mp_1.5m.tif 2_mp/forward_mp_1.5m.
      tif ~/Copahue/SPOT7/cam_b.XML ~/Copahue/SPOT7/cam_n.XML ~/Copahue/
      SPOT7/cam_f.XML 3_st_bnf/out ~/Copahue/SRTM_30_WGS84.tif 2>&1 |
      tee 3_st_bnf/st.mapproject.16jul2019
1026 #merge pc cloud per tile
1028 cd ~/Copahue/run21
      pc_merge -o 4_merge_pc/out-PC-merge.tif 3_st_nbf/out-PC.tif 3
      _stereo_fnb/out-PC.tif 3_st_bnf/out-PC.tif 2>&1 | tee 4_merge_pc/
      merge.pc.log
1030 pc_merge -o 4_merge_pc/out-L-merge.tif 3_st_nbf/out-L.tif 3
      _stereo_fnb/out-L.tif 3_st_bnf/out-L.tif 2>&1 | tee 4_merge_pc/merge
      .L.log
1032
1034 point2dem --dem-hole-fill-len 200 --t_srs epsg:32719 --tr 12 --threads 0
      --nodata-value -9999 4_merge_pc/out-PC-trans_reference.tif --
      orthoimage 4_merge_pc/out-L-merge.tif -o 5_dem/
      Cop_UTM19S_WGS84_12_r4_len200_align 2>&1 | tee 5_dem/dem.log

```