



**GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
UNIDAD DE GLACIOLOGÍA Y NIEVES**

**“ESTIMACIÓN DE VOLÚMENES DE HIELO MEDIANTE
SONDAJES DE RADAR EN ZONAS NORTE, CENTRAL Y SUR”**

RESUMEN EJECUTIVO

REALIZADO POR:

GEOESTUDIOS LTDA.

S.I.T. N° 338

Santiago, Mayo 2014

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

**Ministro de Obras Públicas
Ing. Comercial Sr. Alberto Undurraga Vicuña**

**Director General de Aguas
Abogado Sr. Carlos Estévez Valencia**

**Jefe Unidad Glaciología y Nieves
Dr. Gonzalo Barcaza Sepúlveda**

**Inspector Fiscal
Ing. Civil Sr. Armando Peña González**

GEOESTUDIOS LTDA.

**Jefe de Proyecto
Dr. Gino Casassa Rogazinski
Dr. Cedomir Marangunic Damianovic**

Profesionales

**Dr. Norbert Blindow, asesor en geofísica
Ing. Electrónico Bernhard Bömer, asesor en electrónica
Dr. Carlos Cárdenas, asesor en electrónica, Universidad de Magallanes
Ing. Electrónico Rubén Carvallo, asesor en electrónica, Universidad de
Magallanes**

**Ing. Forestal Sr. José Luis Rodríguez Lagos
Ing. Informático Sra. Ana María Marangunic Vrsalovic
Geomensor Sr. Cristián Peralta Abasolo
Geógrafo Sr. Martín Bustamante Domic
Geólogo Sr. José Becerra Rivera
Ing. Civil Hidráulica, M.Sc. Srta. Gabriela Collao Barrios
Ing. Civil Hidráulica Sra. Carolina Amigo Finger
Ing. Ej. Prevención de Riesgos Sra. Claudia Schönfeldt Palma
Técnico Sr. Andrés Marangunic Vrsalovic
Técnico Sr. Nelson Cvitanic Bravo
Técnico Sr. Claudio Iglesias Scepanovic
Técnico Sr. Carlos Fernández Fernández
Técnico Sr. Arturo Carrasco Olguín
Técnico Sr. Héctor González Tapia
Técnico Sr. Miguel Ledda Verchere**

ÍNDICE

RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN	2
2. ÁREA DE ESTUDIO.....	3
3. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.....	5
4. METODOLOGÍA.....	6
4.1. Cálculo de volúmenes	6
4.2. Resumen de resultados.....	26
4.2.1. Parámetros de vuelo.....	26
4.2.2. Espesores medios y volúmenes.....	27
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	31

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-A. Lista de glaciares a prospectar mediante RES.	3
Tabla 3-A. Resumen de las horas de vuelo empleadas durante la campaña aérea RES 2013.....	5
Tabla 4.1-A. Radio de búsqueda aplicado en interpolación IDW en los diferentes glaciares.....	7
Tabla 4.2.1-A. Resumen de las mediciones aéreas efectuadas en los 18 glaciares considerados en el estudio.....	26
Tabla 4.2.2-A. Resumen de espesores medidos mediante radar y volúmenes calculados en los 18 glaciares.	28
Tabla 4.2.2-B. Resumen de espesores medidos mediante radar y volúmenes calculados en los 18 glaciares.	29

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.1-A. Glaciar Del Potro.	8
Figura 4.1-B. Glaciar Tronquitos.	9
Figura 4.1-C. Glaciar Tapado.....	10
Figura 4.1-D. Glaciar Juncal Norte.	11
Figura 4.1-E. Glaciar Río Blanco.	12
Figura 4.1-F. Glaciar Tupungatito.	13
Figura 4.1-G. Glaciar Marmolejo.	14
Figura 4.1-H. Glaciar Tinguiririca 3.	15
Figura 4.1-I. Glaciar Tinguiririca 4.	16
Figura 4.1-J. Glaciar Tinguiririca 1.	17
Figura 4.1-K. Glaciar Sierra Velluda.	18
Figura 4.1-L. Glaciar Callaqui.	19
Figura 4.1-M. Glaciar Llaima.	20
Figura 4.1-N. Glaciar Sollipulli.	21
Figura 4.1-O. Glaciar Villarrica.	22
Figura 4.1-P. Glaciar Mocho-Choshuenco.	23
Figura 4.1-Q. Glaciar Osorno.....	24
Figura 4.1-R. Monte Tronador.	25

RESUMEN

El objetivo del presente estudio, "Estimación de volúmenes de hielo mediante sondeos de radar en zonas norte, central y sur", Resolución DGA (exenta) Nº 1591 de 29 Mayo 2013, consistió en la determinación, mediante radar aéreo, de volúmenes de hielo equivalente en agua en dieciocho (18) glaciares distribuidos en las zonas glaciológicas Norte, Centro y Sur de Chile, desde la cuenca del río Copiapó (28°22'S) a la cuenca del río Petrohué (41°13'S). Para los glaciares fríos, tal como aquellos en cotas altas de las zonas Norte y Centro, se utilizó un radar de 50 MHz, mientras que en cotas más bajas en las zonas centro y sur, donde se anticipaba hielo temperado, se usó un radar de 25 MHz.

Los glaciares tienen superficies que varían entre 2,1 km² (glaciar Tapado en la cuenca del Elqui) a 38,6 km² (glaciar Tronador en la cuenca del Petrohué), con un promedio de 8 perfiles en cada glaciar. En los glaciares de las zonas Norte y Centro, donde predominan los glaciares de valle, se optó por un perfil longitudinal, 3 perfiles transversales y 3 perfiles diagonales. En la zona Sur, donde los glaciares cubren conos volcánicos, se prefirió perfiles radiales, y en un par de casos (Sierra Velluda, Osorno) también perfiles espirales. Se voló una distancia total de 358 km de perfiles sobre los glaciares. En los glaciares Tapado y Mocho-Choshuenco se realizaron mediciones terrestres de radar para calibrar y validar los datos de radar aéreo, mientras que en los glaciares Tupungatito y Villarrica se utilizaron datos anteriores de radar para el mismo propósito.

Se determinó un espesor medio de 64 m para los 18 glaciares de estudio, con un espesor medio mínimo de 16 m para el Llaima y un espesor medio máximo de 324 m para el Sollipulli. El espesor máximo fue 775 m en el Sollipulli. Los resultados de espesores fueron extrapolados de manera confiable a la mayor parte del área de los glaciares, donde existía buena cobertura de datos aéreos de espesores. Los volúmenes interpolados de hielo resultan en un valor mínimo de 57 millones de m³ para el glaciar Tapado y un máximo de 3.929 millones de m³ para el volcán Sollipulli. A partir de un análisis de 243 cruces para los 16 glaciares donde existen cruces se obtiene una diferencia promedio de espesores de 2,6 m para los 16 glaciares, vale decir un 3,8% de diferencia, que refleja la consistencia interna promedio de los datos de espesor. Los resultados permiten establecer los equivalentes en agua para estos 18 glaciares de la zona Norte, Centro y Sur de Chile.

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo general del presente estudio consiste en la determinación de volúmenes de hielo equivalente en agua en dieciocho (18) glaciares distribuidos en las zonas glaciológicas Norte, Centro y Sur de Chile. Los objetivos específicos incluyen:

- a) Realizar mediciones mediante RES en 18 glaciares, mediante perfiles longitudinales, transversales y/o radiales, según la geometría de cada glaciar en particular.
- b) Determinar el espesor y la topografía subglacial para la superficie total de los 18 glaciares mediante RES.

El estudio se enmarca en el proyecto "Estimación de volúmenes de hielo mediante sondeos de radar en zonas norte, central y sur", cuyas bases administrativas y técnicas fueron aprobadas por la Resolución DGA (exenta) N° 1591, de 29 Mayo 2013. En adelante denominaremos a este proyecto "RES", según la sigla en inglés de "Radio Echo Sounding" (radio eco sondeo).

El espesor de hielo es un parámetro esencial para determinar el estado actual de los glaciares y proyectar cambios futuros. Conforme a los lineamientos establecidos en la Estrategia Nacional de Glaciares (ENG) (DGA, 2009b), la Unidad de Glaciología y Nieves (UGN) de la Dirección General de Aguas (DGA) licita el presente estudio (DGA, 2013) con la finalidad de medir los espesores de hielo en 18 glaciares de las zonas glaciológicas Norte, Centro y Sur, y estimar los volúmenes respectivos de hielo. Las mediciones se enmarcan en el cumplimiento del Nivel 3 de la ENG.

Existen varios métodos geofísicos para la determinación de espesores de hielo, por ejemplo, en orden creciente de precisión, la magnetometría, gravimetría, sísmica y radio-eco sondeo (RES). Estos últimos dos métodos tienen una precisión similar, mejor al 10% por lo general, sin embargo el método logísticamente más simple es el RES, que constituye la metodología seleccionada por la UGN para estudiar los glaciares en la presente propuesta pública. En los glaciares de los Andes chilenos se ha aplicado exitosamente el método de RES terrestre y aéreo, tanto en el marco de estudios de la UGN (ej. DGA, 2009a, 2011, 2012) como en otros estudios científicos (ej., Casassa y Rivera, 1998; Rivera y Casassa 2002; Zamora et al., 2009).

2. ÁREA DE ESTUDIO

De los 18 glaciares incluidos en este estudio, 3 están ubicados en la Zona Norte, 7 en la Zona Centro y 8 en la Zona Sur (Tabla 2-A).

Tabla 2-A. Lista de glaciares a prospectar mediante RES. Las coordenadas UTM se refieren al datum WGS 84, Huso 19S, excepto los volcanes Mocho-Choshuenco y Osorno que pertenecen al Huso 18S. "Sup. Orig." denota la superficie original entregada por la DGA en el Inventario de Glaciares. "Sup. Mod." Refleja la superficie modificada en este estudio de acuerdo a la interpretación de imágenes satelitales recientes. "Porc." es el cociente entre la superficie modificada y la superficie original, expresado en porcentaje.

Nº	Nombre Glaciar	Zona Glaciológica	Sup. Orig. km ²	Sup. Mod. km ²	Porc. %	Huso	UTM N m	UTM E m
1	Del Potro	Zona Norte	4,88	4,78	98,0	19S	6.860.367	440.365
2	Tronquitos	Zona Norte	2,78	2,49	89,6	19S	6.842.969	428.450
3	Tapado	Zona Norte	2,24	2,05	91,5	19S	6.664.227	410.992
4	Juncal Norte	Zona Centro	9,38	8,44	90,0	19S	6.345.235	397.334
5	Río Blanco	Zona Centro	15,81	21,11	133,5	19S	6.342.770	392.936
6	Volcán Tupungatito	Zona Centro	6,89	7,67	111,3	19S	6.303.655	423.443
7	Marmolejo	Zona Centro	9,22	9,67	104,9	19S	6.266.483	415.287
8	Tinguiririca 3	Zona Centro	3,56	3,66	102,8	19S	6.150.327	380.139
9	Tinguiririca 4	Zona Centro	2,09	2,08	99,5	19S	6.149.855	382.023
10	Tinguiririca 1	Zona Centro	4,52	4,34	96,0	19S	6.146.300	378.295
11	Sierra Velluda	Zona Sur	14,54	14,33	98,6	19S	5.850.219	286.008
12	Volcán Callaqui	Zona Sur	9,00	7,33	81,4	19S	5.799.156	285.189
13	Volcán Llaima	Zona Sur	14,05	20,57	146,4	19S	5.712.424	262.435
14	Nevado Sollipulli	Zona Sur	15,42	12,13	78,7	19S	5.682.561	281.314
15	Volcán Villarrica	Zona Sur	28,82	28,12	97,6	19S	5.631.232	248.772
16	V. Mocho-Choshuenco	Zona Sur	16,96	15,22	89,7	18S	5.574.908	241.533
17	Volcán Osorno	Zona Sur	5,87	5,45	92,8	18S	5.443.608	206.390
18	Monte Tronador	Zona Sur	38,72	38,55	99,6	19S	5.439.128	255.842

Se cuenta con los polígonos en formato shape para cada glaciar, correspondientes al inventario oficial de glaciares proporcionado por la DGA ("Sup. Orig." En Tabla 2-A). Se inspeccionaron detalladamente los polígonos de cada glaciar en base a recientes imágenes satelitales visibles de alta resolución (<30 m) disponibles en Google Earth y Bing Maps, y se realizaron modificaciones a dichas áreas ("Sup. Mod."). Estas modificaciones, de carácter preliminar pues un inventario detallado no es objeto de este estudio, reflejan diferencias con el inventario oficial. Las diferencias de las áreas modificadas con el inventario oficial son en general menores al 10% de las áreas originales (Tabla 2-A), excepto en los siguientes glaciares: Río Blanco, Callaqui, Llaima y Sollipulli. En el Río Blanco y Llaima se agregaron áreas cubiertas de detritos que se consideraron parte íntegra de los glaciares, mientras que en el Callaqui y Sollipulli se estimó que el inventario oficial sobreestimaba las áreas glaciares.

Los glaciares de la Zona Norte se ubican por sobre los 4.400 m s.n.m. (glaciar Tapado), alcanzando hasta los 5.700 m de altitud (glaciar Del Potro), mientras que los de la Zona Centro tienen un rango altitudinal entre los 3.100 m (glaciar Tinguiririca 1) y los 6.000 m s.n.m. (glaciar Marmolejo). Basado en la experiencia de la DGA en la medición de los glaciares de las zonas Norte y Centro (DGA, 2009, 2011, 2012), y debido a la altitud de los glaciares en dichas zonas, los 3 glaciares de la Zona Norte (Tabla 2-A) y al menos las zonas altas de los 4 glaciares septentrionales de la Zona Centro (Juncal Norte, Río Blanco, Volcán Tupungatito y Marmolejo) son probablemente fríos, en cambio los tres glaciares Tinguiririca (Tabla 2-A) posiblemente son temperados, al menos en sus zonas inferiores. En la Zona Sur el rango altitudinal de los glaciares varía entre 1.300 y 3.500 m, por lo cual el hielo es temperado, según ha sido comprobado por perforaciones de testigos de hielo (Santibáñez *et al.*, 2008), excepto quizás por los sectores somitales de las montañas más altas (Monte Tronador). La naturaleza fría o temperada del hielo es relevante para el RES puesto que condiciona la presencia o ausencia de agua de fusión, dado que el agua inhibe la penetración de las ondas electromagnéticas de radar en el hielo provocado por la mayor absorción y dispersión, esto último debido a cuerpos de agua intraglacial que normalmente pueden existir en el interior de los glaciares temperados (Bogorodsky *et al.*, 1985; Plewes and Hubbard, 2001; Nobes, 2011). Debido a lo anterior, y tal como se describe en el título 4. Metodología, en el presente proyecto se realizan mediciones con un radar aéreo que opera a un frecuencia de 50 MHz para los glaciares fríos, y 25 MHz para los glaciares temperados (Watts and England, 1976; Watts and Isherwood, 1978; Watts and Wright, 1981).

3. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

Se comenzó con un vuelo de prueba en la zona centro, luego los glaciares de la zona norte, parte de los glaciares de la zona centro, los glaciares de la zona sur y finalmente terminar con los glaciares de la zona centro. El resumen de las fechas, los vuelos y horas de vuelo se presenta en la Tabla 3-A.

Tabla 3-A. Resumen de las horas de vuelo empleadas durante la campaña aérea RES 2013.

VUELO	HORAS
18 agosto. Vuelo de prueba Aeródromo Eulogio Sánchez (Tobalaba, SCTB)-El Yeso-SCTB.	1,8
27 agosto. Vuelo desde Copiapó Chamonate (SCHA) a glaciares Del Potro y Tronquitos, regreso a SCHA.	5,0
29 agosto. Vuelo desde SCHA a glaciares Del Potro y Tronquitos y traslado a Pisco Elqui.	3,5
30 agosto. Vuelo desde Pisco Elqui a glaciar Tapado, retorno a Valle Nevado.	6,3
4 septiembre. Vuelo de prueba en Las Vizcachas.	0,7
6 octubre. Vuelo desde SCTB a Viña Concha y Toro (VCT) (5 octubre), vuelo desde VCT a Alfalfal y glaciares Tupungatito y Marmolejo, regreso a SCTB.	4,2
11 octubre. Vuelo desde Petrohué a glaciares Osorno y Tronador, regreso a Petrohué.	3,8
12 octubre. Vuelo desde Petrohué a Huilo-Huilo, vuelo al glaciar Mocho-Choshuenco y traslado a Pucón.	3,5
14 octubre. Vuelo desde Pucón al glaciar Villarrica, vuelo al glaciar Sollipulli y traslado a Melipeuco km 18.	3,5
15 octubre. Vuelo desde Melipeuco km 18 al volcán Llaima y aterrizaje en helipuerto Tenencia de Carabineros Alto Bío Bío. Vuelo al volcán Callaqui, retorno a la Tenencia Alto Bío Bío y traslado a Antuco.	5,0
16 octubre. Vuelo desde Antuco al glaciar Sierra Velluda, retorno a Antuco y traslado al Aeródromo San Fernando (SCSD).	3,6
17 octubre. Vuelo desde SCSD a helipuerto río Tinguiririca y luego glaciares Tinguiririca, retorno a río Tinguiririca y traslado a SCTB.	5,9
20 noviembre. Vuelo desde SCTB a helipuerto Guardia Vieja y luego a glaciares Juncal Norte y Río Blanco, retorno a SCTB.	3,6
TOTAL	50,4
SUBTOTAL ZONA NORTE	14,8
SUBTOTAL ZONA CENTRO	10,3
SUBTOTAL ZONA SUR	25,3

4. METODOLOGÍA

Se emplea en este proyecto un sistema de radar aéreo para medir los 18 glaciares propuestos por la DGA. Este sistema es una modificación de los radares aéreos que han sido exitosamente aplicados en dos proyectos anteriores de la DGA (DGA, 2011; DGA, 2012), donde participó parte del equipo de trabajo propuesto para este estudio. Para este efecto participa en este estudio el Dr. Norbert Blindow de Alemania, geofísico inventor de los radares aéreos utilizados en los proyectos mencionados.

Los datos aéreos se validan con mediciones mediante RES terrestre que se realizarán en este proyecto en un glaciar frío en la Zona Norte (glaciar Tapado), y un glaciar temperado en la Zona Sur (glaciar Volcán Mocho-Choshuenco). Además se cuenta con datos de espesores de radar terrestre para el glaciar del Volcán Tupungatito, Zona Centro, adquiridos el año 2010 por personal actualmente en Geoestudios en el marco de una campaña glaciológica de la Universidad de Maine, EE.UU. con el Centro de Estudios Científicos (CECs).

Tanto en el radar aéreo como en el terrestre (Casassa y Rivera, 1998) se transmite una onda electromagnética hacia el glaciar, la cual rebota en la base rocosa y es capturada por el receptor (Rx). El espesor se calcula a partir del tiempo (*two-way travel time*) que demora la onda transmitida en viajar entre el transmisor (Tx) y la base subglacial, y su posterior reflejo hacia el Rx. En el caso del radar aéreo el Rx y el Tx se ubican sobre una estructura de antena colgante a unos 20-50 m sobre la superficie, mientras que en el radar terrestre el Rx y Tx están localizados sobre la superficie.

4.1. CÁLCULO DE VOLÚMENES

A continuación (Figs. 4.1-A a 4.1-R) se presentan los resultados gráficos de la interpolación de espesores para los 18 glaciares, mediante el algoritmo IDW con potencia 3 y con una resolución espacial de 5 m. En la interpolación se aplicó un radio de búsqueda variable según las características de cada glaciar, de manera tal que fueran cubiertas las áreas en que no existían datos radar (Tabla 4.1-A). En todos los glaciares se han eliminado áreas sin cobertura adecuada de radar, representadas en achurado, que denominamos "área de exclusión", donde se ha decidido no interpolar puesto que se

pueden cometer errores importantes por subestimación de espesores, ya que la interpolación está controlada en gran medida por el espesor cero de los bordes de los glaciares.

Tabla 4.1-A. Radio de búsqueda aplicado en interpolación IDW en los diferentes glaciares.

Nombre Glaciar	Radio de búsqueda IDW (m)
Del Potro	1.800
Tronquitos	700
Tapado	500
Juncal Norte	1.000
Río Blanco	3.500
Volcán Tupungatito	800
Marmolejo	1.700
Tinguiririca 3	500
Tinguiririca 4	500
Tinguiririca 1	800
Sierra Velluda	1.500
Volcán Callaqui	1.200
Volcán Llaima	2.200
Nevado Sollipulli	1.400
Volcán Villarrica	2.100
V. Mocho-Choshuenco	1.500
Volcán Osorno	800
Monte Tronador	4.800

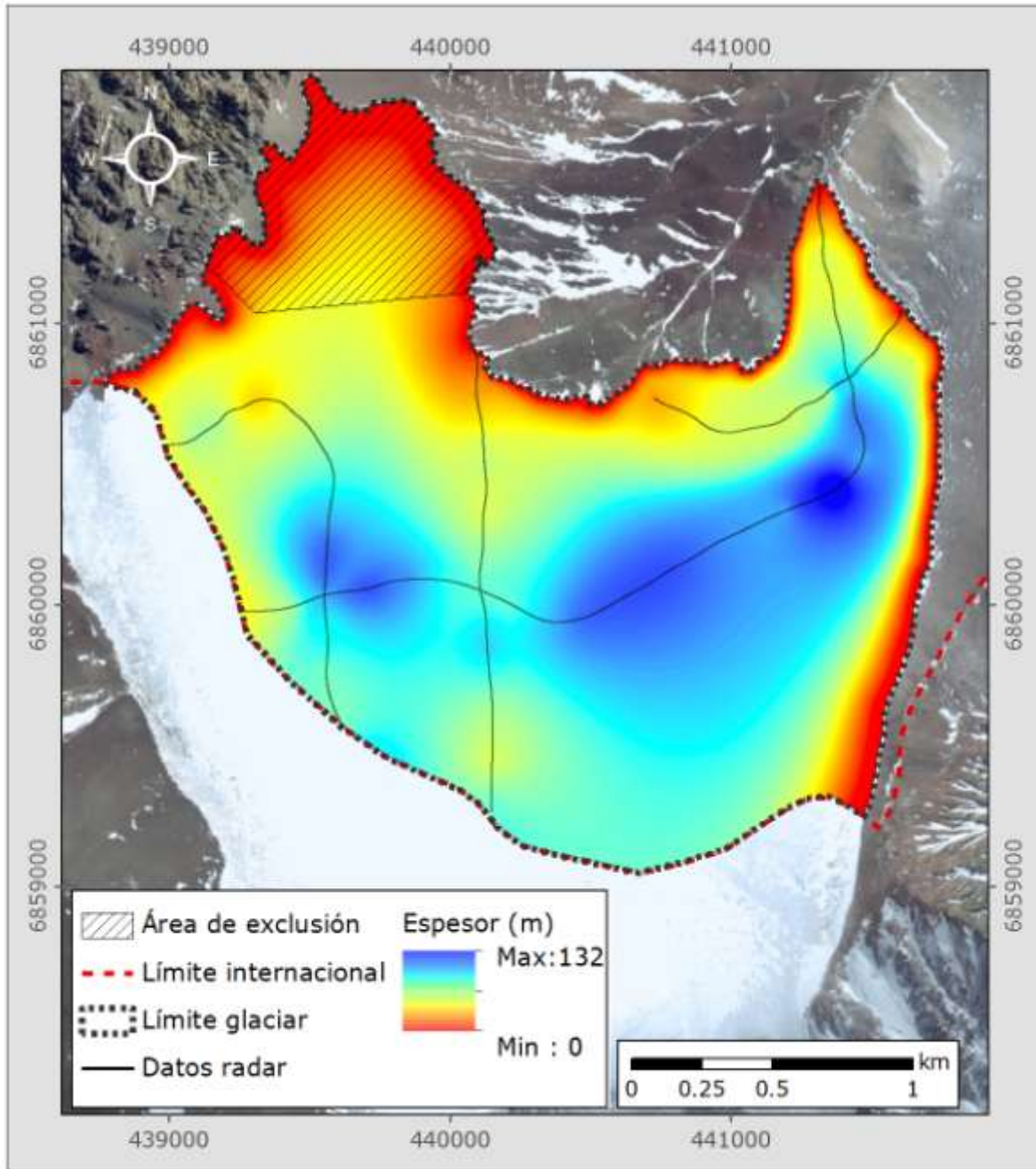


Figura 4.1-A. Glaciar Del Potro. Datos interpolados de espesores. Las líneas negras delgadas representan las líneas de vuelo con datos interpretados de espesores. El polígono achurado dentro del borde del glaciar corresponde a un área eliminada del cálculo volumétrico puesto que no existen datos de radar.

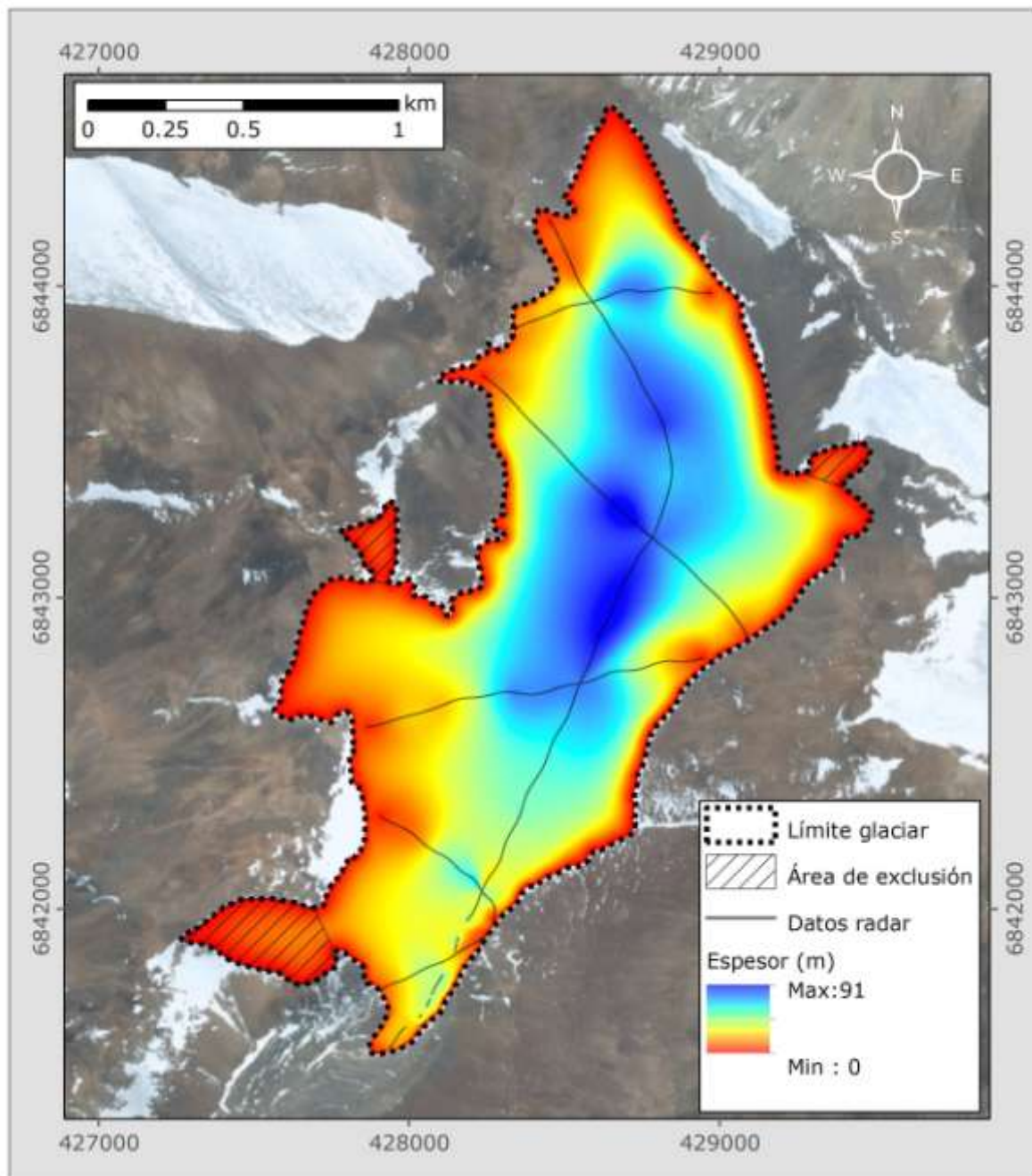


Figura 4.1-B. Glaciar Tronquitos. Datos interpolados de espesores. Las líneas negras delgadas representan las líneas de vuelo con datos interpretados de espesores. Los polígonos achurados dentro del borde del glaciar corresponden a áreas eliminadas del cálculo volumétrico puesto que no existen datos de radar.

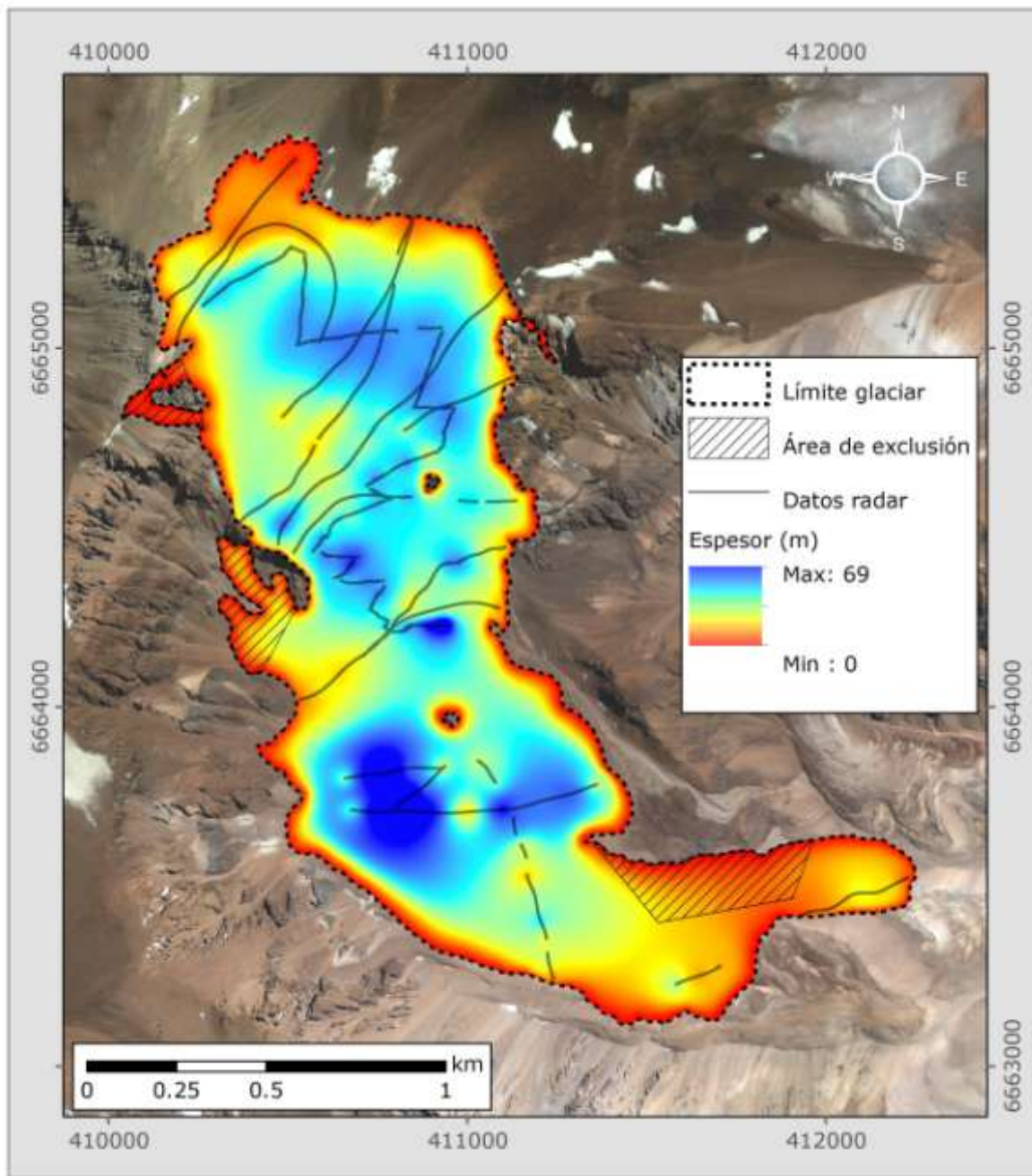


Figura 4.1-C. Glaciar Tapado. Datos interpolados de espesores. Las líneas negras delgadas representan las líneas de vuelo con datos interpretados de espesores. Los polígonos achurados dentro del borde del glaciar corresponden a áreas eliminadas del cálculo volumétrico puesto que no existen datos de radar.

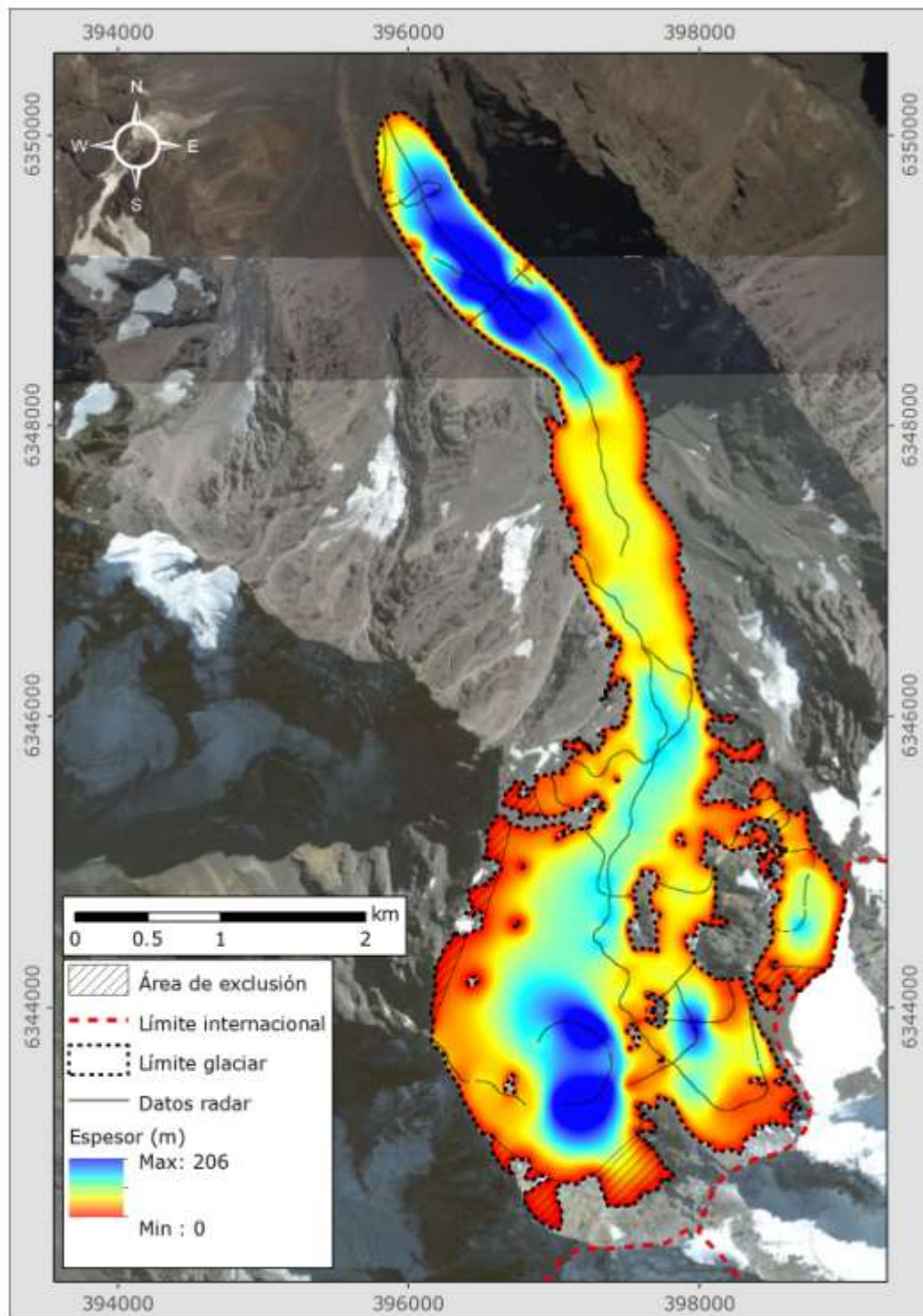


Figura 4.1-D. Glaciar Juncal Norte. Datos interpolados de espesores. Las líneas negras delgadas representan las líneas de vuelo con datos interpretados de espesores. Los polígonos achurados dentro del borde del glaciar corresponden a áreas eliminadas del cálculo volumétrico puesto que no existen datos de radar.

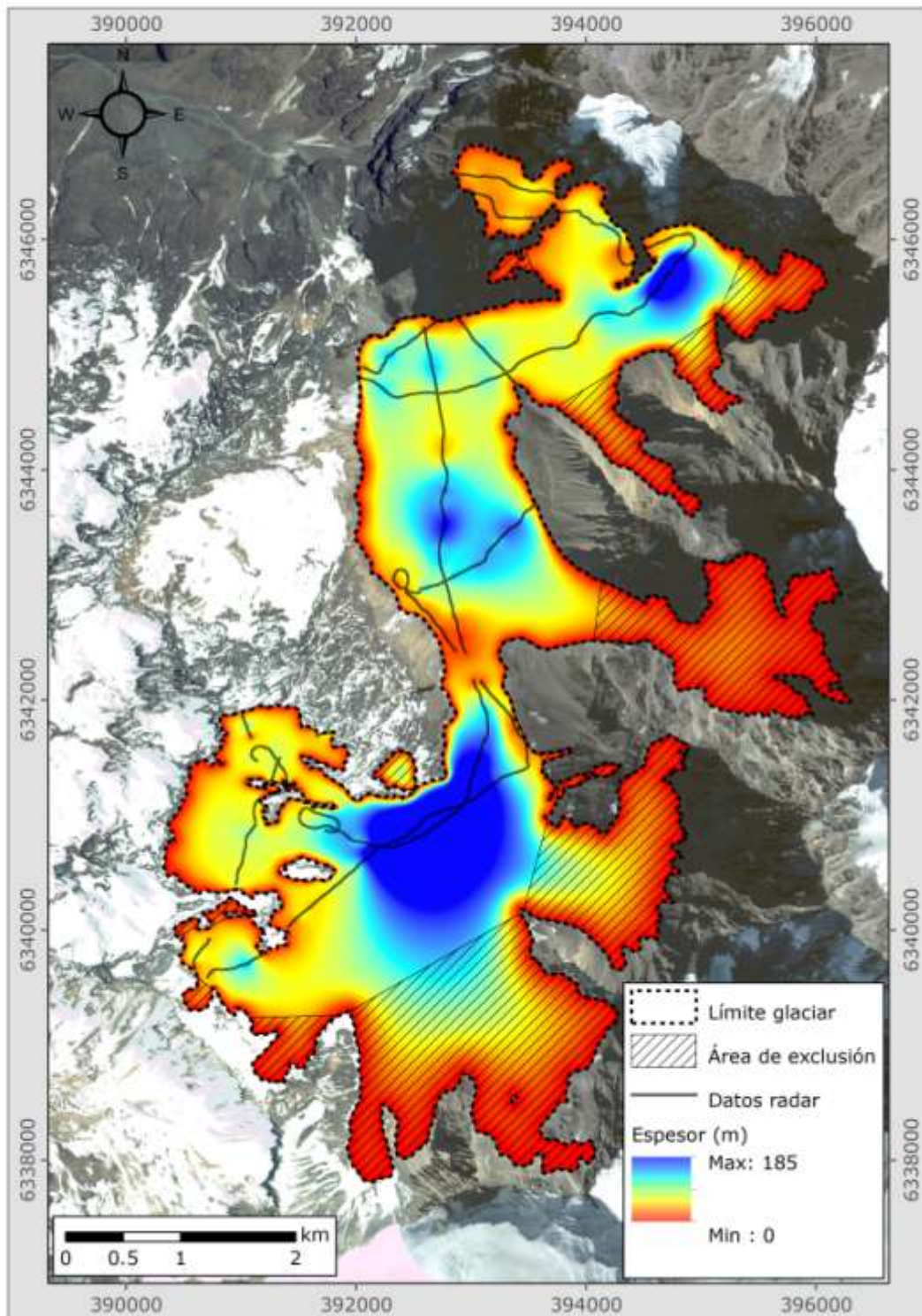


Figura 4.1-E. Glaciar Río Blanco. Datos interpolados de espesores. Las líneas negras delgadas representan las líneas de vuelo con datos interpretados de espesores. Los polígonos achurados dentro del borde del glaciar corresponden a áreas eliminadas del cálculo volumétrico puesto que no existen datos de radar.

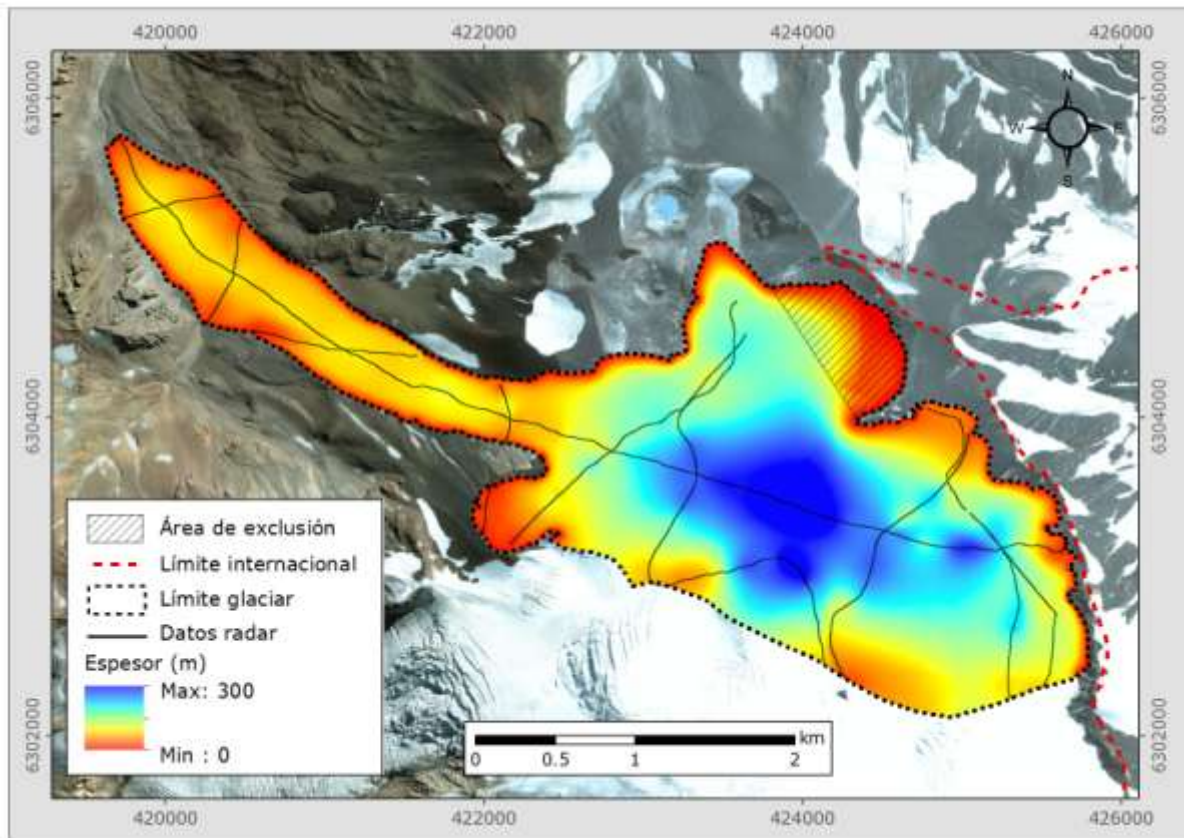


Figura 4.1-F. Glaciar Tupungatito. Datos interpolados de espesores. Las líneas negras delgadas representan las líneas de vuelo con datos interpretados de espesores. El polígono achurado dentro del borde del glaciar corresponde a un área eliminada del cálculo volumétrico puesto que no existen datos de radar.

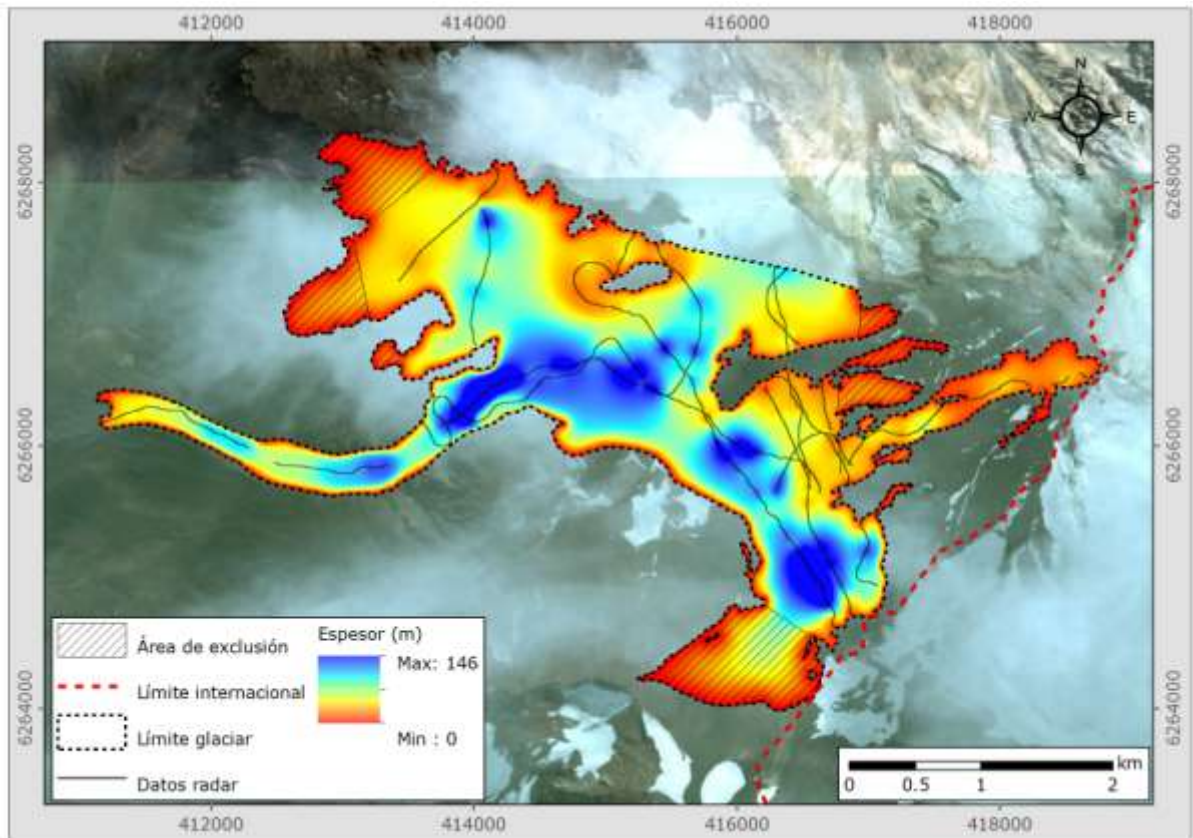


Figura 4.1-G. Glaciar Marmolejo. Datos interpolados de espesores. Las líneas negras delgadas representan las líneas de vuelo con datos interpretados de espesores. Los polígonos achurados dentro del borde del glaciar corresponden a áreas eliminadas del cálculo volumétrico puesto que no existen datos de radar.

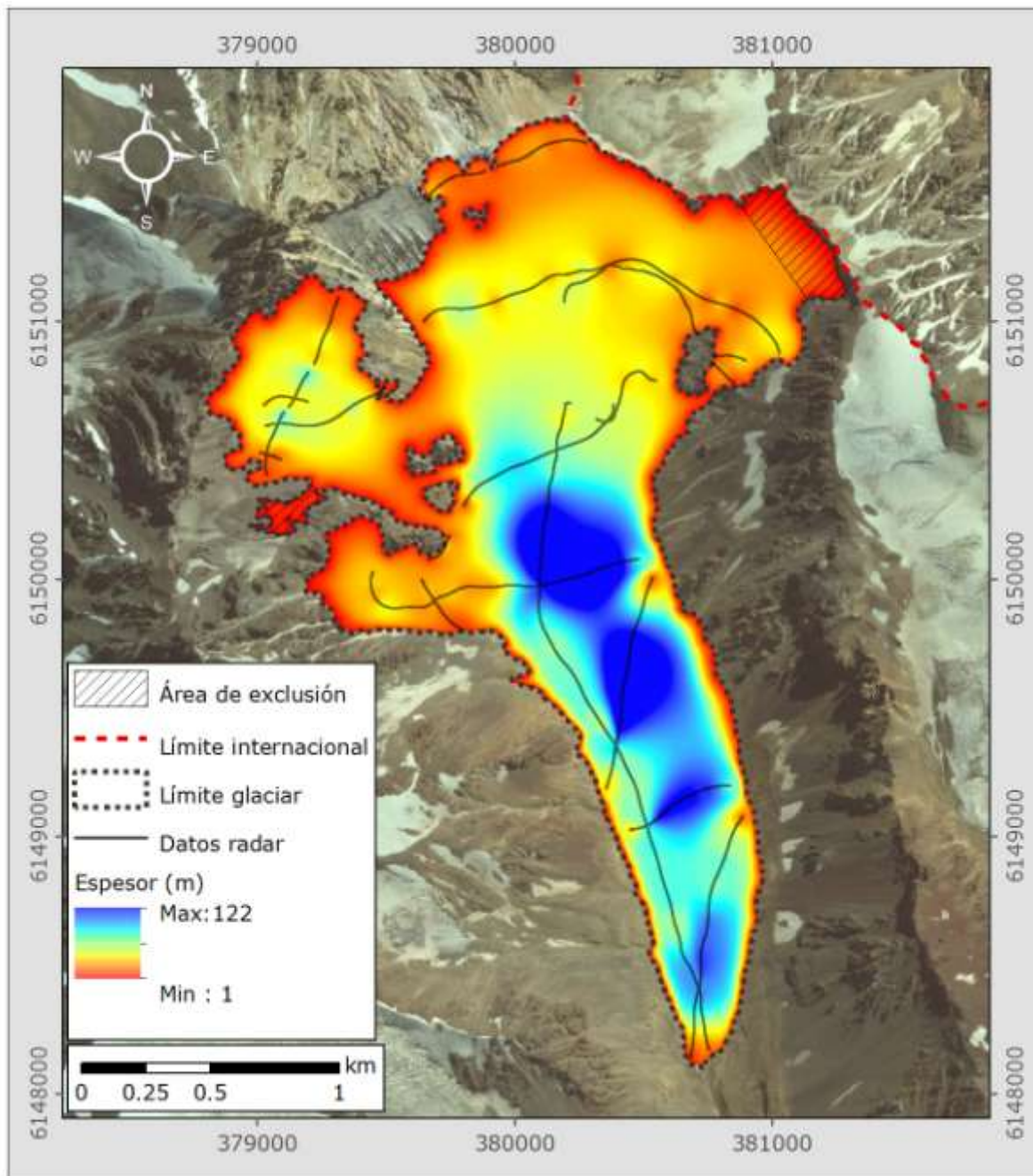


Figura 4.1-H. Glaciar Tinguiririca 3. Datos interpolados de espesores. Las líneas negras delgadas representan las líneas de vuelo con datos interpretados de espesores. Los polígonos achurados dentro del borde del glaciar corresponden a áreas eliminadas del cálculo volumétrico puesto que no existen datos de radar.

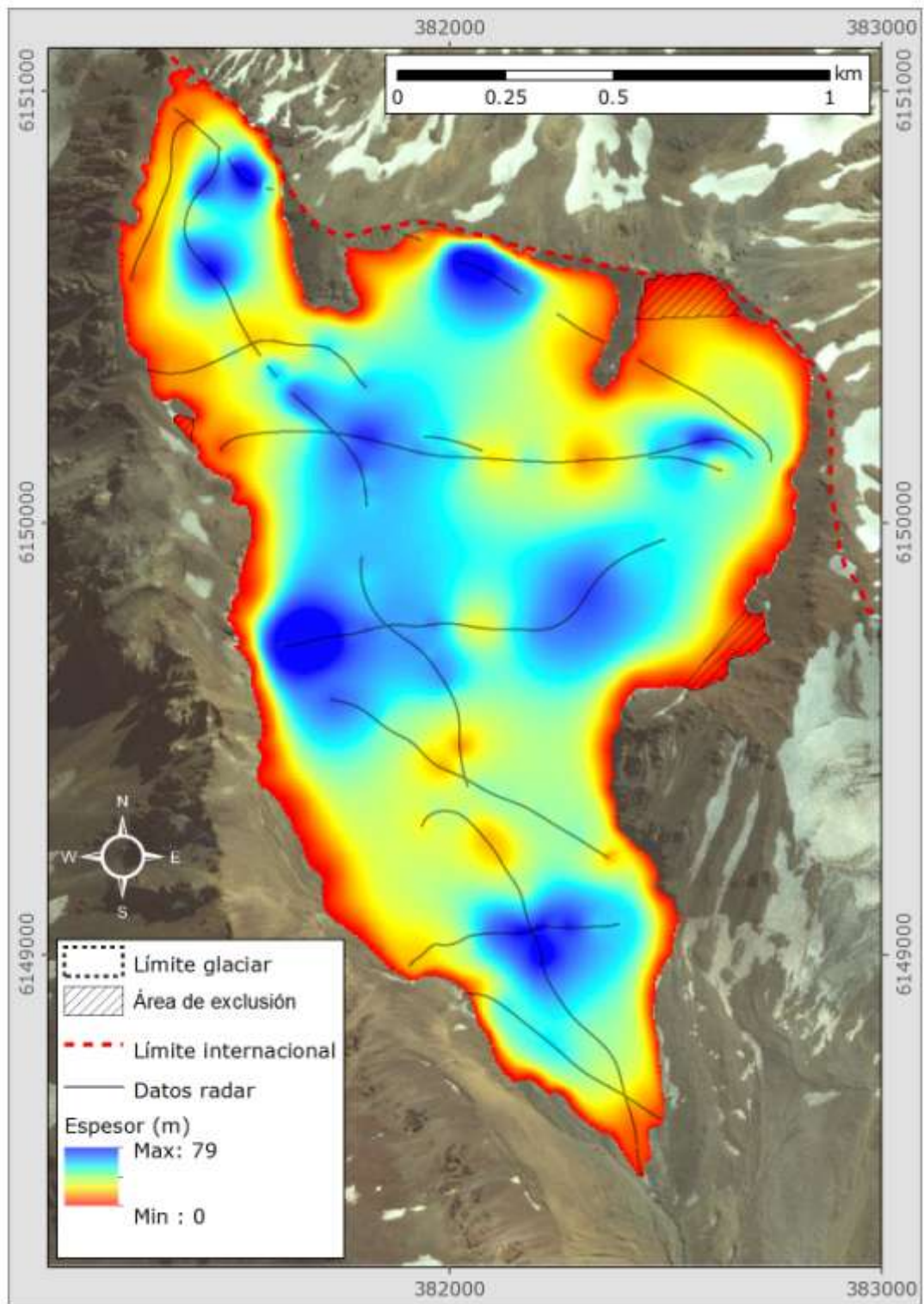


Figura 4.1-I. Glaciar Tinguiririca 4. Datos interpolados de espesores. Las líneas negras delgadas representan las líneas de vuelo con datos interpretados de espesores.

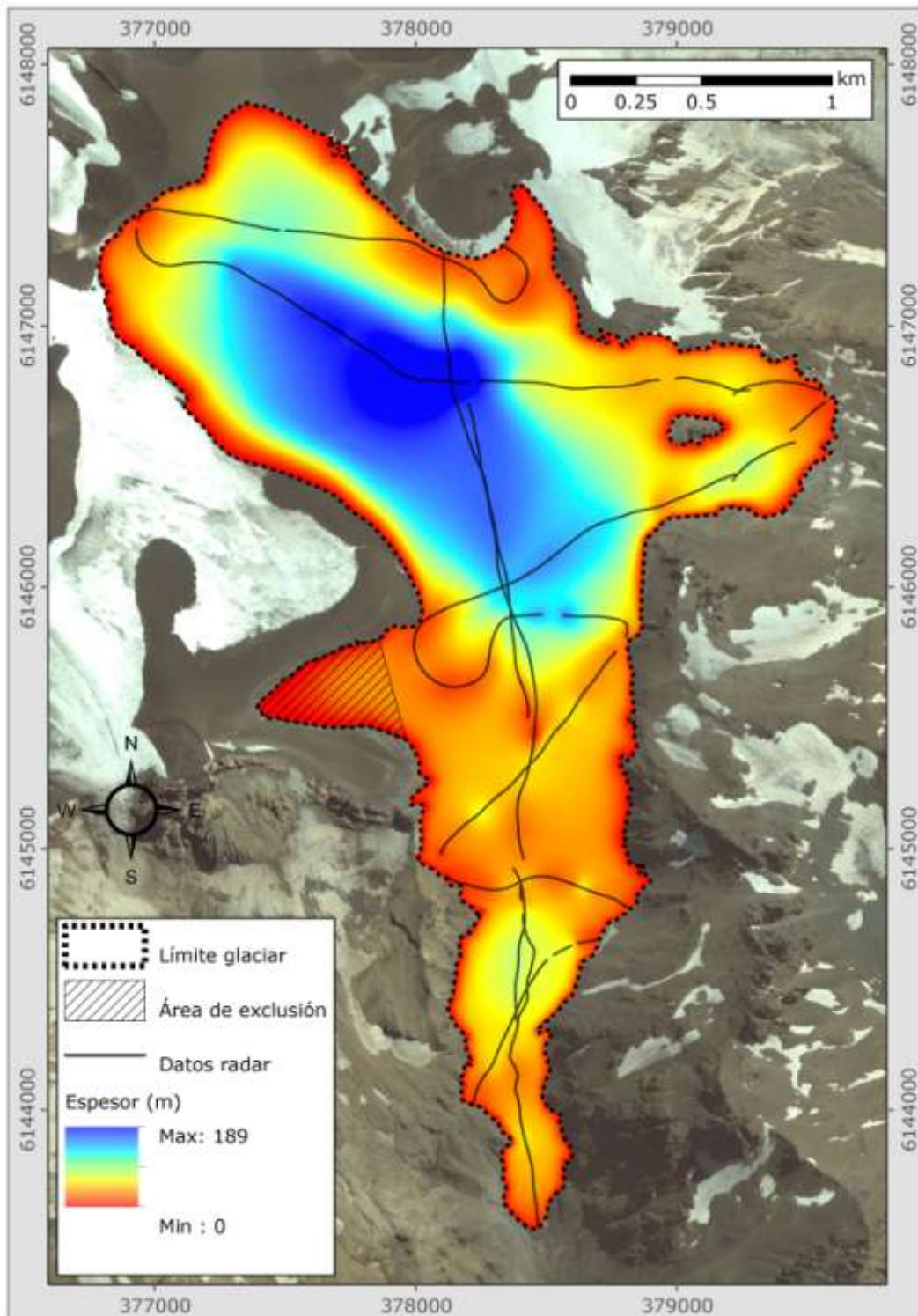


Figura 4.1-J. Glaciar Tinguiririca 1. Datos interpolados de espesores. Las líneas negras delgadas representan las líneas de vuelo con datos interpretados de espesores. El polígono achurado dentro del borde del glaciar corresponde a un área eliminada del cálculo volumétrico puesto que no existen datos de radar.

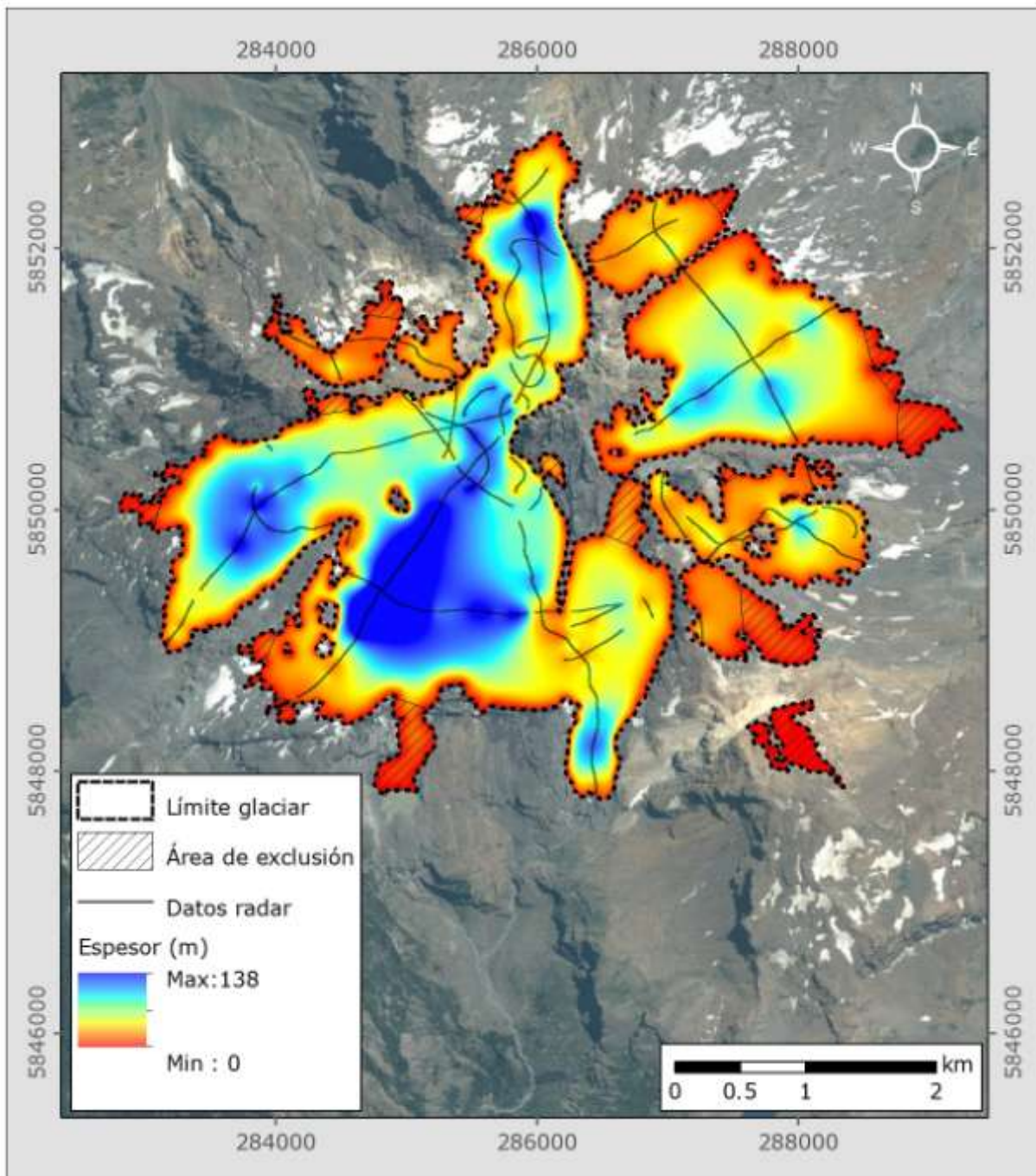


Figura 4.1-K. Glaciar Sierra Velluda. Datos interpolados de espesores. Las líneas negras delgadas representan las líneas de vuelo con datos interpretados de espesores. Los polígonos achurados dentro del borde del glaciar corresponden a áreas eliminadas del cálculo volumétrico puesto que no existen datos de radar.

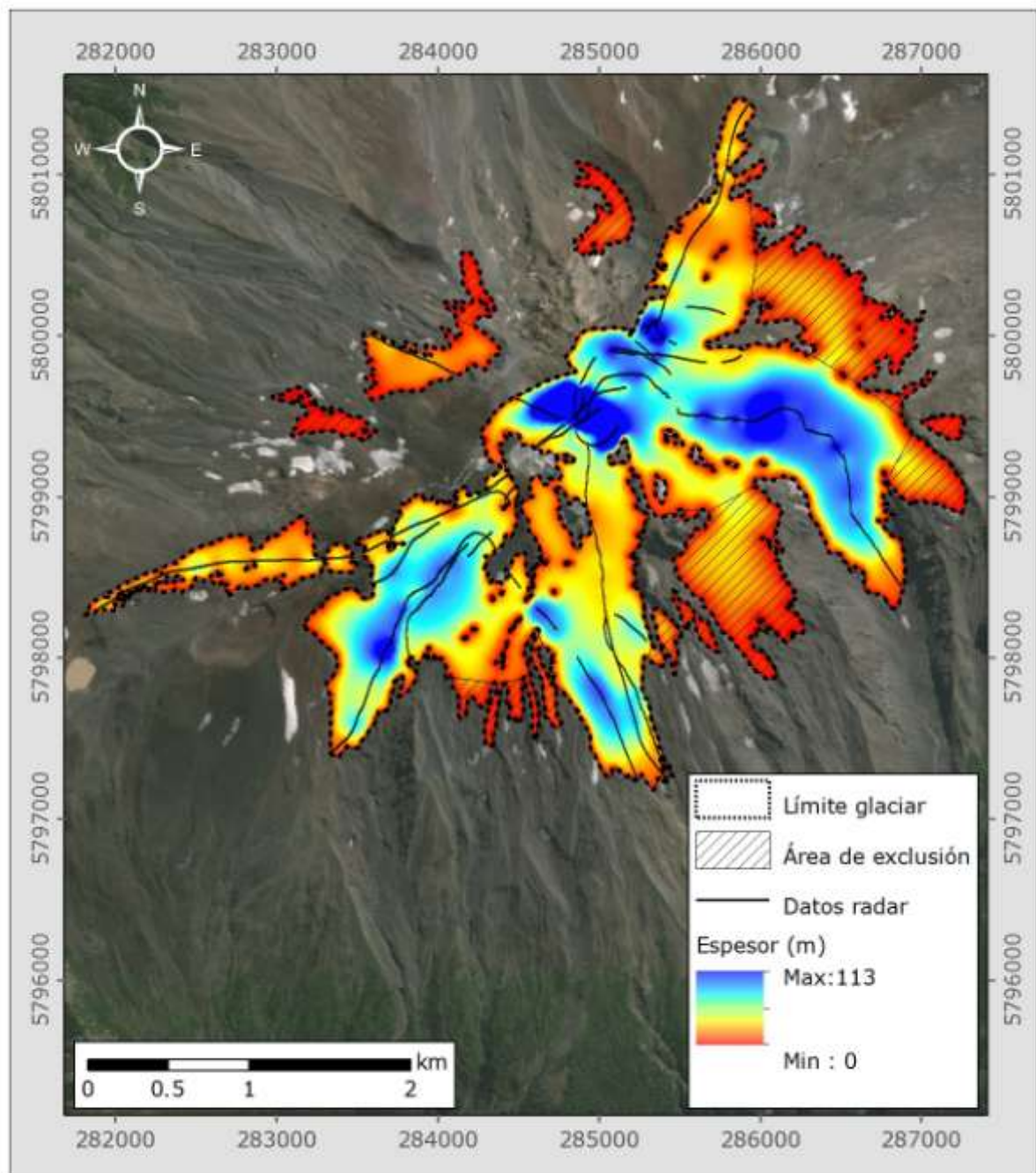


Figura 4.1-L. Glaciar Callaqui. Datos interpolados de espesores. Las líneas negras delgadas representan las líneas de vuelo con datos interpretados de espesores. Los polígonos achurados dentro del borde del glaciar corresponden a áreas eliminadas del cálculo volumétrico puesto que no existen datos de radar.

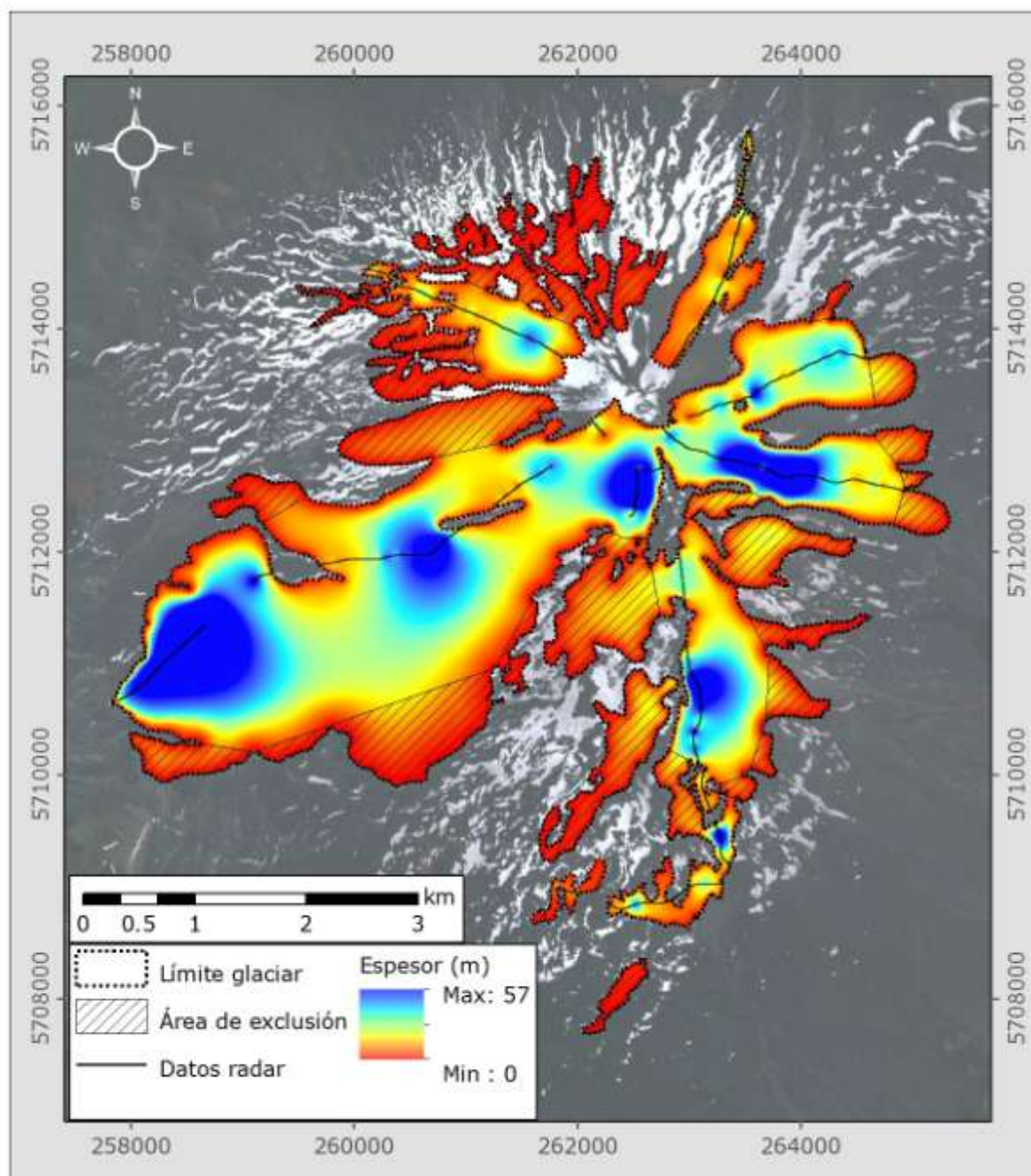


Figura 4.1-M. Glaciar Llaima. Datos interpolados de espesores. Las líneas negras delgadas representan las líneas de vuelo con datos interpretados de espesores. Los polígonos achurados dentro del borde del glaciar corresponden a áreas eliminadas del cálculo volumétrico puesto que no existen datos de radar.

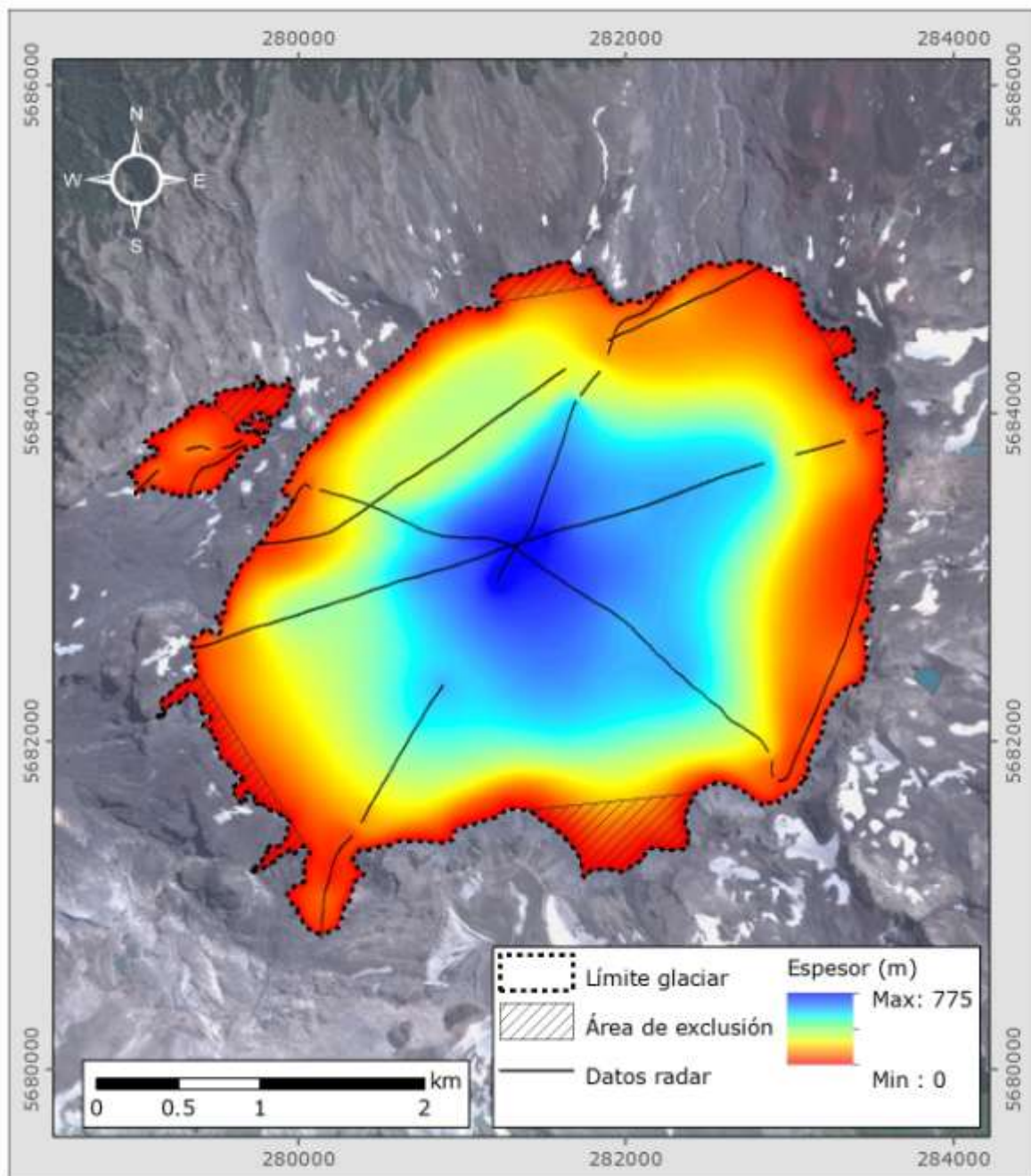


Figura 4.1-N. Glaciar Sollipulli. Datos interpolados de espesores. Las líneas negras delgadas representan las líneas de vuelo con datos interpretados de espesores. Los polígonos achurados dentro del borde del glaciar corresponden a áreas eliminadas del cálculo volumétrico puesto que no existen datos de radar.

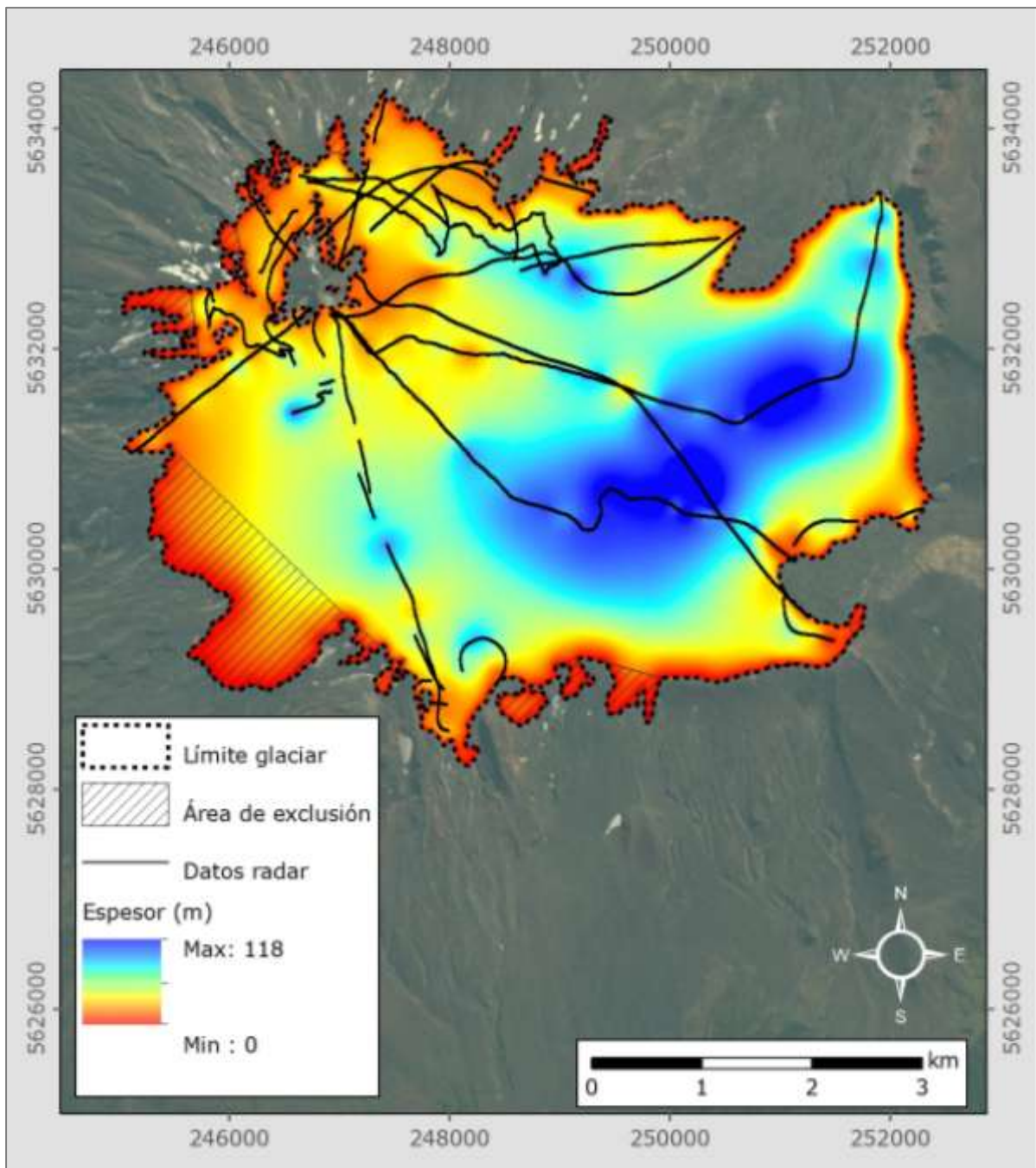


Figura 4.1-O. Glaciar Villarrica. Datos interpolados de espesores. Las líneas negras delgadas representan las líneas de vuelo con datos interpretados de espesores. Los polígonos achurados dentro del borde del glaciar corresponden a áreas eliminadas del cálculo volumétrico puesto que no existen datos de radar.

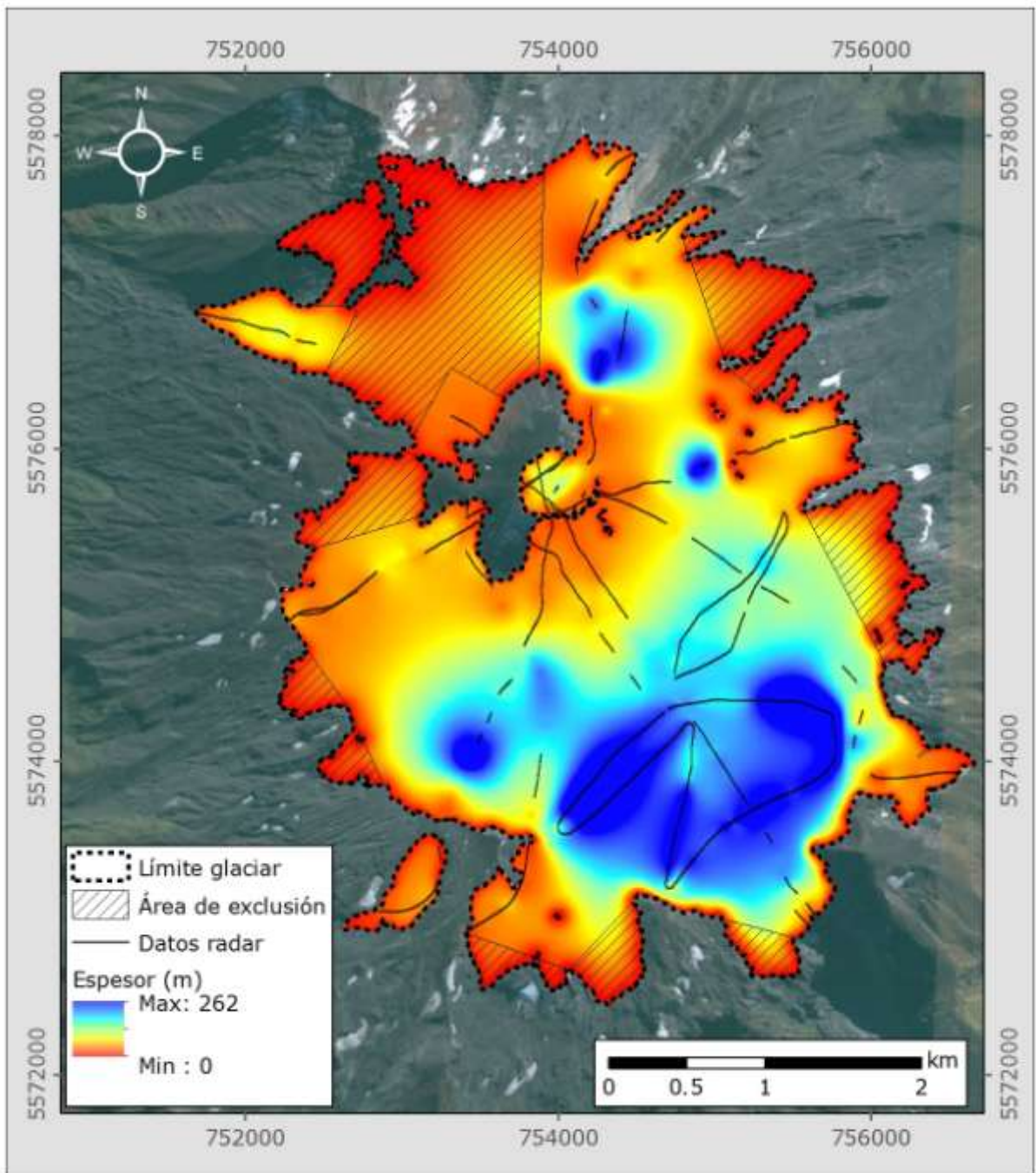


Figura 4.1-P. Glaciar Mocho-Choshuencho. Datos interpolados de espesores. Las líneas negras delgadas representan las líneas de vuelo con datos interpretados de espesores. Los polígonos achurados dentro del borde del glaciar corresponden a áreas eliminadas del cálculo volumétrico puesto que no existen datos de radar.

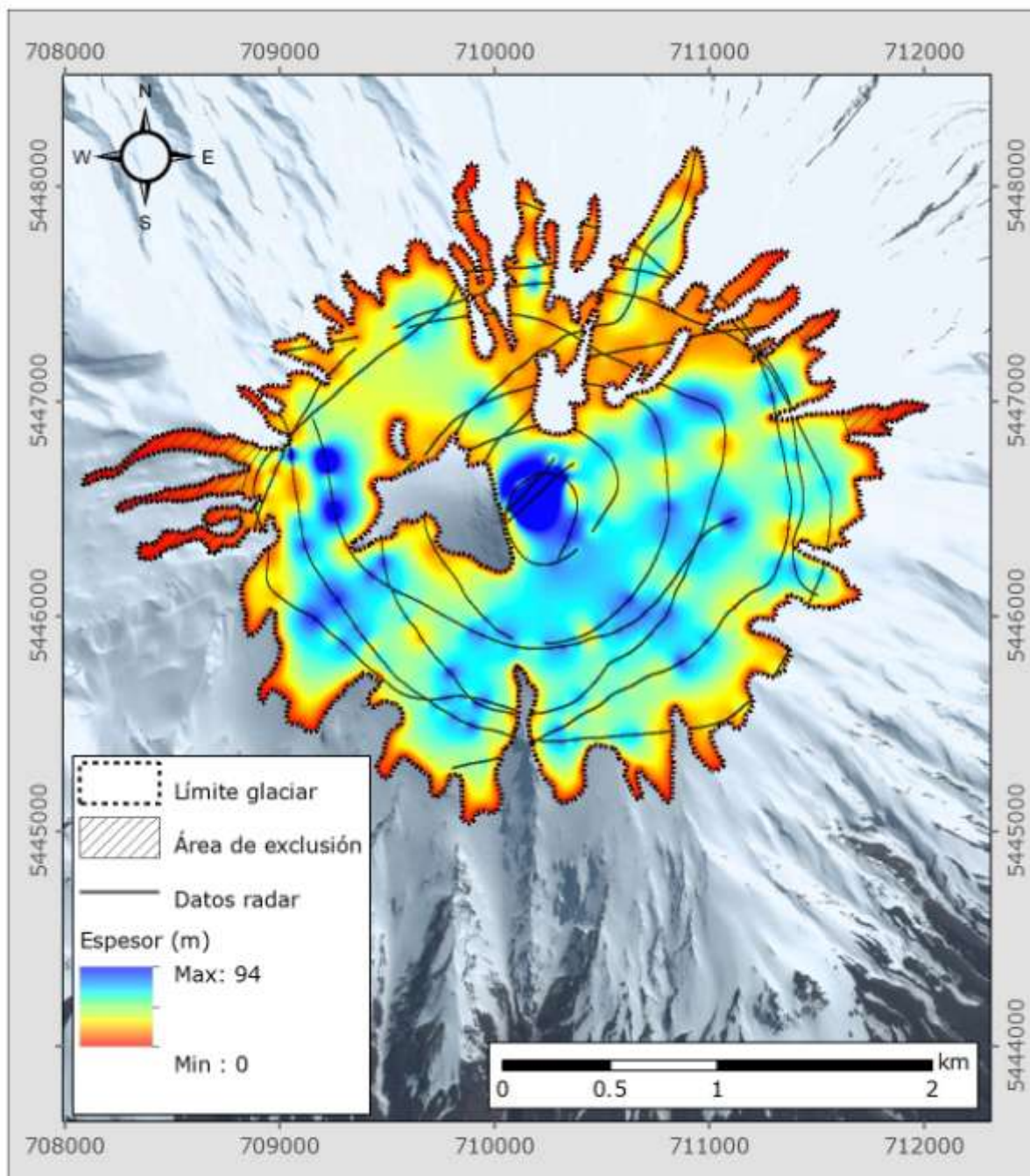


Figura 4.1-Q. Glaciar Osorno. Datos interpolados de espesores. Las líneas negras delgadas representan las líneas de vuelo con datos interpretados de espesores. Los polígonos achurados dentro del borde del glaciar corresponden a áreas eliminadas del cálculo volumétrico puesto que no existen datos de radar. No confundir estos polígonos grises con nunataks en el interior del glaciar que preservan el color de la imagen satelital de fondo.

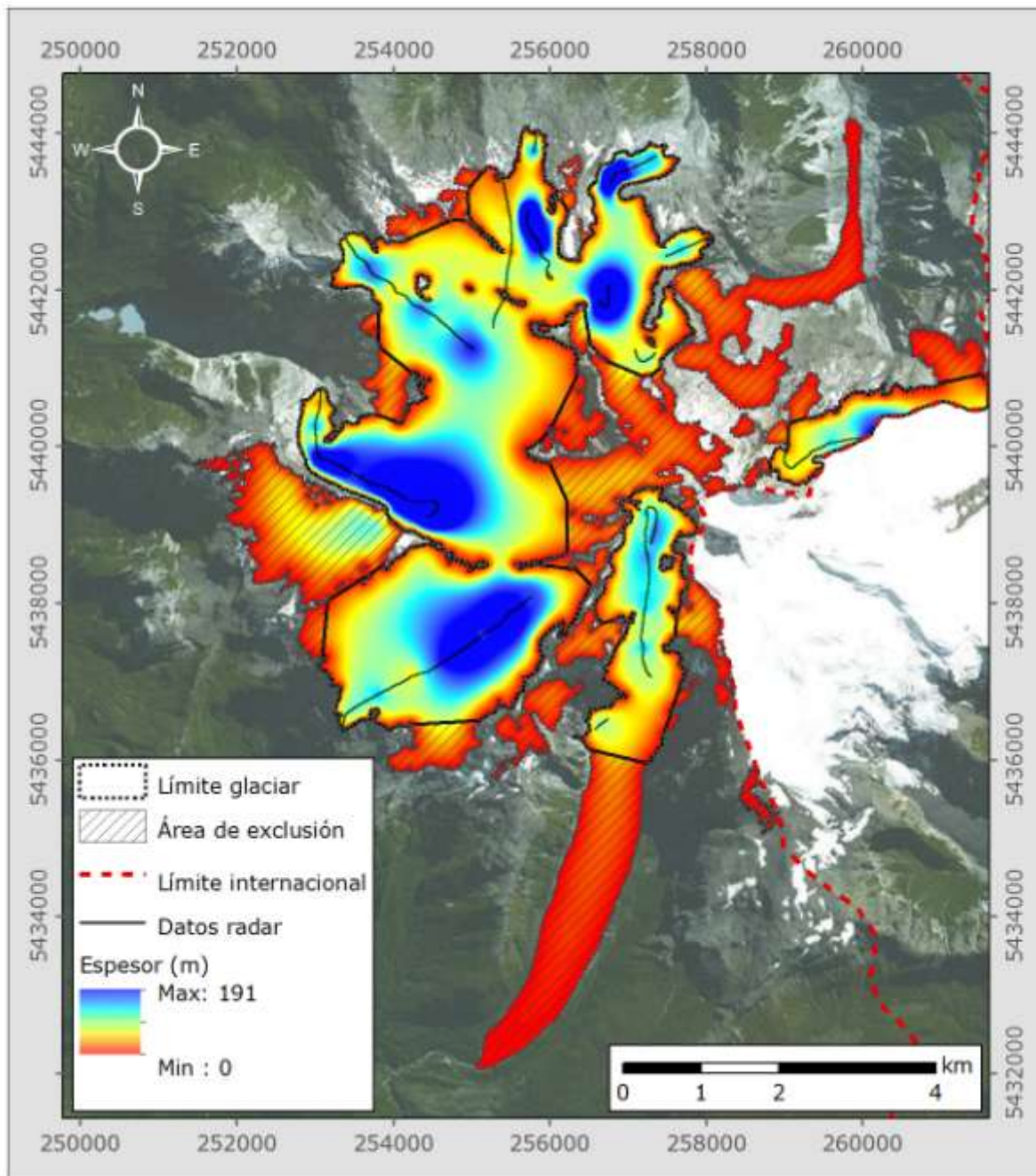


Figura 4.1-R. Monte Tronador. Datos interpolados de espesores. Las líneas negras delgadas representan las líneas de vuelo con datos interpretados de espesores. Los polígonos achurados dentro del borde del glaciar corresponden a áreas eliminadas del cálculo volumétrico puesto que no existen datos de radar.

4.2. RESUMEN DE RESULTADOS

4.2.1. Parámetros de vuelo

Se presenta un resumen de los parámetros de los vuelos obtenidos para los 18 glaciares con información de la distancia total de los perfiles y la altura de vuelo sobre la superficie (Tabla 4.2.1-A).

Tabla 4.2.1-A. Resumen de las mediciones aéreas efectuadas en los 18 glaciares considerados en el estudio. La distancia (Dist. total) es la suma de las longitudes de todos los perfiles para cada glaciar. AGL media (Above Ground Level) es la altura de vuelo promedio de la antena de radar sobre la superficie del glaciar.

Nº	Nombre glaciar	Perfiles	Fecha	Dist. Total (km)	AGL media (m)
1	Tronquitos	Longitudinal, diagonales y transversales	27 y 29 agosto	7,0	68,0
2	Del Potro	Longitudinal, diagonales y transversales	29 agosto	7,9	70,9
3	Tapado	Longitudinal, diagonales y transversales	30 agosto	8,6	84,7
4	Juncal Norte	Longitudinal, diagonales y transversales	20 noviembre	23,4	69,7
5	Río Blanco	Longitudinal, diagonales y transversales	20 noviembre	26,4	78,4
6	Tupungatito	Longitudinal, diagonales y transversales	6 octubre	15,5	68,8
7	Marmolejo	Longitudinal, diagonales y transversales	6 octubre	29,5	75,4
8	Tinguiririca 3	Longitudinal, diagonales y transversales	17 octubre	13,3	58,8
9	Tinguiririca 4	Longitudinal, diagonales y transversales	17 octubre	10,4	57,9
10	Tinguiririca 1	Longitudinal, diagonales y transversales	17 octubre	15,6	62,7
11	Sierra Velluda	Radiales, diagonales y espirales	16 octubre	37,5	78,1
12	Volcán Callaqui	Radiales y diagonales	15 octubre	20,8	62,6
13	Volcán Llaima	Radiales	14 octubre	19,0	64,5
14	Nevado Sollipulli	Radiales	14 octubre	18,1	37,0
15	Volcán Villarrica	Radiales	14 octubre	25,1	101,3
16	V. Mocho-Choshuenco	Radiales	12 octubre	21,1	70,16
17	Volcán Osorno	Radiales y espirales	11 octubre	34,9	75,7
18	Monte Tronador	Longitudinal, diagonales y transversales	11 octubre	23,8	70,4
TOTAL				358,0	69,7

4.2.2. Espesores medios y volúmenes

Se presenta a continuación un resumen de los resultados de espesores medios y volúmenes calculados a partir de las interpolaciones presentadas en 4.1. Las Tablas 4.2.2-A y 4.2.2-B indican los resultados del procesamiento final de los datos de radar para los 18 glaciares, la primera tabla expresa los resultados considerando el espesor medio calculado sin el área de exclusión (definidas como las áreas achuradas en las figuras anteriores) y la segunda el espesor medio calculado con el área de exclusión. Para el cálculo del equivalente en agua se asume que todo el glaciar está compuesto de hielo con una densidad de $0,9 \text{ g/cm}^3$. En los 18 glaciares se modificaron los márgenes de los glaciares entregados por la DGA incorporando cambios recientes de área evidentes en imágenes satelitales Google Earth y Bing Maps, como asimismo se incluyeron zonas sin hielo (afloramientos rocosos) existentes dentro de los glaciares, que proporcionan importantes condiciones de borde cuyo espesor de hielo es cero.

Tabla 4.2.2-A. Resumen de espesores medidos mediante radar y volúmenes calculados en los 18 glaciares, considernado todo el área glaciar, vale decir cálculos sin las áreas de exclusion. H medio y H máx. son los espesores medio y máximo para cada glaciar. Volumen hielo es el volumen de hielo interpolado para cada glaciar, y Volumen eq.a. es el volumen equivalente en agua para cada glaciar, respectivamente, considerando una densidad de 0,9 g/cm³ para el hielo. Las áreas han sido modificadas en este estudio a partir del inventario oficial de la DGA y de recientes imágenes satelitales.

Nº	Nombre Glaciar	Sup.	H medio	H máx.	Volumen hielo	Volumen eq.a.
		km ²	m	m	10 ⁶ m ³	10 ⁶ m ³
1	Del Potro	4,78	61,2	132	293	263
2	Tronquitos	2,49	37,0	91	92	83
3	Tapado	2,05	26,1	69	54	48
4	Juncal Norte	8,44	55,4	206	468	421
5	Río Blanco	21,11	41,3	185	872	785
6	Volcán Tupungatito	7,67	117,1	300	898	809
7	Marmolejo	9,67	39,5	146	382	344
8	Tinguiririca 3	3,66	33,5	122	123	110
9	Tinguiririca 4	2,08	30,5	79	63	57
10	Tinguiririca 1	4,34	57,6	190	250	225
11	Sierra Velluda	14,33	35,6	138	510	459
12	Volcán Callaqui	7,33	22,0	113	161	145
13	Volcán Llaima	20,57	11,3	57	233	209
14	Nevado Sollipulli	12,13	307,6	775	3.731	3.358
15	Volcán Villarrica	28,12	43,0	118	1.209	1.088
16	V. Mocho-Choshuenco	15,22	68,2	262	1.038	934
17	Volcán Osorno	5,45	16,1	94	88	79
18	Monte Tronador	38,55	34,6	191	1.335	1.201
TOTAL		207,99			11.798	10.619

Tabla 4.2.2-B. Resumen de espesores medidos mediante radar y volúmenes calculados en los 18 glaciares, considerando cálculos con las áreas de exclusión, vale decir un área menor al área total del glaciar ("Sup. Neta"). El H medio y H máx. son los espesores medio y máximo para cada glaciar. Volumen hielo es el volumen de hielo interpolado para cada glaciar, y Volumen eq.a. es el volumen equivalente en agua para cada glaciar, respectivamente, considerando una densidad de 0,9 g/cm³ para el hielo. Las áreas han sido modificadas en este estudio a partir del inventario oficial de la DGA y de recientes imágenes satelitales. Dif. H medio representa el aumento (%) del espesor medio de la superficie neta (eliminando el área de exclusión, Tabla actual) respecto del espesor medio de la superficie total del glaciar (sin eliminar el área de exclusión, Tabla 4.1.2.2-A).

Nº	Nombre Glaciar	Sup.	Sup. exclusión	Sup. Neta	H medio	H máx.	Volumen hielo	Volumen eq.a.	Dif. H medio
		km ²	km	km ²	m	m	10 ⁶ m ³	10 ⁶ m ³	%
1	Del Potro	4,78	0,50	4,28	66,7	132	319	287	9,0
2	Tronquitos	2,49	0,12	2,37	38,8	91	97	87	4,9
3	Tapado	2,05	0,13	1,92	27,6	69	57	51	5,7
4	Juncal Norte	8,44	0,58	7,86	59,2	206	500	450	6,9
5	Río Blanco	21,11	7,84	13,27	56,4	185	1.190	1.071	36,6
6	Volcán Tupungatito	7,67	0,36	7,31	121,6	300	933	839	3,8
7	Marmolejo	9,67	1,64	8,03	45,5	146	440	396	15,2
8	Tinguiririca 3	3,66	0,09	3,57	34,4	122	126	113	2,7
9	Tinguiririca 4	2,08	0,03	2,05	31	79	64	58	1,6
10	Tinguiririca 1	4,34	0,11	4,23	59	190	256	231	2,4
11	Sierra Velluda	14,33	1,26	13,07	38,8	138	557	501	9,0
12	Volcán Callaqui	7,33	1,68	5,65	27,1	113	198	179	23,2
13	Volcán Llaima	20,57	7,01	13,56	15,9	57	328	295	40,7
14	Nevado Sollipulli	12,13	0,64	11,49	323,9	775	3.929	3.536	5,3
15	Volcán Villarrica	28,12	2,70	25,42	46,6	118	1.311	1.180	8,4
16	V. Mocho-Choshuenco	15,22	3,60	11,62	83,7	262	1.274	1.147	22,7
17	Volcán Osorno	5,45	0,19	5,26	16,7	94	91	82	3,7
18	Monte Tronador	38,55	14,61	23,94	51,2	191	1.974	1.777	48,0

Al comparar los espesores medios de la Tabla 4.2.2-B (calculado en base a la superficie neta, restando el área de exclusión) con respecto al espesor medio calculado en base a la Tabla 4.2.2-A (calculado en base a la superficie total del glaciar, sin el área de exclusión), se observa que el espesor medio de la superficie neta es en promedio un 14% mayor al espesor de la superficie total del glaciar. Esto es razonable considerando que al no eliminar las áreas de exclusión se subestiman los espesores medio puesto que necesariamente se deben interpolar valores cero correspondientes a los bordes de los glaciares, en circunstancias que el espesor real debe ser normalmente de algunas decenas de metros. En los siguientes 6 glaciares se producen diferencias notables entre los espesores medios calculados con y sin áreas de exclusión: Río Blanco, Marmolejo, Callaqui, Llaima, Mocho-Choshuenco y Tronador, con una diferencia máxima de 48% para el Tronador, y un promedio de 25% para los 6 glaciares. No debe sorprendernos esta discrepancia puesto que las superficies de exclusión son especialmente relevantes en esos 6 glaciares. Estos valores apuntan a que efectivamente se pueden producir errores relevantes en el espesor medio al interpolar a todo el área glaciar, sin eliminar las áreas sin datos de radar, vale decir sin eliminar las áreas de exclusión.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se determinó mediante radar aéreo un espesor medio de 63,6 m para los 18 glaciares de estudio, con un espesor medio mínimo de 15,9 m para el volcán Llaima y un máximo de 323,9 m para el volcán Sollipulli. Los volúmenes interpolados de hielo resultan en un valor mínimo de 57 millones de m³ para el glaciar Tapado y un máximo de 3.929 millones de m³ para el volcán Sollipulli. El volumen total de hielo para los 18 glaciares es de 11.798 millones de m³, con un equivalente en agua total de 10.619 millones de m³.

El método aéreo de radar probó constituir un método adecuado para determinación de los espesores de los glaciares. Para los glaciares fríos, tal como aquellos en cotas altas de las zonas norte y centro, tuvo un buen desempeño el radar de 50 MHz, mientras que en cotas más bajas en las zonas centro y sur, donde se anticipaba hielo temperado, se prefirió utilizar el radar de 25 MHz que proporcionó buenos resultados.

En un glaciar en cada zona glaciológica (norte, centro y sur), se realizaron mediciones de espesor de hielo mediante radar terrestre de modo de validar y calibrar las mediciones con radar aéreo. Este ejercicio, aunque no es estrictamente necesario, es conveniente para acotar los posibles errores y confirmar la interpretación de los registros aéreos.

De modo de optimizar el objetivo de este estudio, cual fue estimar el espesor medio de 18 glaciares mediante aproximadamente 7 perfiles en cada glaciar, se concluye que en los glaciares de valle de las zonas norte y centro son adecuados un perfil longitudinal, tres transversales y tres diagonales. En la zona sur en cambio, donde los glaciares se concentran en volcanes, los perfiles radiales originalmente planificados debieran complementarse con perfiles en espiral, que permite por un lado una mejor cobertura espacial y también proporciona diversos cruces para determinar la consistencia interna de los datos. Hay que poner cuidado en todos los perfiles de efectuar giros lo más suaves posibles dentro del glaciar de modo de evitar balanceos de la antena que modifiquen la iluminación vertical necesaria para mediciones adecuadas.

En la interpolación de los espesores a partir de los datos de radar, es relevante descartar áreas con pobre cobertura de datos, pues de lo contrario se pueden producir significativas subestimaciones de los espesores puesto que necesariamente se deben interpolar sectores donde solamente existen datos de los bordes de los glaciares con espesor cero.