



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

**PLAN DE MONITOREO
NACIONAL DE PERMAFROST**

VOLUMEN II

REALIZADO POR:

ATACAMA AMBIENTE E.I.R.L.

S.I.T. N°: 454

Santiago, diciembre 2019

Ministro de Obras Públicas

MBA Sr. Alfredo Moreno Charme

Director General de Aguas

Dr. Oscar Cristi Marfil

Jefe de Unidad de Glaciología y Nieves

Dr. Gino Casassa Rogazinki

Inspectores Fiscales

Dr. Gino Casassa Rogazinki

M.Sc. Alexis Segovia Rocha

Sr. Juan Carlos Eyzaguirre Valenzuela

ATACAMA AMBIENTE E.I.R.L.

Jefe de Proyecto

M.Sc. Guillermo Azócar Sandoval

Profesionales

Dr. Pablo Iribarren Anacona

Asesores Científicos

Dr. Alexander Brenning

Dr. Kenji Yoshikawa

RESUMEN EJECUTIVO

Conocer el estado actual del permafrost en Chile es esencial para anticipar su evolución en el contexto del cambio global. Este conocimiento es relevante para mitigar peligros naturales asociados a la degradación del permafrost, como también, para vislumbrar el impacto hidrológico de la desaparición del hielo en el subsuelo. A pesar de esto, el conocimiento del permafrost en Chile es limitado y no existen esfuerzos coordinados que permitan tener datos públicos, continuos y sistemáticos del estado actual y evolución del permafrost en sus distintos contextos (i.e. permafrost en altoplanicies, laderas detríticas y en glaciares rocosos). Este informe tiene como objetivo describir los objetivos y alcances de una red de monitoreo de permafrost, identificar áreas a lo largo de Chile en donde se pueden equipar sitios de monitoreo de permafrost representativos de distintos contextos geográficos y finalmente recomendar técnicas para medir las condiciones térmicas, dinámicas y estructura interna de terrenos congelados. Se espera que las recomendaciones del informe sirvan de base para implementar una red de monitoreo nacional para coleccionar, archivar y analizar sistemáticamente datos de permafrost en Chile.

ABSTRACT

Knowing the current state of permafrost in Chile is essential to anticipate its evolution in the context of global change. This knowledge is relevant for mitigating natural hazards associated with permafrost degradation, as well as for understanding the hydrological impact of ground-ice melting. However, the knowledge of permafrost in Chile is limited and there are no coordinated efforts to have public, continuous and systematic data on the current state and evolution of permafrost in its different contexts (i.e. permafrost on debris slopes, plateaus and rock glaciers). This report aims to describe permafrost monitoring plans in other mountain ranges on Earth that serve as an example for a monitoring network in Chile, to identify areas throughout Chile where permafrost monitoring sites, representative of different geographical contexts, can be equipped, and finally to recommend techniques for measuring thermal conditions, dynamics and internal structure of frozen ground. The report's recommendations are expected to serve as the basis for implementing a national monitoring network to systematically collect, archive and analyze permafrost data in Chile.

INDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. OBJETIVOS DEL PLAN.....	1
2. CONCEPTOS Y DEFINICIONES.....	2
3. LA EXPERIENCIA DE LA RED DE MONITOREO EN OTROS PAÍSES	5
4. PROPUESTA DE RED DE MONITOREO DE PERMAFROST	6
4.1. CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LOS SITIOS DE MONITOREOS.....	6
5. MEDICIONES PROPUESTAS: METODOLOGÍA Y PARÁMETROS TÉCNICOS.....	17
5.1.1. <i>Mediciones del Régimen Térmico.....</i>	<i>17</i>
5.1.2. <i>Velocidades de Reptación del Permafrost</i>	<i>18</i>
5.1.3. <i>Características Internas</i>	<i>19</i>
6. ESTIMACIÓN ITEMIZADO DE COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN DE LA RED	20
7. RESULTADOS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA DE RED BÁSICA DE MONITOREO DE PERMAFROST	22
7.1. SITIO DE MONITOREO EN LAS CERCANÍAS DEL VOLCÁN TUPUNGATITO	23
7.2. SITIO DE MONITOREO EN LAS CERCANÍAS DEL GLACIAR BELLO	27
8. ESTUDIOS ADICIONALES RECOMENDADOS	30
8.1. MODELAMIENTO NACIONAL DE LA DISTRIBUCIÓN DEL PERMAFROST.....	30
8.2. INVENTARIO DE EVIDENCIAS DE PERMAFROST	30
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	31
10. ANEXOS.....	56
10.1. FICHAS TÉCNICAS DE INSTRUMENTACIÓN	56

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1.	Sitios propuestos para monitoreo de permafrost en la macrozona Norte.	8
Tabla 2.	Sitios propuestos para monitoreo de permafrost en la macrozona norte.	9
Tabla 3.	Sitios propuestos para monitoreo de permafrost en la macrozona centro.	10
Tabla 4.	Sitios propuestos para monitoreo de permafrost en macrozona sur.	12
Tabla 5.	Sitios propuestos para monitoreo de permafrost en macrozona austral.	14
Tabla 6.	Resumen de localización de los sitios propuestos para monitoreo de permafrost.	16
Tabla 7.	Características técnicas para la medición del régimen térmico.	17
Tabla 8.	Características técnicas para la medición de la velocidad del permafrost.	19
Tabla 9.	Características técnicas para el estudio de las características internas.	19
Tabla 10.	Estimación general de costos. Implementación de un plan de monitoreo de permafrost.	21

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1.	Régimen térmico del suelo en zonas de permafrost (Adaptado de Johnston, 1981).	4
Figura 2.	Vista del sitio de perforación Tupungativo A a 5,575 m de altitud.	24
Figura 3.	Vista del sitio de perforación Tupungatito B a 4,425 m de altitud.	26
Figura 4.	Vista del sitio de perforación Bello a 4,840 m de altitud.	28
Figura 5.	A) Muestra de registro de temperatura realizados en el sitio Tupungatito A. B) Muestra de registro de temperatura realizados en el sitio Tupungatito B.	29

LISTADO DE LAMINAS

Lamina 1.	Sitio propuesto para monitoreo permafrost: Nevado Ojos del Salado.	34
Lamina 2.	Sitio propuesto para monitoreo permafrost: Salares Norte.....	35
Lamina 3.	Sitio propuesto para monitoreo permafrost: Copiapó.	36
Lamina 4.	Sitio propuesto para monitoreo permafrost: Huasco.	37
Lamina 5.	Sitio propuesto para monitoreo permafrost: Elqui.....	38
Lamina 6.	Sitio propuesto para monitoreo permafrost: Barroso.....	39
Lamina 7.	Sitio propuesto para monitoreo permafrost: Olivares.	40
Lamina 8.	Sitio propuesto para monitoreo permafrost: Tupungatito.....	41
Lamina 9.	Sitio propuesto para monitoreo permafrost: Bello.....	42
Lamina 10.	Sitio propuesto para monitoreo permafrost: Echaurren.	43
Lamina 11.	Sitio propuesto para monitoreo permafrost: Universidad.	44
Lamina 12.	Sitio propuesto para monitoreo permafrost: Volcán Tinguiririca.....	45
Lamina 12.	Sitio propuesto para monitoreo permafrost: Volcán Tinguiririca.....	46
Lamina 14.	Sitio propuesto para monitoreo permafrost: Sierra Velluda.....	47
Lamina 15.	Sitio propuesto para monitoreo permafrost: Sierra Nevada.....	48
Lamina 16.	Sitio propuesto para monitoreo permafrost: Hualaihué.....	49
Lamina 17.	Sitio propuesto para monitoreo permafrost: Palena.	50
Lamina 18.	Sitio propuesto para monitoreo permafrost: Chacabuco.	51
Lamina 19.	Sitio propuesto para monitoreo permafrost: Exploradores.	52
Lamina 20.	Sitio propuesto para monitoreo permafrost: John Garner.	53
Lamina 21.	Sitio propuesto para monitoreo permafrost: Cordillera de Darwin.	54
Lamina 22.	Sitio propuesto para monitoreo permafrost: Isla Navarino.	55

1. INTRODUCCIÓN

En el contexto del cambio climático, el estudio de la criósfera se ha situado en lugar importante, debido a que constituye una componente indicadora directa de los efectos del calentamiento climático. A diferencia de componentes de la criósfera tales como la nieve y los glaciares, cuya observación y monitoreo han sido realizados durante siglos, el interés por el monitoreo del permafrost y en especial del permafrost de montaña es reciente.

Basado en la experiencia de los grupos de investigación de permafrost en los Alpes Europeos (PERMANET, Kellerer et al., 2011; PERMOS 2019; y PermaFRANCE, Schoeneich et al., 2010) y los requerimientos solicitados en el anexo N° 3 de la resolución N° 2228 de la Dirección General de Agua (DGA), en cuanto a los criterios de selección de sitios monitoreo, el siguiente informe tiene por objetivo entregar un plan nacional para el estudio y monitoreo del permafrost en el Chile continental.

1.1. Objetivos del Plan

Los objetivos específicos del plan nacional de monitoreo de permafrost son:

- a) Mediciones de temperatura atmosférica, subsuperficiales y en profundidad en áreas con distinta disposición topográfica en sitios seleccionados
- b) Monitoreo de cambios en el hielo subsuperficial y su contenido de agua inferido mediante perforaciones y métodos geofísicos en sitios seleccionados
- c) Monitoreo de las velocidades de reptación del permafrost en sitios seleccionados.
- d) Evaluación de la distribución nacional del permafrost.
- e) Evaluación del aporte del permafrost al régimen hídrico.

2. Conceptos y Definiciones

Con el fin de proveer un contexto teórico básico al informe, este capítulo presenta algunas de las definiciones y terminología relacionada al ambiente periglacial y el permafrost. En el informe titulado "Estado Actual de los Suelos Congelados", Volumen I (S.I.T. N° 454; DGA, 2019) están disponible un conjunto mayor de definiciones y explicaciones en mayor detalle.

Permafrost: Suelo o roca, incluyendo hielo y materia orgánica que permanece a una temperatura de 0°C o menos, por lo menos dos años consecutivos (Trombotto *et al.*, 2014). Esta definición es parte de los términos establecidos en los fundamentos de la Estrategia Nacional de Glaciares de la Dirección General de Aguas (DGA, 2009).

Bajo esta definición el permafrost puede contener agua y hielo, pero no necesariamente ambos elementos definen la presencia de permafrost. Cuando el permafrost contiene hielo, puede ser considerado parte del sistema global de la criósfera. Por otro lado, cuando el permafrost carece de humedad suficiente para permitir el desarrollo de formas de hielo intersticial, es comúnmente denominado permafrost seco (Embleton & King, 1975).

Permafrost de montaña: Se refiere a la presencia de permafrost en altitudes altas y en todas las altas montañas y plateaus alrededor de la Tierra. Comúnmente, el permafrost de montaña y su gran variabilidad espacial es dominada por tres factores ambientales a diferentes escalas espaciales que influyen sobre las temperaturas superficiales: clima, topografía y propiedades del suelo (Hoelzle *et al.*, 2001; Gruber & Haeberli, 2009). Los procesos climáticos se refieren a la influencia que la latitud y la circulación global ejercen sobre un área de montaña (escala global). Las condiciones topográficas pueden modificar los procesos climáticos generales (meso-escala). Localmente, los efectos de las condiciones climáticas topográficamente alteradas sobre las temperaturas superficiales son modificados por las propiedades del suelo, el rol de la cubierta de nieve y su influencia sobre la transferencia calórica (micro escala).

Capa activa: Es la capa superficial del terreno que sufre ciclos anuales de congelamiento y descongelamiento en áreas con permafrost subyacente. La profundidad de la capa activa puede variar de un año a otro y depende de numerosos factores ambientales (p.ej., temperatura del aire, radiación solar, cubierta nival, tipo de roca, vegetación etc.; French, 2007).

Es importante mencionar que las definiciones de permafrost y capa activa están basadas sobre la temperatura y no reflejan las propiedades del suelo.

Hielo de suelo o subterráneo (*ground ice*): Es un término general que se refiere a todo tipo de hielo contenido en suelo congelado o en congelamiento. El hielo subterráneo se presenta en intersticios, cavidades o cualquier otro espacio abierto del suelo. Puede encontrarse en forma de lentes, cuñas, venas, capas, masas irregulares o cristales individuales. El hielo subterráneo se puede haber formado dentro del suelo (singenéticamente) por ejemplo a través de la segregación de lentes de hielo, o en conjunto con el depósito de sedimento (epigenéticamente). Su estructura se puede transformar debido al recongelamiento y los efectos de la presión y reptación del suelo, sobre todo dentro de los glaciares rocosos (Haerberli, 1985).

Suelo: En este informe se entenderá como suelo a todo material no consolidado, depósitos geológicos superficiales, incluyendo aluvionares, coluviareos y depósitos gravitacionales de ladera.

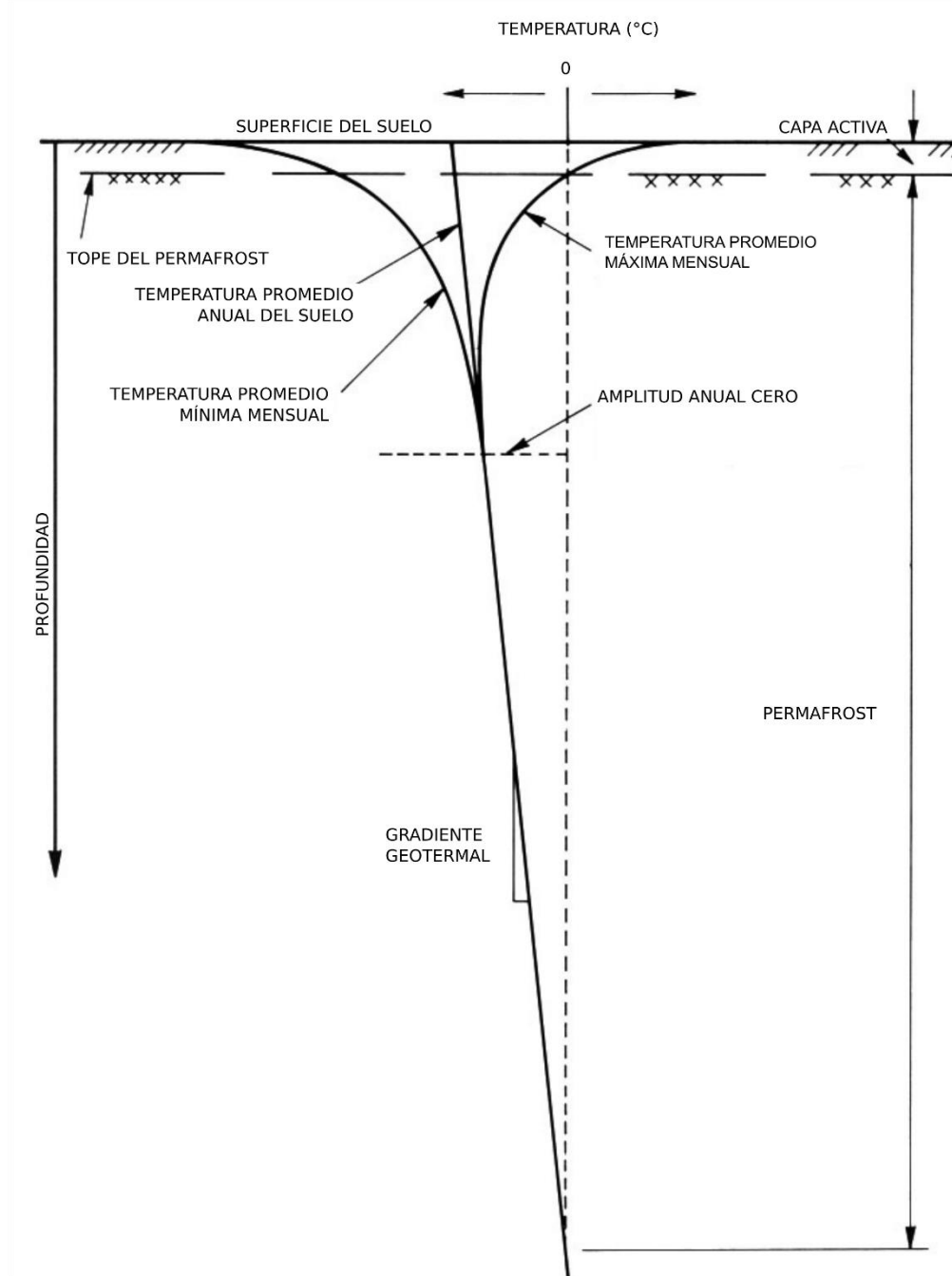
El régimen térmico subsuperficial es usualmente estudiado mediante termistores instalados al interior del suelo. La Figura 1 muestra un ejemplo del régimen térmico en un área típica de permafrost. Los siguientes términos son explicados sobre la base del esquema presentado en la Figura 1.

Profundidad de la amplitud anual cero: Es la profundidad bajo la cual no hay una fluctuación anual en la temperatura del suelo (variaciones no mayores a $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$).

Tope del permafrost: Es el límite superior del permafrost en profundidad (Trombotto et al., 2014).

Gradiente geotermal o geotérmico: Es la tasa de aumento de la temperatura subterránea en función de la profundidad debido al flujo de calor desde el interior de la Tierra. Típicamente varía entre 2 a 3° C cada 100 m en los primeros kilómetros de la corteza, fuera de bordes tectónicos, condicionado también por las características físicas del material.

Figura 1. Régimen térmico del suelo en zonas de permafrost (Adaptado de Johnston, 1981).



3. La Experiencia de la Red de Monitoreo en Otros Países

Actualmente a nivel global la experiencia de red de monitoreo de permafrost de montaña se concentra en iniciativas europeas por grupos de trabajos franceses (PermaFrance: Schoeniech et al., 2010), suizos (PERMOS, 2019) y de cooperación de países europeos (PERMANET; Kellerer et al., 2011) bajo los objetivos del Programa Espacial Alpino de la Unión Europea. Estos grupos de trabajo se han preocupado de monitorear condiciones de permafrost en sitios seleccionados en los Alpes, ya sea directamente en glaciares rocosos como también en zonas aledañas. Del mismo modo, iniciativas tales como PERMANET han logrado censar y sistematizar la información derivada de los sitios de monitoreo de permafrost a lo largo de los Alpes, además de proponer pautas de trabajos para la instalación de estaciones de monitoreo adicional. En total al año 2011, en los Alpes Europeos existían alrededor de 40 sitios de monitoreo que miden varios parámetros y características del permafrost tanto en glaciares rocosos, suelos detríticos como en roca expuesta.

En Europa iniciativas locales de red de monitoreo de permafrost han sido fundadas en Suiza, Francia, Italia y Austria que coordinan a nivel local las actividades de monitoreo. Los resultados de esta red de monitoreo son parte importante del inventario de evidencias de permafrost. En general el financiamiento de estas iniciativas se realiza a nivel regional, nacional e internacional a través de fondos de las autoridades ambientales de gobiernos.

Es importante destacar que la recolección de evidencias de presencia de permafrost en los Alpes, ha sido la base para la elaboración de mapas de modelos estadísticos de la distribución potencial del permafrost.

A través PERMANET se han desarrollado iniciativas para estudiar las relaciones entre permafrost y peligros naturales bajo condiciones de cambio climático, en especial los peligros asociados a la degradación del permafrost y procesos gravitacionales (i.e. desplazamiento, caída de roca, etc.) sobre infraestructura

Los reportes locales de monitoreo del permafrost en los Alpes europeos se han enfocado a estudiar el régimen térmico superficial y subsuperficial en conjunto con la cinemática de los sitios de monitoreo (i.e. desplazamiento), estructura interna de los glaciares rocosos y en menor medida la descarga de agua derivada del descongelamiento de las zonas de permafrost. En general estos reportes son publicados cada dos años.

4. Propuesta de red de monitoreo de permafrost

Establecer una red de monitoreo de permafrost en Chile es esencial para comprender el estado actual del permafrost y su probable respuesta al cambio global. Este conocimiento es relevante tanto para evaluar peligros naturales asociados a la degradación del permafrost como también para comprender el rol geocológico del permafrost en cuencas andinas. Una red de monitoreo permitiría coleccionar, archivar y analizar datos de la dinámica y condición térmica del permafrost de manera sistemática y robusta. Existen diversos factores a tener en cuenta para establecer una red de monitoreo de permafrost, entre los que destacan: la representatividad regional de los sitios seleccionados y las condiciones logísticas para acceder a los sitios de monitoreo para asegurar la colección continua de datos y mantención de dichos sitios.

A lo largo de todo el cordón andino chileno se han identificado formas asociadas a la reptación de permafrost rico en hielo o condiciones térmicas que favorecerían su presencia. Por ello, se proponen sitios de monitoreo de permafrost a lo largo de 4 macro-regiones geográficas de la DGA, aunque poniendo énfasis en los Andes centrales y semiáridos debido a que el conocimiento del permafrost en dichas zonas tiene una directa implicancia social y económica. Cabe destacar, que algunos de los sitios propuestos ya cuentan con investigaciones anteriores tanto de la estructura interna (con métodos geofísicos y perforaciones en algunos casos), desplazamiento y condiciones térmicas de glaciares rocosos, así como de las condiciones térmicas de laderas, lo que constituye una positiva base para futuros estudios.

4.1. Criterios de Selección de los Sitios de Monitoreos

Basado en las evidencias disponibles en el territorio nacional en cuanto a la distribución potencial de permafrost derivado de modelos estadísticos (Azocar & Brenning, 2010; Brenning & Azócar, 2010; DGA, 2010; BGC Engineering, 2009; Gruber, 2012; Azocar et al., 2017; Atacama Ambiente, 2017), inventario de glaciares rocosos disponibles a la fecha, revisión general de imágenes satelital y experiencia de los autores, en las tablas del 1 al 5 se indican los sitios propuestos para monitoreo en cada macrozona geográfica y se mencionan criterios que justifican la elección de dichos sitios.

La mayor parte de las subcuencas seleccionadas concentran la presencia de glaciares rocosos y glaciares blancos, cuya existencia indicarían preliminarmente condiciones favorables para la

presencia de permafrost de montaña. Por otro lado, en las cuencas de la zona norte donde existe una ausencia importante de glaciares y glaciares blancos, condiciones topográficas de gran altura indicarían condiciones favorables de permafrost, especialmente en laderas rocosas y de material detrítico.

Especial relevancia, tienen los sitios propuestos en la macrozona norte y central en cuyas cuencas se concentra una importante distribución de glaciares rocosos y permafrost, en conjunto con una alta demanda de recursos hídricos al concentrar la mayor parte de las actividades antrópicas en Chile.

De acuerdo a lo indicado en el Anexo N° 3 de la resolución N° 2228 de la DGA del 19 de noviembre de 2019, solo se incluirán en la propuesta sitios de monitoreo "ubicados fuera de los glaciares rocosos, al menos 5 sitios en cada macrozona glaciológica (Norte, Centro, Sur y Austral), y con pendiente superficial lo más plana posible, evitando zonas de movimiento (reptación, gelifluxión)....". El estudio de los glaciares rocosos son parte de la línea de la investigación de glaciares de la unidad de Glaciología y Nieves de la DGA.

Tabla 1. Sitios propuestos para monitoreo de permafrost en la macrozona Norte.

Macrozona	Cuenca, Sub cuenca, N° y nombre del sitio	Características generales y criterios de selección	Estudios previos
Norte	Endorreicas entre Fronteras y vertientes del Pacífico. Subcuenca al SE de cuenca Salar de Pedernales. Nevado Ojo del Salado.	Ojos del Salado es el Volcán más alto de la Tierra y es la montaña más alta sin presencia de glaciares. Existe evidencia de permafrost de montaña sobre los 5200 m. en el volcán. El sitio ya es monitoreado por un grupo de investigadores húngaros por lo que se pueden coordinar esfuerzos para dar continuidad a las mediciones realizadas. A pesar de lo remoto del área, existen accesos y operadores turísticos que pueden ayudar a coordinar la logística del trabajo de campo. De hecho, se puede coordinar el mantenimiento de equipo y la descarga de datos con operadores turísticos. El sitio es idóneo para representar las características del permafrost en zonas de gran altitud en la macrozona Norte..	Nagy et al., (2018)
	Endorreicas entre Fronteras y vertientes del Pacífico. Subcuenca al SE de cuenca Salar de Pedernales. Salares Norte	La zona no presenta glaciares rocosos, pero sí formas que evidencian la reptación de permafrost de montaña. La presencia de permafrost esporádico es confirmada por modelos de distribución de permafrost y registro de datos de temperatura. Existen caminos de acceso a varios sitios de interés que facilitan la logística del trabajo de campo, aunque se requieren permisos por parte de mineras para acceder.	Atacama Ambiente (2017); Gruber (2012)

Tabla 2. Sitios propuestos para monitoreo de permafrost en la macrozona norte.

Macro zona	Cuenca, Sub cuenca, N° y nombre del sitio	Características generales y criterios de selección	Estudios previos
Norte	Río Copiapó, Río Pulido Copiapó	La cuenca del Río Copiapó es la cuenca más septentrional de Chile con una superficie significativa (11.4 km ²) de glaciares rocosos. Modelos de distribución de permafrost indican además una amplia distribución de permafrost discontinuo en laderas (Gruber, 2012). Considerando la relevancia del agua en cuencas semidesérticas y el potencial aporte del permafrost a la hidrología de la cuenca, es relevante monitorear permafrost en la zona. Existen caminos de exploración minera hacia diversos sitios que podrían ser monitoreados facilitando la implementación y mantenimiento de equipos.	Azócar & Brenning (2010)
	Río Huasco, Río Carmen Huasco	La cuenca del Huasco cuenta con numerosos glaciares blancos, glaciaretos, glaciares rocosos y presencia local de permafrost en sus laderas. Varios de estos han sido analizados en estudios de impacto ambiental o en literatura científica. Continuar o ampliar dichos estudios (cercaos al proyecto Pascua-Lama) permitiría comprender de mejor manera el estado actual y evolución del permafrost en la región. Particularmente el permafrost en las laderas que ha sido hasta ahora soslayado. El permafrost, acorde a modelos de distribución, estaría ampliamente distribuido en laderas y glaciares rocosos al interior de la cuenca (Azócar et al., 2017; Gruber, 2012).	Azócar et al., (2017)
	Río Elqui Río Turbio Elqui	La cuenca superior del río Turbio se han realizado estudios anteriores de permafrost en el contexto de investigaciones de glaciares rocosos (DGA, 2010). La ventaja de este sector es su accesibilidad, sectores potenciales de distribución permafrost en laderas están ubicados sobre y en las cercanías de la ruta internacional, facilitando la logística de terreno. Continuar y ampliar los estudios de permafrost en esta región permitirá comprender de mejor manera la dinámica del permafrost en esta región.	DGA (2010)

Tabla 3. Sitios propuestos para monitoreo de permafrost en la macrozona centro.

Macrozona	Cuenca, Subcuenca, N° y Nombre del sitio.	Características generales y criterios de selección	Estudios previos
Centro	Río Aconcagua, Río Aconcagua Alto Barroso	Aconcagua Alto posee numerosos glaciares rocosos y blancos que indicarían presencia de condiciones favorables para el permafrost en sus márgenes y laderas cercanas. Existen caminos de acceso a varios sitios de interés, aunque se requieren permisos por parte de mineras.	Geoestudios (2019)
	Río Maipo Río Maipo Alto Olivares	La cuenca superior del río Maipo Altos en las cercanías de los glaciares Olivares, es probable que existan condiciones favorables para la presencia de permafrost esporádico. A la fecha se desconocen estudio en esta materia.	Sin información
	Río Maipo, Río Maipo Alto Bello	La cuenca del Río Maipo Alto presenta un gran número de glaciares, entre estos, varios glaciares rocosos. Además, presenta laderas con evidencia de reptación de permafrost de montaña. La DGA monitorea el glaciar del río Yeso por lo que monitorear conjuntamente el permafrost en las ladera de la cuenca tiene facilidades logísticas. Además, los datos climáticos recabados hasta ahora podrían ayudar a comprender el estado y dinámica actual del permafrost.	Ferrando (2012)
	Río Maipo Río Maipo Alto Echaurren	Cercano al glaciar Echaurren, el glaciar con el programa de monitoreo de más larga data en Sudamérica, existen formas lobuladas y cordones y surcos que dan cuenta de la reptación de permafrost de montaña. De hecho, uno de esos sitios está a pocos metros del refugio de la DGA. Por ello, integrar el estudio de laderas y glaciares rocosos cercanos al glaciar Echaurren (que tiene un programa de monitoreo actual)	Farías et al., (2018)

		sería conveniente logísticamente e interesante científicamente al contar con datos climáticos de varias décadas para comprender el estado del permafrost.	
	Río Maipo Río Maipo Alto Tupungatito	El volcán Tupungatito presenta varios glaciares descubiertos en su superficie. Por su altitud y las condiciones climáticas locales, es un sitio que también puede presentar permafrost de montaña. Este sitio ya cuenta con termistores en el subsuelo, aunque con registros de corta data. Además, cuenta con datos sísmicos y geodésicos colectados por SERNAGEOMIN. El sitio es interesante debido a que permitiría comprender la relación entre el permafrost y la actividad volcánica contemporánea.	Sin información
	Río Rapel, Río Tinguiririca Alto, Universidad	Al interior de la subcuenca río Tinguiririca Alto y las cumbres que rodean el glaciar Universidad existirían condiciones favorables la presencia de permafrost (Gruber, 2012). A la fecha no hay estudios locales que monitoreen las condiciones de permafrost existente en el área.	Sin información
	Río Rapel, Río Tinguiririca Alto, Volcán Tinguiririca	Al interior de la subcuenca río Tinguiririca Alto y en las faldas del volcán Tinguirica, sobre los 3,900 m. De acuerdo a Gruber (2012) existirían condiciones favorables para la existencia de permafrost. Las existencias de condiciones climáticas favorables hacen que sea probable la presencia de permafrost en sus laderas. No existen estudios locales de permafrost en el sector. De acuerdo a Iribarren et al. (2015), en el contexto de investigaciones acerca de los peligros asociados a glaciares y permafrost han ocurrido avalanchas en el sector que han movilizado hielo y sedimentos desde sectores altos a	Iribarren et al. (2015).

		las partes baja de la subcuenca. Los caminos vehículos más cercanos se localizan a unos 5 km, lo que podría facilitar la logística.	
--	--	---	--

Tabla 4. Sitios propuestos para monitoreo de permafrost en macrozona sur.

Macrozona	Cuenca, Subcuenca, N° y Nombre del sitio	Características generales y criterios de selección	Estudios previos
Sur	Río Itata, Río Nuble alto, Cerro los Metales	Al interior de la cuenca del río Itata, es probable que el permafrost se encuentre solo en circunstancias excepcionales en los sectores altos en las faldas del volcán nevados de Chillan y cordones montañosos aledaños (i.e. Cerro los metales).	Sin Información
	Río Bío-Bío Río Duqueco Sierra Velluda	Las faldas suroeste de la Sierra Velluda al interior de la subcuenca del río Duqueco presentan condiciones de un ambiente periglacial que podría favorecer la existencia de permafrost bajo ciertas circunstancias.	Sin Información
	Río Bío-Bío, Río Bío-Bío Alto, Sierra Nevada	En la zona existen condiciones que podrían favorecer la presencia de permafrost en laderas, en los márgenes del glaciar Sierra Nevada. La actividad volcánica y consiguiente flujos de calor geotérmico hacen la Sierra Nevada un sitio interesante para conocer las condiciones térmicas del subsuelo que conjugan las bajas temperaturas en superficie con las probablemente más altas temperaturas a baja profundidad. Existen caminos que facilitan la logística del trabajo en terreno.	Sin información

	<p>Costeras entre Río Puelo y Río Yelcho, Costeras entre Río Negro y Río Vodudahue, Hualaihué</p>	<p>La presencia importante de un gran número de glaciares de montaña es indicativa de condiciones frías subyacente y en los márgenes que podría favorecer la presencia de permafrost en los alrededores de los glaciares. A la fecha no hay estudios locales que monitoreen posibles condiciones de permafrost en el área.</p>	<p>Sin información</p>
	<p>Río Palena y costeras límite decima región, Río Palena entre Frontera y Río Rosselot, Palena</p>	<p>Al oeste de villa Santa Lucia en Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo, existen numerosos glaciares y lagunas periglaciales y presencia de morrenas supraglaciales y frontales con núcleo de hielo y/o hielo intersticial que indicarían preliminarmente condiciones favorables para la presencia de permafrost. Estudios anteriores, en el contexto del estudio del flujo de detrito del año 2017, indicarían la presencia de depósitos detríticos con presencia de hielo subyacente en el área de generación del deslizamiento.</p>	

Tabla 5. Sitios propuestos para monitoreo de permafrost en macrozona austral.

Macrozona	Cuenca, Subcuenca, N° y Nombre del sitio	Características generales y criterios de selección	Estudios previos
Austral	Río Baker, Vertiente Sur Lago Jose Miguel Carrera, Chacabuco	La subcuenca cuenta con numerosos glaciares rocosos en distinto grado de actividad y está ubicada 100 km al este de Campo de Hielo Norte. Estudiar el sector puede dar luces respecto a la futura evolución glaciar y geomorfológica de otros cordones montañosos a medida que el clima se vuelve más cálido y seco en la región. El camino Paso Roballos en el valle de Chacabuco permite la aproximación hacia la cuenca, aunque los glaciares se ubican al menos 10 km aguas arriba en una zona remota. Aun así, es un buen sitio para el monitoreo de permafrost de montaña en Patagonia.	Selley et al., (2018)
	Costeras e islas entre. R. Aysen, R. Baker y Canal Gral, Martinez, Río Exploradores, Exploradores	En la parte septentrional del campo de hielo norte y en la parte baja del glaciar exploradores, hay una importante extensión de morrenas supraglaciales y frontales que probablemente presentan un contenido de hielo variable. Es un sitio interesante para estudiar permafrost en materia detrítico no consolidad.	Sin información
	Costeras entre Seno Andrew y R. Holleberg e isla al oriente, Río Serrano Paso John Garner	En los márgenes meridionales del campo de hielo sur al este de la glaciar grey se observan condiciones favorables para la presencia local de permafrost. Es probable, que vientos fríos provenientes del campo de hielo favorezcan condiciones frías en las laderas barlovento. No existen monitoreos en el área, un sitio interesante debido a su accesibilidad, es el paso John Gardner al interior del Parque Nacional Torres del Paine.	Sin información

	<p>Tierra del Fuego, Costeras Canal Beagle (entre Seno Ventisquero y Frontera) Cordillera de Darwin</p>	<p>Al interior del parque nacional Alberto de Agostini, se encuentra la cordillera de Darwin, cordón montañoso cubierto por un extenso campo de hielo. Es probable que en bordes del campo de hielo existan condiciones favorables para la presencia de permafrost. El sitio propuesto se localiza al sureste de cordillera de Darwin. Debido a la ubicación remota del lugar, se desconoce su accesibilidad real.</p>	<p>Sin información</p>
	<p>Isla al Sur de Canal Beagle y Territorio Antártico, Isla Navarino y Gable, Isla Navarino</p>	<p>La zona cuenta con numerosos glaciares rocosos y evidencia de reptación de permafrost (cordones y surcos y formas lobuladas). Es la zona más austral de Chile con presencia de glaciares rocosos y es probablemente una de las zonas más australes de la Tierra con estas formas, sin considerar la Antártica. No existen estudios previos de permafrost en la isla por lo que su monitoreo sería pionero. La isla, no obstante, está ubicada en una zona remota que dificulta y encarece su estudio.</p>	<p>Redondo (2004)</p>

Tabla 6. Resumen de localización de los sitios propuestos para monitoreo de permafrost.

Nombre	Coordenada de referencia de los sitios (WGS84, 19S)			Cuenca BNA	Subcuenca BNA
	X	Y	Z*		
Macrozona Norte					
Nevado Ojos del Salado	544,880	7,006,915	5,239	Endorreicas entre Frontera y Vertiente del Pacífico	Cuencas al SE. cuenca Salar de Pedernales
Salares Norte	508,223	7,122,699	4,903	Endorreicas entre Frontera y Vertiente del Pacífico	Cuencas al NE. cuenca Salar de Pedernales
Copiapó	432,409	6,853,380	5,164	Río Copiapó	Río Pulido
Huasco	398,366	6,753,038	4,911	Río Huasco	Río Carmen
Elqui	419,109	6,662,868	4,856	Río Elqui	Río Turbio
Macrozona Centro					
Barroso	386,210	6,335,459	4,074	Río Aconcagua	Río Aconcagua Alto
Olivares	389,273	6,326,484	4,734	Río Maipo	Río Maipo Alto
Tupungatito A	424,684	6,304,095	5,574	Río Maipo	Río Maipo Alto
Tupungatito B	420,490	6,305,608	4,448	Río Maipo	Río Maipo Alto
Bello	411,760	6,291,786	4,843	Río Maipo	Río Maipo Alto
Echaurren	394,112	6,283,197	3,923	Río Maipo	Río Maipo Alto
Universidad	380,202	6,163,028	3,366	Río Rapel	Río Tinguiririca Alto
Volcan Tinguiririca	375,910	6,144,917	4,088	Río Rapel	Río Tinguiririca Alto
Macrozona Sur					
Cerro los Metales	295,777	5,911,918	2,930	Río Itata	Río Ñuble Alto
Sierra Velluda	287,755	5,849,671	2,499	Río Bío-Bío	Río Duqueco
Sierra Nevada	275,617	5,727,377	2,122	Río Bío-Bío	Río Bío-Bío Alto
Hualaihué	223,430	5,340,871	1,034	Costeras entre R.Puelo y R.Yelcho	Costeras entre Río Negro y Río Vodudahue
Palena	222,359	5,193,012	1,136	Río Palena y Costeras Limite Décima Región	Río Palena entre Frontera y Río Rosselot
Macrozona Austral					
Chacabuco	262,846	4,790,492	2,026	Río Baker	Vertiente Sur Lago Jose Miguel Carrera
Exploradores	178,405	4,840,205	179	Costeras e Islas entre R Aysén y R Baker y Canal Gral. Martinez	Río Exploradores
Paso John Garner	205,714	4,348,628	1,183	Costeras entre Seno Andrew y R. Hollemberg e islas al oriente	Río Serrano
Cordillera de Darwin	496,971	3,930,086	830	Tierra del Fuego	Costeras Canal Beagle (entre Seno Ventisquero y Frontera)
Isla Navarino	591,650	3,899,893	779	Islas al sur del Canal Beagle y Territorio Antartico	Islas Navarino y Gable

*Altura estimada desde DEM STRTM V02

5. Mediciones propuestas: Metodología y Parámetros Técnicos

Los siguientes párrafos resumen los criterios técnicos a medir en cada sitio de monitoreo propuesto los cuales consideran mediciones de: el régimen térmico, velocidad de reptación del permafrost, y estudio de las características internas (geofísica). Fichas técnicas de los parámetros de medición e instrumentación están disponible en el anexo 1 del presente documento.

5.1.1. Mediciones del Régimen Térmico

La medición de temperaturas en pozos de perforación es un método ampliamente utilizado para obtener información sobre el régimen térmico del suelo y detectar la presencia de permafrost (Barsch, 1996; Trombotto & Borzotta, 2009). La caracterización del permafrost y su desarrollo en el largo plazo (degradación/agradación) requiere de mediciones del régimen térmico superficial y subsuperficial en términos de la profundidad de la capa activa, la profundidad de la amplitud anual de cero grados Celsius y de los gradientes geotérmicos (Humlum y Matsuoka, 2003).

Tabla 7. Características técnicas para la medición del régimen térmico.

Profundidad:	Dependerá de la instrumentación utilizada para permitir la instalación de una cinta termistora. En el caso de glaciares rocosos, suelos detríticos y roca expuestas se recomienda llegar hasta la base de permafrost.
Tipo de instrumentación:	Datalogger de temperatura con capacidad de medir la temperatura a distintas profundidades y 2 a 3 m sobre la superficie. La instrumentación debe ser capaz de guardar datos al menos durante dos años consecutivos y poseer abastecimiento energético suficiente para el periodo a medir.
Precisión:	Entre 0.1- 0.5° C.

Frecuencia de las observaciones:	Cada 30 o 60 minutos.
Reportabilidad de las observaciones:	Anual

5.1.2. Velocidades de Reptación del Permafrost

Los glaciares rocosos, que corresponden a la expresión geomorfológica actual o pasada del permafrost de montaña, son formas dinámicas donde la deformación se presenta en virtud de la fuerza que aplica el hielo contenido, el grosor del hielo contenido, la temperatura, el tamaño y forma de los granos y cristales de hielo, y su densidad (Barsch, 1996). La velocidad superficial de un glaciar rocoso puede variar de acuerdo a la densidad, curva de la pendiente superficial, grosor, temperatura y factores asociados con estos parámetros (Paterson, 1994). Cabe destacar que las mediciones reflejan la deformación tridimensional de un glaciar rocoso, por lo cual un desplazamiento vertical no corresponde necesariamente a una acumulación o pérdida de hielo al interior, es decir, no tiene implicaciones en el balance de masa de un glaciar rocoso.

De este modo, el objetivo de las mediciones es determinar posibles desplazamientos horizontales y verticales de los puntos de monitoreo instalados principalmente sobre los glaciares rocosos.

Es probable que suelos detríticos fuera de los glaciares rocosos no presenten tasas de desplazamiento significativo, aunque esto ha sido raramente cuantificado. Por lo tanto, se recomienda evaluar la factibilidad del monitoreo una vez obtenidos resultados preliminares en cada sitio.

Tabla 8. Características técnicas para la medición de la velocidad del permafrost.

Tipo de instrumentación:	Levantamiento topográfico mediante puntos de control en terreno, vuelos aero fotogramétricos, fotogrametría terrestre o mediante LIDAR terrestre (terrestre o aerotransportado).
Precisión:	Inferior a 1 cm.
Frecuencia de las observaciones:	Al comienzo y final de cada estación seca (i.e. noviembre y abril).
Reportabilidad de las observaciones:	Anual.

5.1.3. Características Internas

En general los suelos que presentan condiciones favorables para la presencia de permafrost pueden presentar condiciones favorables para la presencia de hielo en el sustrato, eventualmente el hielo del permafrost podría contribuir al balance hídrico de la cuenca principalmente en el verano tardío y en años relativamente cálidos y secos (Brenning, 2010). No obstante, esto último es difícil de observar y cuantificar debido a que es un fenómeno que ocurre en el subsuelo. Por lo tanto, el objetivo de la caracterización interna es evaluar mediante métodos geofísicos indirecto la presencia de hielo tanto en suelos detríticos como en glaciares rocosos. Se recomienda el uso en paralelo de radar, resistividad eléctrica o sísmica o perfiles estratigráficos.

Tabla 9. Características técnicas para el estudio de las características internas.

Tipo de instrumentación:	Geofísica: Radar, Resistividad Eléctrica, Sísmica
Precisión:	Va depender de la técnica empleada y el criterio experto en la interpretación de los datos.
Frecuencia de las observaciones:	Cada dos años en temporada seca.
Reportabilidad de las observaciones:	Cada dos años

6. Estimación Itemizado de Costos de Implementación de la Red

En tabla 10 se presenta una estimación general de los costos de una implementación de la red de monitoreo de permafrost a lo largo del territorio nacional. Es importante destacar que es una estimación general basado en los siguientes supuestos:

- Debido a la inaccesibilidad de los sitios se considera aproximación en primer lugar por helicóptero, por tierra o usando ambos medios de transportes.
- Perforaciones de los pozos geológicas desarrolladas con equipo liviano tipo "backpacking drilling" y/o taladros estacionarios tipo Hilti.
- Instrumentación de medición en cada sitio con un máximo de 10 sensores de temperaturas conectados a un datalogger principal con autonomía energética vía paneles solares y transmisión de datos vía comunicación satelital por un periodo de dos años.
- Reportabilidad anual por macrozona.
- Costos generales, no constituye propuesta económica.

Tabla 10. Estimación general de costos. Implementación de un plan de monitoreo de permafrost.

Moneda: UF Proyecto: Estimación general de costos. Implementación del Plan de monitoreo de permafrost		Tarea 1		Tarea 2 (Macrozona norte) 5 SITIOS				Tarea 3 (Macrozona centro) 8 SITIOS				Tarea 4 (Macrozona Sur) 5 SITIOS				Tarea 5 (Macrozona Austral) 5 SITIOS				Total Tareas		
		Administración de proyecto		Tarea 2.1.		Tarea 2.2.		Tarea 3.1.		Tarea 3.2.		Tarea 4.1.		Tarea 4.2.		Tarea 5.1.		Tarea 5.1.				
				Instalación cinta termistora .		Nota técnica de instalación cintas termistoras y primeras lecturas.		Instalación cinta termistora.		Nota técnica de instalación cintas termistoras y primeras lecturas .		Instalación cinta termistora.		Nota técnica de instalación cintas termistoras y primeras lecturas.		Instalación cinta termistora.		Nota técnica de instalación cintas termistoras y primeras lecturas .				
Clasificación del trabajo	Valores UF/H.H.	Hrs	Costo	Hrs	Costo	Hrs	Costo	Hrs	Costo	Hrs	Costo	Hrs	Costo	Hrs	Costo	Hrs	Costo	Hrs	Costo	Hrs	Costo	
1 Experto Principal II	4.04	20	81	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	81	
1 Experto Principal I	0.00	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	
1 Profesional Senior II	2.64	20	53	240	633	30	79	384	1,013	40	105	240	633	30	79	240	633	30	79	1,254	3,307	
1 Profesional Senior I	2.11	20	42	240	506	30	63	384	810	40	84	240	506	30	63	240	506	30	63	1,254	2,646	
1 Profesional Intermedio II	1.58	10	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	16	
1 Profesional Intermedio I	1.23	10	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	12	
1 Junior I	1.05	10	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	11	
Previsionista de Riesgos	1.23	10	12	10	12	0	0	12	15	0	0	10	12	0	0	10	12	0	0	52	64	
Geomático	1.23	10	12	1	1	5	6	1	1	5	6	1	1	5	6	1	1	5	6	34	42	
Administrativos	1.05	10	11	10	11	10	11	10	11	10	11	10	11	10	11	10	11	10	11	90	95	
Sub total		130	250	501	1,163	75	159	791	1,849	95	207	501	1,163	75	159	501	1,163	75	159	501	1,163	75
Gastos	Tarifa UF/unidades	Unidades	Costo	Unidades	Costo	Unidades	Costo	Unidades	Costo	Unidades	Costo	Unidades	Costo	Unidades	Costo	Unidades	Costo	Unidades	Costo	Unidades	Costo	
Viajes. Aproximaciones aéreas y/o tierra	35.16	1	35	15	527	0	0	20	703	0	0	15	527	0	0	15	527	0	0	66	2,321	
Acomodación/Alimentación	1.76	20	35	20	35	0	0	30	53	0	0	20	35	0	0	20	35	0	0	110	193	
Reproducción y envíos	0.70	10	7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	18	13	
Documentos (digital/paper)	3.52	10	35	0	0	1	4	0	0	1	4	0	0	1	4	0	0	1	4	14	49	
Acreditaciones internas	7.03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
EDP de montaña	17.58	6	105	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	105	
Seguro civil/accidentes	3.52	6	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	21	
Ferretería general	3.52	0	0	1	4	0	0	1.0	4	0	0	1.0	4	0	0	1.0	4	0	0	4	14	
Ferretería de montaña	35.16	0	0	1	35	0	0	1	35	0	0	1	35	0	0	1	35	0	0	4	141	
Ferretería perforaciones	35.16	10	352	1	35	0	0	1	35	0	0	1	35	0	0	1	35	0	0	14	492	
Instrumentación cintas termistora	35.16	1	35	20	703	0	0	32	1,125	0	0	20	703	0	0	20	703	0	0	93	3,270	
Transmisiones satelital de datos por dos años	35.16	0	0	5	176	0	0	8	281	0	0	5	176	0	0	5	176	0	0	23	809	
Telefonía satelital	3.52	0	0	3	11	0	0	4	14	0	0	3	11	0	0	3	11	0	0	13	46	
Sub total		64	626	67	1,527	2	4	98	2,251	2	4	67	1,527	2	4	67	1,527	2	4	371	7,474	
Mark up (2%)			18		54		3		82		4		54		3		53.80		3		75	
TOTAL			893		2,744		167		4,182		215		2,744		167		2743.83		167		13,821	

7. Resultados de la Implementación de una de Red Básica de Monitoreo de Permafrost

Se implementaron tres (3) sitios de monitoreo de permafrost, que constituyen la primera etapa de la red nacional de monitoreo de permafrost nacional de la DGA al interior de la cuenca del río Maipo. Los 3 sitios fueron instalados con apoyo de helicóptero de la empresa Suma Air contratado por la Unidad de Glaciología y Nieves de la DGA. Se perforó con un taladro Bosch de 1500 W, 220 V, alimentado con 1 generador Honda EU 2200i, una broca para hormigón de 1" de diámetro y 1 metro de largo, y extensiones atornillables que permitieron alargar la broca hasta 3 metros en total. Los sitios y detalles de instalación fueron los siguientes

El primer sitio se localiza en las cercanías del glaciar Bello y los dos restantes en las faldas del volcán Tupungatito (Laminas 8 y 9) indican la localización de los sitios.

Los datos tomados preliminarmente indicarían solo condiciones favorables para la presencia de permafrost en el sitio Tupungatito A los 5,575 m de altura (Figura 5). No obstante, se debe evaluar esa condición en el tiempo.

7.1. Sitio de Monitoreo en las cercanías del Volcán Tupungatito

Nombre del sitio:	Tupungatito A
Coordenadas:	424,684 6,304,095
Posicionamiento de los sensores de temperatura:	-1 cm, -100 cm, -200 cm
Altitud:	5,575 m s.n.m.
Fecha de instalación:	8 diciembre 2019, 7:40-9:30 h.
Localización general:	Ubicado en un filo rocoso que divide como una península el sector alto del glaciar Tupungatito, a unos 100 metros del borde del glaciar (figura 2 y lamina 8).
Personal a cargo:	Kenji Yoshikawa, Profesor Universidad de Alaska, Gonzalo Campos (colaborador Atacama Ambiente).
Detalle del proceso de perforación e instalación de la cinta termistora:	<p>Se perforó hasta 200 cm de profundidad. A partir de los 10 cm de profundidad y hasta por lo menos dos metros de profundidad hay evidencias de una capa continua rica en permafrost; sin embargo, debido a las limitaciones en la potencia del generador de energía eléctrica no pudimos alcanzar una mayor profundidad</p> <p>Se dejaron 3 sensores de temperatura CS107 de Campbell Scientific. El registrador será instalado por la UGN DGA en el futuro puesto que se instalará allí una estación meteorológica fija.</p> <p>Se dejó 1 sensor en superficie, tapado por una fina capa de detritos (1 cm aproximadamente), otro sensor a 1 metro de profundidad, y el tercero a 2 m de profundidad. Los 3 sensores se instalaron dentro de un tubo de plástico azul de ½" insertado en la perforación, que sobresalía 40 cm sobre la superficie.</p>



Figura 2. Vista del sitio de perforación Tupungatito A, a 5,575 m de altitud, con el tubo de PVC donde se insertaron los 3 sensores de temperatura. Al fondo el sector alto del glaciar Tupungatito, bordeado por cumbres limítrofes. Vista hacia el Sureste.

Nombre del sitio: Sitio B, Tupungatito

Coordenadas:

Posicionamiento de los sensores de temperatura: -1 cm, -100 cm, -124 cm

Altitud: 4,425 m s.n.m.

Fecha de instalación: 8 diciembre 2019, 7:40-9:30 h.

Localización general: Ubicado a unos 400 metros hacia el Noreste del sector inferior del glaciar Tupungatito, fuera del glaciar, sobre un filo rocoso, parte de una colada de lava del volcán Tupungatito (figura 3 y lamina 8).

Personal a cargo: Kenji Yoshikawa, profesor Universidad de Alaska. Gonzalo Campos (colaborador Atacama Ambiente).

Detalle del proceso de perforación e instalación de la cinta termistora: Se perforó hasta 124 cm de profundidad. Se estima que no hay evidencia de permafrost en el lugar, puesto que el detrito excavado en el proceso de la perforación era seco. Se agregó bentonita con agua en la perforación para evitar el colapso de la perforación, de modo de permitir insertar el tubo de PVC. Aproximadamente bajo 50 cm de profundidad se comenzó a perforar en roca. Se dejaron 3 sensores de temperatura CS107 de Campbell Scientific. El registrador será instalado por la UGN DGA en el futuro puesto que se instalará allí una estación meteorológica fija. Se dejó 1 sensor en superficie, tapado por una fina capa de detritos (1 cm aproximadamente), otro sensor a 1 metro de profundidad, y el tercero a 1,24 m de profundidad. Los 3 sensores se instalaron dentro de un tubo de plástico azul de 1/2" insertado en la perforación, que sobresalía 40 cm sobre la superficie.



Figura 3. Vista del sitio de perforación Tupungatito B a 4425 m de altitud, con el tubo de PVC donde se dejaron insertados los 3 sensores de temperatura. Volcán Tupungatito al fondo a la derecha. Vista hacia el Noreste.

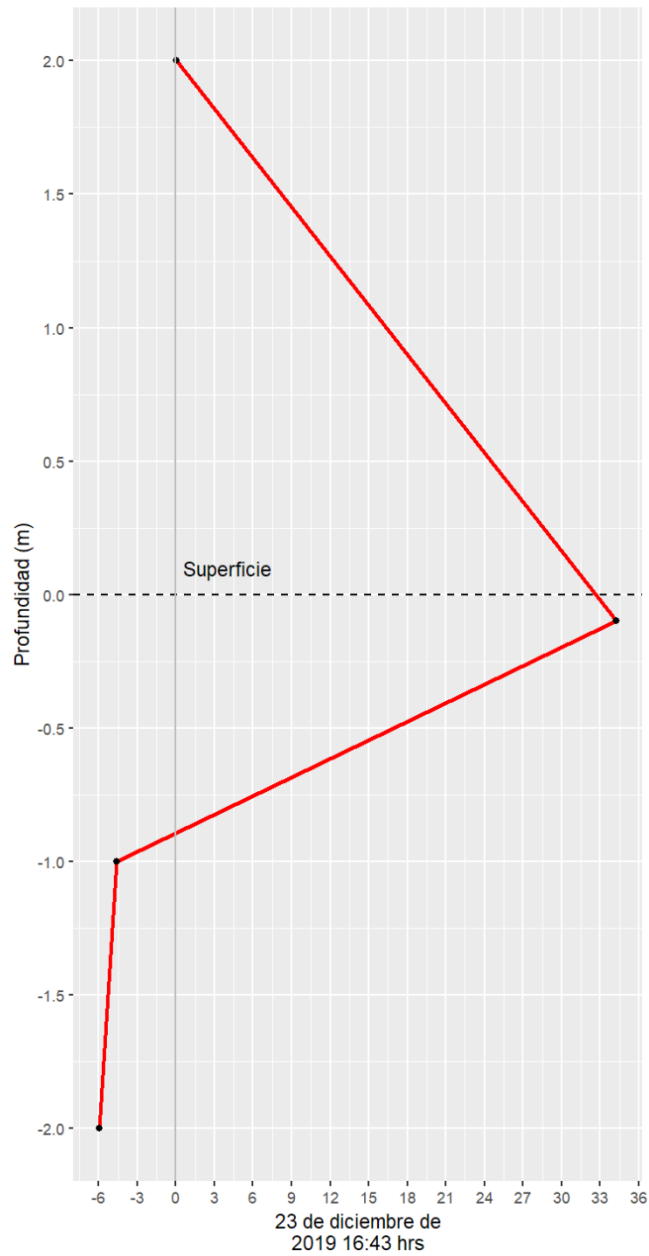
7.2. Sitio de Monitoreo en las cercanías del Glaciar Bello

- Nombre del sitio:** Bello
- Coordenadas:** 411,760 6,305,608
- Altitud:** 4,840 m s.n.m.
- Fecha de instalación:** 2 diciembre 2019, 9:15-11:30 h.
- Posicionamiento de los sensores de temperatura:** -1cm,-100 cm, -170 cm.
- Localización general:** Ubicado a unos 100 metros hacia el Noroeste de la cabecera del glaciar Bello, fuera del glaciar (figura 4 y lamina 9).
- Personal a cargo:** Kenji Yoshikawa, Profesor Universidad de Alaska.
- Detalle del proceso de perforación e instalación de la cinta termistora:** Se perforó hasta 170 cm de profundidad. A partir de unos 10 cm de profundidad se comenzó a perforar en suelo húmedo, lo que se estima es evidencia de permafrost en el lugar, derretido en el proceso de la perforación. Aproximadamente bajo 1 metro de profundidad se comenzó a perforar en roca.
- Se dejaron 3 sensores de temperatura TinyTag con 2 registradores que capturan datos cada ½ hora: 1 sensor en superficie, tapado por una fina capa de detritos (1 cm aproximadamente), otro sensor a 1 metro de profundidad, y el tercero a 1,7 m de profundidad. Los sensores se dejaron dentro de un tubo de plástico azul de ½", insertado en la perforación, que sobresalía 70 cm sobre la superficie.



Figura 4. Vista del sitio de perforación Belo. Dr. Kenji Yoshikawa perforando en la cabecera del glaciar Bello, 4,840 m de altitud. Al fondo el cerro Marmolejo. Vista hacia el Sureste.

A Sitio A Tupungatito. 5575 m



B Sitio A Tupungatito. 4425 m

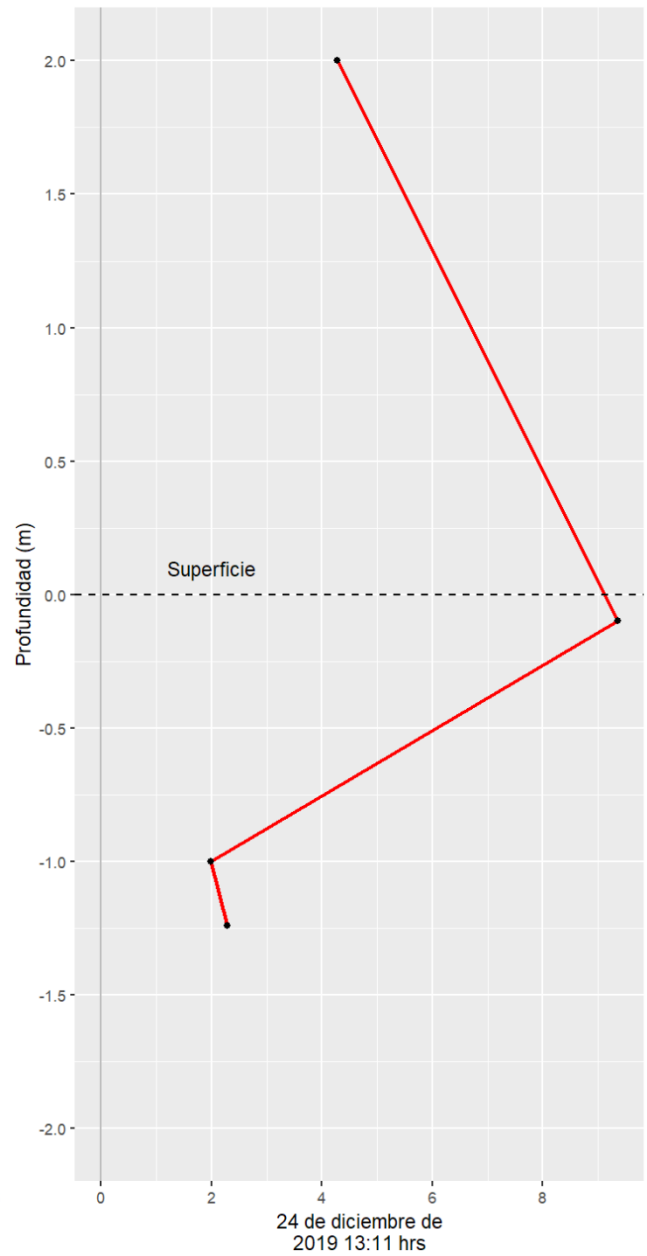


Figura 5. A) Muestra de registro de temperatura realizados en el sitio Tupungatito A. B) Muestra de registro de temperatura realizados en el sitio Tupungatito B.

8. Estudios Adicionales Recomendados

En particular se recomienda dos actividades que deben ser desarrollada en forma paralela. Una de ella es el modelamiento a lo largo del territorio nacional de la distribución del permafrost y el inventario de evidencia de permafrost.

8.1. Modelamiento Nacional de la Distribución del Permafrost

El modelamiento de la distribución de permafrost montaña es la base para poder entender a escala nacional la magnitud de la distribución del permafrost de montaña en el territorio nacional. En general, este tipo de modelo evalúa mediante un índice la posibilidad de existencia de permafrost en un sitio determinado. A nivel nacional sólo se cuenta con estimaciones a resolución media (30 m) entre los 27 y los 29° de latitud Sur.

8.2. Inventario de Evidencias de Permafrost

Un inventario que muestre la ausencia o presencia de permafrost es la base tanto para el desarrollo como para validación de modelos estadísticos de la distribución del permafrost. El inventario debe basarse en distintos tipos de evidencias geomorfológicas, térmicas o de prospección por ejemplo de:

- Pozos geológicos en los cuales se ha determinado la ausencia o presencia de permafrost basados en registro de temperatura.
- Registros de temperatura subsuperficiales (Ground Surface Temperature, GST).
- Prospecciones geofísicas que han determinado la presencia de hielo.
- Evidencias puntuales de presencia de permafrost sobre glaciares rocosos.
- Evidencias de proyectos de infraestructuras en los cuales se haya observado suelos congelados mediante por ejemplo la construcción de trincheras de excavación.

Es importante que este inventario sea actualizado anualmente revisando tanto la literatura científica como estudios de impacto ambiental.

9. Referencias Bibliográficas

- Atacama Ambiente. (2017). *Estudio de caracterización de temperaturas subsuperficiales mediante cintas termistoras, proyecto minero Salares Norte*. Santiago: En: Estudio de impacto ambiental Salares Norte. Goldfields. Anexo 3.2.11-11. Soluciones de Gestión Ambiental, SGA.
- Azócar & Brenning. (2010). Hydrological and Geomorphological Significance of Rock Glaciers in Chile (27°-33°S). *Permafrost and Periglacial Processes*, 21: 42–53. DOI: 10.1002/ppp.669
- Azócar, G. F., Brenning, A., and Bodin, X. (2017). Permafrost distribution modelling in the semi-arid Chilean Andes, *The Cryosphere*, 11, 877-890, doi: 10.5194/tc-11-877-2017, 2017.
- Barsch, D. (1996). *Rockglaciers: Indicators for the present and former geocology in high mountain environments*. Berlin, Germany: Springer.
- BGC Engineering. (2009). *Estudio de caracterización del permafrost en la zona del proyecto Pascua-Lama*. Santiago: En: Recopilación de estudios de línea base actualizada de la criósfera. Anexo I. EIA modificaciones del proyecto Pascua-Lama. Estudios de monitoreo y seguimiento.
- Brenning, A. (2010). Short Communication: The significance of rock glaciers in the dry Andes – Reply to L. Arenson and M. Jakob. *Permafrost and Periglacial Processes*, 21(3), 286-288.
- Brenning, A., & Azócar, G. F. (2010). Statistical analysis of topographic and climatic controls and multispectral signatures of rock glaciers in the dry Andes, Chile (27°–33°S). *Permafrost and Periglacial Processes*, 21(1), 54-66. doi:10.1002/ppp.670
- Bodin X, Rojas F, Brenning A. (2010). Status and evolution of the cryosphere in the Andes of Santiago (Chile, 33.5 degrees S.) *Geomorphology*, 118 (3–4) 453-464.
- Bodin, X Trombotto Dario. (2015). Evaluación de los aportes de la fotogrametría terrestre para el estudio de geoformas de alta montaña (Cordón del Plata, Mendoza, Argentina); Fundación Miguel Lillo; Acta Geológica Lilloana; 27; 2; 12-2015; 87-96
- Dirección General de Aguas. (2009). *Estrategia nacional de glaciares*. Estudio realizado por: Centro de Estudios Científicos. Santiago, Chile: Ministerio de Obras Públicas.
- Dirección General de Aguas. (2010). *Dinámica de glaciares rocosos*. Realizado por: Unidad de Gestión de Proyectos del Instituto de Geografía de la Pontificia Universidad Católica de Chile. Dirección General de Aguas, Unidad de Glaciología y Nieves. Santiago: Ministerio de Obras Públicas.
- Dirección General de Aguas (DGA). (2019). *Estado actual de los suelos congelados*. Volumen I. Realizado por Atacama Ambiente E.I.R.L. Santiago: Ministerio de Obras Públicas, Chile.
- Embleton, C., & King, C. A. (1975). *Periglacial geomorphology*. London: Edward Arnold Ltd.
- Farías D, Vivero S, Casassa G, Schaefer M, Burger F, Seehaus T, Iribarren Anaconda P, Escobar F, Braun M. (2019). Geodetic Mass Balances and Area Changes of Echaurren Norte Glacier (Central Andes, Chile) between 1955 and 2015. *Remote Sensing*. DOI: 10.3390/rs11030260
- Ferrando, F. (2012). Glaciar Pirámide: características y evolución reciente de un glaciar cubierto; evidencias del cambio climático. *Investigaciones Geográficas*. 44: 57-74.
- French, H. M. (2007). *The Periglacial environment*. West Sussex, England: John Wiley & Sons Ltd.
- Geoestudios. (2019). *Estudio de glaciares los Bronces*. Santiago.: En: Línea de base de glaciares del proyecto los Bronces Integrados. Anexo 3.13.

- Gruber, S., & Haeberli, W. (2009). Mountain permafrost. In R. Margesin (Ed.), *Permafrost Soils* (pp. 33-44). Berlin: Springer-Verlag.
- Hoelzle, M., Mittaz, C., Etzelmüller, B., & Haeberli, W. (2001). Surface energy fluxes and distribution models of permafrost in European mountain areas: An overview of current developments. *Permafrost and Periglacial Processes*, 12(1), 53-68. doi:DOI: 10.1002/ppp 385
- Haeberli W. (1973). Die Basis-Temperatur der winterlichen Schneedecke als möglicher Indikator für die Verbreitung von Permafrost in den Alpen. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 9, p. 221-227.
- Haeberli, W. (1985). Creep of mountain permafrost: Internal structure and flow of alpine rock glaciers. *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie*, 77, 142.
- Humlum, O., & Matsuoka, N. (Edits.). (2003). *A handbook on periglacial field methods. International Permafrost Association (IPA). The Working Group on Periglacial Processes and Environments*. The University Center on Svalbard.
- Iribarren Anacona, P., Mackintosh, A., & Kevin Patrick, N. (2015). Hazardous processes and events from glacier and permafrost areas: lesson from the Chilean and Argentinean Andes. *Earth surface processes and landforms*, 40, 2-21.
- Krainer, K., Mostler, W., & Spotl, C. (2007). Discharge from active rock glaciers, Austrian Alps: A stable isotope approach. *Austrian journal of earth sciences*, 100, 102-112.
- Kellerer-Pirklbauer, A., Lieb, G. K., Schoeneich, P., Deline, P., & Pogliotti, P. (2011). Thermal and geomorphic permafrost response to present and future climate change in the European Alps. PermaNET project.
- Johnston, G. (1981). *Permafrost engineering design and construction*. Toronto: Wiley.
- Selley H Harrison S, Glasser N, Wüdrich O Colson D, Hubbard A. (2018). Rock glaciers in central Patagonia *Geogr. Ann.* (2018), pp. 1-15
- Nagy B, Ignezi A, Kovaks J, Szalai Z, Mari L. (2018). Shallow ground temperature measurements on the highest volcano of the Earth, the Mt. Ojos del Salado, Arid Andes, Chile. *Permafrost and Periglacial Processes* DOI: 10.1002/ppp.1989.
- Merz K., Rabenstein L., Buchli T., Hansruedi M. (2012). Geophysical Characterization of the Furggwanghorn Rock Glacier, Switzerland. *Integrated Geosciences for Subsurface Instabilities, Offshore and Onshore*. 74th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2012.
- Paterson, W. (1994). *The physics of glaciers*. Burlington, Massachusetts: Elsevier Science Ltd.
- PermaNET. (2011). Wp4 Final Report. Handbook to establish alpine permafrost monitoring network. 46 pp
- PERMOS. (2019). Permafrost in Switzerland 2014/2015 to 2017/2018. (J. Noetzli, C. Pellet, & B. Staub, Edits.) *Glaciological Report Permafrost No. 16-19 of the Cryospheric Commission of the Swiss Academy of Sciences*. doi:10.13093/permos-rep-2019-16-19.
- Redondo. (2004). El glaciar rocoso del Cerro Krund, Tierra del Fuego. Argentina. *Cuadernos de Investigación Geográfica* 30:169-180
- Schoeneich, P., Bodin, X., Kyrstiecki, J.-M., & Ravelin, L. (2010). Permafrost in France, Report N°1, PermaFrance Network. Grenoble: Institut de Géographie Alpine.
- Thies H., Nickus U., Mair V., Tessadri R., Tait D., Thaler B. & Psenner R. (2007). Unexpected response of high alpine lake waters to climate warming. *Environmental Science and Technology* 41: 7424-7429

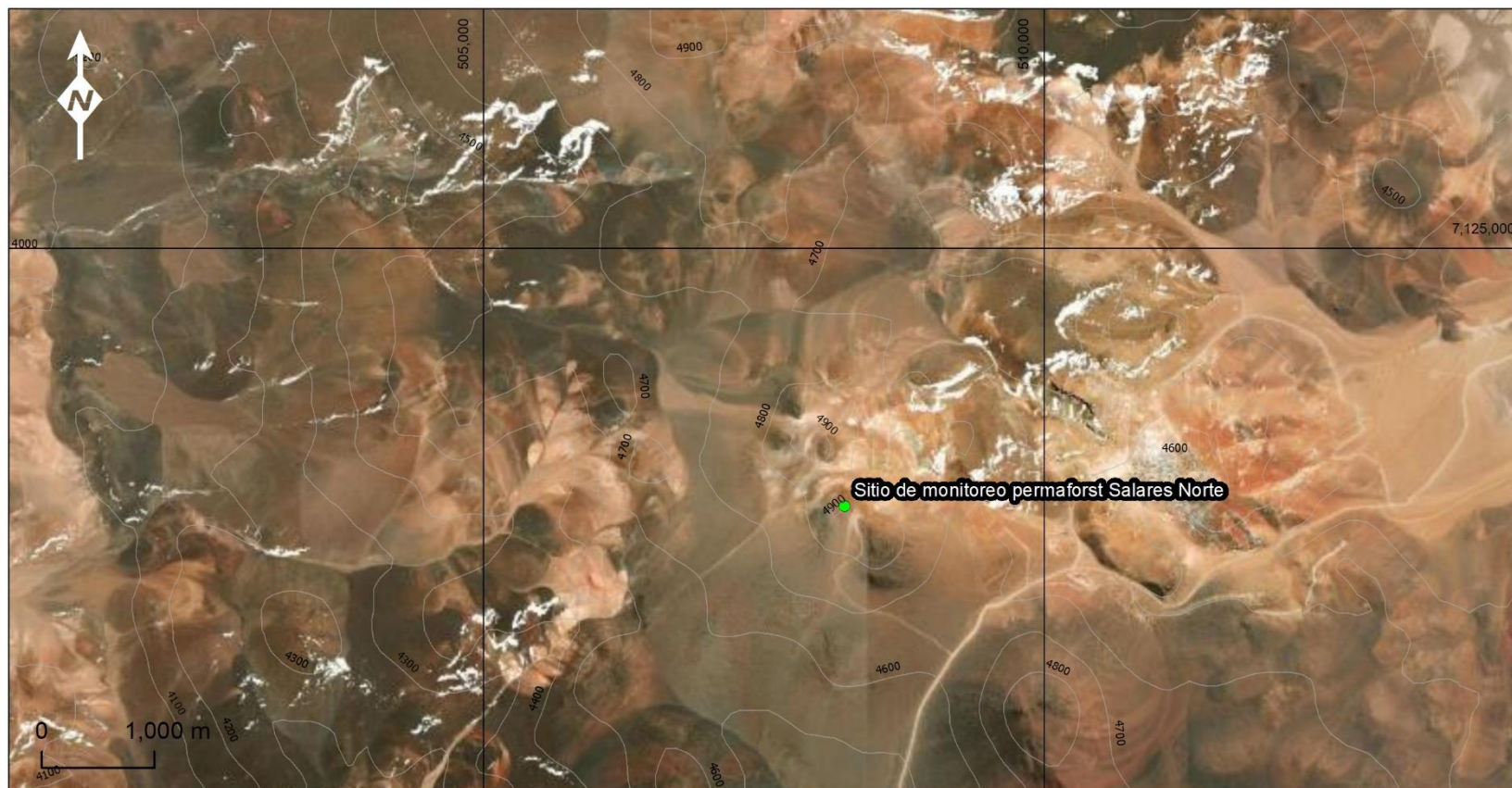
- Trombotto, D., & Borzotta, E. (2009). Indicators of present global warming through changes in active layer-thickness, estimation of thermal diffusivity and geomorphological observations in the Morenas Coloradas rockglacier, Central Andes of Mendoza, Argentina. *Cold Regions Science and Technology*, 55, 321-330.
- Trombotto Liaudat, D., Wainstein, P., & Arenson, L. U. (2014). Guía terminológica de la geocriología sudamericana. Luján de Cuyo, San Juan, Argentina: Vazquez Mazzini Editores.

Lamina 1. Sitio propuesto para monitoreo permafrost: Nevado Ojos del Salado.



PROYECTO: Estado Actual de Los Suelos Congelados y Plan de Monitoreo Nacional de Permafrost	LAMINA N°: 1	ESCALA: 1:60,000	CLIENTE: MOP-DGA
	NOTAS: Proyección: 19 S, WGS84 Ortofoto: Google Maps Topografía: SRTM V02	FECHA: 2019-12-19	
TÍTULO: Sitio propuesto para monitoreo de permafrost: Endorreicas entre Fronteras y vertientes del Pacífico. Subcuenca al SE de cuenca Salar de Pedernales. Nevado Ojo del Salado.	REVISIÓN: 2	AUTORES: ATACAMA <small>ARGENTINA</small>	

Lamina 2. Sitio propuesto para monitoreo permafrost: Salares Norte.



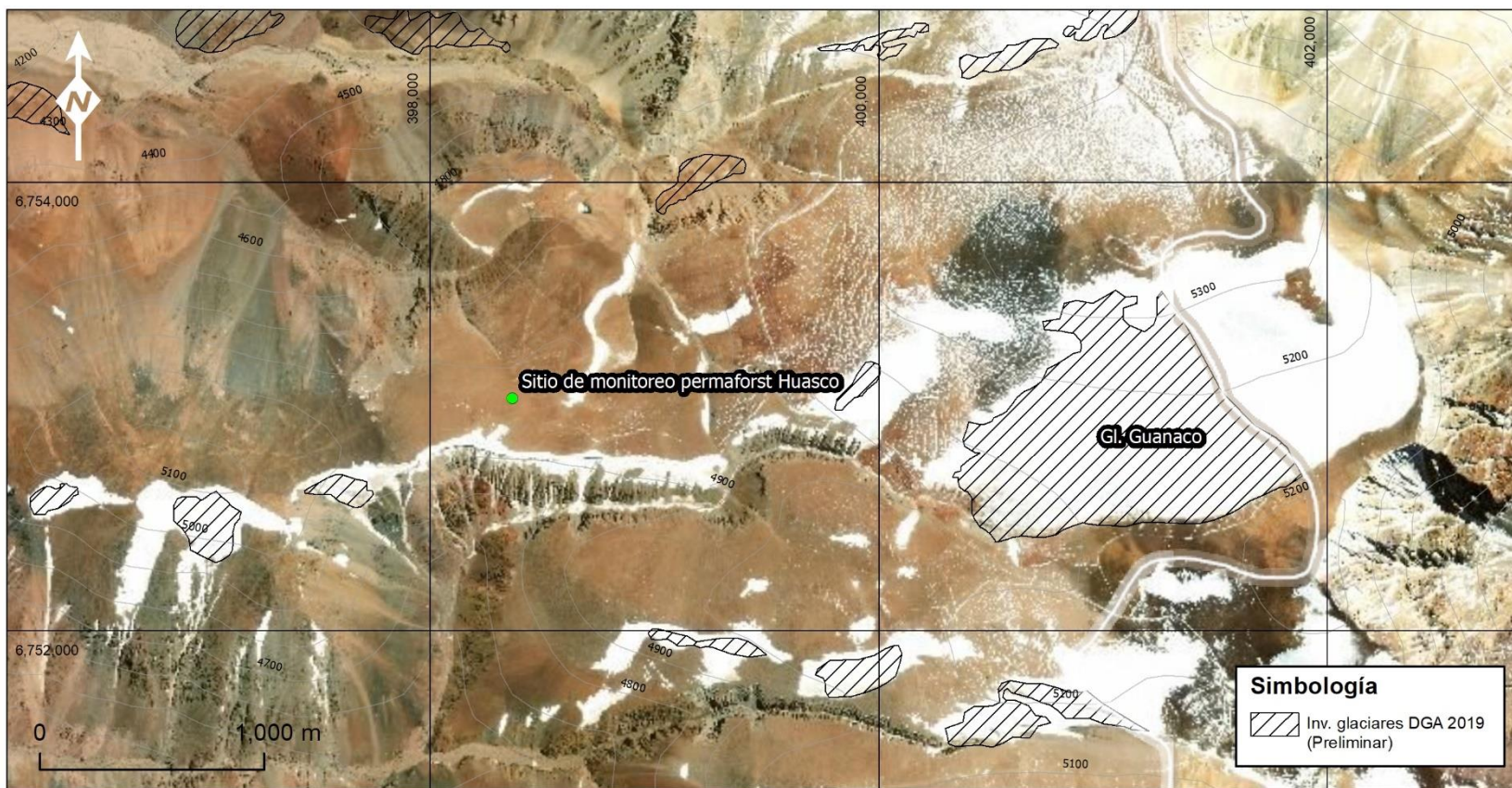
PROYECTO: Estado Actual de Los Suelos Congelados y Plan de Monitoreo Nacional de Permafrost	LAMINA N°: 2	ESCALA: 1:60,000	CLIENTE: MOP-DGA
	TITULO: Sitio propuesto para monitoreo de permafrost: Endorreicas entre Fronteras y vertientes del Pacífico. Subcuenca al SE de cuenca Salar de Pedernales. Salares Norte.	NOTAS: Proyección: 19 S, WGS84 Ortófoto: Google Maps Topografía: SRTM V02	
		REVISIÓN: 2	AUTORES: ATACAMA AMBIENTE


Lamina 3. Sitio propuesto para monitoreo permafrost: Copiapó.



PROYECTO: Estado Actual de Los Suelos Congelados y Plan de Monitoreo Nacional de Permafrost	LAMINA N°: 3	ESCALA: 1:60,000	CLIENTE: MOP-DGA
	NOTAS: Proyección: 19 S, WGS84 Ortofoto: Google Maps Topografía: SRTM V02	FECHA: 2019-12-19	
TITULO: Sitio propuesto para monitoreo de permafrost: Cuenca Río Copiapó, subcuenca río Pulido. Copiapó	REVISIÓN: 2	AUTORES: ATACAMA AMBIENTE	

Lamina 4. Sitio propuesto para monitoreo permafrost: Huasco.



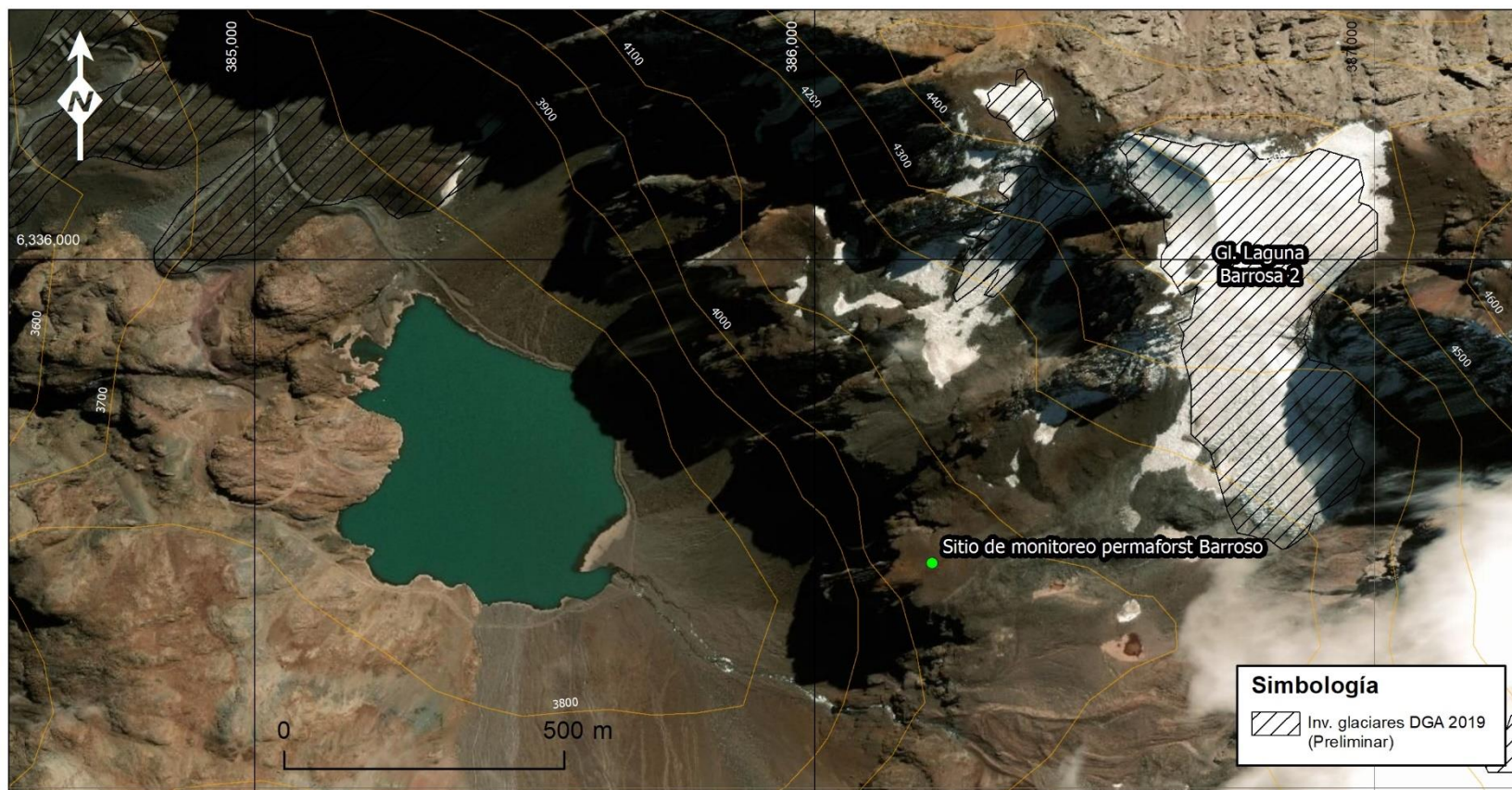
PROYECTO: Estado Actual de Los Suelos Congelados y Plan de Monitoreo Nacional de Permafrost	LAMINA N°: 4	ESCALA: 1:30,000	CLIENTE: MOP-DGA
	NOTAS: Proyección: 19 S, WGS84 Ortofoto: Google Maps Topografía: SRTM V02	FECHA: 2019-12-19	
TÍTULO: Sitio propuesto para monitoreo de permafrost: Río Huasco, subcuencia río Carmen. Huasco.	REVISIÓN: 2	AUTORES: 	

Lamina 5. Sitio propuesto para monitoreo permafrost: Elqui.



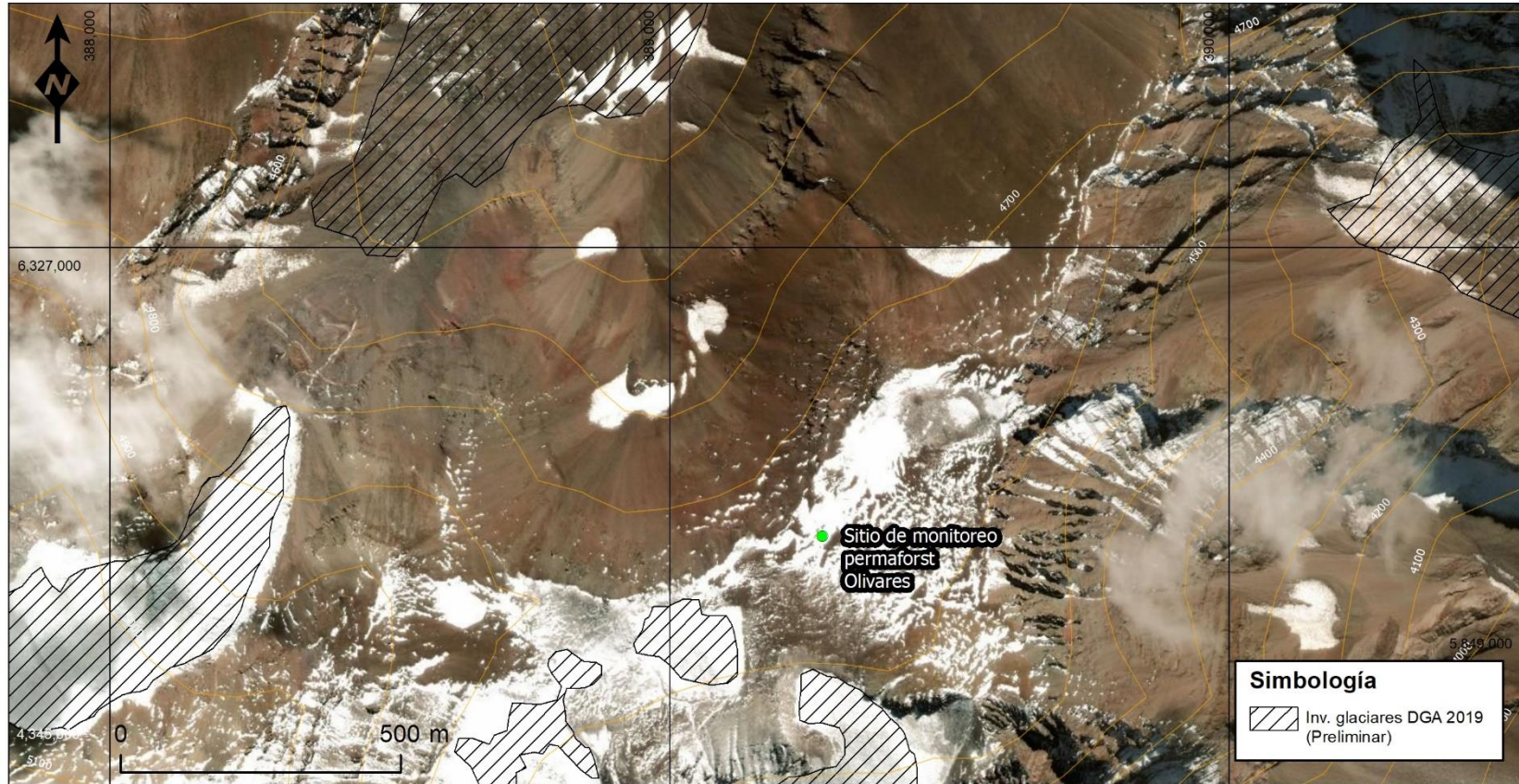
PROYECTO: Estado Actual de Los Suelos Congelados y Plan de Monitoreo Nacional de Permafrost	LAMINA N°: 5	ESCALA: 1:40,000	CLIENTE: MOP-DGA
	TITULO: Sitio propuesto para monitoreo de permafrost: Río Elqui, subcuencia río Turbio. Elqui	NOTAS: Proyección: 19 S, WGS84 Ortofoto: Google Maps Topografía: SRTM V02	
		REVISIÓN: 2	AUTORES: ATACAMA AMBIENTE

Lamina 6. Sitio propuesto para monitoreo permafrost: Barroso.



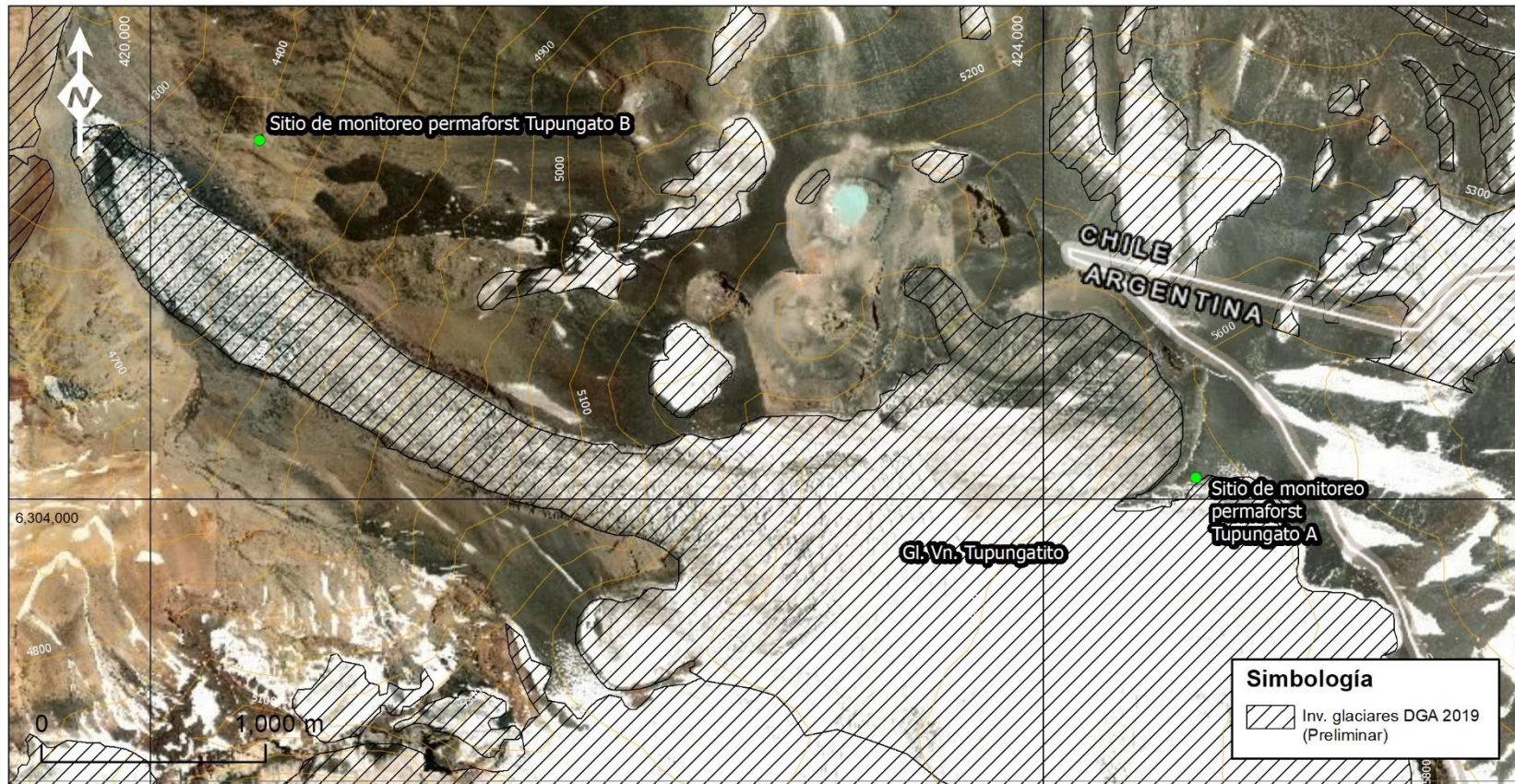
PROYECTO: Estado Actual de Los Suelos Congelados y Plan de Monitoreo Nacional de Permafrost	LAMINA N°: 6	ESCALA: 1:12,000	CLIENTE: MOP-DGA
	NOTAS: Proyección: 19 S, WGS84 Ortófoto: Google Maps Topografía: SRTM V02	FECHA: 2019-12-19	
TÍTULO: Sitio propuesto para monitoreo de permafrost: Río Aconcagua, Río Aconcagua Alto, Barroso.	REVISIÓN: 2	AUTORES: ATACAMA AMBIENTE	

Lamina 7. Sitio propuesto para monitoreo permafrost: Olivares.



PROYECTO: Estado Actual de Los Suelos Congelados y Plan de Monitoreo Nacional de Permafrost	LAMINA N°: 07	ESCALA: 1:12,000	CLIENTE: MOP-DGA
	NOTAS: Proyección: 19 S, WGS84 Ortófoto: Google Maps Topografía: SRTM V02	FECHA: 2019-12-19	
TÍTULO: Sitio propuesto para monitoreo de permafrost. Río Maipo, subcuenca río Maipo Alto. Olivares.	REVISIÓN: 2	AUTORES: ATACAMA AMBIENTE	

Lamina 8. Sitio propuesto para monitoreo permafrost: Tupungatito.



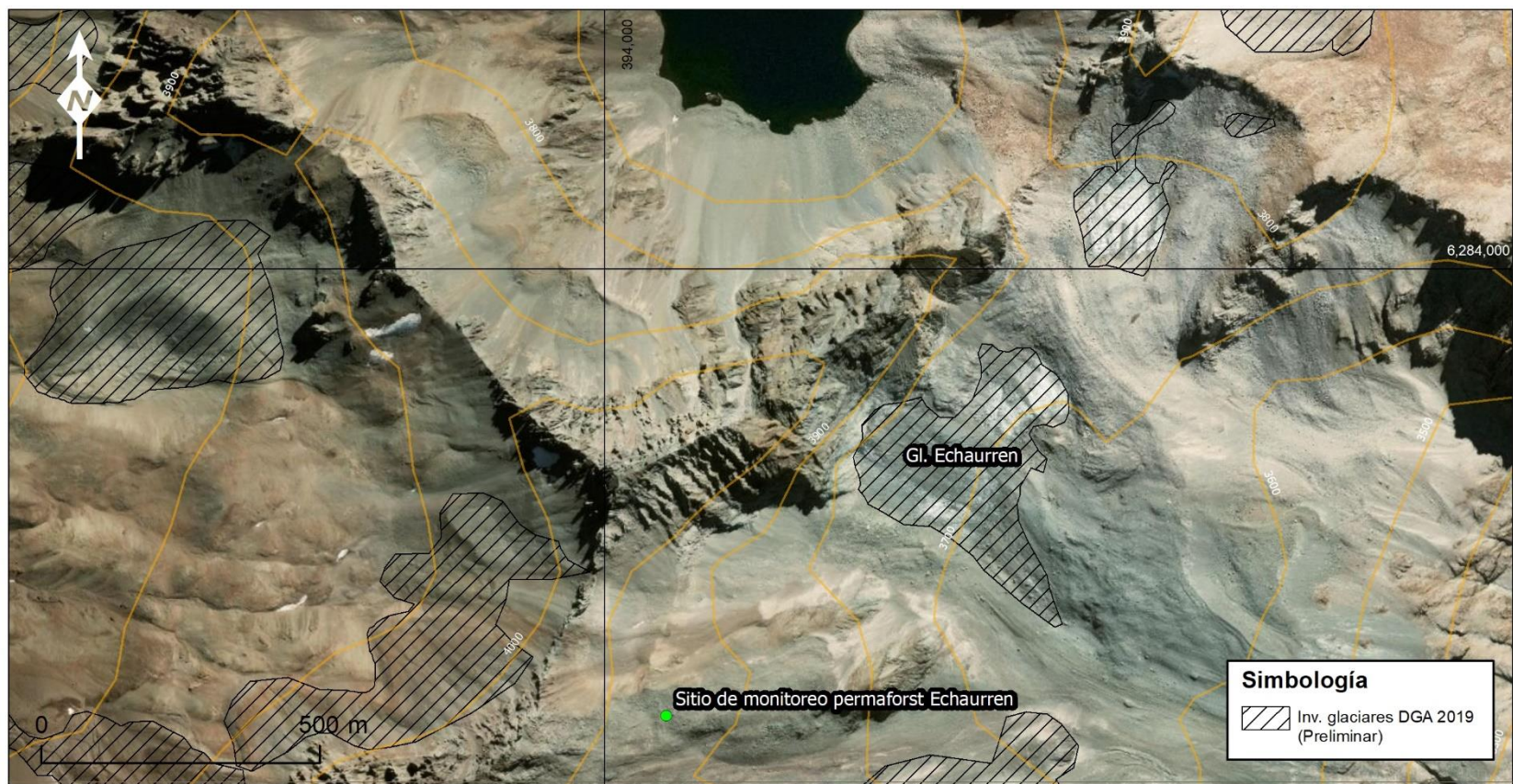
PROYECTO: Estado Actual de Los Suelos Congelados y Plan de Monitoreo Nacional de Permafrost	LAMINA N°: 8	ESCALA: 1:30,000	CLIENTE: MOP-DGA
	NOTAS: Proyección: 19 S, WGS84 Ortófoto: Google Maps Topografía: SRTM V02	FECHA: 2019-12-19	
TÍTULO: Sitio propuesto para monitoreo de permafrost: Río Maipo. Subcuenca río Maipo Alto. Tupungatito.	REVISIÓN: 2	AUTORES: ATACAMA <small>AMBIENTE</small>	

Lamina 9. Sitio propuesto para monitoreo permafrost: Bello.



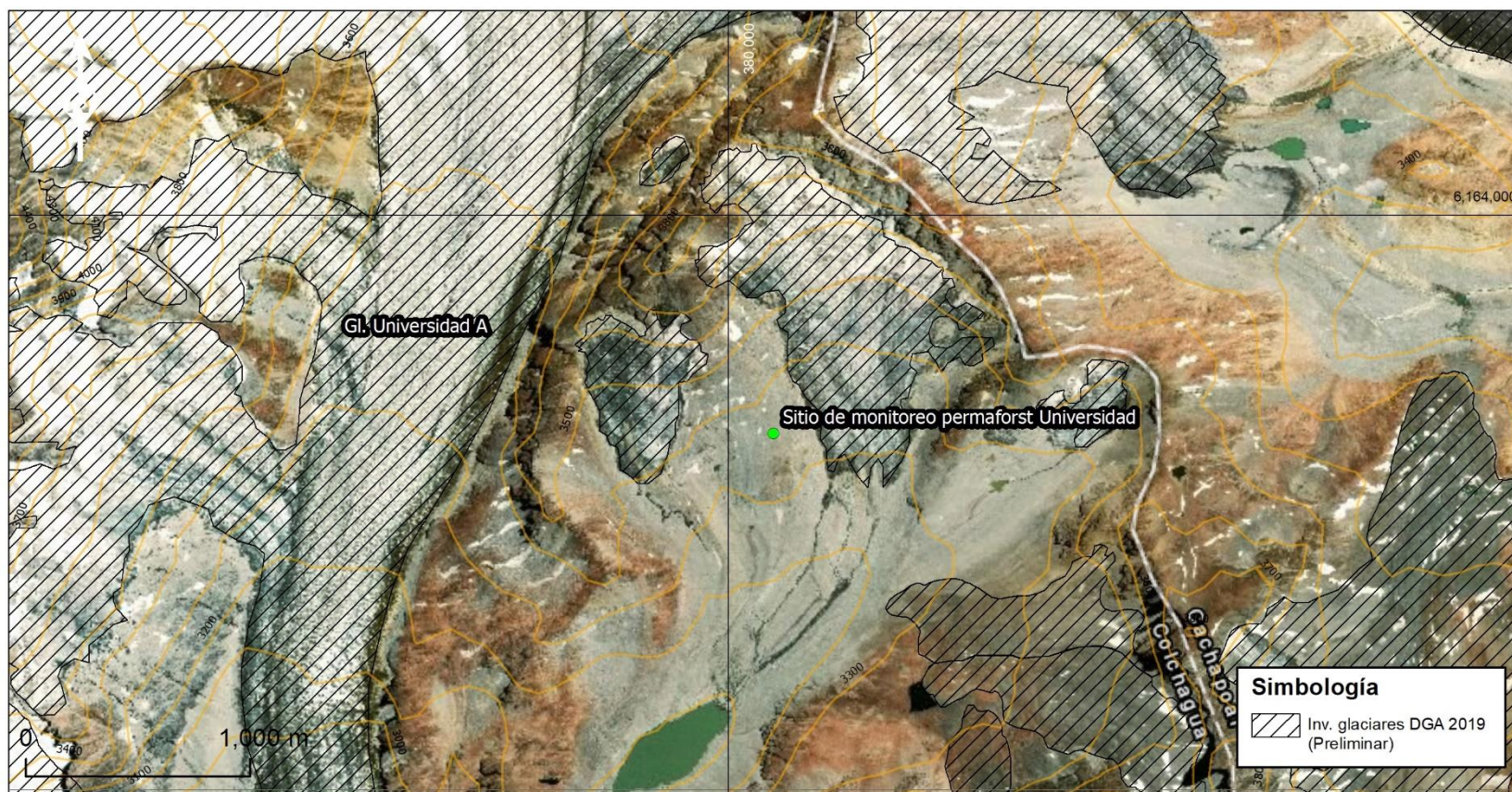
PROYECTO: Estado Actual de Los Suelos Congelados y Plan de Monitoreo Nacional de Permafrost	LAMINA N°: 9	ESCALA: 1:20,000	CLIENTE: MOP-DGA
	NOTAS: Proyección: 19 S, WGS84 Ortofoto: Google Maps Topografía: SRTM V02	FECHA: 2019-12-19	
TÍTULO: Sitio propuesto para monitoreo de permafrost: Río Maipo. Subcuenca río Maipo Alto. Bello.	REVISIÓN: 2	AUTORES:	

Lamina 10. Sitio propuesto para monitoreo permafrost: Echaurren.



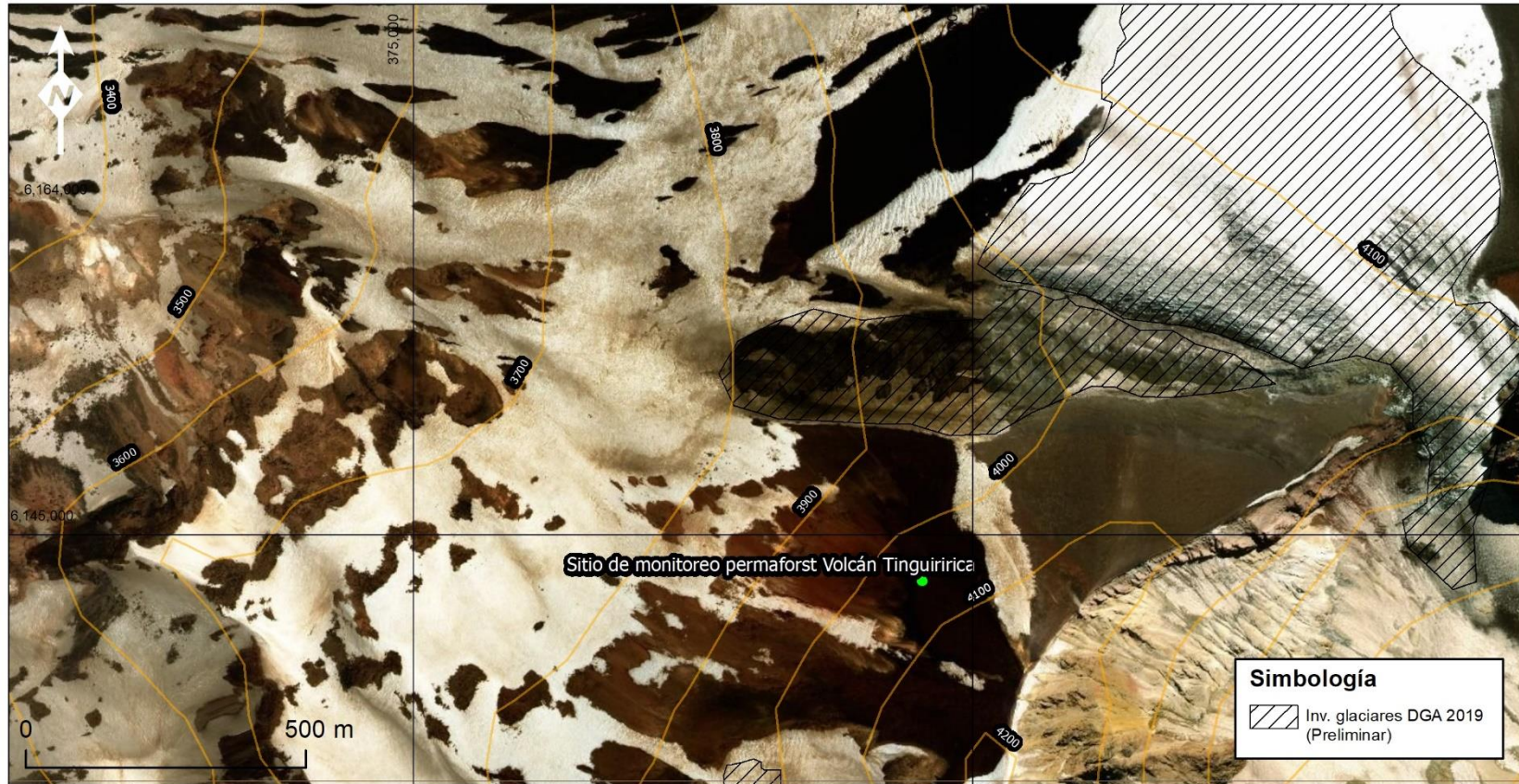
PROYECTO: Estado Actual de Los Suelos Congelados y Plan de Monitoreo Nacional de Permafrost	LAMINA N°: 10	ESCALA: 1:12,000	CLIENTE: MOP-DGA
	NOTAS: Proyección: 19 S, WGS84 Ortofoto: Google Maps Topografía: SRTM V02	FECHA: 2019-12-19	
TÍTULO: Sitio propuesto para monitoreo de permafrost: Río Maipo. Subcuenca río Maipo Alto. Echaurren			

Lamina 11. Sitio propuesto para monitoreo permafrost: Universidad.



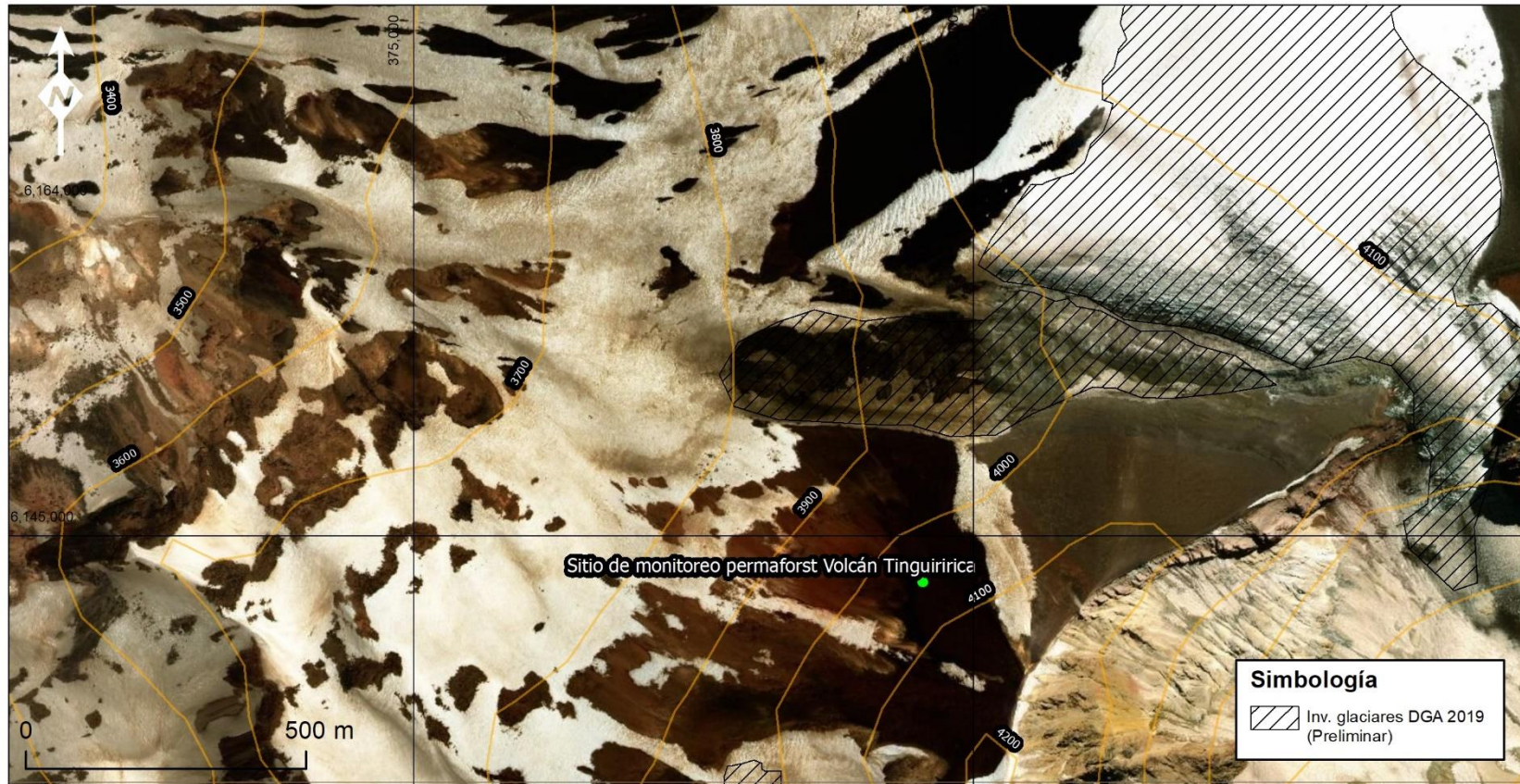
PROYECTO: Estado Actual de Los Suelos Congelados y Plan de Monitoreo Nacional de Permafrost	LAMINA N°: 11	ESCALA: 1:30,000	CLIENTE: MOP-DGA
	NOTAS: Proyección: 19 S, WGS84 Ortofoto: Google Maps Topografía: SRTM V02	FECHA: 2019-12-19	
TITULO: Sitio propuesto para monitoreo de permafrost: Río Rapel, subcuencia río Tinguiririca Alto. Universidad.	REVISIÓN: 2		

Lamina 12. Sitio propuesto para monitoreo permafrost: Volcán Tinguiririca.



PROYECTO: Estado Actual de Los Suelos Congelados y Plan de Monitoreo Nacional de Permafrost	LAMINA N°: 12	ESCALA: 1:12,000	CLIENTE: MOP-DGA
	NOTAS: Proyección: 19 S, WGS84 Ortofoto: Google Maps Topografía: SRTM V02	FECHA: 2019-12-19	
TÍTULO: Sitio propuesto para monitoreo de permafrost: Río Rapel, subcuencia río Tinguiririca Alto. Volcán Tinguiririca.	REVISIÓN: 2	AUTORES: ATACAMA AMBIENTE	

Lamina 13. Sitio propuesto para monitoreo permafrost: Volcán Tinguiririca.



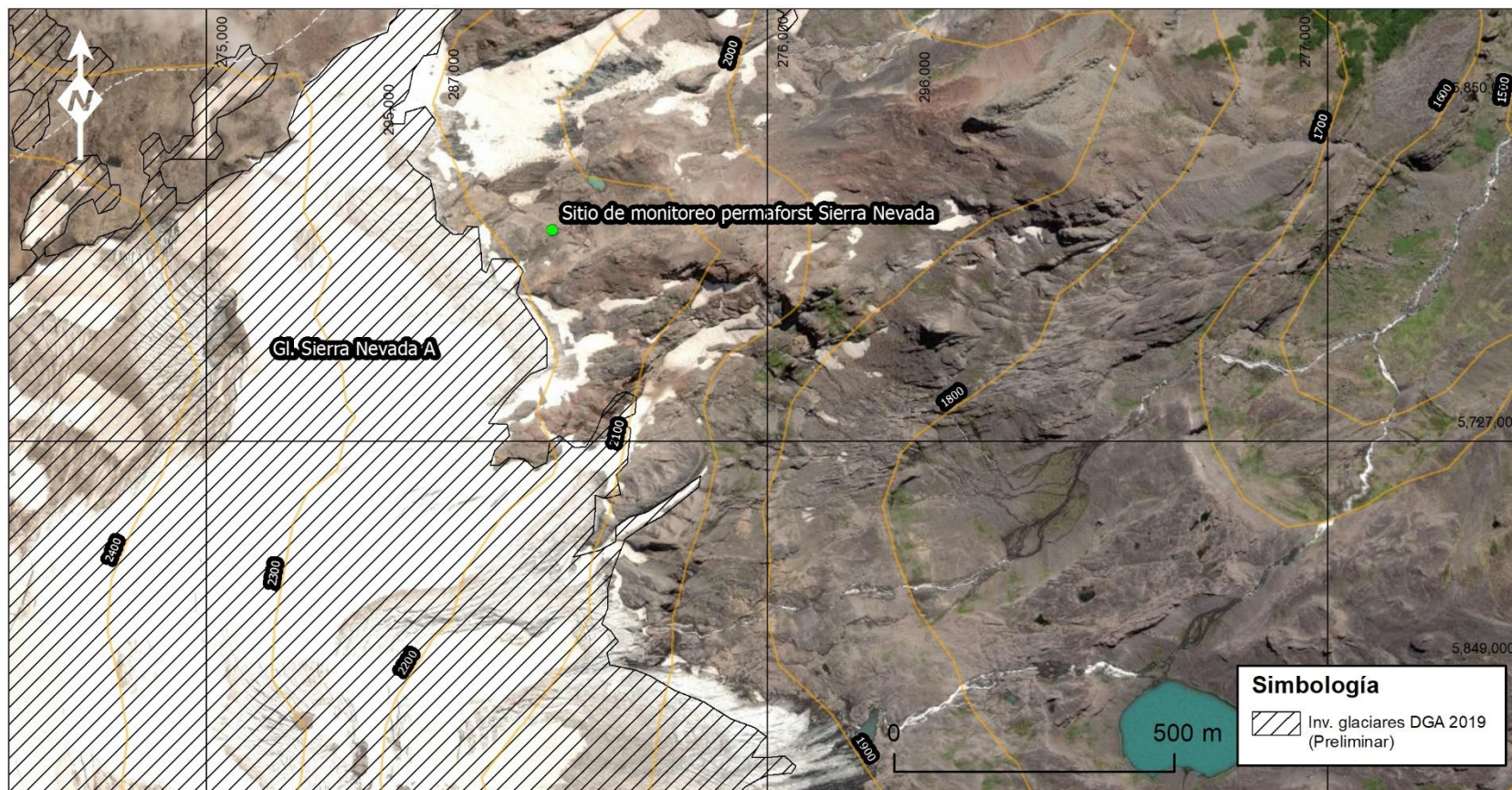
PROYECTO: Estado Actual de Los Suelos Congelados y Plan de Monitoreo Nacional de Permafrost	LAMINA N°: 12	ESCALA: 1:12,000	CLIENTE: MOP-DGA
	NOTAS: Proyección: 19 S, WGS84 Ortófoto: Google Maps Topografía: SRTM V02	FECHA: 2019-12-19	
TÍTULO: Sitio propuesto para monitoreo de permafrost: Río Rapel, subcuencia río Tinguiririca Alto. Volcán Tinguiririca.	REVISIÓN: 2	AUTORES: ATACAMA <small>AMBIENTE</small>	

Lamina 14. Sitio propuesto para monitoreo permafrost: Sierra Velluda.



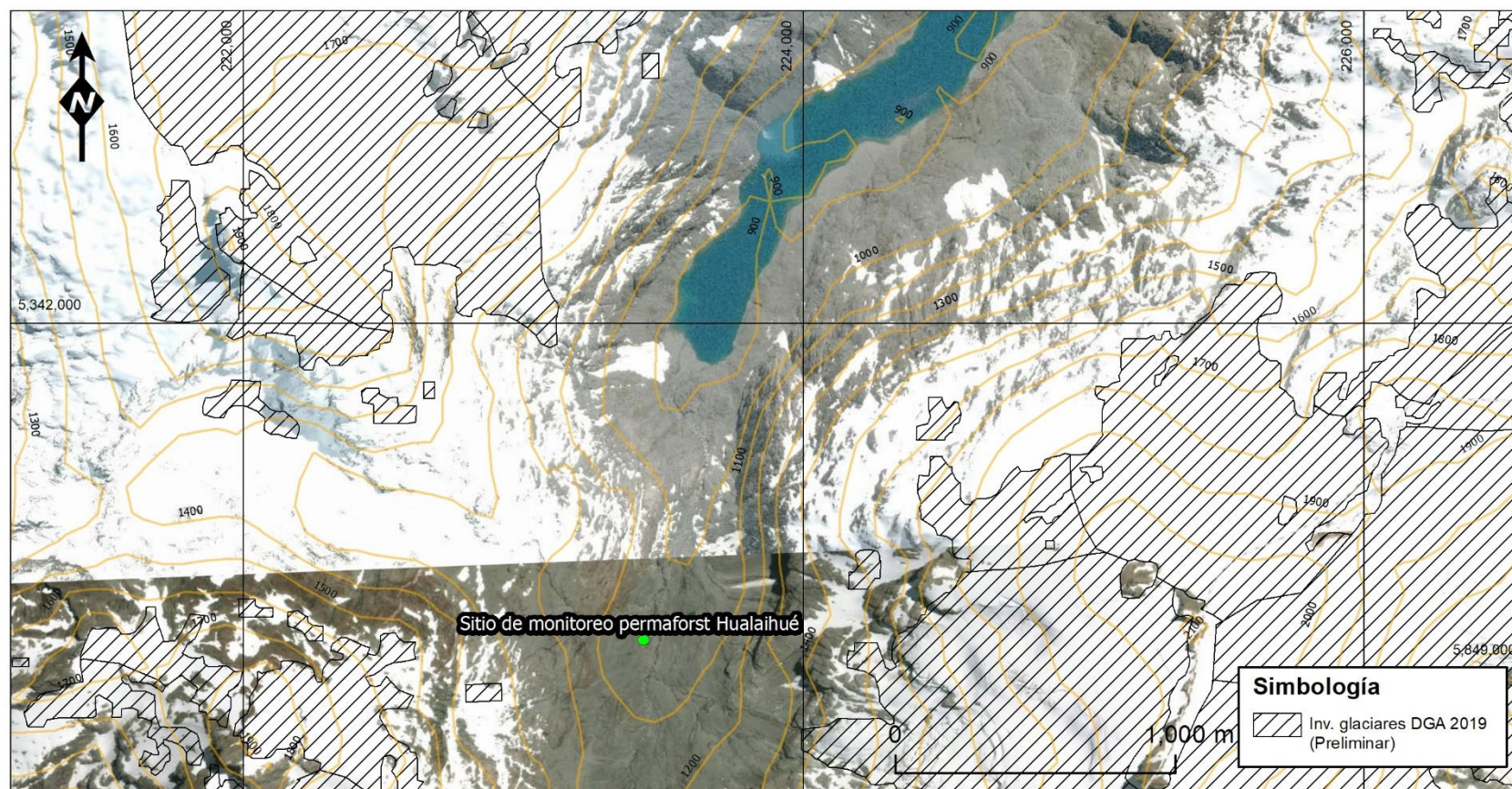
PROYECTO: Estado Actual de Los Suelos Congelados y Plan de Monitoreo Nacional de Permafrost	LAMINA N°: 14	ESCALA: 1:12,000	CLIENTE: MOP-DGA
	NOTAS: Proyección: 19 S, WGS84 Ortofoto: Google Maps Topografía: SRTM V02	FECHA: 2019-12-19	
TITULO: Sitio propuesto para monitoreo de permafrost: RíoBío-Bío, subcuenca río Duqueco. Sierra Velluda.	REVISIÓN: 2		


Lamina 15. Sitio propuesto para monitoreo permafrost: Sierra Nevada.



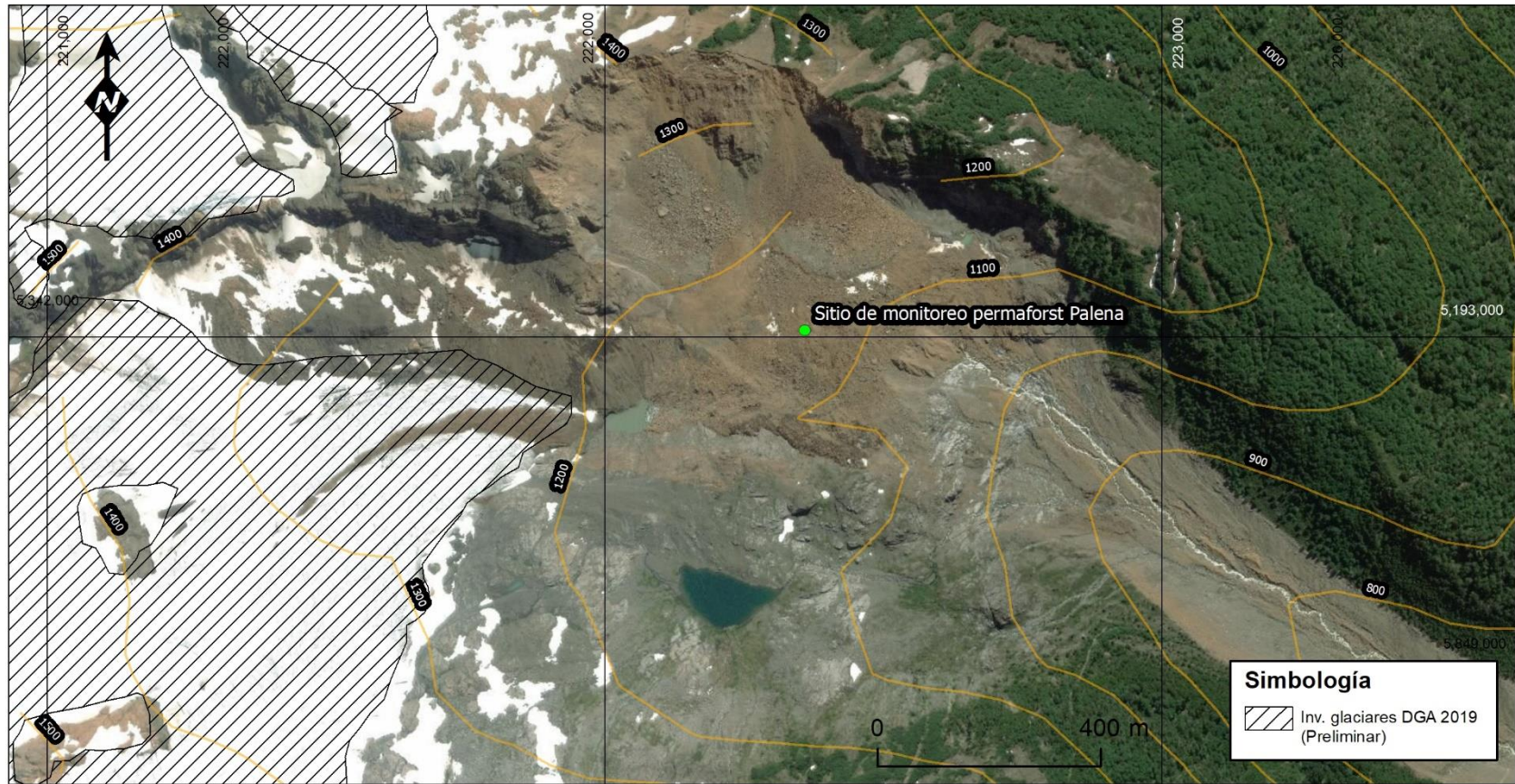
PROYECTO: Estado Actual de Los Suelos Congelados y Plan de Monitoreo Nacional de Permafrost	LAMINA N°: 15	ESCALA: 1:12,000	CLIENTE: MOP-DGA
	NOTAS: Proyección: 19 S, WGS84 Ortofoto: Google Maps Topografía: SRTM V02	FECHA: 2019-12-19	
TITULO: Sitio propuesto para monitoreo de permafrost: RíoBío-Bío, subcuena río Bío-Bío Alto. Sierra Nevada.	REVISIÓN: 2	AUTORES: ATACAMA AMBIENTE	

Lamina 16. Sitio propuesto para monitoreo permafrost: Hualaihué.



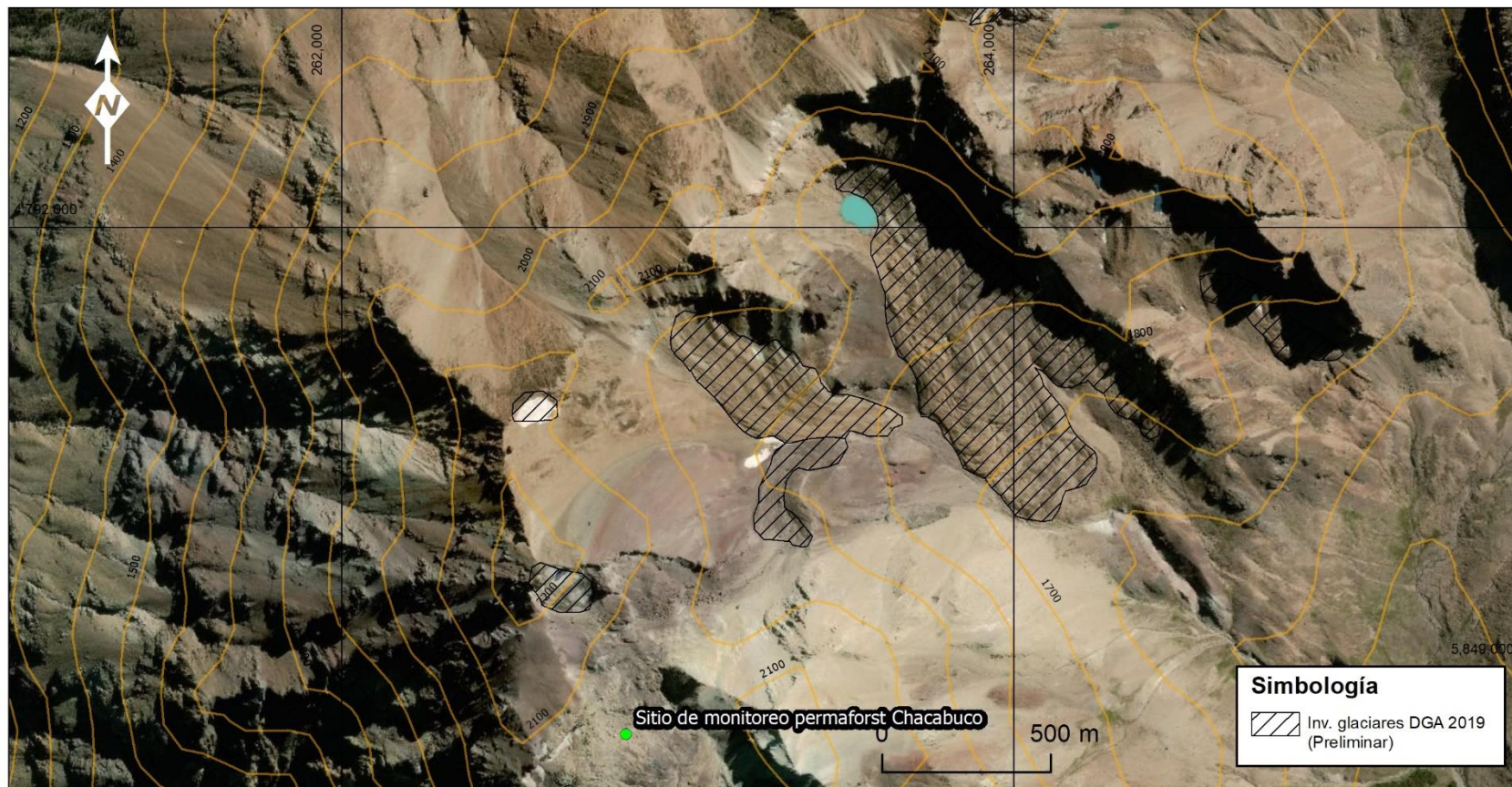
PROYECTO: Estado Actual de Los Suelos Congelados y Plan de Monitoreo Nacional de Permafrost	LAMINA N°: 16	ESCALA: 1:24,000	CLIENTE: MOP-DGA
	NOTAS: Proyección: 19 S, WGS84 Ortofoto: Google Maps Topografía: SRTM V02	FECHA: 2019-12-19	
TITULO: Sitio propuesto para monitoreo de permafrost: Costeras entre R.Puelo y R.Yelcho, Costeras entre Rio Negro y Rio Vodudahue. Hualaihué.	REVISIÓN: 2	AUTORES: 	


Lamina 17. Sitio propuesto para monitoreo permafrost: Palena.



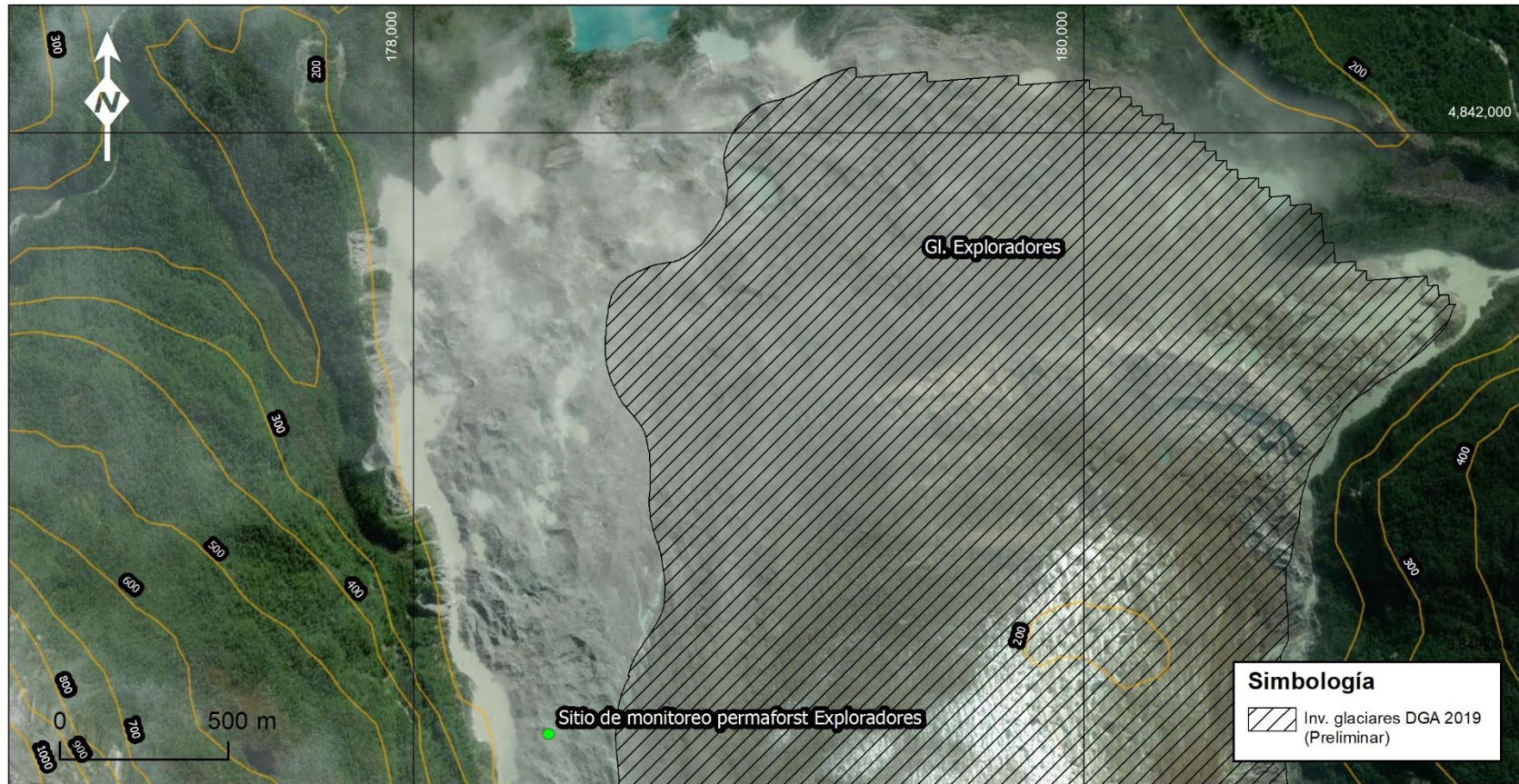
PROYECTO: Estado Actual de Los Suelos Congelados y Plan de Monitoreo Nacional de Permafrost	LAMINA N°: 17	ESCALA: 1:12,000	CLIENTE: MOP-DGA
	NOTAS: Proyección: 19 S, WGS84 Ortofoto: Google Maps Topografía: SRTM V02	FECHA: 2019-12-19	
TÍTULO: Sitio propuesto para monitoreo de permafrost: Río Palena y Costeras Limite Decima Región, Río Palena entre Frontera y Río Rosselot. Palena.	REVISIÓN: 2	AUTORES: ATACAMA <small>AMBIENTE</small>	

Lamina 18. Sitio propuesto para monitoreo permafrost: Chacabuco.



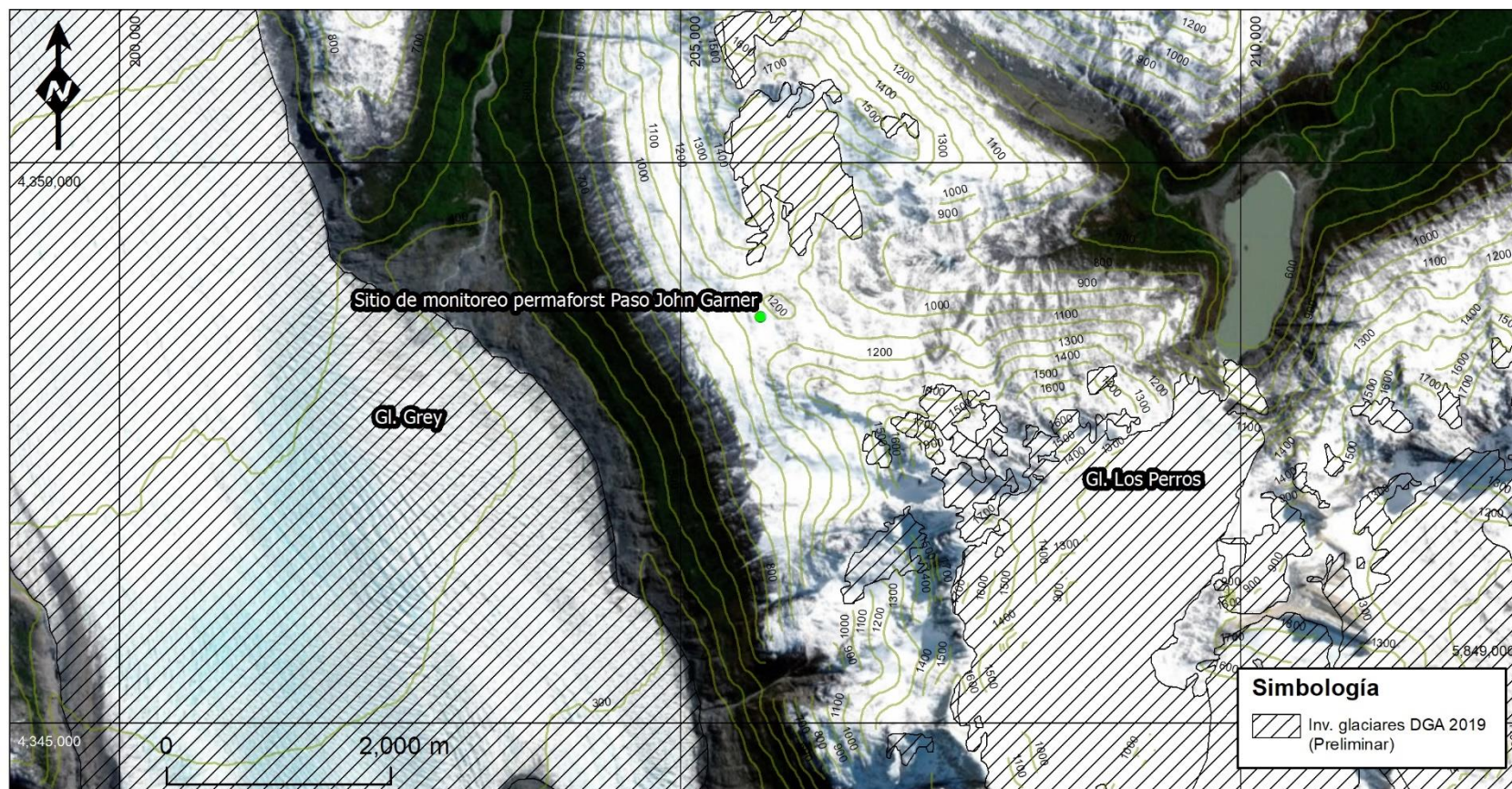
PROYECTO: Estado Actual de Los Suelos Congelados y Plan de Monitoreo Nacional de Permafrost	LAMINA N°: 18	ESCALA: 1:20,000	CLIENTE: MOP-DGA
	NOTAS: Proyección: 19 S, WGS84 Ortófoto: Google Maps Topografía: SRTM V02	FECHA: 2019-12-19	
TÍTULO: Sitio propuesto para monitoreo de permafrost: Río Baker, Vertiente Sur Lago Jose Miguel Carrera. Chacabuco	REVISIÓN: 2		AUTORES: 

Lamina 19. Sitio propuesto para monitoreo permafrost: Exploradores.



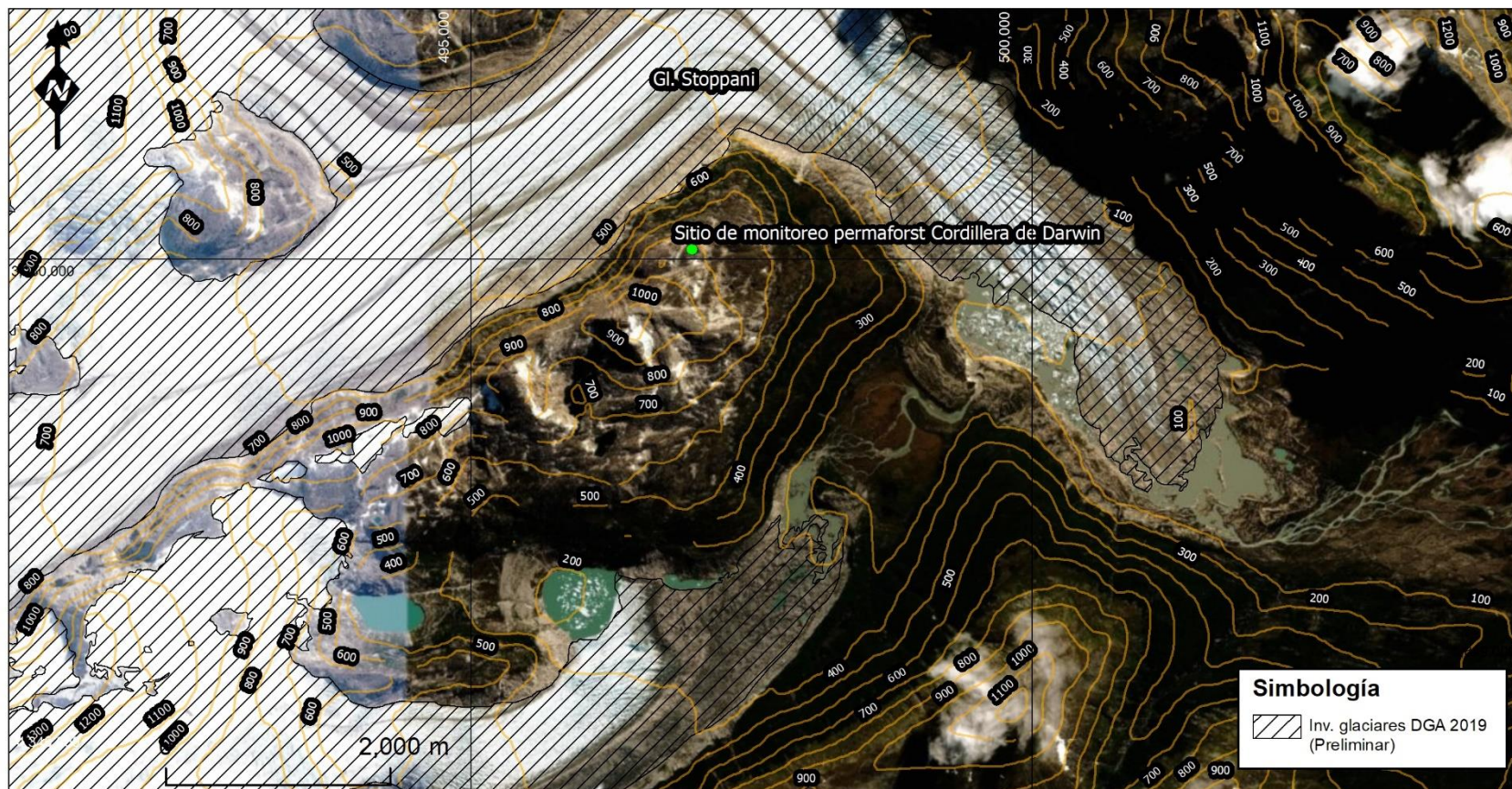
PROYECTO: Estado Actual de Los Suelos Congelados y Plan de Monitoreo Nacional de Permafrost	LAMINA N°: 19	ESCALA: 1:20,000	CLIENTE: MOP-DGA
	NOTAS: Proyección: 19 S, WGS84 Ortofoto: Google Maps Topografía: SRTM V02	FECHA: 2019-12-19	
TITULO: Sitio propuesto para monitoreo de permafrost: Costeras e Islas entre R Aysen y R Baker y Canal Gral. Martinez. Río Exploradores. Exploradores		REVISIÓN: 2	AUTORES:

Lamina 20. Sitio propuesto para monitoreo permafrost: John Garner.



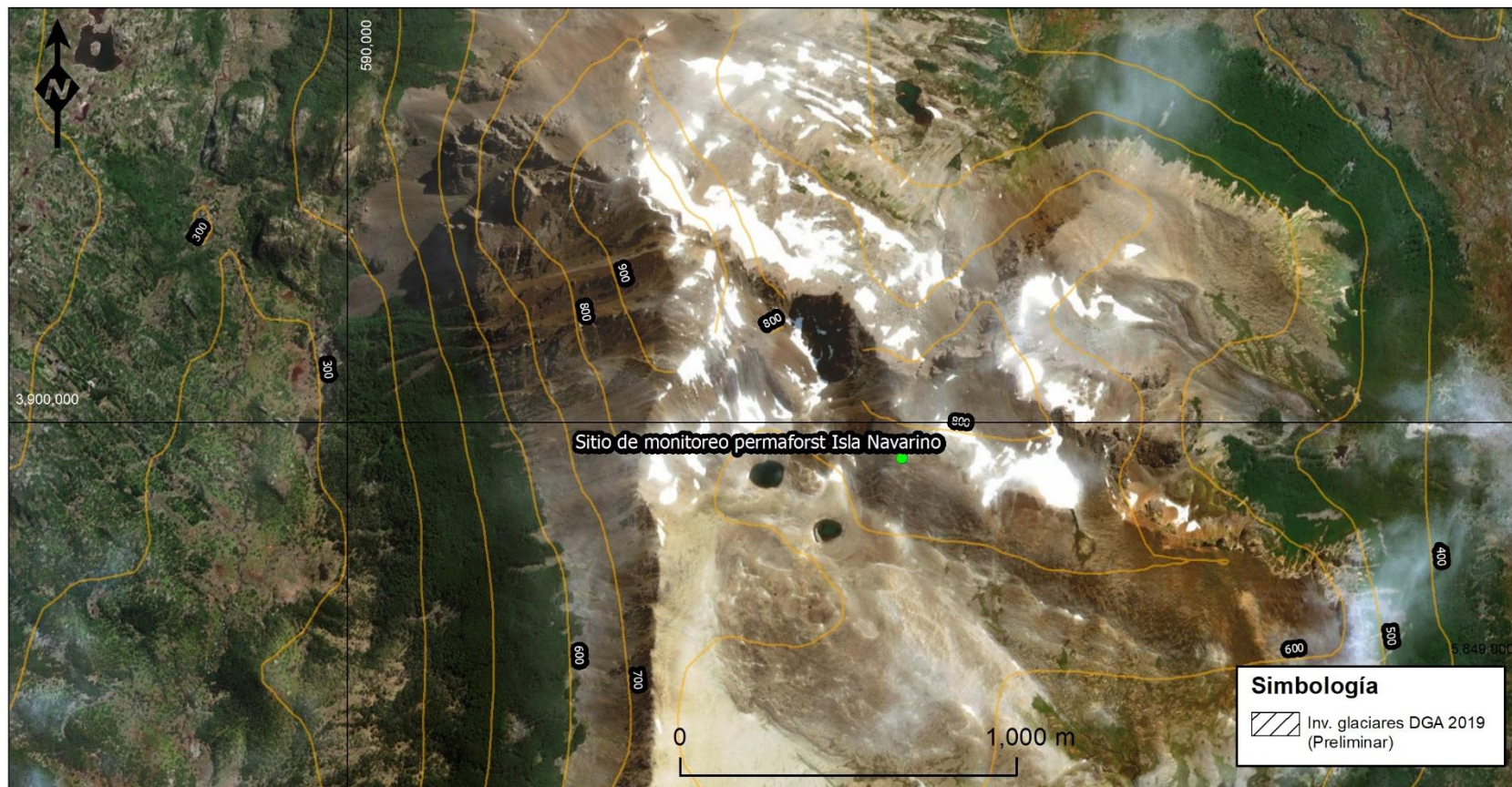
PROYECTO: Estado Actual de Los Suelos Congelados y Plan de Monitoreo Nacional de Permafrost	LAMINA N°: 20	ESCALA: 1:60,000	CLIENTE: MOP-DGA
	NOTAS: Proyección: 19 S, WGS84 Ortofoto: Google Maps Topografía: SRTM V02	FECHA: 2019-12-19	
TITULO: Sitio propuesto para monitoreo de permafrost: Costeras entre Seno Andrew y R. Holleberg e islas al oriente, subcuenca río Serrano. John Garner.		REVISIÓN: 2	


Lamina 21. Sitio propuesto para monitoreo permafrost: Cordillera de Darwin.



PROYECTO: Estado Actual de Los Suelos Congelados y Plan de Monitoreo Nacional de Permafrost	LAMINA N°: 21	ESCALA: 1:60,000	CLIENTE: MOP-DGA
	NOTAS: Proyección: 19 S, WGS84 Ortofoto: Google Maps Topografía: SRTM V02	FECHA: 2019-12-19	
TITULO: Sitio propuesto para monitoreo de permafrost. Tierra del Fuego, subcuencas costeras Canal Beagle (entre Seno Ventisquero y Frontera). Cordillera de Darwin.		REVISIÓN: 2	AUTORES: ATACAMA AMBIENTE

Lamina 22. Sitio propuesto para monitoreo permafrost: Isla Navarino.



PROYECTO: Estado Actual de Los Suelos Congelados y Plan de Monitoreo Nacional de Permafrost	LAMINA N°: 22	ESCALA: 1:20,000	CLIENTE: MOP-DGA
	NOTAS: Proyección: 19 S, WGS84 Ortófoto: Google Maps Topografía: SRTM V02	FECHA: 2019-12-19	
TÍTULO: Sitio propuesto para monitoreo de permafrost. Islas al sur del Canal Beagle y Territorio Antártico, Islas Navarino y Gable. Isla Navarino.	REVISIÓN: 2	AUTORES: 	

10. Anexos

10.1. Fichas técnicas de instrumentación

La información de estas fichas técnicas fue resumida y adaptada del proyecto PermaNET y complementada con la experiencia de los autores.¹

Parametro de Medición:	Temperaturas Subsuperficiales Mediante Cintas Termistoras
<p>Características Generales</p> <p>Permafrost es comúnmente definido como suelo y/o roca que permanece bajo 0° C por al menos dos años consecutivos. Generalmente para este propósito se ocupan cintas termistoras con sensores de temperatura distribuidos en profundidad cada 50 o 100 cm, o según la profundidad del pozo. Los datos derivados de los sensores de temperaturas distribuidos a lo largo del pozo, permiten determinar parámetros tales como: Profundidad de la capa activa, tope y base del permafrost, amplitud anual de cero grado y gradiente geotermal. Corresponde a uno de los métodos más objetivos para determinar permafrost localmente, sin embargo, está limitado por la disponibilidad de pozos de perforación y logística.</p>	
<p>Equipo e Instrumentación</p> <p>Se usan dataloggers con sensores de temperaturas conectados a los canales disponible en cada instrumento. Los sensores de temperatura pueden estar distribuidos en un solo cable o un cable por sensor amarrado a los otros cables con sensores. En general, se recomienda ocupar sensores de temperatura con precisión inferior a 0.1°C. El equipo tiene que tener capacidad de registrar temperatura por al menos dos años consecutivos y a intervalos cada 60 minutos. Entre las marcas más usada para este propósito se encuentra los datalogger Campbell Scientific, Hobonset, Geoprecision, Lakewood Systems y DIY sistemas construidos con CPU Arduino o Rasperry Pi. En la medida que sea posible se sugiere tomar lecturas de las temperaturas superficiales a 2 m desde el suelo. Del mismo modo, se recomienda complementar con mediciones de BTS y GST. Se recomienda el procesamiento de los datos a traves de script y paquetes estadísticos en el lenguaje computacional R.</p>	
<p>Ventajas</p> <ul style="list-style-type: none">- Permite obtener indicadores objetivos sobre la presencia de permafrost y evaluar su evolución en el tiempo.- Los datos pueden ser transmitidos en forma remota, disminuyendo los costos logísticos.- Complementa metodologías de BTS y GST- De haber canales disponibles en el datalogger. Se pueden complementar las mediciones de temperatura en profundidad con mediciones atmosféricas.	

¹ La información de este anexo fue resumida y adaptada de documentos de permaNET complementada con la experiencia de los autores. Para ver los documentos originales visitar el sitio <http://www.permanet-alpinespace.eu/products/monitoringnetwork/index.html>

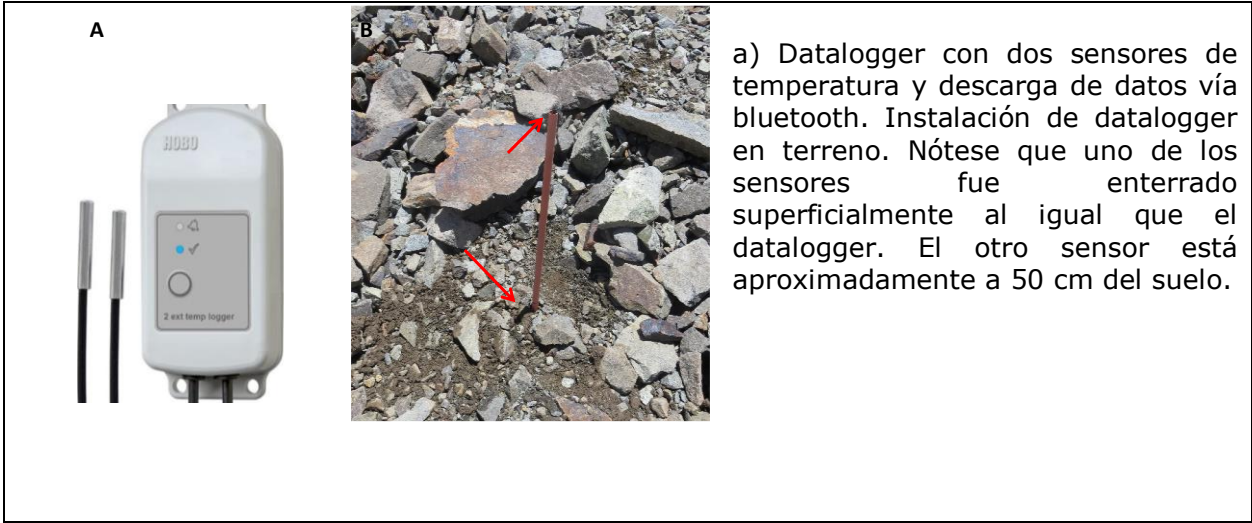
Dificultades


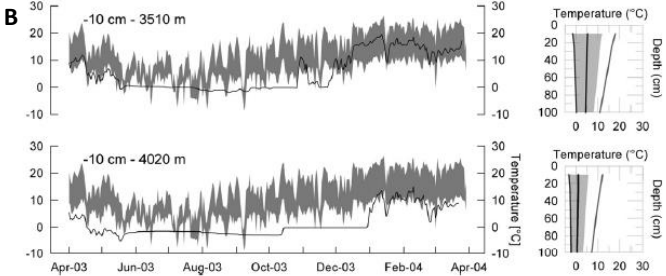
- Requiere de un pozo geológico, cuyos costos pueden ser alto debido a que los sitios potenciales de permafrost están en zonas remotas de la cordillera.
- Perdida de datos por eventos de fuerza mayor relacionados a descargas eléctricas y eventos meteorológicos.
- Los datos indican solo una condición térmica y no hídrica (i.e. contenido de hielo).


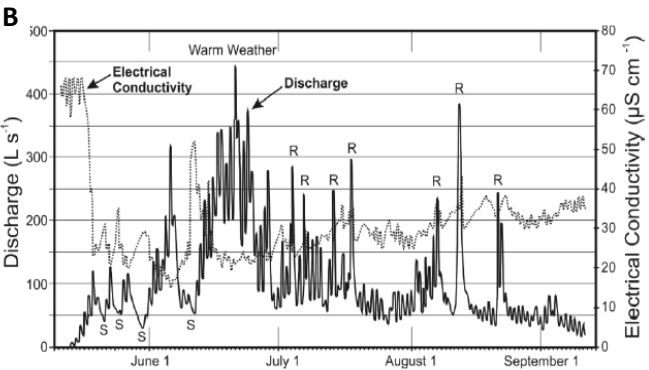



A) Cinta termistora de la marca Geo Precision.

Parámetro de Medición:	Temperatura en la capa inferior de la nieve (Bottom Temperature of Snow Cover, BTS)
<p>Características Generales</p> <p>El objetivo del método es medir la Temperatura de Equilibrio Invernal (o WEqT por sus siglas en inglés) en la interfaz nieve/suelo para inferir la presencia o ausencia de permafrost. En presencia de permafrost, el flujo de calor negativo del subsuelo congelado genera WEqt fuertemente negativos (típicamente < -2 °C) mientras que en zonas sin permafrost el WEqt tiene temperaturas cercanas a 0 °C o moderadamente negativas (Haeberli 1973). El WEqT es afectado por la evolución y espesor de la cobertura nival. Se estima que un espesor de nieve de 80 a 100 cm es suficiente para aislar el terreno de la temperatura atmosférica.</p>	
<p>Equipo e Instrumentación</p> <p>Suelen usarse dos dataloggers de temperatura instalados en conjunto por sitio; uno en la superficie del terreno y otro a 50 o 100 cm del suelo que de cuenta del espesor y temporalidad de la cobertura nival. Se pueden usar grillas o transectos para definir los sitios de instalación de los pares de sensores asegurando tener una buena representatividad espacial del área de estudio. Las mediciones puntuales luego son interpoladas para obtener mapas de distribución de temperatura.</p>	
<p>Ventajas</p> <p>Permite determinar los límites espaciales del permafrost especialmente en zonas de transición como los márgenes de glaciares rocosos y en laderas detríticas. El método además permite cartografiar la temperatura y su variación temporal si es complementado con métodos de interpolación.</p>	
<p>Dificultades</p> <p>El WEqT no se alcanza todos los años en cada sitio y es altamente dependiente de la cobertura nival. Si no existe una cobertura nival espesa en invierno, el WEqT puede tener valores muy negativos en áreas sin permafrost. El régimen térmico superficial es altamente variable espacial y temporalmente por lo que se necesita una amplia red de sensores para tener una buena representación espacial lo que encarece la investigación.</p>	



Parametro de Medición:	Temperatura superficial del terreno (Ground Surface Temperature, GST)
<p>Características Generales Es la temperatura medida en los centímetros superficiales del terreno y corresponde a la temperatura de la parte alta de la capa activa. No es una medición del permafrost en sentido estricto, pero permite comprender la evolución de la capa activa y del permafrost. La GST presenta variaciones espaciales y temporales asociadas a la cobertura nival, factores micro topográficos y balance radiativo. El análisis del régimen térmico provee información valiosa de episodios de enfriamiento/calentamiento del terreno y permite inferir comportamiento de la cobertura nival.</p>	
<p>Equipo e instrumentación Se usan dataloggers de temperatura enterrados en los primeros centímetros del terreno. Los dataloggers son cubiertos por material del mismo sitio y se debe evitar instalar en bloques rocosos por el efecto de ventilación que distorsiona la temperatura. Se pueden usar grillas o transectos para definir los sitios de instalación de los sensores asegurando tener una buena representatividad espacial del área de estudio. Las mediciones puntuales luego son interpoladas para obtener mapas de distribución de temperatura.</p>	
<p>Ventajas Permite obtener información valiosa del régimen térmico del terreno (Mean Annual Ground Surface Temperature), respecto a episodios de enfriamiento/calentamiento (Ground Freezing Index), de indicadores indirectos de la presencia de permafrost (Bottom Temperature of Snow Cover) e indicadores de la presencia de nieve o comienzo de la época de deshielo (Zero curtain).</p>	
<p>Dificultades En terrenos con grandes bloques de roca puede ser complejo encontrar parches de material fino en donde enterrar los dataloggers. El régimen térmico superficial es altamente variable espacial y temporalmente por lo que se necesita una amplia red de sensores para tener una buena representación espacial del terreno estudiado, lo que encarece la investigación.</p>	
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>A</p>  </div> <div style="width: 50%;"> <p>B</p>  </div> </div> <p>A) Datalogger de temperatura usado para medir temperatura superficial del terreno. B) Variación de la temperatura del aire y a 10 cm bajo el suelo en los Andes de Santiago. extraída de Bodin et al., (2010)</p>	

Parametro de Medición:	Temperatura y Química del Agua
<p>Características Generales</p> <p>La temperatura del agua provee información del régimen térmico del sustrato (rocoso o detrítico) y depende de factores topográficos, climáticos y de la presencia/ausencia de permafrost. El flujo térmico negativo proveniente del permafrost baja la temperatura del agua (típicamente $< 1^{\circ}\text{C}$) por lo que bajas temperaturas pueden ser indicadores de la presencia de permafrost. Así, afloramientos de agua con temperaturas $> 2^{\circ}\text{C}$ indican zonas con permafrost poco probable, aguas con temperaturas entre 1 y 2°C indican que es posible que exista permafrost (en un rango de incertidumbre) y temperaturas $< 1^{\circ}\text{C}$ indican la posible presencia de permafrost. Las características químicas del agua también pueden evidenciar la presencia/ausencia de permafrost. Thies et al., (2007) encontraron un enriquecimiento en la concentración de cationes solubles en lagos alimentados por glaciares rocosos en comparación con lagos sin glaciares rocosos en similares condiciones geológicas.</p>	
<p>Equipo e Instrumentación</p> <p>Para medir la temperatura y la química del agua se instalan dataloggers en afloramientos de agua en zonas con probable presencia de permafrost, por ejemplo, arroyos asociados a glaciares rocosos. Registros de al menos un año hidrológico son recomendables, aunque también se han realizado estudios considerando sólo mediciones continuas en verano. Se usan comúnmente dataloggers de temperatura y de conductividad eléctrica (datos continuos) y esas mediciones son complementadas con análisis químicos puntuales vía espectrometría de absorción.</p>	
<p>Ventajas</p> <p>Monitorear la temperatura y la química del agua no sólo permite inferir la presencia de permafrost, los datos también pueden ser utilizados en estudios de calidad de agua.</p>	
<p>Dificultades</p> <p>La temperatura y la química del agua son condicionadas por factores locales, tanto meteorológicos (temperatura y precipitación) como geológicos dificultando la interpretación de la influencia del permafrost.</p>	
	
<p>A) Instrumentación en terreno para medir temperatura y nivel del agua (sensor protegido por tubo). B) Nivel de agua y conductividad en arroyo proveniente de glaciar rocoso. <i>R</i> indica precipitación. Fuentes: PermaNET (2011) y Krainer et al., (2007).</p>	

Parametro de Medición:	Temperatura Superficial de Laderas Rocosas Empinadas
<p>Características Generales</p> <p>Corresponde al monitoreo de la temperatura superficial o sub-superficial (10 cm) de laderas rocosas como proxy para identificar la presencia/ausencia de permafrost. El Mean Annual Ground Surface Temperature (MAGST) puede ser razonablemente utilizado para detectar permafrost debido a la ausencia de nieve o detritos en laderas fuertemente empinadas. Los siguientes rangos de MAGST son comúnmente utilizados como rangos de certidumbre de la ocurrencia de permafrost. Aunque estos valores deben ser calibrados a las condiciones locales de cada región.</p> <p>-2 °C < MAGST < 0°C: Muy probable MAGST < -2 °C: Probable 0 °C < MAGST < 2°C: Poco probable MAGST >2 °C: Muy poco probable</p>	
<p>Equipo e Instrumentación</p> <p>Se utilizan dataloggers de temperatura que son insertados en grietas en la roca o en perforaciones artificiales. Existen dataloggers cuyos datos deben ser descargados directamente del sensor con las dificultades logísticas que ello implica, mientras que otros permiten descargar datos a distancia (bluetooth u otros medios) a varias decenas de metros de distancia. También existen dataloggers que transmiten los datos en tiempo real a través de sistemas de comunicación GPRS.</p>	
<p>Ventajas</p> <p>Conocer las condiciones térmicas de laderas rocosas puede servir no sólo para identificar la presencia/ausencia de permafrost, sino también para cuantificar los ciclos de hielo/deshielo y con ello las tasas de erosión por crioclastia.</p>	
<p>Dificultades</p> <p>Instalar y mantener instrumentos en laderas rocosas empinadas es logísticamente complejo y riesgoso. Por ello redes de monitoreo de este tipo son escasas y pueden sufrir interrupciones por avalanchas o caída de roca que dañan los instrumentos o interrumpen rutas de acceso.</p>	
	<p>A) Instalación de sensores de temperatura en pared rocosa empinada en Los Alpes para estudios de permafrost. Nótese la complejidad de instalar y descargar datos en sitios remotos. Fuente: PermaNET(2011)</p>

Parámetro de Medición:	Velocidad de Reptación del Permafrost
<p>Características generales</p> <p>Glaciares rocosos y otras formas de permafrost de montaña pueden presentar desplazamiento por reptación. El desplazamiento de permafrost está condicionado por la pendiente, composición interna (i.e proporción de hielo, agua y detritos), temperatura y espesor de las formas. Por ello medir las tasas de desplazamiento del terreno puede ser un método útil para indicar presencia/ausencia de permafrost y su estado actual (e.g. agradación o degradación de permafrost rico en hielo)</p>	
<p>Equipo e Instrumentación</p> <p>Existen múltiples instrumentos y métodos utilizados para medir la velocidad de reptación del permafrost. Actualmente los más utilizados corresponden a levantamientos topográficos con GPS diferencial (DGPS) marcando puntos en terreno (e.g. pintando rocas o perforándolas para instalar pines metálicos) que son medidos estacional o anualmente (generalmente cada verano). Además, son comunes la fotogrametría terrestre y aérea usando vehículos no tripulados. Con fotogrametría se pueden para obtener tasas de desplazamiento con mayor cobertura espacial.</p>	
<p>Ventajas</p> <p>Se pueden obtener tasas de desplazamiento tridimensional de permafrost de manera puntual (usando DGPS) o distribuido espacialmente (fotogrametría terrestre o aérea). Las tasas de desplazamiento permiten conocer la respuesta de glaciares rocosos o permafrost en laderas a cambios en condiciones ambientales. Las tasas de desplazamiento también pueden ser indicativas de la presencia o ausencia de permafrost rico en hielo y su agradación o degradación.</p>	
<p>Dificultades</p> <p>Rocas marcadas como referencia para medir tasas de desplazamiento pueden volcarse o cubrirse de detritos impidiendo su medición en campañas de levantamiento topográfico consecutivas. Vuelos con dron pueden impedirse por malas condiciones meteorológicas (viento y/o nieve). Además, son demandantes en cuanto al post proceso de datos.</p>	
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div data-bbox="321 1310 613 1692" style="text-align: center;"> </div> <div data-bbox="662 1310 1247 1692" style="text-align: center;"> </div> </div> <p>A) Desplazamiento (vertical) de glaciar rocoso medido con DGPS. B) Marca en roca utilizada para medir desplazamiento de glaciar rocoso con DGPS y para ser tomada como referencia en vuelo fotogramétrico con dron. En: Bodin & Trombotto (2015).</p>	

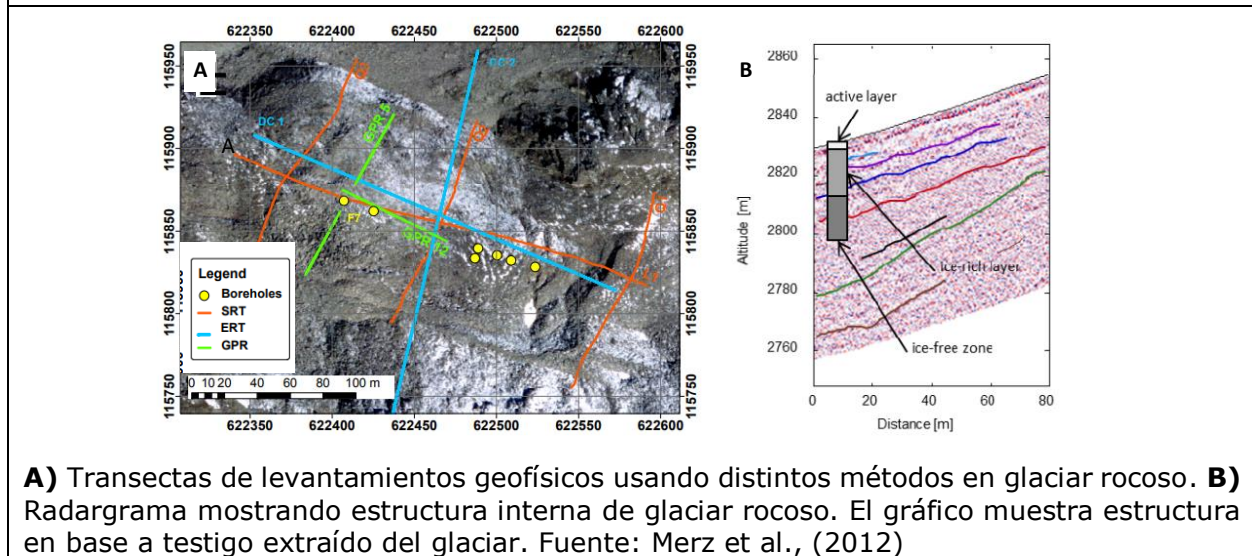
Parametro de Medición:	Radar de Penetración Terrestre y Otros Métodos Geofísicos
-------------------------------	--

Características generales
 El radar de penetración terrestre (GPR por sus siglas en inglés) permite inferir el espesor y la estructura interna de cuerpos detríticos como glaciares rocosos y puede ser utilizado para estimar el contenido de agua, hielo y detrito en estas formas. El método se basa en la emisión de cortos pulsos electromagnéticos al terreno y la medición e interpretación de la energía reflejada en función del tiempo, amplitud y fase. Con frecuencias de 15MHz se ha logrado penetrar hasta 70 m de profundidad en glaciares rocosos.

Equipo e Instrumentación
 Se recomienda la medición en primavera o invierno cuando existe una capa de nieve significativa sobre glaciares rocosos ya que las condiciones frías disminuyen la atenuación de la señal provocada por la capa activa. Además, la nieve facilita el transporte del equipo al disminuir el atrapamiento de las antenas entre rocas. Suelen realizarse mediciones a lo largo de transectas paralelas y transectas perpendiculares al flujo de los glaciares intentando abarcar distintos pisos altitudinales.

Ventajas
 Permite conocer la estructura interna de glaciares rocosos y otras manifestaciones del permafrost de manera no destructiva otorgando información valiosa, por ejemplo, el contenido de hielo y espesor de glaciares rocosos.

Dificultades
 Los radargramas están sujetos a la interpretación del operador por lo que la estructura interna inferida por distintos expertos puede variar. En general, es recomendable realizar en conjunto levantamientos con distintas técnicas geofísicas (e.g. resistividad eléctrica y sísmica) para disminuir la incertidumbre en las mediciones. No obstante, es óptimo complementar las técnicas geofísicas con la extracción y análisis de testigos que son raramente obtenidos. Todas las técnicas utilizadas son onerosas.





info@atacamamb.com

www.atacamamb.com

JEFE DE PROYECTO:

Msc. Guillermo Azócar Sandoval

Email: gazocar@atacamamb.com

ASESORES CIENTÍFICOS:

Dr. Pablo Iribarren Anacona

Email: pablo.pablo.iribarren@uach.cl

Dr. Alexander Brenning

Email: alexander.brenning@uni-jena.de

Dr. Kenji Yoshikawa

Email: kyoshikawa@alaska.edu