



← Panorámica glaciar Bello, Región Metropolitana

NAC-I-048-2014

Título de Proyecto	NUNATAK-CHILE Primer Laboratorio Natural sobre Contaminación Glaciar y Cambio Climático: Levantamiento de la Línea Base
Año de Adjudicación	2014
Duración	20 meses
Área Prioritaria	Cambio Climático
Área Secundaria	Química Ambiental
Monto Total del Proyecto	\$ 32.114.200
Monto Financiado por FPA	\$ 20.000.000
Director	Prof. Dr. Francisco Cereceda-Balic
Institución Beneficiaria	Universidad Técnica Federico Santa María
Instituciones y Empresas Asociadas	Ejército de Chile Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile Escuela Nacional de Montaña CRESCO Energías Renovables

ISBN: 978-956-368-197-0

Autores: Francisco Cereceda Balic, Víctor Vidal, Mario Funes y Ximena Fadic

Fotografías: Francisco Cereceda Balic y Víctor Vidal.

www.nunatak.usm.cl

Diseño y diagramación: valentina gonzález

Impreso en Valparaíso, Diciembre 2016

Esta es una publicación financiada por el Fondo de Protección Ambiental del Ministerio del Medio Ambiente, NUNATAK-CHILE, 2016

NUNATAK-CHILE

NUNATAK-CHILE: LABORATORIO NATURAL SOBRE CONTAMINACIÓN GLACIAR

*Primer Laboratorio Natural sobre
Contaminación Glaciar y Cambio Climático:
Levantamiento de la Línea Base*



Índice

Prólogo.....	7	Proyecto.....	27
Introducción.....	10	Hipótesis científica.....	28
¿Qué son los glaciares?	10	Objetivo general	28
¿Cuál es su importancia?	10	Objetivos específicos.....	28
Ubicación de los glaciares	11	Actividades	30
¿Dónde se encuentran los glaciares en Chile?	11	Actividades realizadas.....	31
¿Cuál es la importancia de los glaciares en el equilibrio radiativo de la tierra?	12	Etapa 1.	31
Aerosoles atmosféricos, material particulado y Black Carbon.....	15	Etapa 2.	32
¿Qué son los aerosoles atmosféricos?	15	Logística	32
¿Cuáles son las fuentes los aerosoles atmosféricos?	15	Sistemas de energía	33
¿Qué es el material particulado?	16	Equipamiento de monitoreo	34
¿Cuál es la composición química del material particulado?	16	Toma de muestras de nieve	35
¿Qué es el Black Carbon (BC) o carbono negro.....	17	Etapa 3.	36
¿Cómo y por qué el BC afecta el clima.....	17	Diseño del laboratorio refugio NUNATAK	36
¿Cuáles son las fuentes de BC y BrC?	18	Infraestructura de monitoreo	38
¿Cómo afectan el BC y el BrC a la criósfera?	18	Justificación del lugar seleccionado	38
Aerosoles atmosféricos, material particulado y black carbon	19	Resultados	43
Transporte de aerosoles desde las ciudades a sitios de alta montaña	23	Meteorología	44
¿Cómo afectan los aerosoles atmosféricos a los glaciares?	23	Material particulado atmosférico	47
¿Qué es la deposición atmosférica?	23	Black carbon	48
¿Qué es un laboratorio natural?	23	Albedo	50
Transporte de aerosoles y contaminación de la criósfera de la Cordillera de Los Andes	24	Análisis de iones mayoritarios	52
		Determinación de iones en nieve superficial	53
		Determinación de elementos traza en nieve superficial	55
		Difusión.....	59
		Reseña	66
		Agradecimientos.....	71
		Referencias monografía	73



Prólogo

El cambio climático es uno de los problemas ambientales más relevantes del siglo 21 y es actualmente materia de innumerables estudios y discusiones. Muchos de estos estudios indican que la influencia humana ha provocado que los cambios en el clima excedan los umbrales conocidos en la variabilidad natural.

La contaminación ambiental, especialmente gases y partículas, contribuyen y agudizan los efectos del cambio climático. En especial las partículas pueden ser transportadas desde una ciudad como Santiago, hasta los glaciares de la Cordillera de Los Andes y depositarse sobre la nieve y el hielo. Estas partículas, de contenido fundamentalmente carbonáceo, absorben radiación solar y se calientan, aumentando la velocidad de derretimiento de la nieve, acelerando la pérdida de masa del glaciar, modificando el albedo e impactando finalmente sobre el fenómeno del cambio climático global. Este problema es relevante en nuestro país, dado que Chile cuenta con una de las mayores superficies de glaciares a nivel mundial, con más de 3.000 glaciares en su territorio y una superficie total estimada en 25.500 Km², que representan el 90% de la superficie de glaciares de Sudamérica.

El proyecto NUNATAK-CHILE Primer Laboratorio Natural sobre Contaminación Glaciar y Cambio Climático: Levantamiento de la Línea Base, ejecutado por el Centro de Tecnologías Ambientales (CETAM) de la Universidad Técnica Federico Santa María, buscó determinar la huella dactilar química de los contaminantes y su influencia sobre el aumento de la velocidad de derretimiento de los glaciares. La investigación realizada incluyó monitoreo de nieve y aerosoles recolectados en glaciares de la Cordillera de Los Andes, específicamente de la zona central de Chile. De esta forma se intentó establecer la relación entre la contaminación producida por el hombre y sus efectos sobre los glaciares.

Otro de los objetivos del proyecto fue la creación del primer refugio científico de investigación ambiental de montaña, el cual fue bautizado como NUNATAK. Este término, originario de la lengua Inuit, significa cuerpo montañoso que se encuentra rodeado por un campo de hielo, es generalmente utilizado como punto de referencia o refugio por montañistas. Con esta premisa, el CETAM se planteó como objetivo diseñar e implementar el primer refugio científico chileno, apropiado para realizar monitoreo geológico, glaciológico, físico, biológico y químico de los glaciares y sus entornos de montaña. Esta instalación científica permite recibir científicos de Chile y del mundo interesados en realizar investigaciones en este importante tema.



Las Naciones Unidas en el documento "The Future We Want", del 10 de enero del 2012, de su "Declaración sobre el Medio Ambiente y Desarrollo" de la AGENDA 21, define y reconoce a las montañas como:

Mountains

We recognize that mountains are highly vulnerable to global changes such as climate change, and are often home to communities including of indigenous peoples, who have developed sustainable uses of their resources yet are often marginalized, sometimes with high poverty rates, exposure to natural risks and food insecurity. We recognize the benefits derived from mountains and their associated ecosystems. We also recognize the need to explore global, regional, national, and local mechanisms to compensate and reward mountain communities for the services they provide through ecosystem protection.

De la misma forma, en el Acuerdo de París del 2015, la Asamblea de las Naciones Unidas en su resolución A/RES/70/1, denominada "Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development", señala:

"Recognizing that climate change represents an urgent and potentially irreversible threat to human societies and the planet and thus requires the widest possible cooperation by all countries, and their participation in an effective and appropriate international response, with a view to accelerating the reduction of global greenhouse gas emissions"

Introducción

(Marco Teórico)



¿QUÉ SON LOS GLACIARES?

Los glaciares son grandes masas de hielo que se forman paulatinamente por la acumulación, compactación y recrystalización de la nieve caída en los lugares más fríos de la superficie terrestre.

¿CUÁL ES SU IMPORTANCIA?

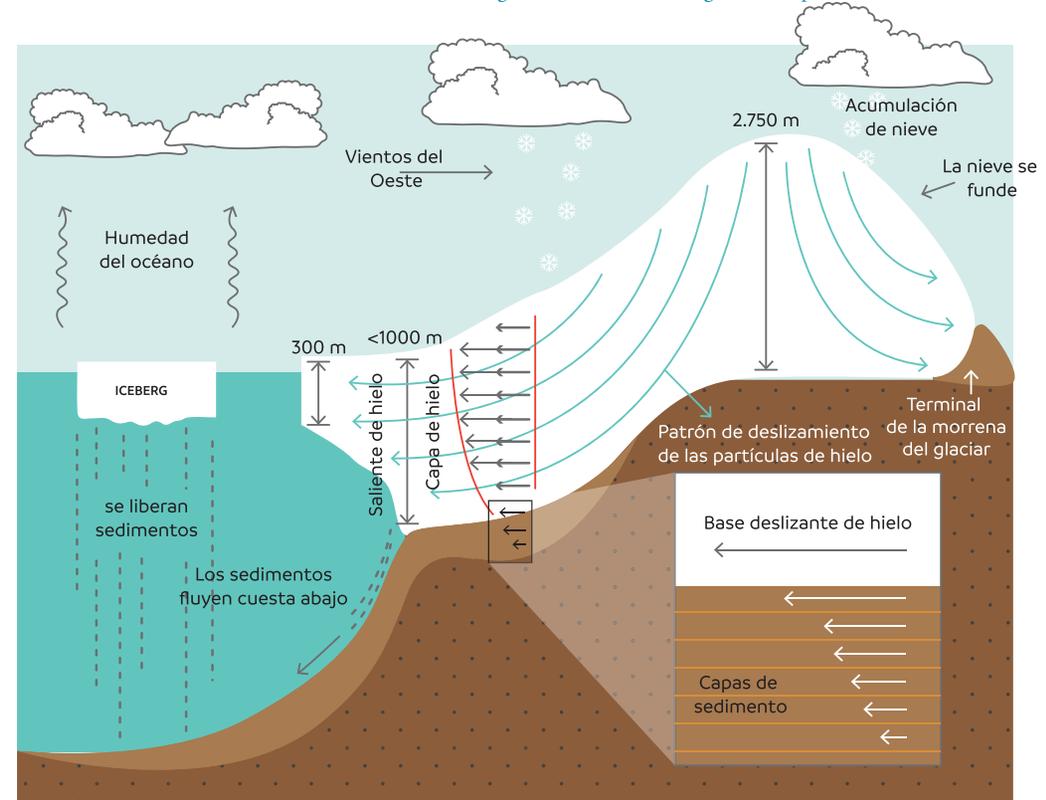
Los glaciares representan el 75% del reservorio de agua dulce del planeta y junto con las grandes masas de hielo de los polos son parte importante de la criósfera (agua en estado sólido).

En Chile el 70% de la población obtiene de los glaciares el agua que consume. Así mismo son importantísimos para el mantenimiento del clima global debido a que los glaciares reflejan entre el 45% y 85% de la luz del Sol que llega desde el espacio, enfriando de esta forma el planeta. Este porcentaje varía según lo fresco de la nieve; mientras más fresca sea la nieve, más reflejará. Esto permite que nuestro planeta tenga las temperaturas que tiene actualmente y cualquier cambio en este equilibrio hará de nuestro planeta un lugar más frío o más cálido.

Figura 01: Descripción de las características de un cuerpo glaciar



Instalación de estación de monitoreo en el glaciar Olivares Alfa, Región Metropolitana



Fuente: adaptado de © Stephen Marshak (Essentials of Geology)

Tabla 1: Inventario de Glaciares en Chile ⁽³⁾

Región Administrativa	Cuenca hidrográfica	N° de Glaciares	Área en Km ²
Arica y Parinacota y Tarapacá	*	14	29,70
Antofagasta	*	14	12,13
Atacama	*	49	66,83
Coquimbo	*	11	7,02
Valparaíso	Aconcagua	265	151,25
Metropolitana	Maipo	647	421,9
Del Libertador General Bernardo	Cachapoal	146	222,42
O'Higgins	Tinguiririca	261	106,46
Del Maule	Mataquito	81	81,91
	Maule	98	35,32
Biobío y Araucanía	Bio-Bio	29	52,37
Araucanía	Imperial	13	18,72
Araucanía y Los Ríos-X	Toltén	14	68,48
	Valdivia	6	42,33
Los Ríos	Bueno	11	19,35
	Petrohue	12	60,57
Los Lagos	Maullín	1	2,84
	Chamiza	1	1,05
Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo	Campo de Hielo Norte	28	4.200
Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo y de Magallanes y de la Antártica Chilena.	Campo de Hielo Sur	48	11.260**
Inventariados	Total	1.751	16.861
No Inventariados	Área Estimada (Km ²)		5.205
	Total (Km ²)		22.066

UBICACIÓN DE LOS GLACIARES

Los glaciares se encuentran en zonas cercanas a los polos y en la parte alta de las montañas, como por ejemplo en Groenlandia y la Antártica, o en la Cordillera de Los Himalayas, Los Alpes o Los Andes.



¿DÓNDE SE ENCUENTRAN LOS GLACIARES EN CHILE?

Los glaciares en Chile están estrechamente relacionados a la latitud y altitud del territorio. En el extremo norte se ubican por sobre los 6.000 metros de altitud, en los conos de las montañas; mientras que en la zona austral o Patagonia y Antártica es posible encontrar grandes masas (de hielo) a nivel mar. Los Andes Sudamericanos presentan aproximadamente 25.500 Km² de superficie glaciar⁽¹⁾ de los cuales Chile, presenta alrededor de 22.000 Km²⁽²⁾, con cerca de un 90% de la superficie de los glaciares de Sudamérica. Por otro lado, nuestro país posee una diversidad ambiental que refleja distintos tipos de glaciares, que pueden ser denominados descubiertos (hielo limpio), con cubierta de rocas (detritos) y rocosos los que corresponden a una mezcla de hielo y detritos⁽²⁾.

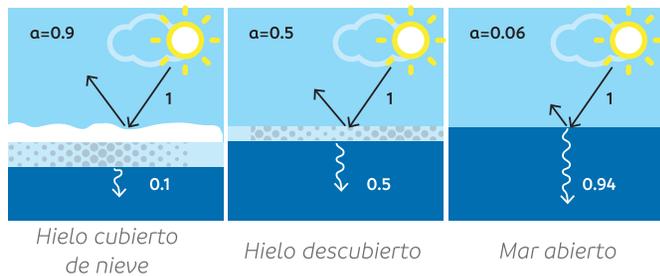
*Se trata de un inventario preliminar, donde los glaciares no están asociados a cuencas hidrográficas.

**Aproximadamente entre un 8 y un 19% de esta superficie se ubica en Argentina, de acuerdo al nuevo acuerdo fronterizo de 1998.



¿CUÁL ES LA IMPORTANCIA DE LOS GLACIARES EN EL EQUILIBRIO RADIATIVO DE LA TIERRA?

Los glaciares son fundamentales para el mantenimiento del clima global debido a que reflejan entre el 45% y 85% de la luz del Sol que llega del espacio, enfriando el planeta. Esta reflexión de las diferentes superficies del planeta se denomina albedo y en la cirósfera su porcentaje varía según lo fresco de la nieve, mientras más fresca sea la nieve; más reflejará



Fuente: adaptado de © The National Snow and Ice Data Center (NSIDC), USA, 2008.

Superficies	Rangos de Albedo
Nieve fresca	0,80 a 0,90
Nieve vieja derretida	0,40 a 0,80
Arena del desierto	0,40
Praderas o pastizales	0,25
Árboles de hoja caduca	0,15 a 0,18
Coníferas	0,08 a 0,15
Tundra	0,20
Océanos	0,07 a 0,10



Arriba: Instalación de carpas en campamento campaña de monitoreo glaciar Olivares Alfa.

Abajo: Caminando sobre el glaciar Grey, Parque Nacional Torres del Paine, Región de Magallanes

Figura 02: Valores de albedo medidos en diferentes superficies

La presencia de glaciares en Chile es un fenómeno asociado a las montañas, tanto por ofrecer un espacio para su contención como por la influencia sobre la temperatura y precipitación nival. En el norte de Chile hay pocos glaciares y con dimensiones pequeñas (c.a. 90 glaciares que en total cubren 116 Km²), debido a las escasas precipitaciones que, a pesar de las bajas temperaturas en las grandes alturas de la cordillera nortina, no logran acumular grandes cantidades de nieve. En las regiones de Valparaíso, O'Higgins y Metropolitana, el número y superficie de glaciares se incrementan significativamente debido a un aumento en las precipitaciones y alturas de la Cordillera de los Andes, que supera los 6.000 msnm en varias ocasiones (e.g. Volcán Tupungato, 6.550 msnm). En esta zona se han inventariado sobre 1.320 glaciares que suman en total más de 900 Km². Más al sur, entre la Región del Maule y la Región de Los Lagos, se produce una disminución tanto en el número como en la superficie glaciaria contabilizando cerca de 300 glaciares, alrededor de 400 Km² de hielo, debido principalmente a la disminución en la altura de las cumbres andinas, que en promedio es apenas superior a los 2.000 msnm⁽³⁾. En la zona Austral, el aumento en la cantidad y superficie total de los glaciares aumenta en forma considerable, alcanzando alrededor de 20.000 Km², convirtiendo a esta zona en la de más glaciares del hemisferio sur fuera de la Antártica. La mayor proporción de esta superficie se encuentra distribuida en los Campos de Hielo Norte y Sur, y la Cordillera Darwin. En esta zona la gran cantidad de hielo acumulado se debe a la alta pluviometría, causada por el paso frecuente de sistemas frontales y la lluvia orográfica causada por los cordones montañosos al interior de los campos de hielos que poseen cumbres superiores a 2.500 ó 3.000 msnm, alcanzando su punto más alto en el Monte San Valentín,

con 4.058 msnm. Cabe destacar que el Campo de Hielo Sur es la segunda masa de hielo continua y extrapolar más extensa del mundo.

Excepto la zona central, el resto del país posee inventarios detallados de glaciares descubiertos, pero no de glaciares de roca o glaciares recubiertos con detritos (glaciares rocosos), que sólo fueron incluidos en la cuenca del Maipo por Marangunic (1979)⁽⁴⁾. El resto de las cuencas de Chile central tienen importantes porcentajes de glaciares rocosos, generados por derrumbes laterales, incorporación de material morrénico y regeneración de lenguas terminales^(5, 6).

Los glaciares en Chile, a pesar de ser considerados estratégicos para la economía a mediano plazo, se encuentran entre los recursos naturales menos estudiados⁽⁷⁾. Hasta la fecha, las principales investigaciones glaciológicas se han desarrollado en la Patagonia, zona geográfica donde se localizan las masas de hielo más grandes del hemisferio sur^(8,9). En el centro de Chile, donde se localizan las principales actividades económicas y de población, la cobertura nevada y de glaciares, a pesar de ser más pequeños que en la Patagonia, tienen un papel clave en los recursos hídricos, especialmente durante la estación seca. Se estima que el aumento de las temperaturas y la disminución de las precipitaciones en el centro y sur de Chile jugarán un papel importante en la reducción de la cobertura estacional nivosa^(10, 11) y en la disminución de los glaciares chilenos^(12, 13, 14).

El balance de masas de un glaciar representa un vínculo crítico entre la atmósfera y la hidrología de los glaciares⁽¹⁵⁾. Este balance se define como “la suma algebraica de acumulación y ablación o pérdida de masa al final del período de un año”, o el cambio neto de masa (volumen equivalente de agua) entre dos períodos sucesivos^(16, 17). La

acumulación y la ablación de nieve en un glaciar están relacionadas con el movimiento que presentan los glaciares, que finalmente se traducen en su avance y/o retroceso. La ablación en un glaciar se refiere al proceso de remoción de nieve y hielo de éste, se produce principalmente debido a la fusión seguida de escorrentía, pero también puede verse afectada por la acción del viento, el quiebre del hielo, evaporación y sublimación⁽¹⁸⁾. Así mismo, cabe mencionar, que el proceso de fusión de los glaciares está determinado por el balance energético entre la interfaz superficie-atmósfera^(19,20) y que parte importante de la energía que recibe un glaciar proveniente del sol, puede reflejarse al espacio dependiendo del albedo de la superficie, el cual puede oscilar entre 0,8 en nieve fresca y 0,3 en nieve con impurezas⁽²¹⁾. El albedo está definido como el cociente entre la radiación solar incidente desde la atmósfera sobre la radiación solar reflejada por la superficie. (Ecuación 1)

$$\text{Albedo} = \frac{E(\text{inc})}{E(\text{ref})}$$

Donde

E(inc): Radiación solar incidente (W/m²)

E(ref): Radiación sola reflejada (W/m²)

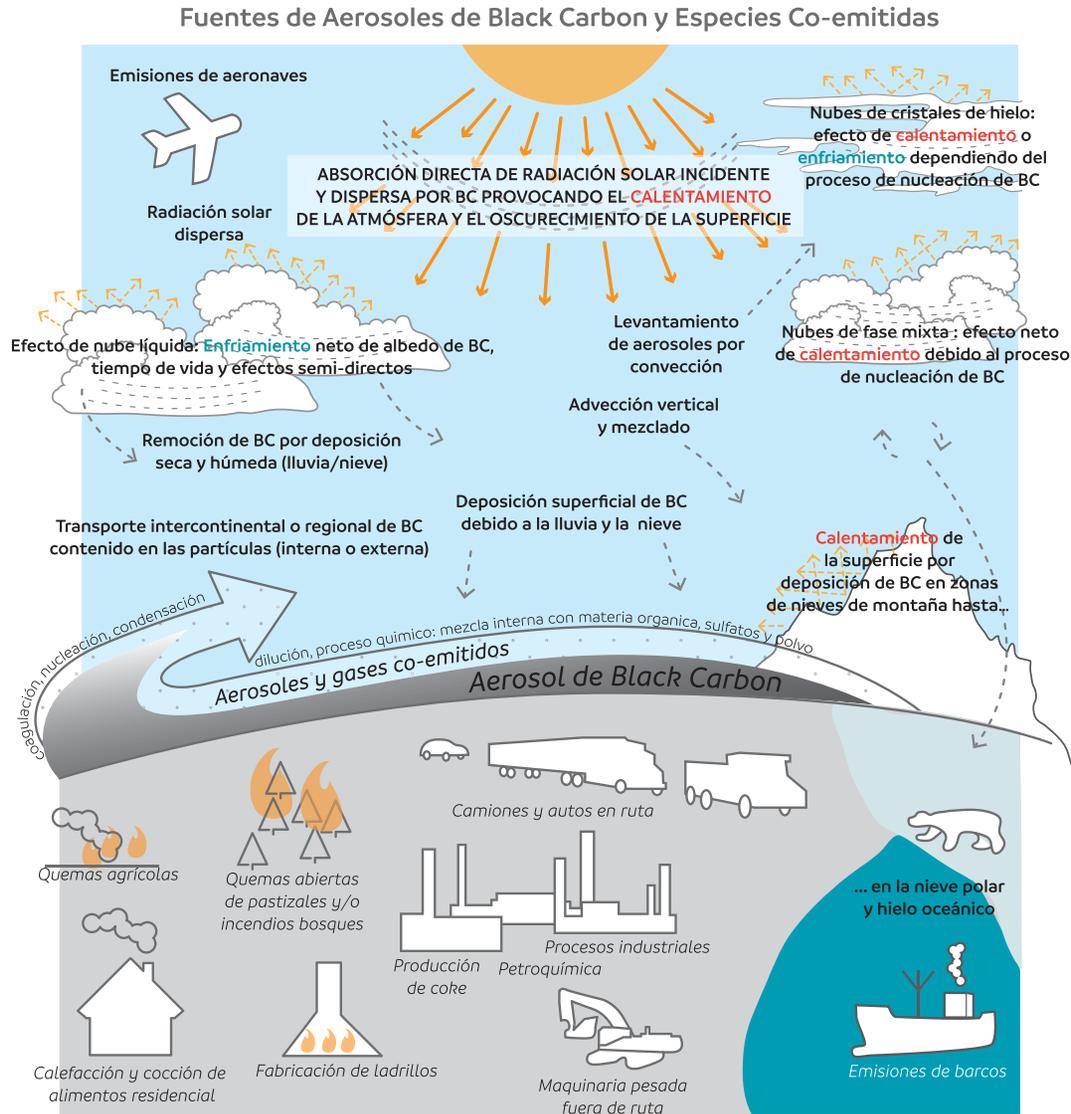
Dados los antecedentes expuestos, se puede inferir que el delicado balance de masa natural de un glaciar puede verse afectado si se incrementa el proceso de ablación, lo cual es posible mediante la deposición de contaminantes antropogénicos capaces de absorber radiación solar, implicando un aumento de temperatura de la superficie glaciar acelerando así su ablación y por ende la pérdida de masa del glaciar, lo que tiene implicancias severas sobre el balance radiativo de la tierra por la disminución de superficies reflectantes.

La mayoría de las observaciones del albedo de nieve son inferiores a las calculadas para la nieve pura, excepto en las masas de nieve muy remotas, como es caso de la Antártica y el interior de Groenlandia, situación que puede explicarse asumiendo la presencia de contaminantes en la nieve como el Black Carbon (BC)⁽²²⁾. Las impurezas que tienen más probabilidades de tener efectos generalizados sobre el albedo de la nieve son, el BC, los aerosoles crustales y las cenizas provenientes de las erupciones volcánicas.



Depósito de partículas en forma circular como manchas sobre el glaciar Olivares Alfa

Aerosoles Atmosféricos, Material Particulado y Black Carbon



Fuente: adaptado de ©American Geophysical Union 2013. Credit D. W. Fahey

¿QUÉ SON LOS AEROSOL ATMOSFÉRICOS?

El término aerosol se aplica a la mezcla heterogénea de partículas sólidas o líquidas de distinta naturaleza química suspendidas en un medio gaseoso. El tamaño de las partículas que lo componen puede ser desde 0,001 µm a más de 100 µm.

¿CUÁLES SON LAS FUENTES LOS AEROSOL ATMOSFÉRICOS?

La generación los aerosoles atmosféricos puede ser de origen natural o debido a la actividad humana. Algunas partículas se dan de manera natural, ejemplo de ellos son: los restos de plantas e insectos, el polen, las cenizas volcánicas, las tormentas de polvo, los incendios forestales y de pastizales, y los aerosoles marinos. Las actividades humanas, como la quema de combustibles y la alteración de la superficie terrestre también generan aerosoles, denominados antropogénicos. Algunas de estas partículas son emitidas directamente a la atmósfera (emisiones primarias) y otras son emitidas como gases que al reaccionar entre ellos o con la luz solar forman compuestos químicos tóxicos y/o partículas en la atmósfera (emisiones secundarias).

Figura 03: Fuentes de aerosoles de black carbon y especies co-emitidas.

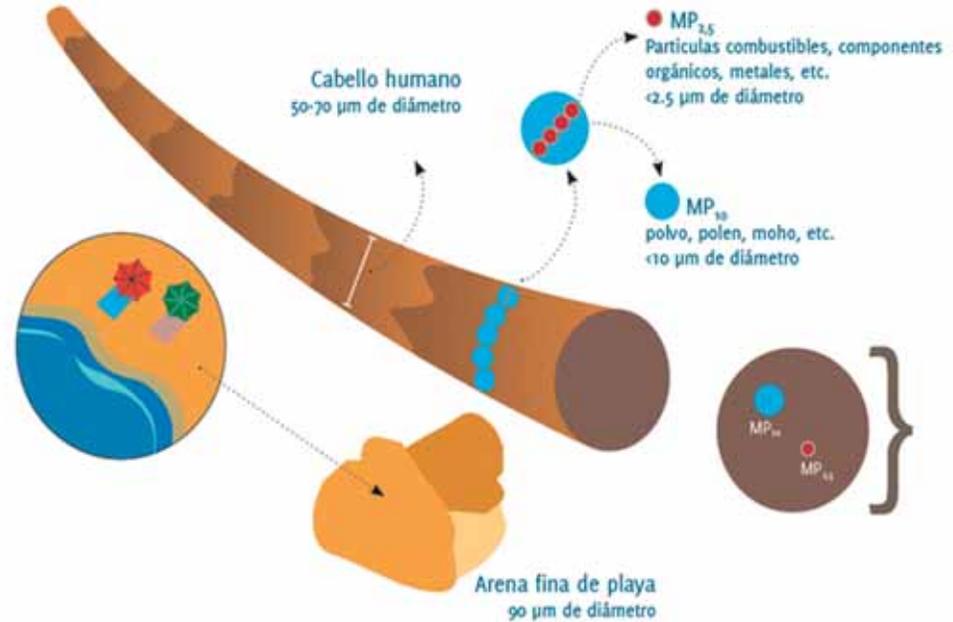


¿QUÉ ES EL MATERIAL PARTICULADO?

Es un término utilizado para referirse a las partículas suspendidas que forman parte de los aerosoles atmosféricos. El material particulado (MP) se clasifica de acuerdo al diámetro aerodinámico de las partículas. Aquellas partículas de diámetro menor a $10\ \mu\text{m}$ (MP₁₀) son denominadas material particulado en suspensión o respirable, debido a su mayor tiempo de permanencia en la atmósfera y a la posibilidad de introducirse al organismo a través de nuestro sistema respiratorio⁽²³⁾. Por el contrario, aquellas partículas de diámetro mayor a $10\ \mu\text{m}$ son denominadas material particulado sedimentable, y presentan un menor tiempo de permanencia en la atmósfera, precipitando rápidamente. Dentro de la fracción de material particulado respirable, destacan por su capacidad de penetrar más profundamente en el sistema respiratorio, aquellas con diámetro menor a $2,5\ \mu\text{m}$ (MP_{2,5}), causando serios problemas respiratorios, enfermedades cardiovasculares y procesos inflamatorios^(24, 25).

¿CUÁL ES LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL MATERIAL PARTICULADO?

Dependiendo de la fuente, los aerosoles atmosféricos pueden tener una constitución química orgánica y/o inorgánica, pudiéndose resumir en una fracción correspondiente a óxidos metálicos y sales minerales de origen geogénico, una fracción carbonácea constituida por carbono elemental o black carbon (BC) y otra por carbono orgánico (OC), en donde pueden encontrarse cientos de compuestos químicos derivados de alcanos, alquenos, alquinos, aromáticos, carbonilos, entre otros. La fracción de OC de los aerosoles puede tener un origen primario o secundario, pudiendo ser de origen biogénico (descomposición de la materia orgánica o

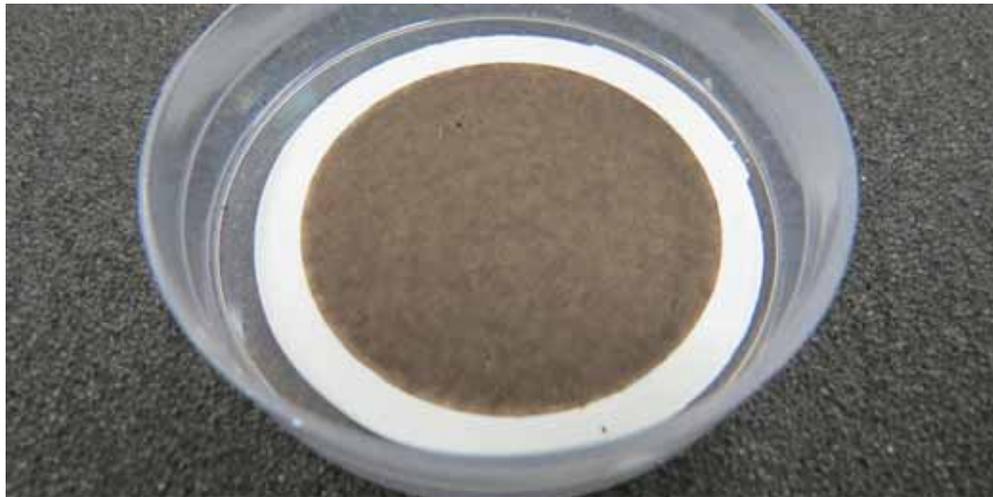


Fuente: basado en © US-EPA, 2010, EPA 454/R-03-002

Figura 04: Comparación de las dimensiones del material particulado atmosférico.



Arriba: fotografía de un filtro de material particulado recolectado desde el tubo de escape de un vehículo diésel, conteniendo principalmente BC



Abajo: fotografía de un filtro de material particulado recolectado desde un ducto de chimenea de estufa a leña, conteniendo principalmente BrC

emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COVs) provenientes de la vegetación) o antropogénico, principalmente proveniente de cuatro categorías: quema de combustibles fósiles, procesos industriales, fuentes fugitivas no industriales y fuentes móviles⁽²⁶⁾.

¿QUÉ ES EL BLACK CARBON (BC) O CARBONO NEGRO?

El BC forma parte de los aerosoles atmosféricos y está constituido fundamentalmente por una forma sólida de carbono principalmente puro llamado carbono elemental o grafito, además es un contaminante de tiempo de vida corta (dura entre horas a días en el aire) cuyo alto potencial de efecto invernadero lo posiciona en segundo lugar de importancia después del metano. Su cuantificación y entendimiento es clave para poder evaluar los impactos de los aerosoles sobre el clima, siendo un tema de creciente interés sobre todo para las grandes ciudades, por sus adicionales impactos sobre la salud de la población⁽²⁷⁾.



¿CÓMO Y POR QUÉ EL BC AFECTA EL CLIMA?

El BC absorbe eficientemente la radiación solar en diferentes longitudes de onda, demostrando tener una influencia sobre el calentamiento climático de la Tierra, tanto a escala regional como global⁽²⁸⁾. Otras partículas a base de carbono también pueden absorber radiación electromagnética, particularmente el denominado carbono café (BrC), que absorben en el visible de la radiación solar y es co-emitado junto con BC⁽²⁹⁾. Estos contaminantes afectan el balance radiativo de la atmósfera alterando el clima.

¿CUÁLES SON LAS FUENTES DE BC Y BrC?

El BC y el BrC son emitido junto con otros gases y aerosoles, incluyendo el dióxido de azufre (SO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO_2), como producto de la quema de combustibles fósiles (Diesel y carbón), los biocombustibles (madera, estiércol y residuos de cultivos), la quema de biomasa abierta (incendios forestales y la quema de residuos de cultivos), estufas de leña y la quema de los residuos urbanos⁽³²⁾.



¿CÓMO AFECTAN EL BC Y EL BrC A LA CRIÓSFERA?

Estos contaminantes producen un cambio en la reflectividad de la superficie del planeta y con ellos el consiguiente cambio en el albedo, cuando el BC se deposita sobre la nieve y el hielo, generando “oscurecimiento” de la superficie impactada y la conversión de la radiación solar absorbida adicional en calor (radiación IR) que puede acelerar la fusión o sublimación de la nieve y el hielo. La deposición de BC/BrC en la nieve es una creciente preocupación en zonas de alta montaña y glaciares, principalmente debido al rol que juega en el balance de masa de estas zonas de la criósfera y la alteración de las propiedades de la nieve y el hielo en las regiones que dependen de estos cuerpos glaciares para equilibrar el suministro de agua en todas las estaciones del año⁽²⁹⁾.



Material particulado depositado en la nieve encontrado en calicata de glaciar estudiado

AEROSOLIOS ATMOSFÉRICOS, MATERIAL PARTICULADO Y BLACK CARBON

El término aerosol se aplica a la mezcla heterogénea de partículas sólidas o líquidas en un medio gaseoso. El tamaño de las partículas que lo componen puede ser desde 0,001 μm a más de 100 μm . Los aerosoles atmosféricos se clasifican en naturales, compuestos principalmente por cenizas volcánicas, esporas, polen, sal marina, polvo terrestre, polvo desértico etc., y antropogénicos, derivados de la actividad humana, tales como humo de chimeneas, tránsito vehicular, partículas minerales surgidas de procesos industriales y partículas producidas fotoquímicamente a partir de contaminantes gaseosos (aerosoles secundarios).

La importancia de los aerosoles sobre el fenómeno de cambio climático global, está aún lejos de entenderse completamente, quedando muchas preguntas sin respuesta. Una de ellas es el rol de los aerosoles y partículas atmosféricas compuestas principalmente de black carbon (BC), en la ablación de la nieve y la pérdida de masa de un glaciar.

La caracterización química, tanto orgánica como inorgánica de muestras de aerosoles y de deposición atmosférica permitiría evaluar el estado actual de la contaminación atmosférica y contrastar la idea del transportes de contaminantes globales, que son arrastrados a la superficie por las precipitaciones de nieve. Al mismo tiempo, estos contaminantes una vez depositadas en la capa de nieve, pueden modificar el albedo y acelerar su ablación, aumentando así la pérdida de masa glaciar y el aumento de la pérdida de las reservas de agua.

Muchos de estos contaminantes pueden ser atribuidos a una fuente específica. Iones y elementos traza pueden ayudar a identificar el origen de las fuentes de estos

aerosoles secundarios como nitrato (NO_3^-) y sulfato (SO_4^{2-}), pueden atribuirse a la combustión de combustibles fósiles en el tráfico y la industria, el amonio (NH_4^+) puede ser atribuido al actividad agrícola y pecuaria⁽³³⁾. Calcio (Ca^{2+}), Magnesio (Mg^{2+}) pueden ser usados como trazadores de aerosoles crustales. Potasio (K^+) puede ser trazador de aerosoles crustales, así como también trazador de la quema de biomasa^(34, 35). Cereceda-Balic et al 2012, demostraron la presencia de elementos traza de origen antropogénico en precipitaciones de nieve en el área de Cerro Colorado, en Los Andes centrales a unos 40 km a NE del área metropolitana, indicando que se ve afectada por las emisiones atmosféricas urbanas de Santiago de Chile. En dicho lugar, se encontró un enriquecimiento significativo para distintos elementos traza relacionados con el tráfico, procesos de fundición y quema de biomasa⁽³⁶⁾.

Entre los componentes del aerosol atmosférico de mayor relevancia en la aceleración de la ablación de los glaciares se encuentra el Black Carbon que es aproximadamente 50 veces más eficaz que el polvo, y 200 veces más eficaz que la ceniza, en la reducción del albedo de la nieve⁽³⁷⁾. El BC es un contaminante de vida corta debido a que su tiempo de residencia en la atmosfera es de algunos días a semanas⁽³⁸⁾. Estudios recientes han sugerido que el forzamiento climático a través de los aerosoles carbonosos se debe probablemente a un componente importante de forzamiento antropogénico⁽³⁹⁾. Las principales fuentes antropogénicas de BC son la quema de biomasa, la quema de combustibles sólidos con fines residenciales y la quema de combustibles en motores diésel⁽⁴⁰⁾. El BC, debido a sus características de aerosol, influye en el clima a través de los 7 aspectos descritos por Boucher (2015)⁽⁴¹⁾, 1) Dispersa y absorbe la radiación solar; 2) La absorción de radiación solar por BC modifica el perfil de temperatura vertical; 3) El BC sirve como núcleos de condensación de nubes;

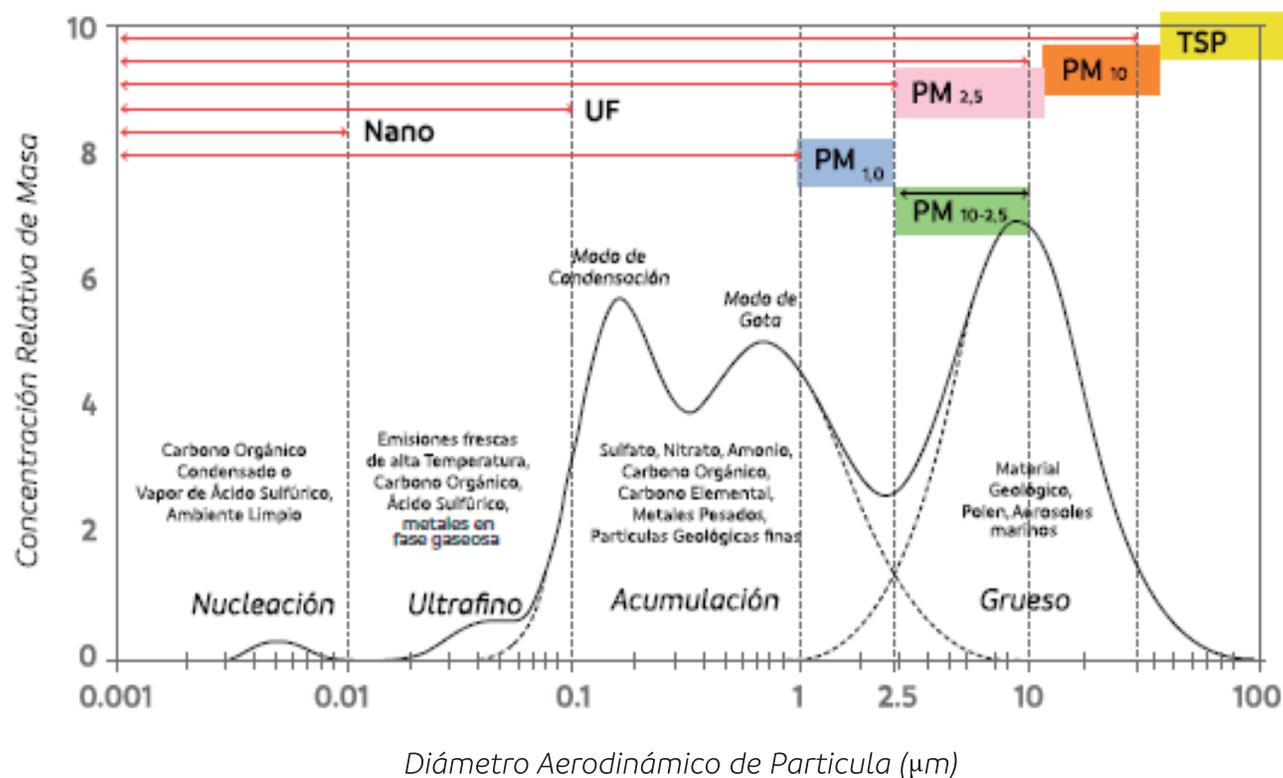
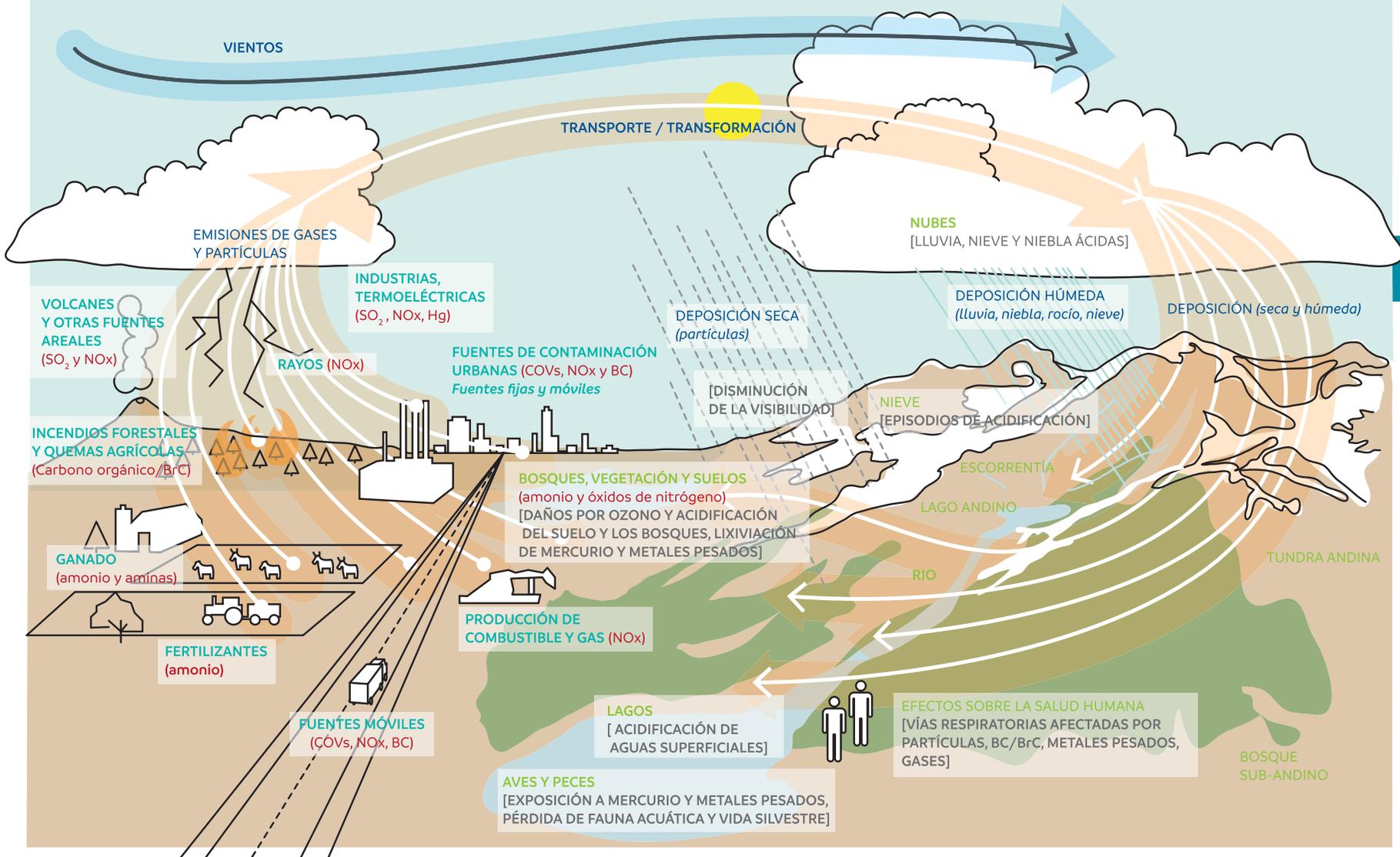


Figura 05: Proceso de formación del material particulado atmosférico

4) Modifica las propiedades microfísicas de las nubes, las que tienen un impacto en su evolución; 5) El BC puede afectar a las propiedades de las nubes en fase de mezcla rápida y hielo; 6) Puede depositarse sobre superficies de nieve y hielo, con lo que estas superficies se vuelven menos reflectantes; 7) Finalmente, los aerosoles también interactúan con la vegetación a través, de cambios en la radiación solar entrante.



PROCESOS DE FORMACIÓN DE AEROSOL EN LA ATMÓSFERA:
SUS FUENTES, TRANSPORTE, TRANSFORMACIÓN, DEPOSICIÓN Y SUS EFECTOS SOBRE EL MEDIO AMBIENTE



Fuente: adaptado de © National Wildlife Refuge System, USA Government.
<http://www.fws.gov/refuges/airquality/sources.html>

ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN (CONTAMINANTE)
ZONA AFECTADA [EFECTOS]
TIPO DE DEPOSICIÓN ATMOSFÉRICA

Figura 06: Proceso de formación de aerosoles en la atmósfera: sus fuentes, transporte, transformación, deposición y sus efectos sobre el medio ambiente.

Transporte de aerosoles desde las ciudades a sitios de alta montaña



CÓMO AFECTAN LOS AEROSOLES ATMOSFÉRICOS A LOS GLACIARES?

Los aerosoles contaminantes pueden transportarse desde grandes distancias, viajando desde otro continente o desde las ciudades cercanas a las zonas glaciares, generando un impacto global o local respectivamente. Al depositarse sobre la nieve de los glaciares, sus efectos sobre la criósfera producen un aceleramiento del derretimiento de la nieve, disminuyen su albedo, aumentando la luz absorbida y acelerando el derretimiento de los glaciares, lo que trae como consecuencia final un impacto sobre el cambio climático global.

¿QUÉ ES LA DEPOSICIÓN ATMOSFÉRICA?

Es el proceso por el cual las partículas contaminantes son transferidas de la atmósfera a la superficie de la tierra, incluyendo las superficies nevadas. Se llama deposición seca a la transferencia en forma de material particulado sedimentable sin la presencia de un hidrometeoro. La deposición húmeda en cambio, corresponde a los hidrometeoros, como la niebla, el rocío, la lluvia, la nieve o el granizo. La suma de ambos tipos de deposiciones atmosféricas se denomina deposición total.



¿QUÉ ES UN LABORATORIO NATURAL?

Un laboratorio natural es un objeto de estudio territorialmente localizado, con dos características básicas: presentar condiciones o atributos naturales únicos o muy particulares respecto del mundo; y constituir un espacio abierto y privilegiado para la investigación científica. Se trata de un atractivo para la ciencia nacional e internacional, que busca revelar las oportunidades de investigación únicas que ofrece nuestro país.

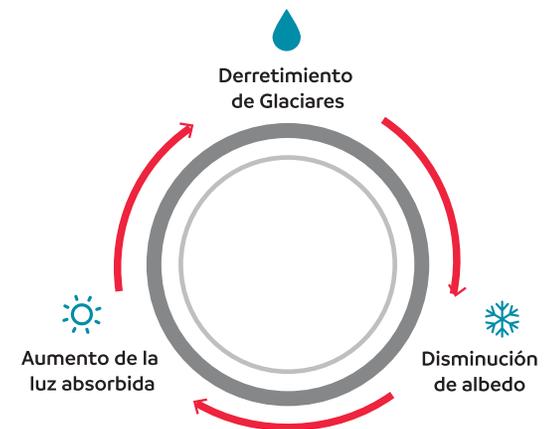


Figura 07: Esquema que representa el ciclo de los efectos negativos de los aerosoles atmosféricos sobre el albedo y el derretimiento glaciar.

TRANSPORTE DE AEROSOLES Y CONTAMINACIÓN DE LA CRIÓSFERA DE LA CORDILLERA DE LOS ANDES

Los antecedentes del Hemisferio Norte muestran que un contenido de BC de 30 ppb (en masa) puede reducir el albedo de banda ancha de la nieve en un 6%⁽⁴²⁾, que corresponde a un forzamiento de radiación local que sería equivalente a duplicar la concentración de CO₂⁽³⁰⁾. Solo este aspecto ha generado un tremendo interés, ya que indica que el BC puede contribuir a un calentamiento inesperadamente rápido de las zonas polares y el retroceso de los glaciares en todo el mundo. Este efecto ha sido comprobado en la zona de la cordillera del Himalaya, donde el retroceso de los glaciares ha sido especialmente importante en los últimos años debido justamente a los altos niveles de contaminación regional y local, donde las poblaciones locales dependen de los ciclos estacionales hidrológicos; claramente esto afectará negativamente el ciclo del agua, modificando el balance de masas de los glaciares, así como el suministro de agua durante el verano⁽⁴³⁾. Estudios recientes muestran que la deposición húmeda y seca de BC en las montañas del Himalaya y las regiones boreales pueden reducir la capa de nieve hasta en 10 días por temporada^(44, 45). El conocimiento de los contaminantes antes mencionados, sus concentraciones y su variabilidad en las regiones de alta montaña, es esencial para una mejor entendimiento del transporte de BC y partículas desde las grandes urbes hasta la cumbres de alta montaña y su efecto sobre la criósfera⁽⁴⁶⁾.

Con respecto a la deposición de aerosoles con propiedades de absorción en la criósfera de la Cordillera de Los Andes, se pueden encontrar algunos estudios asociados a la aplicación de modelos de transporte de BC y partículas, así como el análisis de testigos de hielo, neviza y nieve

y de las cuales junto a algunas campañas de monitoreo en cordillera de corto plazo han permitido explorar el transporte de estos contaminantes a largas y cortas distancias, para fuentes asociadas a la quema de biomasa, así como aquellas de origen urbano-industrial^(36, 47, 48, 49 50, 51, 52, 54).

La Cordillera de los Andes se extiende por 7.000 km a lo largo de América del Sur, siendo el derretimiento de su nieve y deshielo de los glaciares, la principal fuente de agua para más de 80 millones de personas de varios países de América, incluyendo Chile^(53, 54). La evidencia científica indica que la criósfera de los Andes ha respondido al cambio climático, manifestándose en un retroceso de los glaciares y de la capa de nieve, hecho que podría incidir en la disponibilidad de recursos hídricos⁽⁵⁴⁾. El BC ha demostrado tener una influencia sobre el calentamiento climático de la Tierra mediante la absorción de radiación solar y terrestre en la atmósfera, tanto a escala regional como global^(29, 30, 31). Otro aspecto importante, es el cambio en la reflectividad de la superficie del planeta y el consiguiente cambio de albedo, cuando el BC se deposita sobre la nieve y el hielo, generando un “oscurecimiento” de la superficie impactada y la conversión de la radiación solar absorbida adicional en radiación IR, lo que puede acelerar la fusión o sublimación de la nieve y el hielo. La deposición de BC en la nieve es una creciente preocupación en zonas de alta montaña y glaciares, principalmente debido al rol que juega en el balance de masa y la alteración de las propiedades de la nieve y el hielo⁽²⁹⁾.

En la Cordillera de Los Andes se encuentra un número importante de centros urbanos de diverso tamaño, cuyas

emisiones pueden alcanzar potencialmente algunos de los glaciares de montaña. Como se mencionó, aunque escasos, hay algunos estudios realizados en testigos de hielo y neviza que muestran claramente la presencia de trazadores químicos proxy de contaminación antropogénica en las alturas de Los Andes^(55, 56). Sin embargo, el impacto de los aerosoles y del BC en la capa de nieve de los glaciares de Los Andes ha sido explorado sólo esporádicamente por medio de mediciones directas^(57, 58, 36), lo que impide la identificación de la importancia relativa de este tipo de contaminantes para explicar el retroceso acelerado de los glaciares y la pérdida gradual de superficie nivosa. Estas pocas observaciones, junto con el estudio de modelos, más la información obtenida de otras regiones de montaña del mundo, proporcionan evidencia suficiente para justificar el desarrollo de campañas intensivas de monitoreo para cuantificar los procesos atmosféricos que están ocurriendo y para evaluar el verdadero impacto del BC y los aerosoles en la criósfera de Los Andes, antecedentes que fundamentaron la realización de este proyecto FPA, considerando Los Andes como un laboratorio natural para el estudio de los aerosoles y sus efectos sobre el cambio climático.

En la ciudad de Santiago se observa una circulación valle-montaña poco profunda, la cual se hace más evidente durante los días despejados⁽⁵⁹⁾. Sin embargo, esta circulación de mesoescala no alcanza las grandes cumbres de montaña durante los días nublados, habría que esperar un frente con mucha turbulencia en altura para que ocurra un fenómeno de transporte de contaminantes, con deposición húmeda (nieve) o seca de aerosoles y BC. Estos

antecedentes validan la necesidad de realizar campañas de monitoreo sistemático, para recoger las variaciones estacionales de un periodo completo, por ejemplo un año, y así poder evaluar el impacto de estos contaminantes sobre un sector específico de la criósfera de Los Andes. Estos antecedentes fundamentaron la construcción de un laboratorio-refugio que permitiera medir los aerosoles atmosféricos en la criósfera, directamente en sitios de alta montaña en la Cordillera de Los Andes como un verdadero laboratorio natural.



PROYECTO NUNATAK

NUNATAK-CHILE: LABORATORIO NATURAL SOBRE CONTAMINACIÓN GLACIAR

Bajo la hipótesis de que los aerosoles emitidos a la atmósfera se pueden transportar desde las zonas urbanas hacia los glaciares de Los Andes centrales de Chile, depositándose e incorporándose en la nieve y/o hielo, disminuyendo el albedo y como consecuencia acelerando la ablación y la pérdida de masa glaciaria, impactando finalmente sobre el efecto invernadero y el cambio climático, nació el proyecto NUNATAK, que corresponde a una iniciativa del Centro de Tecnologías Ambientales (CETAM) de la Universidad Técnica Federico Santa María. El proyecto NUNATAK, dirigido por el Prof. Dr. Francisco Cereceda Balic, director del CETAM y académico del Departamento de Química de la UTFSM, contó con el financiamiento del Fondo de Protección Ambiental del Ministerio del Medio Ambiente, Gobierno de Chile y contó con la colaboración de diversas instituciones y empresas: la Escuela de Alta Montaña del Ejército de Chile, la Unidad de Glaciares y Nieves de la Dirección General de Aguas

del Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile, la Escuela Nacional de Montaña y la empresa CRESCO Energías Renovables.

El objetivo general del proyecto NUNATAK fue el levantamiento de una línea de base de contaminación en un glaciar de interés, mediante monitoreo atmosférico y caracterización química de las muestras recolectadas. Para lograr este objetivo se construyó el primer laboratorio refugio transportable de montaña de nuestro país, plataforma que fue utilizada para la realización de campañas de monitoreo y caracterización química de aerosoles atmosféricos en sitios de montaña, mediante la utilización de equipamiento alimentado con sistemas de energía limpia (solar), lo que dado lo prístino de los sitios de monitoreo, permitió obtener resultados confiables, libres de la influencia de contaminación generada in situ, por ejemplo, por la utilización de equipos generadores de energía a combustibles fósiles.

Hipótesis Científica

Los aerosoles emitidos a la atmósfera se pueden transportar desde las zonas urbanas hacia los glaciares de Los Andes centrales de Chile, depositándose en forma húmeda y/o seca incorporándose en la nieve, disminuyendo el albedo y como consecuencia acelerando la ablación y la pérdida de masa glaciar, impactando finalmente sobre el efecto invernadero y el cambio climático.

Objetivo General

Levantamiento de Línea de Bases de contaminación en un glaciar de interés mediante monitoreo atmosférico y caracterización química de muestras recolectadas.

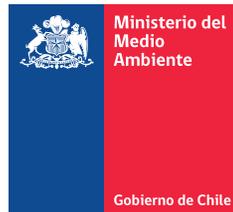
Objetivos Específicos

- Realizar campañas de monitoreo y caracterización química de aerosoles atmosféricos en un glaciar seleccionado y la ciudad de Santiago.
- Implementar metodologías analíticas para determinación de especies iónicas mayoritarias.
- Medir tamaño, número, distribución y concentración de los aerosoles atmosféricos.
- Medir black carbon y albedo.
- Estudiar resultados para evaluar el origen y transporte de los aerosoles atmosféricos.
- Realizar campañas de difusión de resultados usando la estructura del proyecto NUNATAK.

NUNATAK

NUNATAK-CHILE: LABORATORIO NATURAL SOBRE CONTAMINACIÓN GLACIAR

INSTITUCIÓN FINANCIANTE



INSTITUCIÓN EJECUTORA



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA



COLABORAN



Actividades

Etapa 1. Búsqueda de sitios de monitoreo y prueba de equipos de generación de energía (fotovoltaicos) que se usarán en el laboratorio/refugio NUNATAK



Etapa 2. Campañas de Monitoreo en glaciares de montaña para levantamiento de información ambiental, prueba de equipos de energía y monitoreo mientras se construye el laboratorio/refugio NUNATAK



ETAPA 3. Construcción e Instalación del refugio NUNATAK, equipos de generación de energía (fotovoltaicos) e instrumentos de monitoreo para finalmente instalar el laboratorio/refugio NUNATAK en un sector de montaña de Los Andes

Actividades Realizadas

Etapa 1. Búsqueda de sitios de monitoreo y prueba de equipos de generación de energía (fotovoltaicos) que se usarán en el laboratorio/refugio NUNATAK.

Se realizó la búsqueda de sitios para la instalación del laboratorio refugio NUNATAK en la cordillera de los Andes; el sitio debía cumplir con una serie de requisitos para el transporte e instalación del laboratorio refugio NUNATAK, como por ejemplo, poseer acceso vía terrestre para el transporte del laboratorio refugio, presentar una nivología anual abundante para poder obtener una cantidad suficiente de muestras de nieve y contar con condiciones de seguridad suficientes para la instalación del laboratorio y sus equipos de monitoreo asociados.

Los lugares evaluados correspondieron al glaciar San Francisco, el glaciar colgante El Morado, el glaciar Juncal y la Escuela de Montaña del Ejército de Chile, en Portillo, paso fronterizo Los Libertadores, Región de Valparaíso.

Finalmente se decidió que la ubicación ideal para esta primera etapa de instalación del refugio-laboratorio fuera en la Escuela de Alta Montaña del Ejército de Chile (EAME), situada en el sector de Portillo, debido a que se cuenta con el apoyo logístico del Ejército para su instalación y para facilitar la operación del NUNATAK durante su período de prueba y funcionamiento en terreno.

Arriba: Imagen de google earth donde se muestra la ubicación de los sitios explorados

En medio: Mapa de zonas a explorar

Abajo: Cuartel de la Escuela de Alta Montaña del Ejército de Chile, en Portillo, paso fronterizo Los Libertadores, Región de Valparaíso





Etapa 2. Campañas de Monitoreo en glaciares de montaña para levantamiento de información ambiental, prueba de equipos de energía y monitoreo mientras se construye el laboratorio/refugio NUNATAK

Se realizaron 2 campañas de monitoreo en los meses de Septiembre y Octubre de 2014 previas a la instalación del laboratorio refugio NUNATAK en Portillo, con el apoyo de la Dirección General de Aguas, a través de la licitación pública ID 1019-53-LP14, cuyo objetivo fue realizar la caracterización química de muestras de nieve y analizar la composición y distribución de material particulado atmosférico para los glaciares Olivares Alfa y Bello, ubicados en la Región Metropolitana

La campaña de monitoreo consistió en la toma de muestras de nieve en los glaciares Olivares Alfa y Bello para su caracterización química. También se realizó una campaña de monitoreo de aerosoles directamente sobre la superficie del glaciar, midiendo la concentración y distribución de material particulado en suspensión, la concentración de Black Carbon, complementada con la medición de parámetros meteorológicos incluida la radiación solar para así poder calcular el albedo en ambos glaciares estudiados. En paralelo a las campañas de monitoreo en los glaciares se realizó una campaña de monitoreo en la ciudad de Santiago, donde se midieron los mismos contaminantes que fueron medidos en los glaciares para así poder tener una estimación de su capacidad de transporte hacia éstos glaciares de alta montaña (4.500 m.s.n.m).

LOGÍSTICA

Dado lo remoto e inhóspito de los glaciares estudiados, sin duda la logística de transporte de equipamiento y personal, junto con la habitabilidad durante las expediciones fueron aspectos claves en el éxito de las campañas de monitoreo.

Arriba: Imagen de google earth donde se muestra la ubicación del glaciar Olivares Alfa, Bello y la Región Metropolitana

Abajo: Carpa hangar y sistemas de energía fotovoltaica tipo paneles solares flexibles usados en pruebas en las campañas de monitoreo en glaciares



El transporte de equipamiento y personas hacia los glaciares fue realizado en helicóptero para lo cual se contó con la colaboración de la empresa Ecopter. Se transportaron alrededor de 1.000 Kg de equipamiento, además de las personas, por lo que la coordinación con servicios meteorológicos fue fundamental para el éxito de esta tarea.

Dado que el laboratorio refugio NUNATAK se encontraba en proceso de construcción, se utilizó un refugio alternativo para la permanencia del equipo de investigadores en los glaciares estudiados. Para ello se utilizó una carpa hangar especialmente construida para soportar condiciones meteorológicas adversas y se probaron distintos sistemas de energía bajo condiciones de campo.

SISTEMAS DE ENERGÍA

Debido a que durante las campañas de monitoreo en los glaciares Olivares Alfa y Bello se midieron contaminantes asociados a actividades antropogénicas de combustión en su mayoría, fue fundamental evitar cualquier tipo de contaminación provocada por las actividades propias del monitoreo como por ejemplo la utilización de combustible para generar energía eléctrica, es por esto que con la colaboración de la empresa CRESCO Energías Renovables, se diseñó y construyó un sistema de energía fotovoltaico capaz de alimentar a los equipos de monitoreo utilizados, bajo condiciones de operación extrema que sirvió para probar los diversos equipos de monitoreo y los distintos sistemas de generación y almacenamiento de energía bajo condiciones extremas, conocimientos empíricos que fueron aplicados posteriormente en la instalación de los equipos de monitoreo y en la construcción del sistema de energía del NUNATAK.

Arriba: Transporte en helicóptero de la carga y los científicos del CETAM-UTFSM hasta los glaciares en estudio a más de 4.000 m.s.n.m

Abajo: Prueba de equipos de monitoreo ambiental y sistemas de energía fotovoltaica usados durante las campañas de monitoreo en glaciares



EQUIPAMIENTO DE MONITOREO

ESPECTRÓMETRO LASER DE AEROSOLES



Medición en tiempo real de concentración y distribución por tamaños de material particulado en suspensión

ETALÓMETRO



Medición en tiempo real de concentración de Black Carbon/Brown Carbon

ESTACIÓN METEOROLÓGICA



Medición de T°, %HR, P°, dirección y velocidad de viento

RADIÓMETRO



Medición de radiación solar incidente y reflejada (Albedo)

CPDT



Toma de muestras de material particulado sedimentable y nieve fresca

TOMA DE MUESTRAS DE NIEVE

MUESTREO DE NIEVE PROFUNDA



MUESTREO DE NIEVE SUPERFICIAL





Laboratorio-refugio NUNATAK con sistema fotovoltaico de energía instalado

ETAPA 3. Construcción e Instalación del refugio NUNATAK, equipos de generación de energía (eólicos, fotovoltaicos) e instrumentos de monitoreo para finalmente instalar el laboratorio/refugio NUNATAK en un sector de montaña de los andes

El diseño del laboratorio-refugio científico NUNATAK buscó crear una infraestructura que permita realizar monitoreo ambiental continuo en sitios remotos como los glaciares, cuenta con condiciones de habitabilidad, seguridad, confort térmico y condiciones para ser usado como laboratorio de terreno totalmente autónomo, ya que es alimentado por un avanzado sistema fotovoltaico de energía retráctil fácilmente desmontable para su transporte ya sea por vía terrestre o aérea.

DISEÑO DEL LABORATORIO REFUGIO NUNATAK

El laboratorio-refugio NUNATAK consta de un container metálico panelizado fabricado especialmente para sitios extremos, construidas con materiales resistentes a las inclemencias del tiempo de cordillera ya que cuenta con aislante térmico y ventanas de termopanel que aseguran el bienestar y confort de sus ocupantes. El laboratorio-refugio está totalmente equipado, con cajoneras y mesones de trabajo, enchufes de 3 tipos distintos, un rectificador y estabilizador de voltaje, además de una UPS para darle mayor autonomía y permitir el funcionamiento y seguridad de los equipos de monitoreo, durante el tiempo en que estén funcionando bajo condiciones de campo. El laboratorio-refugio posee además una infraestructura para la habitabilidad de 3 personas con literas para dormir, muebles de cocina, una encimera de dos platos a gas, lavaplatos y un baño completo con ducha, lavamanos y WC químico.

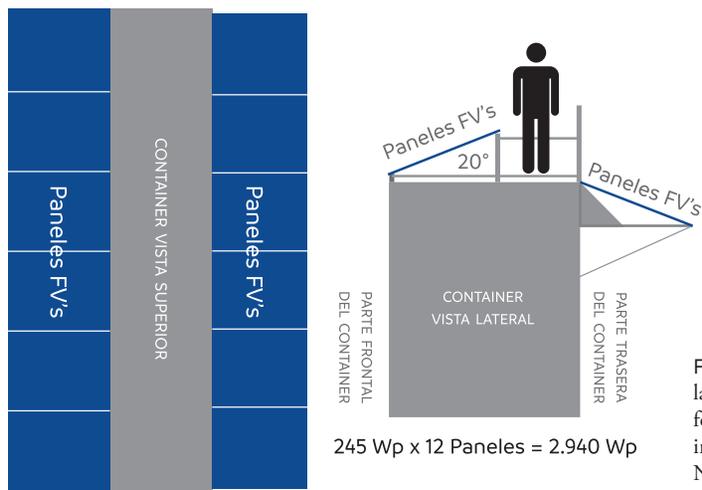


Figura 8: Diseño exterior de la instalación de los paneles fotovoltaicos y del pasillo de instrumentos en el techo del NUNATAK.

Con la colaboración de la empresa CRESCO Energías Renovables se instaló un moderno sistema fotovoltaico capaz de suplir las necesidades de habitabilidad del refugio además de alimentar los equipos de monitoreo e instrumentos de medición de forma ininterrumpida.

Con la colaboración del Ejército de Chile, se logró gestionar la instalación del laboratorio-refugio NUNATAK en el cuartel de la Escuela de Montaña del Ejército de Chile, ubicado en Portillo.

La instalación del laboratorio-refugio NUNATAK requirió de una compleja logística desde su transporte y acondicionamiento del terreno para su instalación en el cuartel de la Escuela de Montaña del Ejército de Chile, para lo cual se contó con la valiosa colaboración de personal de ejército y maquinaria de vialidad del MOP.

Finalmente se logró el hito de la instalación del laboratorio-refugio NUNATAK junto con la instalación de equipamiento de medición de contaminación atmosférica y meteorología en la Cordillera de Los Andes. Inmediatamente instalado se comenzó con el monitoreo de material particulado, black carbon, albedo y meteorología, además de realizar una campaña de toma de muestras de nieve para especiación química



Arriba: Ubicación del laboratorio-refugio NUNATAK en la Escuela de Montaña del Ejército de Chile, ubicado en Portillo

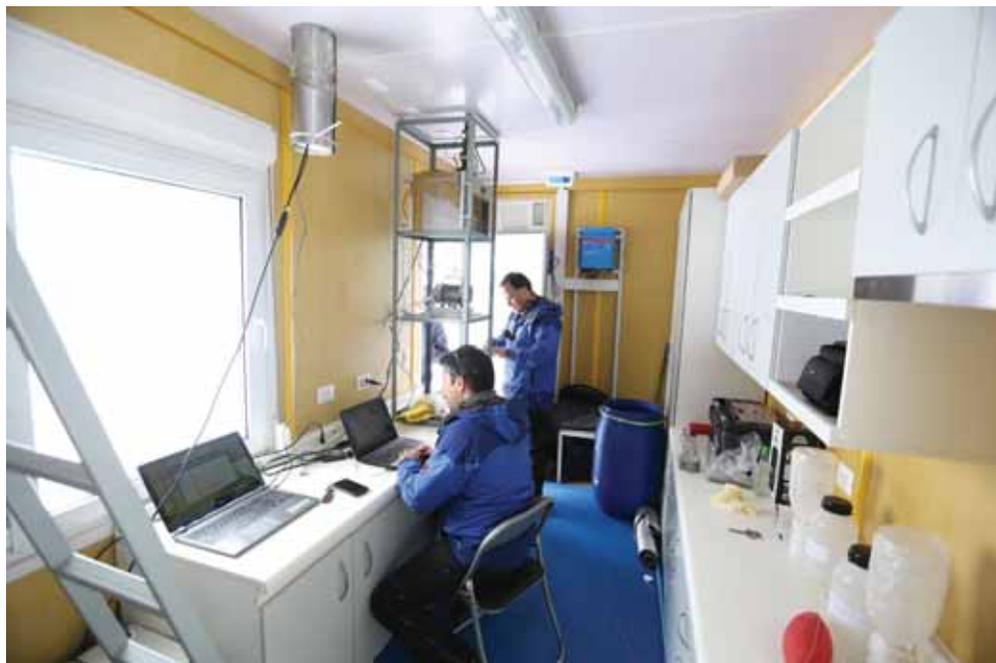
Abajo: Transporte e instalación de laboratorio-refugio NUNATAK en la Escuela de Montaña del Ejército de Chile, ubicado en Portillo

INFRAESTRUCTURA DE MONITOREO PARA FINALMENTE INSTALAR EL LABORATORIO/REFUGIO NUNATAK EN UN SECTOR DE MONTAÑA DE LOS ANDES

El Laboratorio-Refugio NUNATAK quedó con su sistema de autonomía eléctrica funcionando (12 paneles FVT y banco de baterías); sistemas de monitoreo meteorológico completo; radiómetro neto (medición de albedo), Black Carbon (Aethalómetro-BC); PM10, PM2,5, PM1,0 y tamaño y distribución de partículas (espectrómetro laser de aerosoles: 0,25-34 μm , en 31 canales distintos), PC esclavo de almacenamiento de datos y sistema de recolección pasiva de deposición húmeda (nieve).

JUSTIFICACIÓN DEL LUGAR DE SELECCIONADO PARA LA PRIMERA CAMPAÑA DE MONITOREO Y PRUEBAS DEL NUNATAK

Para la realización de campañas de monitoreo de aerosoles con la finalidad de obtener un levantamiento de línea de bases en sectores de alta montaña, idealmente estas mediciones deben hacerse cerca de las fuentes de emisiones y lo más cerca posible de los sectores de acumulación de nieve y de los glaciares potencialmente impactados. La filosofía de medición es intentar vincular las emisiones de gases y aerosoles lo más cerca posible de la fuente de emisión y en su transporte al punto de máximo impacto. El problema fundamental en este tipo de investigación se traduce entonces en encontrar un lugar de medición que sea accesible, idealmente con electricidad, y cerca de los sectores de acumulación de nieve y de los glaciares que han experimentado fusión y sublimación en los últimos 50 años. A falta de un lugar como el descrito, el lugar de medición alternativo es un sitio a favor del viento respecto de la fuente de emisión y situado lo más alto posible, para representar la situación de montaña antes descrita y objeto del estudio.

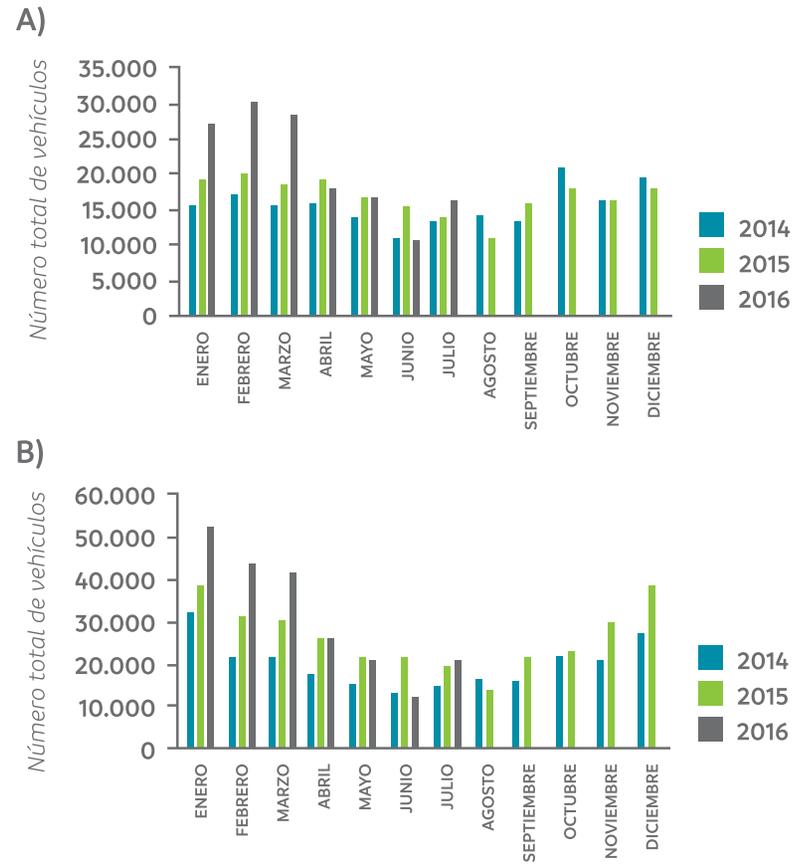


Arriba: interior del laboratorio-refugio NUNATAK, se aprecia el rack de instrumentos y mesón de trabajo

Abajo: Recolección de muestras de nieve superficial y en calicata para caracterización química de la nieve



En este sentido un sector que podría ser muy interesante puesto, que es prácticamente monofuente (fuentes móviles: diésel/gasolina), sería el paso fronterizo entre Chile y Argentina a través del complejo aduanero del Cristo Redentor. Por este paso de frontera, circulan camiones de carga y buses que usan diésel, así como vehículos livianos que usan también diésel y gasolina, los cuales son una fuente relevante de aerosoles incluyendo BC a nivel local. Actualmente, el promedio del tráfico diario anual de los vehículos que cruzan los Andes entre Chile y Argentina a través de este paso fronterizo se ha cuadruplicado en los últimos 10 años, siendo en promedio actualmente de aproximadamente más de 2.000 vehículos anuales (Servicio Nacional de Aduanas de los Andes, Chile, información 2016), de los cuales aproximadamente la mitad son camiones y autobuses. Este paso fronterizo se encuentra a una elevación de 3.000 msnm, cerca de la cumbre más alta de América, el Aconcagua y aunque en términos absolutos las emisiones de estas fuentes móviles pueden ser pequeñas, sus emisiones inyectadas directamente a esta altura podría tener un impacto relativamente grande en otros sitios cercanos de glaciares y nieves de montañas de la cordillera de Los Andes. Una situación similar puede ocurrir en relación con las emisiones de los grandes camiones diésel utilizados en las actividades mineras que operan a altitudes elevadas en la misma cordillera.



(Fuente: Servicio Nacional de Aduanas de los Andes, Chile, 2016).

Figura 03:

A) N° Total de vehículos, dirección Argentina -Chile.

B) N° Total de vehículos, dirección Chile- Argentina.





Resultados

Los lugares seleccionados para desarrollar las primeras campañas de este proyecto fueron los glaciares Bello (GB, 33° 31' 56" S; 70° 13' 15" O) y Olivares Alfa (GOA, 33° 11' 37" S; 70° 13' 15" O), ubicados en la Cordillera de Los Andes de la Región Metropolitana. Ambos glaciares son de alta montaña, ubicándose entre los 4.280 y 4.500 m.s.n.m, respectivamente. El GB se considera, por su ubicación geográfica y su lejanía a las fuentes de emisión antropogénicas, como control (lugar limpio); por el contrario, el GOA se considera como posiblemente más impactado, primero por su mayor cercanía a fuentes antropogénicas como la ciudad de Santiago, por estar en la dirección de los vientos predominantes de esta ciudad hacia la cordillera y finalmente por tener muy cerca (200 m) mega proyectos de extracción minera a tajo abierto, perteneciente a las empresas mineras Codelco División Andina y Anglo América.

Durante los meses de invierno es muy riesgoso acceder a esta zona de glaciares, y más aún, establecer campamentos de trabajo por muchos días, por lo que es necesario esperar hasta finales del invierno, cuando las condiciones meteorológicas son más benignas y estables, para poder ingresar a estos glaciares y realizar las campañas de

monitoreo. El desarrollo de las mediciones ambientales durante las campañas, requiere de la presencia y supervisión permanente de personal científico altamente especializado, así como expertos en alta montaña para supervisar la logística y los aspectos de seguridad de estas expediciones. Con esta finalidad, el grupo de científicos del CETAM-UTFSM, que participaron de las campañas fueron sometidos a un curso de entrenamiento en alta montaña, así como a exámenes médicos de altura y verificación de las condiciones físicas de los participantes que permitiera afrontar apropiadamente las rigurosas condiciones de trabajo, así como tomar los seguros correspondientes exigidos para operar en helicópteros y bajo estas condiciones de campo.

Durante el mes de septiembre y octubre del 2014, que son los meses cuando se puede ingresar después del invierno, en helicóptero a la alta cordillera de los Andes, se instalaron campamentos en los glaciares Bello (GB) y Olivares Alfa (GOA) para realizar las campañas de monitoreo asociadas a este proyecto. Para esto se instaló durante cada campaña una estación de monitoreo de aerosoles atmosféricos y meteorología directamente sobre la superficie glaciar, la cual fue supervisada por los científicos del CETAM-

UTFSM y acompañados por guías profesionales de montaña de la Escuela Nacional de Montaña de Chile. En estas campañas se midieron parámetros meteorológicos (T° , P° , %HR, Velocidad y dirección del viento), albedo, la concentración y distribución por tamaños de material particulado atmosférico, black carbón y deposición total, además de recolectar muestras de nieve superficial y calicatas de hasta unos 3-4 m de profundidad en el glaciar. Respecto de la concentración de material particulado, se midió PM10, PM2,5 y PM1,0. Con relación a la distribución de partículas, se midió el número de partículas en 31 tamaños aerodinámicos distintos entre 0,27 y 34 μm .

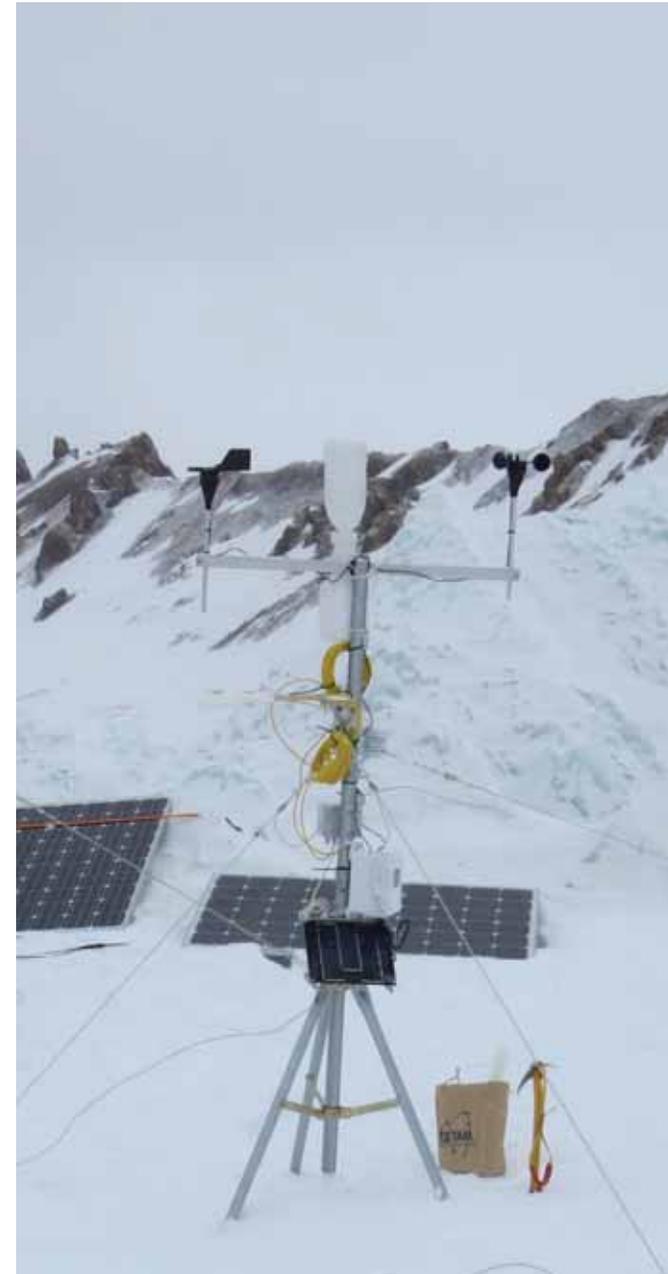
METEOROLOGÍA

Para realizar una correcta interpretación de los datos de contaminación atmosférica en cualquier campaña de monitoreo atmosférico es fundamental contar con información meteorológica, en especial datos de dirección y velocidad de viento, temperatura y humedad relativa. Por lo tanto, durante las campañas de monitoreo de los glaciares Bello y Olivares Alfa se instaló una estación meteorológica automática en cada glaciar estudiado y se registró información en paralelo a la recolección de datos de contaminantes atmosféricos.

Los registros de temperatura del aire y humedad relativa medidos en el glaciar Bello para el periodo desde el 12 al 30 de septiembre de 2014 se presentan a continuación en la Figura 09.

En la figura 09 se puede apreciar la variación temporal de la temperatura medida en el glaciar Bello, la cual presenta un promedio de -8.7°C durante el período de monitoreo. La máxima registrada se alcanzó 6.1°C y una mínima de -17.9°C , registrándose una amplitud máxima en el

Estación meteorológica instalada en glaciar Bello



período de 23.1 °C. Respecto a la Humedad Relativa, esta presentó un promedio de 65.7%, una mínima de 19.3% y una máxima de 93.3%.

La medición de dirección y velocidad de viento en el glaciar Bello permitió la elaboración de la rosa de los vientos para el sector, la cual permite observar en la figura 10, la dirección y velocidad del viento durante el período de la campaña.

Respecto a las intensidades y direcciones del viento predominante en el glaciar bello, se puede apreciar que predominan los vientos que provienen desde el norte, dirección donde se encuentra la actividad minera de

cordillera antes mencionada. Respecto a la velocidad del viento, el 27.3% de los casos presenta intensidades que fluctúan entre 3.6 y 5.7 m/s; un 23.9% de los vientos presentan intensidades entre 5.7 y 8.8 m/s, siendo estas las intensidades más recurrentes del período.

En el glaciar Olivares Alfa se registraron datos de presión atmosférica, humedad relativa, temperatura ambiental, dirección y velocidad de viento utilizando una estación meteorológica automática ubicada junto con los equipos de monitoreo atmosférico a 4.500 m.s.n.m.

Los registros del monitoreo de Temperatura y Humedad Relativa medidos en el glaciar Olivares Alfa, se presentan

Temperatura y Humedad Relativa en Glaciar Bello • 12 - 30/09/2014

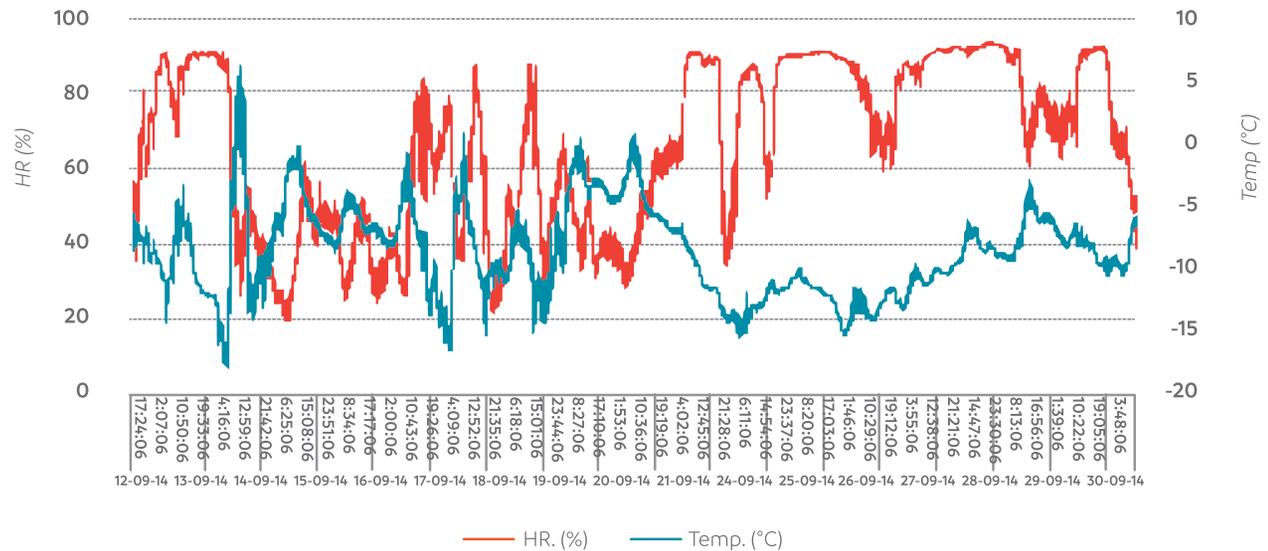


Figura 09: Monitoreo de temperatura (°C) v/s Humedad Relativa (%), medida desde el 12 al 30 de septiembre de 2014 en Glaciar Bello

a continuación la figura 12 para el período comprendido entre el 21 y el 30 octubre de 2014.

En la figura 12 se puede apreciar la temperatura medida en el glaciar Olivares Alfa, la cual presenta un promedio de $-1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante el período de monitoreo. La máxima registrada alcanzó los $10,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una mínima de $-10,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, registrándose una amplitud máxima en el período de $21,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Respecto a la Humedad Relativa, esta presentó un promedio de $36,1\%$, una mínima de $7,9\%$ y una máxima de $78,6\%$.

La medición de dirección y velocidad de viento en el glaciar Olivares Alfa permitió la elaboración de la rosa de los vientos para el sector, la cual permite observar en la figura 11, la dirección y velocidad del viento para el período comprendido entre el 21 y el 29 de Octubre de 2014.

En la figura 11 se observa que los vientos predominantes provienen de varias direcciones a diferencia del glaciar Bello en que había una sola dirección predominante. La dirección con mayor frecuencia corresponde a vientos nor-noreste, también en directa relación con la dirección desde donde se encuentran las emisiones de la explotación minera en altura. Respecto a las intensidades del viento, el monitoreo mostró mayores frecuencias que van desde un $33,1\%$ para aquellos vientos con intensidades entre $0,5$ y $2,1\text{ m/s}$, y un $27,9\%$ de vientos con intensidades entre $2,1$ y $3,6\text{ m/s}$, siendo estas las intensidades más recurrentes del período de monitoreo.

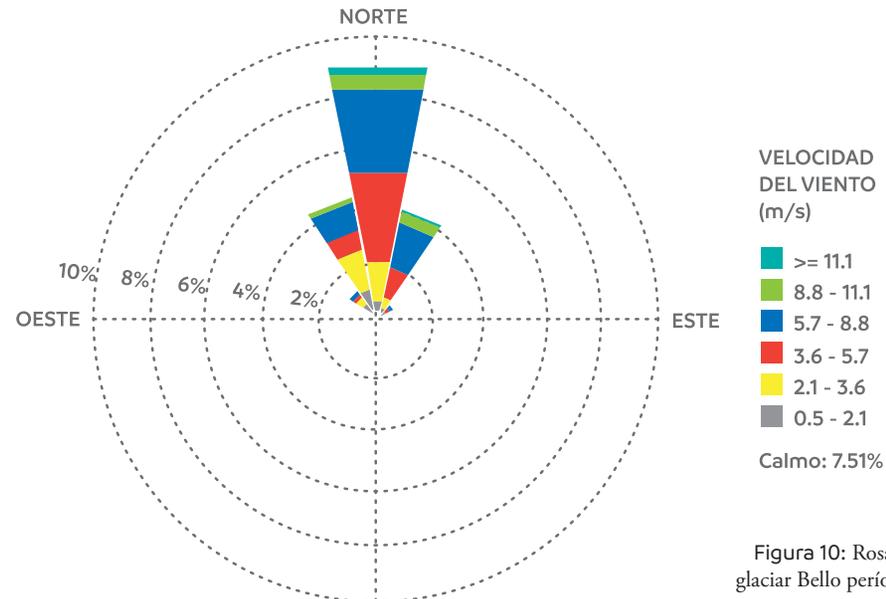


Figura 10: Rosa de los vientos glaciar Bello período 12 al 30 de septiembre de 2014

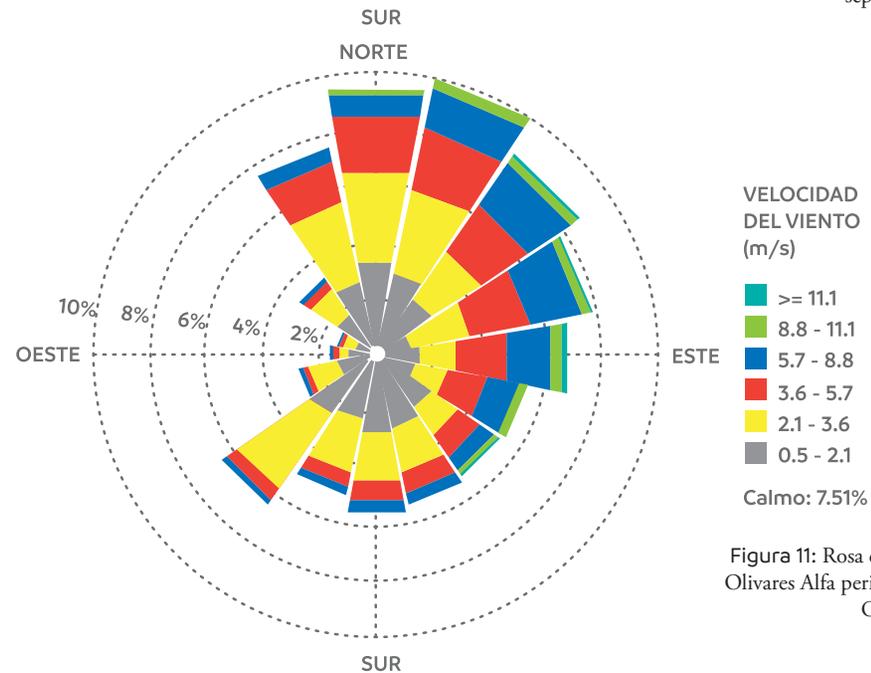


Figura 11: Rosa de Viento glaciar Olivares Alfa período 21 al 29 de Octubre de 2014.

Temperatura y Humedad Relativa en Glaciar Olivares Alfa •21 - 30/10/2014

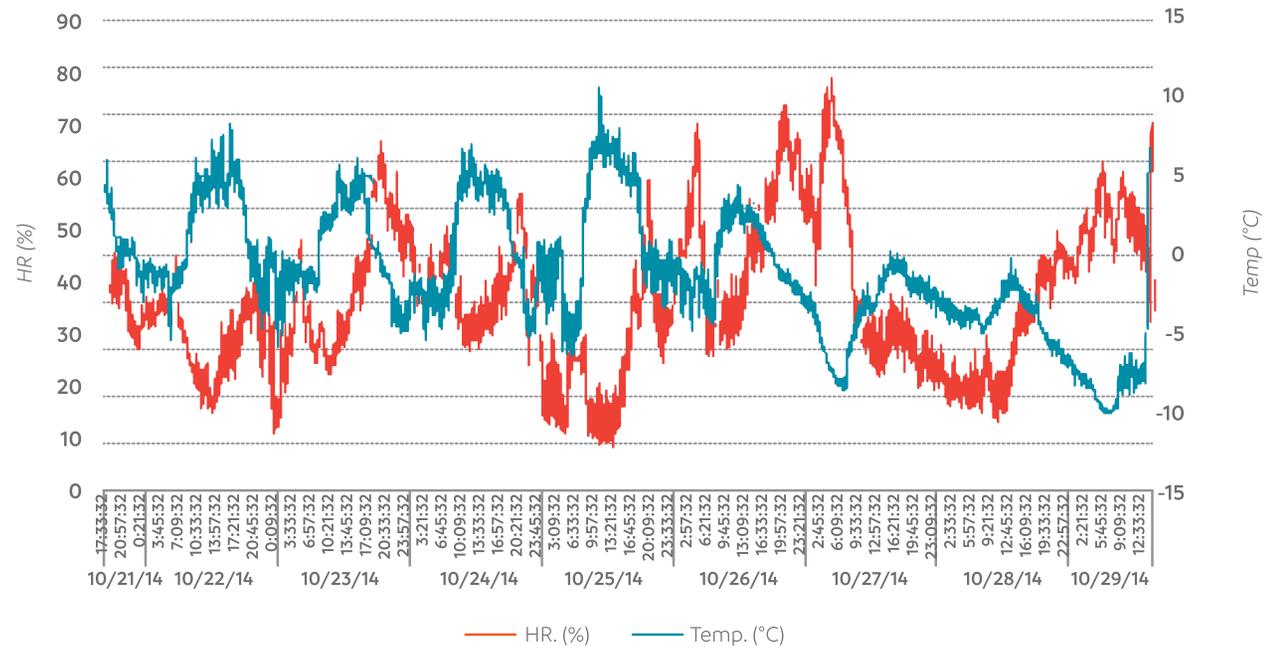


Figura 12: Monitoreo de temperatura (°C) v/s Humedad Relativa (%), medida en Glaciar Olivares Alfa 21 - 30/10/2014

MATERIAL PARTICULADO ATMOSFÉRICO

En el mismo lugar donde se midió la meteorología, se instaló un equipo óptico, automático de monitoreo de partículas atmosféricas, denominado espectrómetro laser de aerosoles (model 1.109, GRIMM, Alemania), el cual permite medir concentración de partículas en el rango de PM10, PM2,5 y PM1,0 y la distribución de partículas, en 31 tamaños aerodinámicos distintos entre 0,27 y 34 μm .

Como se observa en la figura 13 el 98% de las partículas medidas en ambos glaciares se encuentra en el rango de 0,265 a 0,425 μm (partículas finas), mientras que sólo

el 2% se encuentra entre 0,475 y 34 μm , esto indica que el material particulado atmosférico medido en ambos glaciares tiene perfiles de distribución por tamaños similares indicando un posible origen común. Por otra parte el material particulado encontrado es fundamentalmente fino, es decir aquel que es factible que pueda no solo permanecer por más tiempo en la atmósfera (semanas a años) sino que además es aquel que puede viajar a las más grandes distancias desde la fuente de emisión, indicando la factibilidad que corresponda a material particulado de origen antropogénico (ver figura 14 siguiente).

BLACK CARBON

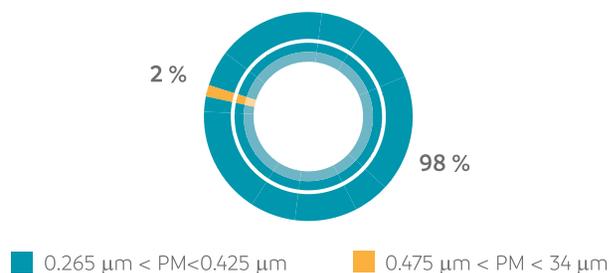
Otro contaminante que se midió durante las campañas de monitoreo de los glaciares Bello y Olivares Alfa fue Black Carbon (BC), que tiene gran relevancia en el calentamiento global y el cambio climático, debido a sus capacidades de absorción de radiación solar en la longitud de onda del visible y del infra rojo (IR) del espectro electromagnético que llega desde el sol. Como se ha explicado, al depositarse el BC sobre la nieve hace que esta se derrita más rápido debido a que estas partículas de BC se calientan con la luz del sol, acelerando el retroceso de los glaciares y modificando el albedo, impactando sobre el clima global. Black Carbon fue monitoreado en el mismo lugar y en conjunto con la meteorología y las partículas atmosféricas en ambos glaciares, mediante un instrumento óptico denominado etalómetro (microAeth®, Model AE51, AethLabs, USA) capaz de medir en línea cada un minuto la concentración atmosférica de BC en [$\mu\text{g}/\text{m}^3$].

Como se observa en la figura 16, la concentración de BC en el glaciar Olivares Alfa fue mayor a la observada en el glaciar Bello, esto puede tener explicación en la cercanía del glaciar Olivares Alfa a la zona de explotación minera de cordillera antes mencionada, relacionada con el tráfico de maquinaria pesada en el rajo de la mina y su posterior deposición sobre el glaciar.

El BC es parte del material particulado, por lo tanto, con miras a poder establecer a futuro medidas de mitigación de contaminantes, es importante conocer la fracción del material particulado a la cual se asocia el BC medido. Para ello se realizó un análisis de correlación entre material particulado por cada tamaño y BC.

La figura 15 muestra que existe correlación significativa ($>0,6$) entre BC y partículas hasta $0,615 \mu\text{m}$, sobre este tamaño de partículas, la correlación con BC disminuye,

Distribución de partículas glaciar Bello



Distribución de partículas glaciar Olivares Alfa

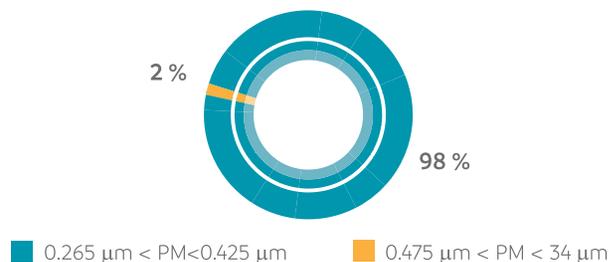


Figura 13: Distribución porcentual por tamaños de material particulado

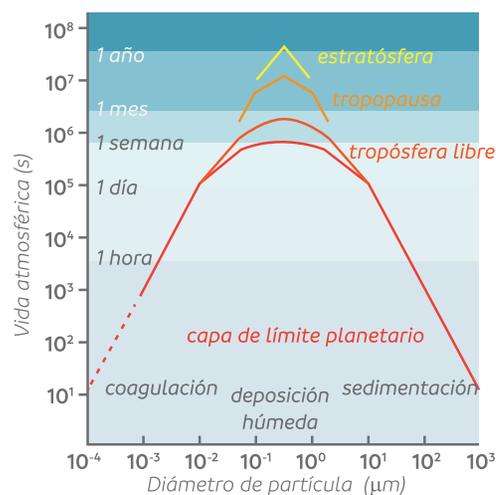


Figura 14: Tiempo de vida media del material particulado v/s tamaño de partículas entre 10^{-4} y $10^3 \mu\text{m}$. Se puede observar que el máximo de vida media (semanas a años) se encuentra en las partículas entre 0,1 y $1 \mu\text{m}$ de diámetro aerodinámico, el que puede llegar hasta la estratósfera.

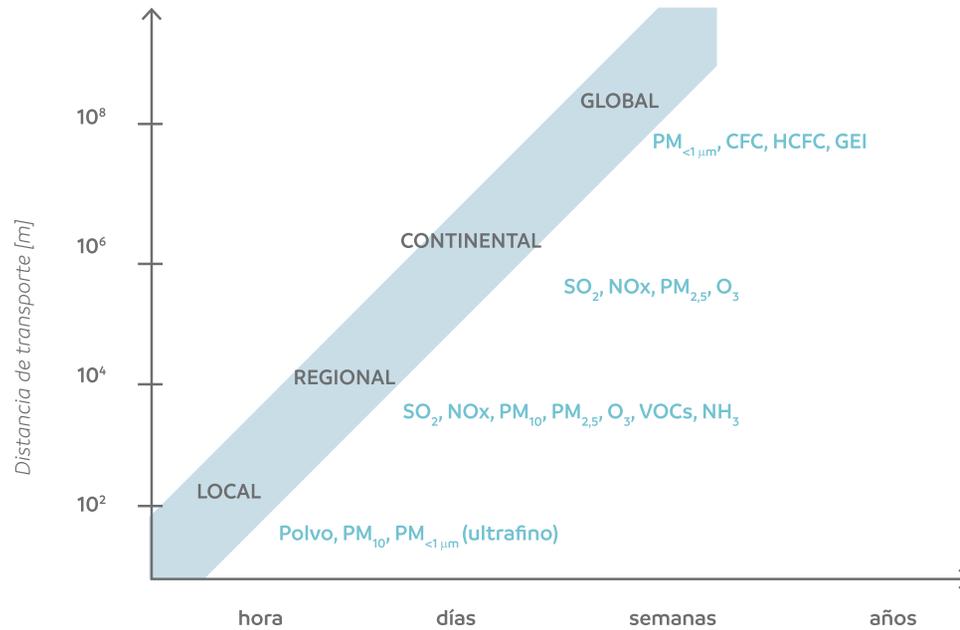


Figura 15: Distancia de transporte desde la fuente [m] v/s tiempo de residencia en la atmósfera para distintos contaminantes del aire, se aprecia que el $PM_{1,0}$ puede alcanzar grandes distancias y puede tener impactos globales con tiempos de permanencia de semanas a años en la atmósfera.

CFC: Cloro-Fluor- Carbono

VOCs: Compuestos Orgánicos Volátiles

HCFC: Hidroclorofluorocarburos, GEI: Gases De Efecto Invernadero

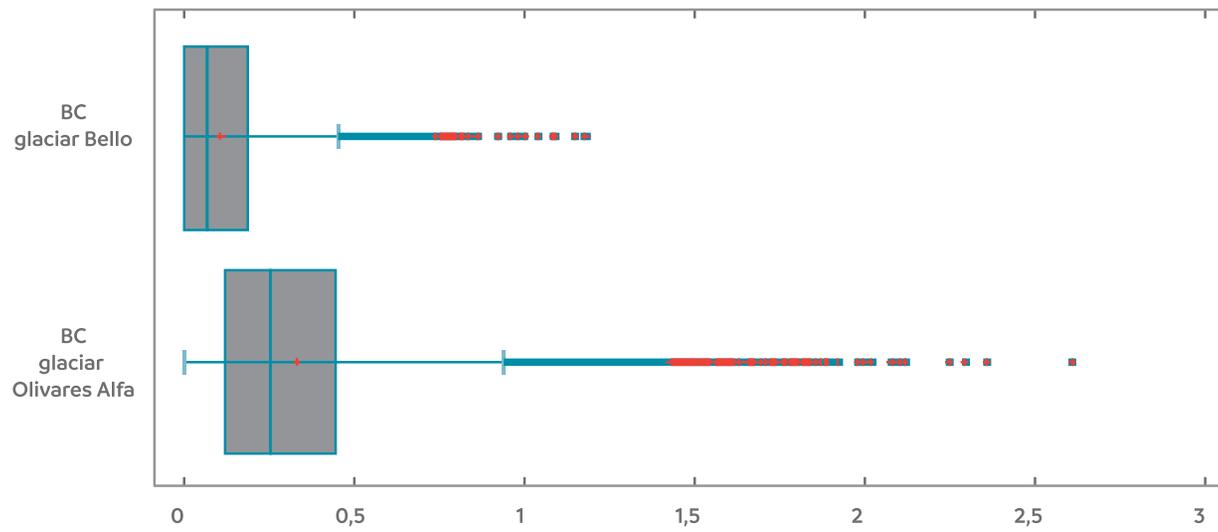


Figura 16: Diferencia de concentración de BC entre glaciar Olivares Alfa y glaciar Bello.

indicando que el Black Carbon observado en el glaciar Olivares Alfa está asociado a partículas finas. Este hecho es un indicativo de que las fuentes de BC corresponderían principalmente a fuentes de combustión, lo que sumado a que tanto BC como partículas provendrían de la misma fuente (actividad minera extractiva en cordillera) hace presumible que el BC observado en el glaciar Olivares Alfa pudiese ser producido por la maquinaria que utiliza motores de combustión interna en la faena minera ya que es la fuente de partículas y BC más cercana que se puede observar en esta zona de alta montaña.

La concentración de Black Carbon observada en los glaciares en estudio fue comparable a los registrados en otros lugares remotos del mundo, como es la Antártica y en la cordillera de Los Alpes. Tomando como referencia la concentración de BC obtenida en el glaciar Olivares Alfa, se calculó su diferencia porcentual respecto del glaciar Bello y de otros sitios en el mundo resultados que se observan en la figura 14.

En la figura se observa que el glaciar Bello presentó una concentración de Black Carbon 63,3% menor que en el glaciar Olivares Alfa, así mismo, la estación McMurdo ubicada en la costa antártica presenta concentraciones de Black Carbon 51,3% menores a la registrada en el glaciar Olivares Alfa, y por último la región de Sonnblick ubicada en los Alpes Austriacos en Los Alpes, presenta valores de BC 18,4% menores a la concentración del glaciar Olivares Alfa.

Estos resultados ponen en contexto la alta concentración de Black Carbon observada en el glaciar Olivares Alfa cuya única fuente cercana observada la constituye la actividad minera cordillerana antes mencionada.



Figura 17: Ubicación de glaciar Olivares Alfa y dirección predominantes de los vientos durante la campaña de monitoreo.

Es importante considerar que el material particulado que contiene BC, es capaz de depositarse en los glaciares, oscureciendo su superficie. Este fenómeno provoca que el glaciar absorba mayor cantidad de radiación solar, acelerando su derretimiento y modificando en consecuencia su albedo.

ALBEDO

Un buen parámetro para evaluar el impacto de la deposición de material particulado, en especial BC sobre los glaciares es la medición de su capacidad de reflexión de radiación solar (albedo) ya que mientras más blanca sea la superficie del glaciar (más limpia) su albedo será mayor.

Por lo tanto, utilizando un radiómetro capaz de medir la radiación solar incidente y reflejada (Net Radiometer CNR4, Kipp & Zonen) se determinó la capacidad de reflexión de radiación solar de ambos glaciares estudiados. Este instrumento se instaló obviamente en las mismas estaciones donde se han medido todos los parámetros anteriores en paralelo.

Coeficiente de correlación Bc v/s Número de Partículas GOA

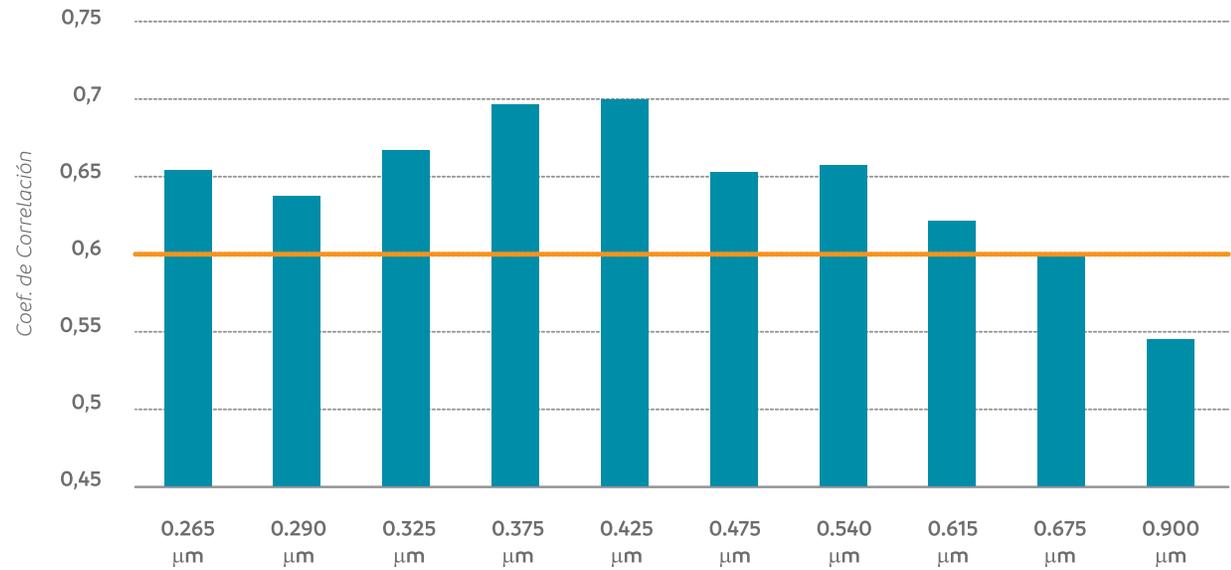


Figura 13: Correlación Black Carbon v/s número de partículas para distintos tamaños de partícula medidos (0,265-0,900 µm) en glaciar Olivares Alfa

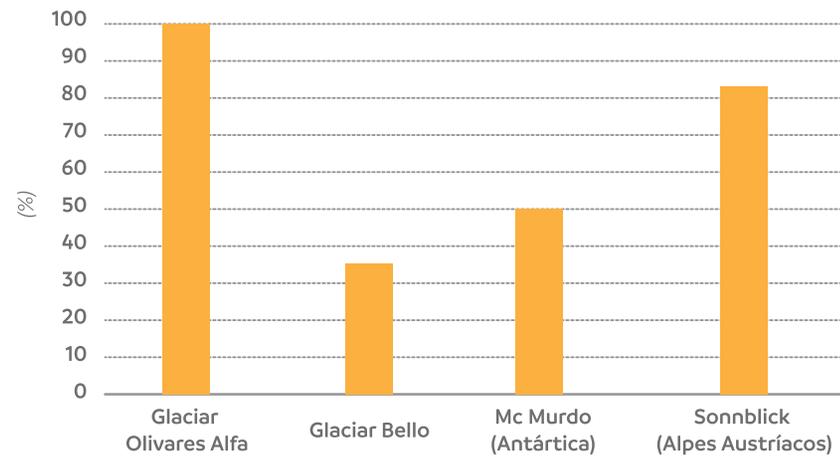


Figura 14: Comparación porcentual (%) de BC en distintas partes del mundo basado en su concentración medida en el GOA , a la cual por ser la mayor, se le ha asignado el valor del 100%.

Como se muestra en la Figura 15, los resultados indicaron que en el glaciar Olivares Alfa el 60% de la radiación solar es reflejada, mientras que en el glaciar Bello el 80% de la radiación es reflejada hacia la atmósfera, en otras palabras el GOA absorbe el doble de radiación incidente respecto del GB, calentándose más rápidamente y por ende incidiendo en su derretimiento de la misma forma. En términos de albedo se puede entonces deducir que el albedo del GB es el doble del GOA, indicando en palabras simples que este último está más “sucio” que el GB. Estos resultados, junto con la concentración atmosférica de material particulado y Black Carbon, indicaron que el glaciar Olivares Alfa se encuentra más impactado por la deposición de contaminantes presumiblemente debido a la actividad minera cercana al glaciar.

Con la finalidad de tener mayor evidencia sobre el fenómeno antes descrito se realizaron análisis adicionales, como la caracterización química de la nieve de ambos glaciares, determinándose iones mayoritarios (NH_4^+ , NO_3^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Cl^- , Na^+ y metales pesados (Cr, Cu, Zn, As, Cd, Pb, Sb, Fe, Al y Hg) característicos de fuentes antrópicas y naturales.

ANÁLISIS DE IONES MAYORITARIOS

Durante las campañas de monitoreo de los glaciares Bello y Olivares Alfa, se llevó a cabo la toma de muestras de nieve tanto superficial así como profunda (calicatas).

El muestreo de nieve superficial se llevó a cabo con el fin de determinar la cantidad de contaminantes como por ejemplo iones y elementos traza que se depositan sobre los glaciares en estudio. El muestreo se realizó siguiendo la siguiente metodología:

- Se demarcó un área de alrededor de 10 m² en las cercanías de la calicata de donde se seleccionaron 3

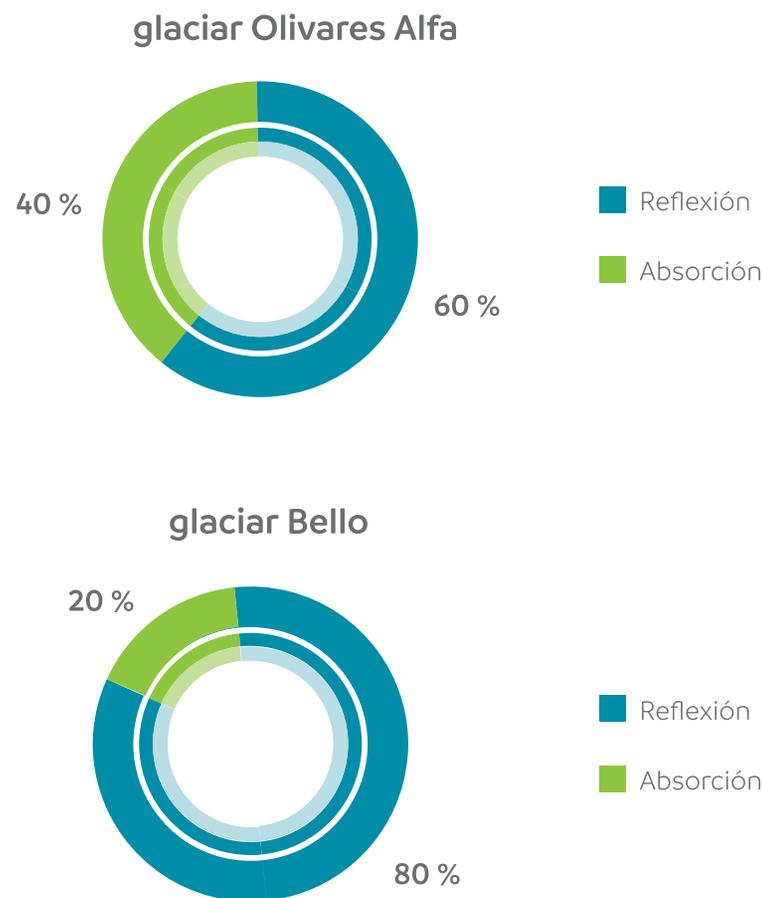


Figura 15: Cálculo porcentual de la radiación absorbida v/s la reflejada en cada uno de los glaciares estudiados. Este gráfico entrega información sobre el efecto de los aerosoles sobre el albedo de la nieve de estos glaciares.

puntos de 1 m² para la toma de muestras de nieve superficial, teniendo las mismas precauciones que para la selección del sitio de la calicata

- En cada punto de muestreo de nieve superficial se midió un cuadrado de 1 m x 1 m, se excavaron los primeros 5 cm de nieve con una pala plástica previamente lavada y acondicionada
- La nieve excavada se homogenizó y se almacenó en bolsas estériles Whirlpack (USA) de 2 L de capacidad previamente etiquetadas
- Posteriormente las muestras separadas en bolsas se almacenaron en cajas especiales para transporte de aislapol de alta densidad de 100 L de capacidad (procedencia alemana) y fueron transportadas al laboratorio para su especiación química

Determinación de Iones en Nieve Superficial

Las muestras obtenidas de nieve superficial se sometieron a análisis de iones inorgánicos Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, Na⁺, NH₄⁺, K⁺, Mg²⁺ y Ca²⁺, los cuales se determinaron y cuantificaron mediante cromatografía iónica en un cromatógrafo iónico 850 Professional IC de Metrohm, Suiza, que permite llevar a cabo separaciones isocráticas con detección por conductividad.

Una vez determinada la concentración de iones en las muestras de nieve se pudo calcular su enriquecimiento sobre la superficie de los glaciares de estudio, entendiéndose por enriquecimiento a la presencia de iones en cantidades por sobre lo que debería haber naturalmente. Los resultados de factores de enriquecimiento calculados se observan en la tabla.

$$FE = \frac{([x] \text{ nieve} / [Na^+] \text{ nieve})}{([x] \text{ mar} / [Na^+] \text{ mar})}$$

FE < 2: Deficiencia o mínimo de enriquecimiento

FE ~ 2- 5: Moderadamente enriquecido

FE ~ 5-20: Significativamente enriquecido

FE ~ 20-40: Alto enriquecimiento

FE > 40: Extremadamente enriquecido

Tabla 02. Comparación de los FE de los glaciares estudiados respecto de otros glaciares del mundo, según bibliografía a pié de pagina.

Glaciar/ion	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
Glaciar Bello*	8,9	44,7	1,0	55,04	5,40	805,0
Glaciar Olivares Alfa*	2,2	25,8	1,0	18,28	3,2	97,2
Mercedario**, San Juan Argentina	0,45	18,58	1,0	3,10	1,67	38,02
Esmeralda**, Cerro El Plomo, RM	1,40	95,74	1,0	4,16	5,30	165,40
Tapado**, IV Región	1,02	45,59	1,0	10,58	1,87	138,23
Marinelli*** Tierra del Fuego, XII región	1,01	2,41	1,0	2,81	0,93	1,97

*nuestro estudio,

**Bolius et al 2006

***Grigholm et al 2009.

Los factores de enriquecimiento (FE) calculados indicaron que sulfato (ion asociado a actividad antropogénica principalmente) se encuentra altamente enriquecido en los glaciares Bello y Olivares Alfa, potasio que es un ion asociado a la quema de biomasa se encuentra extremadamente enriquecido en el glaciar Bello y significativamente enriquecido en el glaciar Olivares Alfa y por último calcio se encuentra extremadamente enriquecido en ambos glaciares estudiados. Los resultados indican que hay deposición de iones por influencia natural y antropogénica en ambos glaciares estudiados, dado sus niveles de enriquecimiento. Por una parte el gran enriquecimiento de Ca²⁺, podría estar asociado a la deposición de material crustal proveniente de las morrenas y sitios descubiertos del glaciar; por otra parte, y según

este análisis, pareciera que el glaciar Bello recibe aportes antrópicos mayores que el GOA, pero de naturaleza muy distinta a la de este último, muy probablemente asociados a fuentes de fundiciones metálicas (SO₄²⁻) o quema de leña (K⁺), sin embargo y como se ha visto, este tipo de contaminación no afecta importantemente su albedo, dado que el albedo del GB es el doble del GOA, indicando en palabras simples que este último está más “sucio” que el GB.

Finalmente la tabla 02 muestra una comparación de los FE de los glaciares estudiados respecto de otros glaciares del mundo, indicando que el GOA y GB poseen niveles de enriquecimiento para sulfato que son menores al encontrado en el glaciar Esmeralda en el Cerro el Plomo,

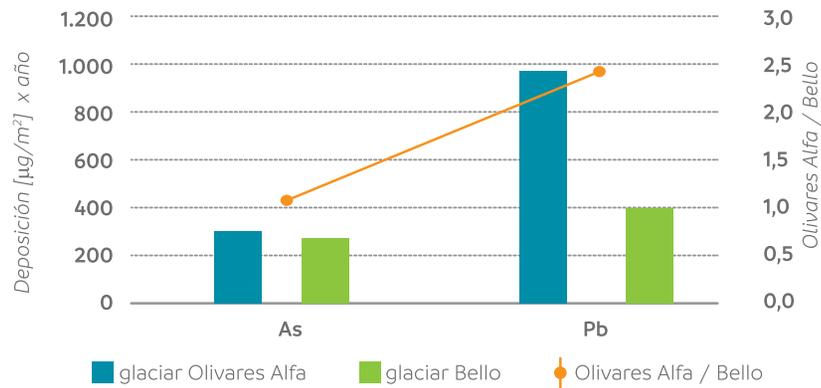
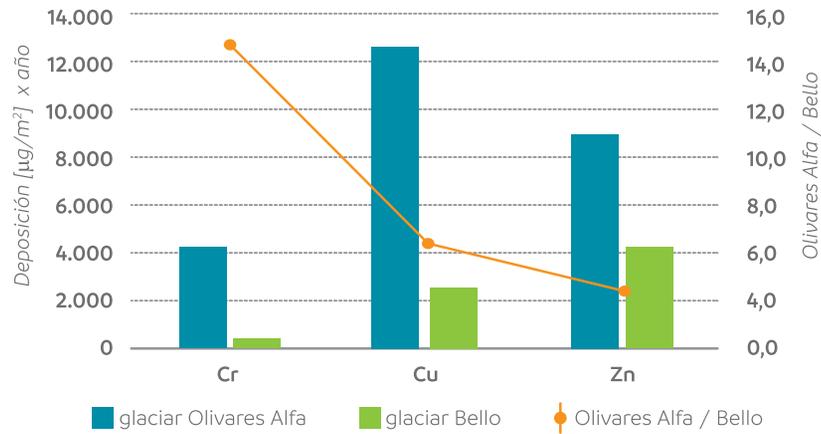


Figura 16a: Taza de deposición anual de elementos en glaciares estudiados

lugar claramente mucho más cerca de la ciudad de Santiago en la Región Metropolitana, lo que es una clara evidencia de su origen antropogénico. Por el contrario en el glaciar Marinelli en Tierra del Fuego, prácticamente no hay enriquecimiento, lo cual es una evidencia de su condición de prístino, sin fuentes antrópicas cercanas. A excepción del glaciar Marinelli, que es un glaciar costero, todo el resto de los glaciares continentales están desde significativa a extremadamente enriquecidos en calcio, lo que da cuenta del aporte crustal que reciben estos glaciares, muy probablemente por la acción erosiva del viento y otras variables ambientales sobre las morrenas y roca desnuda de la alta cordillera.

DETERMINACIÓN DE ELEMENTOS TRAZA EN NIEVE SUPERFICIAL

Las muestras de nieve superficial tomadas como se describió en el punto anterior, fueron sometidas a análisis de especiación química, determinando la concentración de elementos traza mediante Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS), utilizando un equipo ELAN DRC II, Perkin Elmer, USA. Se determinó la concentración Cr, Cu, Zn, As, Cd, Pb, Sb, Fe, Al y Hg en las muestras de nieve superficial lo que permitió calcular su tasa de deposición anual por metro cuadrado en cada glaciar estudiado cuyos resultados se muestran en la siguiente figura.

Como se aprecia en la figura, la deposición de elementos asociados a actividad antropogénica como: Cr, Cu, Zn, As, Cd, Pb, Sb y Hg, corresponden a elementos típicamente asociados a la extracción de minería metálica y presentaron una mayor tasa de deposición anual en el glaciar Olivares Alfa en comparación al glaciar Bello. Por otro lado, los elementos crustales Fe y Al mostraron un

comportamiento opuesto, siendo mayor su deposición en el glaciar Bello, lo que es concordante con el importante enriquecimiento del ión Ca^{2+} encontrado en este glaciar, reforzando el origen crustal del material particulado depositado en la nieve del GB⁽⁶⁰⁾. Estos resultados son concordantes con las respectivas fuentes cercanas a ambos glaciares, mientras el glaciar Olivares Alfa se encuentra próximo a la zona de explotación minera de cordillera, el glaciar Bello está ubicado 45 Km mas al sur, recibiendo un menor impacto del material particulado generado en las cercanías del GOA. Por otra parte, el GOA dado el perfil de elementos que presenta en la nieve, podría afirmarse que la mayor tasa de deposición de elementos antropogénicos observada en este glaciar, podría deberse a la influencia de la actividad minera cordillerana cercana a éste.



foto que muestra desde un sobrevuelo en helicóptero el rajo de la explotación minera en el cordón montañoso del glaciar Olivares Alfa, donde se aprecia gran cantidad de material particulado emitido a mas de 4.500 m.s.n.m., directamente desde este lugar por la actividad de la minera

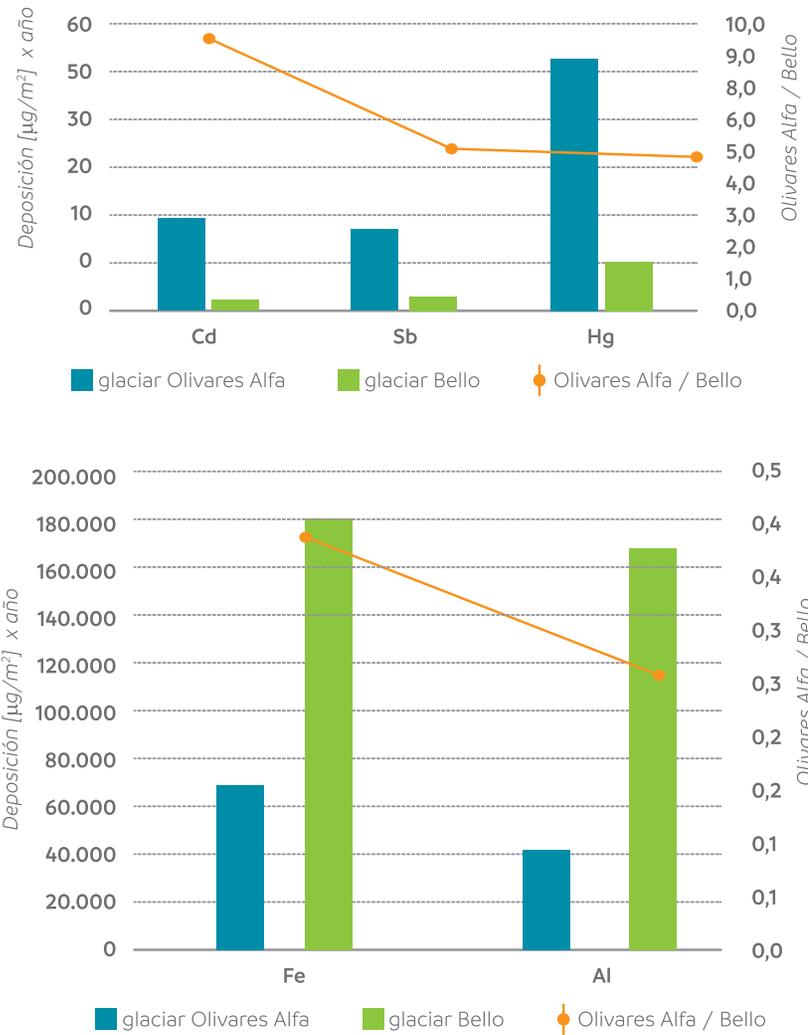


Figura 16b: Taza de deposición anual de elementos en glaciares estudiados







Difusión

Entre las actividades de difusión de proyecto NUNATAK-CHILE se destaca una exposición montada en la estación Baquedano del metro de Santiago que simuló las condiciones de trabajo durante una campaña científica en los glaciares, a través de información sobre éstos, por medio de microvideos, el desarrollo de una plataforma web, folletos e información de prensa escrita y web que presentó una importante oportunidad para que la comunidad conozca y se acerque a las enormes potencialidades que ofrece nuestro país para la investigación y el trabajo científico en especial en sus diferentes laboratorios naturales como los son las montañas y sus glaciares.

Esta exposición permaneció abierta a todo el público, de manera gratuita, entre el 4 y el 9 de julio del 2014 de 10 a 18 horas. Solo esta exposición del proyecto que se realizó en el metro acercó la ciencia a cerca de 2,4 millones de pasajeros diarios que circulan por el metro, haciendo conciencia de la importancia de estudiar la contaminación atmosférica y sus efectos sobre la criósfera, impactando las zonas de nieve de montañas y sus glaciares, estimulando y resaltando la necesidad de estudiar esta parte de nuestro país, sobre todo para comprender los efectos del retroceso de los glaciares y su impacto sobre el efecto invernadero y el cambio climático global.

Otra atractiva exhibición se produjo en otro punto urbano de alta afluencia de público, como es el Museo Interactivo Mirador (MIM), donde el público pudo conocer la importancia de los glaciares en nuestra geografía y la complejidad que significa realizar investigaciones en entornos glaciares, los instrumentos y el equipamiento utilizados y tener un contacto directo con los científicos del Centro de Tecnologías Ambientales (CETAM), demostrando que la ciencia puede ser apasionante, con visos de aventura y riesgo. Cientos de estudiantes de colegios de Santiago y de otros puntos del país que visitaron el MIM, se encontraron en esa oportunidad con esta exposición interactiva adicional que les permitió adentrarse en el mundo de la criósfera y de la química ambiental.

Para completar el material que se exhibía en estas distintas acciones de difusión, se generó un inédito material consistente en un video interactivo de aproximadamente 4 minutos, denominado “Tour por los glaciares de Chile”, un recorrido virtual por los glaciares del país que va describiendo los distintos cuerpos glaciares, incluyendo los denominados rocosos, de montaña, de valle y de efluente, así como las más importantes



Detalle del montaje de la exposición en el metro Baquedano, donde se recreó un ambiente glacial y antártico, con la carpa y los instrumentos usados en las expediciones

Como se aprecia en las fotos en ambas exposiciones se utilizó un creativo juego de luces led que recrea el ambiente glacial, para llamar la atención del público



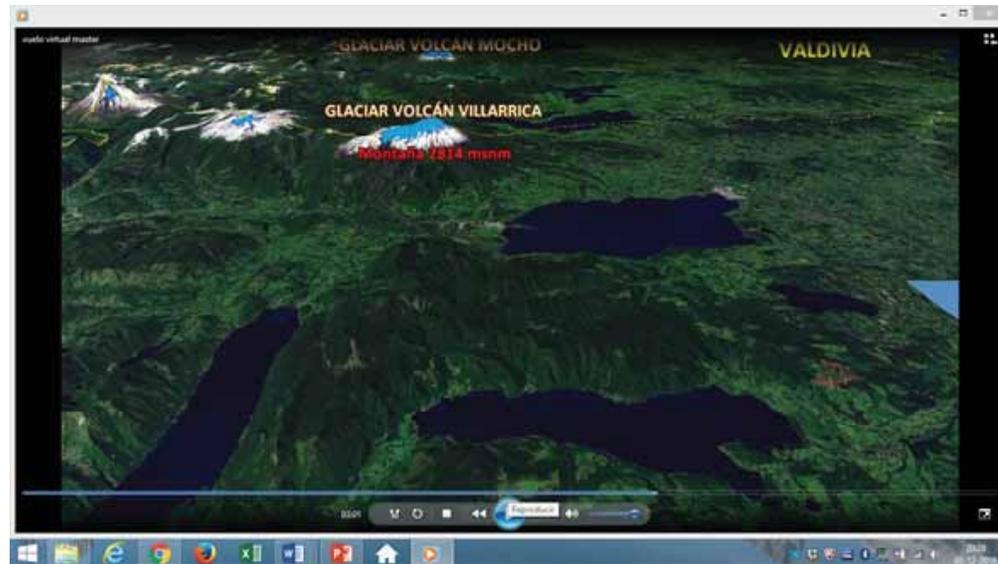
Detalle del montaje de la exposición en el MIM, donde se aprecia la promoción de los videos interactivos rotativos y los instrumentos y equipamiento usados en las expediciones

cumbres del territorio nacional, comenzando por la zona norte y terminando en la zona austral, incluyendo los campos de hielo patagónicos. Este video está basado en la información detallada que al respecto recopiló el catastro de glaciares realizado por la Unidad de Glaciares y Nieves de la Dirección General de Aguas del Ministerio de obras Públicas, documento que se editó y publicó en Febrero del 2014 y que por primera vez recoge y sistematiza el trabajo de muchos años de recopilación y levantamiento que ha realizado el MOP en la cordillera de los Andes. Para la realización del video se utilizaron las coordenadas geográficas de la ubicación de cada uno de estos cuerpos glaciares entregadas en el inventario de glaciares del MOP, los cuales se ingresaron sobre la plataforma de internet y herramienta de posicionamiento geográfico de google earth, de forma de poder realizar luego una animación computacional que permite generar un film virtual que simula un viaje en helicóptero por sobre los glaciares y la cordillera de los Andes.

A continuación se muestran imágenes de pantallas tomadas directamente desde el video, comenzando por la zona norte y terminando en la zona austral

Adicionalmente al video se desarrolló un folleto explicativo que da a conocer los principales aspectos de desarrollo del proyecto NUNATK, el cual fue entregado al público en cada una de las exposiciones antes mencionadas. Este folleto consta de 8 mini-páginas en un formato de pequeña encuadernación, en el que se tratan temas como: que es un glaciar, cuál es su importancia, donde están ubicados, cuales son los glaciares de Chile, que es un laboratorio natural, que es un Nunatak y en que consiste este proyecto, quien es CETAM-UTFSM y en que consiste el programa Chile Laboratorios Naturales. A continuación se muestran las páginas del folleto antes mencionado.





imágenes de pantallas tomadas directamente desde el video, comenzando por la zona norte y terminando en la zona austral



¿Qué son los glaciares?

Los glaciares son grandes masas de hielo que se forman paulatinamente por la acumulación, compactación y re-cristalización de la nieve caída en los lugares más fríos de la superficie terrestre.



¿Cuál es su importancia?

Los glaciares son parte importante de la criósfera (superficie de la Tierra en donde el agua está en estado sólido), junto con las grandes masas de hielo de los polos, representando el 75% del reservorio de agua dulce del planeta. En Chile el 70% de la población obtiene de aquí el agua que consume. Asimismo son importantísimos para el mantenimiento del clima global.



Ubicación de los glaciares

Los glaciares se encuentran en zonas cercanas a los polos y en la parte alta de las montañas; como por ejemplo, en Groenlandia y la Antártica, o en las Cordillera de Los Himalayas o de Los Andes.



Los glaciares de Chile

Los glaciares en Chile están estrechamente relacionados a la latitud y altitud del territorio.

En el extremo norte se ubican por sobre los 6.000 metros de altitud, en los conos de las montañas; mientras que en la zona austral o Patagonia y Antártica, es posible encontrar grandes masas que alcanzan hasta el nivel del mar.



Detalle de las 8 páginas del mini-folleto que se elaboró para entregar información sobre el proyecto en las distintas exposiciones realizadas.



¿Qué es un Laboratorio Natural?

Un laboratorio natural es un objeto de estudio territorialmente localizado, con dos características básicas: presentar condiciones o atributos naturales únicos o muy particulares respecto del mundo; y constituir un espacio abierto y privilegiado para la investigación científica. Se trata de un atractivo para la ciencia nacional e internacional, que busca revelar las oportunidades de investigación únicas que ofrece nuestro país.

¿Qué es un Nunatak?

La palabra Nunatak es originaria del idioma inuit, lengua nativa de los esquimales de Alaska, Canadá y Groenlandia. Es un afloramiento rocoso o isla en medio de un campo de hielo, que puede estar o no cubierto de vegetación. Por ejemplo, el del Glaciar Grey, en Patagonia.

¿Qué es el proyecto Nunatak?

El proyecto Nunatak es un esfuerzo conjunto entre el Centro de Tecnologías Ambientales (CETAM) de la Universidad Técnica Federico Santa María y el programa EXPLORA CONICYT. "Nunatak Laboratorio Natural sobre Contaminación Glaciar", es uno de los proyectos ganadores del primer Concurso Nacional de Apoyo a Actividades de Divulgación "Chile: Laboratorio Natural".

La iniciativa busca divulgar la actividad científica que se realiza en los glaciares chilenos mediante acciones de comunicación atractivas que promuevan la generación de conciencia medioambiental y la protección de los glaciares.

Nunatak

Centro de Tecnologías Ambientales (CETAM)

Este Centro realiza investigación en Ciencias Ambientales, aplicando Ciencia e Ingeniería para el desarrollo de tecnologías innovadoras e integrales para abordar desafíos ambientales actuales asociados a la contaminación, agua y energía; vinculando a la UTPSM con el mundo gubernamental y empresarial, contribuyendo con la transferencia tecnológica para dar soluciones creativas a la problemática medioambiental.

Chile: Laboratorio Natural

Es un Proyecto que busca posicionar al país como una potencia a nivel mundial, y un proveedor de laboratorios naturales para el desarrollo de proyectos de Ciencia y Tecnología, debido a la múltiple variedad de ecosistemas, microclimas y escenarios de distintas características.



Acciones comprometidas

- Exposición itinerante (Región de Valparaíso y Santiago)
- Sitio web
- 5 microdocumentales
- Información de prensa
- Folleto

Julio-octubre 2014



Monitoreo Glaciar Grey.

Conoce más del proyecto en nunatak.usm.cl

CETAM



Reseña

Desde hacía tiempo que varios de los investigadores del Centro de Tecnologías Ambientales (CETAM- UTFSM) que disfrutaban de la naturaleza y el trabajo de campo mirábamos hacia las montañas como nuestro próximo derrotero científico, sin embargo sabíamos por experiencia propia que el camino no sería fácil y nos encontraríamos con muchas dificultades logísticas, técnicas instrumentales y de capacidades humanas. La literatura científica respecto de la química y física de la criósfera en esta parte del mundo y en particular de la cordillera de los Andes, la cordillera más larga del mundo, era y sigue siendo muy escasa. Esto, por una parte nos alentaba a descubrir en un mundo poco explorado, pero a la vez nos pronosticaba mucha incertidumbre y dificultades por resolver. Éramos conscientes también de la importancia estratégica que tienen y tendrían esos cuerpos glaciares en el futuro de los ecosistemas de montaña, de la biodiversidad, de los servicios ecosistémicos y principalmente del agua que suministran estos glaciares a los más de 85 millones de personas de 7 países de Latinoamérica que dependen y habitan en el entorno de la cordillera de los Andes. Esto sin considerar la importancia cultural, etnográfica y la cosmovisión que estas montañas representan para sus habitantes, no solo para Latinoamérica, sino para toda la humanidad.

Con esta visión, en el año 2002 nos decidimos a emprender una aventura que nos proyecta al día de hoy y nos permite escribir esta breve reseña de lo que ha sido esta emocionante y apasionante experiencia. Nuestra primera expedición se realizó el año 2003 en el glaciar del cerro el Plomo muy cercano a la región Metropolitana y

fue realizada en conjunto con colegas del Paul Scherrer Institute, Zürich, el Centro de investigación suizo más grande e importante de este país. El grupo suizo fue liderado por la Dra. Margit Schwikowski, Directora del Labor für Radio- und Umweltchemie, experta de reconocido prestigio a nivel mundial en el área de testigos de hielo y paleoclimatología. En esta expedición, tomamos nuestras primeras muestras de nieve y probamos los primeros equipos para monitorear aerosoles. Luego de esto decidimos continuar nuestras campañas en el sector de cerro Colorado y La Parva (≈ 3.000 msnm), dos centros de sky también cercanos a la Región Metropolitana (RM), con la finalidad de evaluar y detectar la huella dactilar química del transporte de contaminantes atmosféricos (gases y partículas) y su influencia respecto al derretimiento progresivo de los glaciares de montaña y su impacto sobre el cambio climático a escala local y global. La ventaja de estos lugares es que son de fácil acceso y nos han permitido desarrollar campañas sistemáticas desde entonces para poder evaluar efectos a largo plazo, con la intención de evaluar nuestras hipótesis de investigación.

Posteriormente, nuestra curiosidad nos llevó a explorar nuevos horizontes y desde entonces hemos desarrollado variadas campañas a lo largo de los Andes, explorando una transecta de norte a sur del país, como son los glaciares: Tupungatito, Echaurren, Olivares Alfa y Bello en la RM; Juncal y Portillo en la V región; Nevados de Chillán (VIII Región); Volcán Villarrica (IX Región); Volcán Mocho Choshuenco (XIV Región); y Glaciar Grey, en la Patagonia; finalmente la plataforma Larsen C, y los Glaciares La Paloma y La Clavere, en la Península Antártica. La información obtenida en estas campañas está generando una base de datos longitudinal del fenómeno de la deposición de aerosoles sobre la nieve y su impacto sobre las superficies blancas del planeta (glaciares), única

en el país y en el mundo, permitiendo determinar el origen de estos aerosoles, ya sea antropogénico (procesos de combustión procedentes de fuentes móviles o fijas originarias de las ciudades) y/o naturales (erupciones volcánicas, incendios forestales, entre otras).

Esta investigación sin precedentes tiene como objetivo mejorar la comprensión de los fenómenos asociados a la deposición de aerosoles en la nieve de los glaciares de los Andes hasta la Antártica, permitiendo evaluar los fenómenos de transporte de contaminantes hasta las cumbres de los glaciares. Las partículas que contienen estos aerosoles al depositarse sobre la nieve absorben mayor radiación solar, calentándose, acelerando la ablación y el retroceso de los glaciares, modificando finalmente el albedo e impactando el clima global. Por primera vez y directamente sobre estos glaciares se midió en tiempo real, la concentración de BC y partículas PM₁₀, PM_{2.5}, PM_{1.0} y su distribución por tamaño entre 0,26 a 34 μm en 31 canales diferentes, meteorología y albedo total; complementado con especiación química en muestras de nieve superficial y profunda (pozos de nieve), donde se determinaron pH, conductividad y la concentración de iones, elementos y contaminantes orgánicos como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) y alifáticos, ácido metanosulfónico (AMS), entre otros, presentes en la fase sólida (PM) y líquida de la nieve, así como en los aerosoles; todos estos compuestos químicos pueden ser usados para la asignación de fuentes de estos contaminantes, permitiendo de esta forma evaluar el impacto de la contaminación causada por partículas y aerosoles atmosféricos (naturales y antropogénicos), su influencia en el cambio climático y las reservas de agua de montaña en los glaciares de los Andes de Chile.

La última etapa en la que nos encontramos y que ha dado origen a esta monografía, es la realización del proyecto

NUNATAK. Un “nunatak”, palabra esquimal en idioma inuit, corresponde a un emplazamiento rocoso situado en medio de un glaciar o campo de hielo. En ese sentido, el proyecto “NUNATAK-CHILE, Primer Laboratorio Natural sobre Contaminación Glaciar y Cambio Climático: Levantamiento de Línea de Base”, hace uso de una analogía con dicho término para denominar a un “refugio científico”, es decir una infraestructura apropiada que permita proporcionarle habitabilidad a los científicos y seguridad a los instrumentos, sorteando las adversidades climáticas en las zonas donde se ubican los glaciares, cuya función científica es que los monitores orientados a medir la contaminación en estos lugares de condiciones climáticas extremas, puedan tener una permanencia en el tiempo, sistematizando y comparando así los datos generados. Tomando esto en consideración se ha desarrollado un Laboratorio-Refugio, que se proyecta como una plataforma científica transportable de monitoreo ambiental para zonas extremas, re-ubicable según el interés del objetivo de investigación, que permite el levantamiento de líneas de base sobre contaminación en glaciares y ecosistemas de montaña, para evaluar los impactos actuales y futuros sobre el Cambio Climático a nivel local y global. Se espera que este Laboratorio-Refugio permita atraer científicos, estudiantes y tomadores de decisiones tanto nacionales como internacionales para realizar investigaciones en los temas antes expuestos, permitiendo evidenciar in situ los efectos de la actividad antropogénica sobre las zonas glaciares y su impacto sobre el cambio climático.

Como se ha podido observar en esta monografía, inicialmente y durante el período 2016-2017, el NUNATAK estará instalado en Portillo con la finalidad de probar todos los equipos y la instalación del suministro de energía, así como para evaluar en esta primera etapa

el impacto sobre la nieve de los aerosoles atmosféricos emitidos por las fuentes móviles asociadas al gran tráfico de vehículos livianos y pesados que transitan entre Chile y Argentina por el paso fronterizo de Los Libertadores ubicado en el sector de Portillo. Cabe destacar, que actualmente no existen en América Latina otros laboratorios naturales de similares características a las del proyecto Nutanak y que cuenten con patrocinio, tanto público como privado, para llevar a cabo labores de investigación en zonas montañosas.

Esperamos que esta monografía cumpla la función de educar, sensibilizar y estimular a los tomadores de decisiones públicos y privados, a la comunidad en general, a los estudiantes y en especial a los niños de nuestro país, para enseñarles a cuidar, valorar y respetar nuestra cordillera de los Andes. No podremos cumplir nada de lo anterior si no conocemos y entendemos los fenómenos que ocurren en nuestra cordillera, por esto es importante continuar desarrollando e intensificando este proyecto, ya que a ellos les dejaremos como legado invaluable, las hermosas montañas que tanto caracterizan a nuestro país.

Dr. Francisco Cereceda Balic
Profesor Titular
Departamento de Química
Director Centro de Tecnologías Ambientales
Laboratorio de Química Ambiental
Universidad Técnica Federico Santa María
Avda. España 1680, Valparaíso, Chile
Tel: 56-32-2654-875 Secretaría / -686 Laboratorio
francisco.cereceda@usm.cl
www.nunatak.usm.cl





Agradecimientos

Los autores agradecen la colaboración de:

- Fondo de Protección Ambiental (FPA) del Ministerio del Medio Ambiente, Gobierno de Chile.
- Escuela de Alta Montaña del Ejército de Chile
- Unidad de Glaciares y Nieves de la Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile
- CRESCO Energías Renovables
- Escuela Nacional de Montaña
- Ilustre Municipalidad de Los Andes, Departamento de Medio Ambiente
- Fuerza Aérea de Chile, Refugio de Montaña El Colorado
- Ecocopter



Referencias Monografía

1. *Global glacier changes: facts and figures*. Word Glacier Monitoring Service, UNEP
2. *Inventario de Glaciares de Chiles*, DGA, MOP, Febrero del 2014
3. Rivera, A.; Casassa, G; Acuña C. and Lange, H. 2000. *Variaciones recientes de glaciares en Chile*. Revista de Investigaciones Geográficas, 34, 29-60.
4. Marangunic, C. 1979. *Inventario de Glaciares. Hoya del río Maipo*. Dirección General de Aguas, Publicación G-2, Santiago.
5. Valdivia P, 1984. *Inventario de Glaciares, Andes de Chile Central (32°-35° lat. S). Hoyas de los ríos Aconcagua, Maipo, Cachapoal y Tinguiririca. In: Jornadas de Hidrología de Nieves y Hielos en América del Sur*. Programa Hidrológico Internacional, Santiago de Chile 1 :6.1-6.24.
6. Rivera, A. 1989. *Inventario de Glaciares entre las cuencas de los ríos Bio Bio y Petrohue. Su relación con el volcanismo activo: Caso Volcán Lonquimay*. Memoria de Título, escuela de Geografía, Universidad de Chile, Santiago.
7. Rivera, A. and Acuña, C., 1997. *Variaciones recientes de Glaciares en la macrozona central de Chile. XVIII Congreso Nacional de Geografía*. Sociedad Chilena de Ciencias Geográficas, Santiago, 293-304.
8. Casassa, G.; Rivera, A.; Aniya, M. and Naruse, R. 2000. *Características glaciológicas del Campo de Hielo Patagónico Sur*. Anales Instituto Patagonia, Serie Ciencias Naturales, 28, 5-22.
9. Rivera, A. and Casassa, G. 2000. *Variaciones Recientes y Características de los glaciares Chico y O'Higgins, Campo de Hielo Sur*. En: IX Congreso Geológico Chileno, 2, 244-248.
10. Carrasco, J.; Casassa, G. and Quintana, J. 2005. *Changes of the 0°C isotherm in central Chile during the last quarter of the XXth Century*. Hydrological Sciences Journal, 50(6), 933-948.
11. Carrasco, J.; Osorio, R. and Casassa, G. 2008. *Secular trend of the equilibrium line altitude in the western side of the southern Andes derived from radiosonde and surface observations*. Journal of Glaciology, 54(186), 538-550.
12. Casassa, G. 1995. *Glacier Inventory in Chile: Current Status and Recent Glacier Variations*. Annals of Glaciology 21: 317-322.
13. Casassa, G.; Rivera A. and Carrasco J., 2000. *Glacier variations in the Southern Patagonia Icefield and their Relation with Climate*. En: Sixth International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography, 312-313.
14. Rivera, A.; Acuña C.; Casassa G. and Bown F. 2002. *Use of remotely sensed and field data to estimate the contribution of Chilean glaciers to eustatic sea-level rise*. Annals of Glaciology, 34, 367-372.
15. Braithwaite, R. 2002. *Glacier mass balance: the first 50 years of international monitoring*. Progress in Physical Geography 26(1), 76-95.

16. Ostrem, G. and Brugman, M. 1991. Glacier Mass-Balance Measurements. A manual for field and office work. Norwegian Water Resources and Energy Administration, Saskatchewan, 224 pp
17. Cogley, J.G.; Hock, R.; Rasmussen L.A.; Arendt, A.A.; Bauder, A.; Braithwaite, R.J.; Jansson P.; Kaser G.; Möller, M.; Nicholson, L.; and Zemp M, 2011, Glossary of Glacier Mass Balance and Related Terms, IHP-VII Technical Documents in Hydrology No. 86, IACS Contribution No. 2, UNESCO-IHP, Paris.
18. Benn and Evans, 1998. Glaciers and Glaciation. Arnold, Londres, 734 pp
19. Braithwaite, 1995. Positive degree-day factors for ablation on the Greenland ice sheet studied by energy-balance modelling. *Journal of Glaciology*, 41(137), 153-160.
20. Oerlemans, J. 2001. Glaciers and Climate Change. Wilco, Amsterdam, 148 pp
21. Lliboutry, L. 1956. Nieves y glaciares de Chile. Fundamentos de Glaciología. Ediciones de la Universidad de Chile, Santiago, 471 pp.
22. Warren, S.G. and Wiscombe, W.J. 1980. A Model for the Spectral Albedo of Snow. II: Snow Containing Atmospheric Aerosols. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 37(12), doi: 0022- 4928/80/122734-12: 2734-2745.
23. Vallero, D. 2008. Fundamentals of Air Pollution. Fourth edition, 967 pages. Academic Press is an imprint Elsevier, London, UK.
24. United State Environmental Protection Agency (EPA). 2012. Report to Congress on Black Carbon. Department of the Interior, Environment and Related Agencies Appropriations Act, 2010.
25. Organización Mundial de la Salud (OMS). 2003. Cambio climático y salud humana - Riesgos y respuestas. OMS Press, Ginebra, Suiza.
26. Seinfeld, J. and Pandis, S. 2006. Atmospheric Chemistry and Physics. Second edition, 1232 pages. Jhon Wiley & Sons, Inc.USA.
27. Climate Change 2001: Working Group I: The Scientific Basis. Chapter 5. Aerosols, their Direct and Indirect Effects (IPCC)).
28. Petzold, A.; Ogren J. A.; Fiebig M.; Laj P.; Li, S.-M.; Baltensperger U.; Holzer-Popp T., Kine S., Pappalardo, G.; Sugimoto, N.; Wehrli C.; Wiedensohler A. and Zhang X.-Y. 2013. Recommendations for reporting “black carbon” measurements. *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 8365–8379,
29. Bond, T. C.; Doherty, S. J.; Fahey, D. W.; Forster, P.; Berntsen M., De Angelo, T. B. J.; Flanner, M. G., Ghan, S.; Karcher, B.; Koch, D., Kinne, S.; Kondo, Y.; Quinn, P. K.; Sarofim, M. C.; Schultz, M. G.; Schulz, M.; Venkataraman, C.; Zhang, H.; Zhang, S.; Bellouin, N.; Guttikunda, S. K.; Hopke, P. K.; Jacobson, M. Z.; Kaiser, J. W.; Klimont, Z.; Lohmann, U.; Schwarz, J. P.; Shindell, D.; Storelvmo, T.; Warren, S. G. and Zender, C. S. 2013. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment, *J. Geophys. Res.*, 118, 5380–5552, doi:10.1002/jgrd.50171.
30. Hansen, J. and Nazarenko, L. 2004: Soot climate forcing via snow and ice albedos. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 101, 423-428, doi:10.1073/pnas.2237157100.
31. Ramanathan, V. and Carmichael, G. 2008. Global and regional climate changes due to black carbon, *Nat. Geosci.*, 1, 221–227, doi:10.1038/ngeo156.
32. Bond, T. C., Streets, D. G.; Yarber, K. F; S. M. Nelson, J.-H. Woo, and Z. Klimont (2004), A technology-based global inventory of black and organic carbon emissions from combustion, *J. Geophys. Res.*, 109, D14203, doi:10.1029/2003JD003697.

33. Schwikowski, M. and Eichler A. U. *Alpine Glaciers as Archives of Atmospheric Deposition*. In: Bundi Ed. U. *Alpine Waters*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag: 2010 PAG 141-150.
34. Schwikowski, M.; Brutsch, S.; Gaggeler H.W. and Schotterer U. 1999. *A high-resolution air chemistry record from an Alpine ice core: Fiescherhorn glacier, Swiss Alps*. *J. Geophys. Res.*, 104(D11), 13709–13719, doi:10.1029/1998JD100112.
35. Kaspari, D., Schwikowski, M. Gysel, G. Flanner, S. Kang, S. and Mayewski P. 2011. *Recent increase in black carbon concentrations from a Mt. Everest ice core spanning 1860–2000 AD*. *Geophysical Research Letters* 2011, 38, (L04703) doi:10.1029/2010GL046096,
36. Cereceda-Balic, F.; Palomo-Marín, M.; Bernalte, E.; Vidal, V.; Christie, J.; Fadic, X.; Guevara, J.; Miro, C.; Pinilla, E. 2012. *Impact of Santiago de Chile urban atmospheric pollution on anthropogenic trace elements enrichment in snow precipitation at Cerro Colorado, Central Andes*. *Atmospheric Environment*, 47 51-57.
37. Warren S. 1984 *Impurities in snow: effects on albedo and snowmelt*. (review) *Annals of Glaciology*
38. *Integrated Assessment of Black Carbon and Tropospheric Ozone*. UNEP and WMO 2011
39. *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Beijing, 2001.
40. Andreae, M.O., and Crutzen, P.J., 1997. *Atmospheric aerosols: Biogeochemical sources and role in atmospheric chemistry*. *Science* 276, 1052–1056.
41. Boucher, O. 2015. *Atmospheric Aerosols: Properties and Climate Impacts*. 307 pages. Springer Netherlands
42. Warren, S.G. and Wiscombe W.J. 1985. *Dirty snow after nuclear war*. *Nature*, Vol 313, No 6002, pp. 467-470.
43. Menon, S.; Koch, D.; Beig, G.; Sahu, S.; Fasullo, J. and Orlikowski D. (2010), *Black carbon aerosols and the third polar ice cap*, *Atmos. Chem. Phys.*, 10 (10), 4559-4571, doi: 10.5194/acp-10-4559-2010.
44. Ménéguez, M., Krinner; G., Balkanski; Y.; Cozic, A.; Boucher, O. and Ciais, P.; 2013. *Boreal and temperate snow cover variations induced by black carbon emissions in the middle of the 21st century*, *The Cryosphere*, 7, 537-554
45. Ménéguez, M.; Krinner, G.; Balkanski, Y.; Boucher, O.; Cozic, A.; Lim, S., Ginot, P.; Laj, P.; Gallée, H.; Wagnon, P.; Marinoni, A. and Jacobi, H.W. 2014. *Snow cover sensitivity to black carbon deposition in the Himalaya: from atmospheric and ice core measurements to regional climate simulations*, *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 4237-4249, doi:10.5194/acp-14-4237-2014,
46. Bonasoni P.; Cristofanelli P.; Marinoni A.; Pradhan B. B.; Fuzzi S.; Gobbi G.P.; Vuillermoz E.; Laj P. 2010. *High Concentration of Black Carbon Observed in the High Himalayas*. *Black Carbon e Bulletin Vol 2 N°2*.
47. Freitas, S. R.; Longo, K. M.; Silva Dias, M. A. F.; Chatfield R.; Silva Dias, P.; Artaxo P.; Andreae M. O.; Grell, G.L.; Rodrigues, F.; Fazenda, A. and Panetta J. 2009. *The Coupled Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System (CATT-BRAMS) – Part 1: Model description and evaluation*. *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 2843–2861.
48. Longo, K. M.; Freitas, S. R.; Andreae, M. O.; Setzer, A.; Prins, E. and Artaxo P. 2010. *The Coupled Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System (CATT-BRAMS). Part 2: Model sensitivity to the biomass burning inventories*. *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 5785–5795.
49. Mena-Carrasco, M.; Saide, P.; Delgado, R.; Hernandez, P.; Spak, S.; Molina, L.; Carmichael, G. and Jiang X. 2014. *Regional climate feedbacks in Central Chile and their effect on air quality episodes and meteorology*, *Urban Clim.*, 10, 771–781, doi:10.1016/j.uclim.2014.06.006.

50. Pereira, G.; Shimabukuro, Y. E.; Moraes E. C.; Freitas, S. R.; Cardozo F. S. and Longo K. M. 2011. *Monitoring the transport of biomass burning emission in South America*, *Atmos. Pollut. Res.*, 2(3), 247–254, doi:10.5094/apr.2011.031.
51. Rosario, N. E.; Longo, K. M.; Freitas, S. R.; Yamasoe, M. A. and Fonseca R. M. 2013. *Modeling the South American regional smoke plume: Aerosol optical depth variability and surface shortwave flux perturbation*, *Atmos. Chem. Phys.*, 13(6), 2923–2938, doi:10.5194/acp-13-2923-2013.
52. Vimeux, F.; Ginot, P.; Schwikowski, M.; Vuille, M.; Hoffmann, G.; Thompson, L. G. and Schotterer U. 2009. *Climate variability during the last 1000 years inferred from Andean ice cores: A review of methodology and recent results*. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 281, 229–241. doi:10.1016/j.palaeo.2008.03.05454.
53. Barnett, T.P.; Adam, J.C. and Lettenmaier, D.P. 2005. *Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions*. *Nature*, 438, 303–309.
54. Molina, L.; Gallardo, L.; Andrade, M.; Baumgardner, D.; Borbor-Córdova, M.; Bórquez, R.; Casassa, G.; Cereceda-Balic, F.; Dawidowski, L.; Garreaud, R.; Huneus, N.; Lambert, F.; McCarty, J.L.; McPhee, J.; Mena-Carrasco, M.; Raga, G.B.; Schmitt, C. and J.P. Schwartz. 2015. *Pollution and its Impacts on the South American Cryosphere*. *Earth's Future*, 3: 345–369.
55. Boliu, D.; Schwikowski, M.; Jenk, T.; Gäggeler, H.W. and Casassa, G. 2006. *A first shallow firn core record from Glaciar La Ollada on Cerro Mercedario in the Central Argentinean Andes*. *Annals of Glaciology*, 43: 14–22.
56. Eichler, A.; Gramlich, G.; Kellerhals, T.; Tobler, L. and Schwikowski, M. 2014. *Pb pollution from leaded gasoline in South America in the context of a 2000-year metallurgical history*. *Science Advances*, 1(2):1-8.
57. Schmitt, C. G.; All J. D.; Schwarz, J. P.; Arnott, W. P.; Cole, R. J.; Lapham, E. and Celestian A.. 2015. *Measurements of light-absorbing particles on the glaciers in the Cordillera Blanca, Peru*, *Cryosphere*, 9 (1), 331–340, doi:10.5194/tc-9-331-2015.
58. Jenk, T., Rivera, A.; Schindler, J. and Schwikowski M. 2013, *Air pollutants in snow from two Chilean glaciers*. Rep., Paul Scherrer Intitut.
59. Córdova, F. M.; Durán, C. A. and Galindo, R. 2015. *The Chilean medium-sized port companies in knowledge management: Diagnosis, challenges and trends*. *Procedia Computer Science*, 55: 1133-1142.
60. Grigholm, B.; Mayewski, Paul Andrew; Kurbatov, Andrei V.; Casassa, Gino; Staeding, A. Contreras; Handley, M.; Sneed, Sharon B.; and Introne, D. S., “*Chemical Composition of Fresh Snow from Glaciar Marinelli, Tierra Del Fuego, Chile*” (2009). *Journal of Glaciology*, Vol. 55, No.193, 2009.

