



REPÚBLICA DE CHILE  
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS  
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS  
UNIDAD DE GLACIOLOGÍA Y NIEVES  
REGIÓN METROPOLITANA

## **CARACTERIZACIÓN GLACIOQUÍMICA DE ELEMENTOS TRAZA EN MUESTRAS DE NIEVE**

REALIZADO POR:

CENTRO DE TECNOLOGÍAS AMBIENTALES  
DE LA  
UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA  
(CETAM - UTFSM)

S.I.T. N° 351

Santiago, diciembre 2014

## **MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS**

Ministro de Obras Públicas  
Ingeniero Comercial Sr. Alberto Undurraga Vicuña

Director General de Aguas  
Abogado Sr. Carlos Estévez

Jefe Unidad Glaciología y Nieves  
Dr. Gonzalo Barcaza S.

Inspector Fiscal  
Geóloga Sra. M<sup>a</sup> Belén Varela M.

### CENTRO DE TECNOLOGÍAS AMBIENTALES UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARIA.

Jefe de Proyecto  
Prof. Dr. Francisco Cereceda Balic  
Química Analítica Ambiental

Investigadores y profesionales  
Dr. en Química, Sr. Mario Funes H.  
Dr. (cand.) en Química, Sr. Javier Zúñiga R.  
Químico Industrial, Sr. Víctor Vidal C.  
Ing. Agrónomo, Sra. Ximena Fadic R.  
Ingeniero Ambiental, Sr. Juan Pablo Muñoz G.  
Químico Industrial, Sr. Julio Acuña A.  
Técnico Analista Químico, Sr. Cristián Reinoso A.  
Técnico Analista Químico, Sr. Patricio Llanos O.

## **ÍNDICE DE CONTENIDOS GENERALES**

I. RESUMEN EJECUTIVO .....	16
II. INTRODUCCIÓN .....	18
III. OBJETIVOS .....	21
IV. METODOLOGÍAS.....	22
V. RESULTADOS .....	32
VI. CONCLUSIONES .....	187
VII. BIBLIOGRAFIA .....	202
VIII. ANEXOS.....	208

## **ÍNDICE DE CONTENIDOS ESPECÍFICOS**

I. RESUMEN EJECUTIVO	16
II. INTRODUCCIÓN	18
III. OBJETIVOS	21
3.1 OBJETIVO GENERAL	
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	
IV. METODOLOGÍAS	22
4.1 Muestréos de nieve	22
4.2 Medición de material particulado (MP) y Black Carbon (BC)	24
4.3 Medición de variables meteorológicas y Albedo	25
4.4 Metodologías de análisis de muestras de nieve y aerosoles	25
4.5 Análisis de resultados	30
V. RESULTADOS	32
5.1 Descripción de las campañas realizadas	32
5.2 Análisis meteorológico	45
5.3 Mediciones de concentración y distribución por tamaño de material particulado atmosférico (MP)	70
5.4 Monitoreo de Black Carbon (BC)	93
5.5 Determinación de iones en aerosoles y nieve	105
5.6 Determinación de elementos	165
VI CONCLUSIONES	187
VI BIBLIOGRAFIA	202
VII ANEXOS	208

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Ilustración de glaciares monitoreados, faenas mineras y principales ciudades.....	22
Figura 2. Fases de extracción de muestras de aerosoles atmosféricos inorgánicos en fase gaseosa.....	29
Figura 3. Exploración del terreno para campamento base en GB .....	32
Figura 4. Carga a transportar desde Placa Roja al glaciar Bello.....	33
Figura 5. Vista general de la ubicación del glaciar Bello.....	34
Figura 6. Ubicación de puntos de monitoreo, campamento y estación de monitoreo de campaña glaciar Bello.....	34
Figura 7. Labores de instalación de equipos en glaciar Bello.....	35
Figura 8. Equipo Grimm instalado.....	36
Figura 9. Estación meteorológica instalada en el glaciar Bello.....	36
Figura 10. Fotografía que muestra la instalación del campamento en glaciar Bello.....	36
Figura 11. Toma de muestras de nieve en calicata en GB.....	37
Figura 12. Toma de muestras de nieve en calicata en GB.....	37
Figura 13. Vista general de la ubicación del glaciar Olivares Alfa.....	38
Figura 14. Imagen de ubicación de sitios de interés en campaña Olivares Alfa.....	39
Figura 15. Visión general del glaciar Olivares Alfa y del plateau donde se instalaron el campamento y los instrumentos.....	40
Figura 16. Operaciones de traslado de la carga e instrumentos durante la campaña en el glaciar Olivares Alfa.....	41
Figura 17. Operaciones de traslado de la carga e instrumentos durante la campaña en el glaciar Olivares Alfa.....	41
Figura 18. Toma aérea de manchas de partículas depositadas en la superficie de la nieve en el glaciar Olivares Alfa.....	41
Figura 19. Carpa hangar utilizada por el CETAM para el campamento e instalación de paneles fotovoltaicos flexibles.....	42
Figura 20. Localización de los equipos de monitoreo en GOA.....	42
Figura 21. Equipo de CETAM junto a la estación de monitoreo instalada en el glaciar Olivares Alfa.....	43
Figura 22. Estación <b>de monitoreo Parque O'Higgins</b> .....	44
Figura 23. Equipo de monitoreo de Black Carbon y equipo Espectrómetro Laser de Aerosoles.....	44
Figura 24. Equipo Low Vol, Partisol 2300-Speciation Sampler, Thermo.....	45
Figura 25. Ilustración de la ubicación de la estación DGA Olivares Gamma.....	45
Figura 26. Ilustración de la ubicación de la estación DGA Valle Olivares.....	46
Figura 27. Monitoreo de Temperatura instantánea en GOG.....	47

Figura 28. Monitoreo de Humedad Relativa en glaciar Olivares Gamma.....	47
Figura 29. Monitoreo de radiación solar, onda corta en glaciar Olivares Gamma.....	48
Figura 30. Monitoreo de radiación solar, onda larga en glaciar Olivares Gamma.....	48
Figura 31. Rosa de Viento sector del glaciar Olivares Gamma.....	49
Figura 32. Monitoreo de temperatura en Valle Olivares.....	50
Figura 33. Monitoreo de Humedad Relativa en Valle Olivares.....	50
Figura 34. Monitoreo de radiación solar incidente en Valle Olivares.....	51
Figura 35. Rosa de Vientos en Valle Olivares.....	52
Figura 36. Precipitación horaria v/s acumulada en Valle Olivares.....	52
Figura 37. Ubicación de la estación meteorológica en glaciar Bello.....	53
Figura 38. Monitoreo de temperatura v/s Humedad Relativa en glaciar Bello.....	54
Figura 39. Rosa de Viento en glaciar Bello.....	55
Figura 40. Radiación solar onda larga incidente en glaciar Bello.....	55
Figura 41. Radiación solar onda larga reflejada en glaciar Bello.....	56
Figura 42. Radiación solar onda corta incidente en glaciar Bello.....	56
Figura 43. Radiación solar onda corta reflejada en glaciar Bello.....	56
Figura 44. Albedo glaciar Bello.....	57
Figura 45. Imagen de ubicación de estación de monitoreo en glaciar Olivares Alfa.....	59
Figura 46. Monitoreo de temperatura v/s humedad relativa en glaciar Olivares Alfa.....	60
Figura 47. Rosa de Vientos en glaciar Olivares Alfa.....	61
Figura 48. Radiación solar onda larga incidente en GOA.....	62
Figura 49. Radiación solar onda larga reflejada en GOA.....	62
Figura 50. Radiación solar onda corta incidente en GOA.....	63
Figura 51. Radiación solar onda corta reflejada en GOA.....	63
Figura 52. Albedo en glaciar Olivares Alfa.....	63
Figura 53. Radiación onda corta incidente glaciar Olivares Alfa v/s glaciar Bello.....	65
Figura 54. Comparación de mediciones de radiación solar de onda corta reflejada glaciares Olivares Alfa y Bello.....	65
Figura 55. Radiación onda larga incidente glaciar Olivares Alfa v/s glaciar Bello.....	66
Figura 56. Comparación de mediciones de radiación solar de onda larga reflejada en glaciares Olivares Alfa y Bello.....	67
Figura 57. Diferencia absoluta de onda corta incidente-reflejada en glaciar Bello y glaciar Olivares Alfa.....	68
Figura 58. Diferencia absoluta de radiación de onda larga incidente-reflejada en glaciar Bello y glaciar Olivares Alfa.....	68

Figura 59. Concentración de material particulado atmosférico PM10, PM2,5 y PM1 en glaciar Olivares Alfa.....	70
Figura 60. Rosas de vientos por períodos en glaciar Olivares Alfa.....	71
Figura 61. Ilustración de zona de estudio en glaciar Olivares Alfa con superposición de rosas de vientos.....	72
Figura 62. Relación de material particulado atmosférico con temperatura ambiental en glaciar Olivares Alfa.....	73
Figura 63. Foto aérea del rajo al borde del portezuelo de montaña del glaciar OA, mostrando la nube de PM que genera la actividad industrial extractiva .....	74
Figura 64. Distribución por tamaño de material particulado atmosférico en glaciar Olivares Alfa.....	75
Figura 65. (A) Distribución por tamaño de material particulado en glaciar Olivares Alfa, (B) Evolución temporal de partículas finas (0,265 $\mu\text{m}$ ) y concentración de material particulado atmosférico PM1 en GOA.....	76
Figura 66. Distribución del material particulado atmosférico en glaciar Olivares Alfa.....	76
Figura 67. Evolución temporal del material particulado atmosférico PM10, PM2,5 y PM1 en glaciar Bello.....	77
Figura 68. Velocidad de viento y concentración de material particulado atmosférico en glaciar Bello.....	78
Figura 69. Imagen de la zona de estudio en glaciar Bello con superposición de rosas de vientos para periodo de monitoreo.....	78
Figura 70. Concentración promedio de PM10, PM2,5 y PM1 en glaciar Bello.....	79
Figura 71. Distribución promedio de material particulado atmosférico en glaciar Bello.....	79
Figura 72. Evolución temporal partículas finas (0,265 $\mu\text{m}$ ) y concent. de material particulado atmosférico PM1 en GB.....	80
Figura 73. Distribución del material particulado atmosférico en glaciar Bello.....	80
Figura 74. Evolución temporal del material particulado atmosférico PM10, PM2,5 y PM1 en Santiago.....	81
Figura 75. Concentración promedio de PM10, PM2,5 y PM1 en Santiago.....	82
Figura 76. Distribución promedio de material particulado atmosférico en Santiago.....	82
Figura 77. Evolución temporal partículas finas (0,265 $\mu\text{m}$ ) y concentración de material particulado atmosférico PM1 en Santiago.....	83
Figura 78. Distribución de material partic. atmosférico en Santiago.....	84

Figura 79. Comparación de concentración de PM10, PM2,5 y PM1 para Santiago, glaciar Olivares Alfa y glaciar Bello.....	84
Figura 80. Comparación de concentración de material particulado atmosférico.....	85
Figura 81. Análisis factorial para diferentes concentraciones de material particulado atmosférico en los 3 sitios de estudio....	86
Figura 82. Composición porcentual del material particulado atmosférico fino ( $MP \leq 0,425 \mu m$ ) en los 3 sitios de estudio.....	87
Figura 83. Comparación de concentración de PM10, PM2,5 y PM1 para glaciar Olivares Alfa y glaciar Bello.....	88
Figura 84. Gráficos de cajas y bigotes para comparación estadística de PM10, PM2,5 y PM1 en glaciar Olivares Alfa y Bello .....	89
Figura 85. Comparación de número de partículas atmosféricas para Santiago, glaciar Olivares Alfa y glaciar Bello.....	90
Figura 86. Gráficos de cajas y bigotes para comparación estadística de partículas atmosféricas de $0,265 \mu m$ en los sitios de muestreo.....	90
Figura 87. Comparación de número de partículas atmosféricas promedio para glaciar Olivares Alfa y glaciar Bello.....	91
Figura 88. Gráficos de cajas y bigotes para comparación estadística de N° de partículas atmosféricas de $0,265 \mu m$ , $0,615 \mu m$ y $1,150 \mu m$ en glaciar Olivares Alfa y glaciar Bello.....	92
Figura 89. Concentración de BC en glaciar Olivares Alfa.....	93
Figura 90. Concentración de PM1 y BC en glaciar Olivares Alfa.....	94
Figura 91. Rosas de vientos en superposición con los datos de monitoreo de BC en glaciar Olivares Alfa.....	94
Figura 92. Mapa de zona de estudio en glaciar Olivares Alfa con superposición de rosas de vientos para diferentes períodos de monitoreo.....	95
Figura 93. Correlación Black Carbon v/s número de partículas atmosféricas medidas en glaciar Olivares Alfa.....	96
Figura 94. Concentración de BC en glaciar Bello.....	97
Figura 95. Gráficos de cajas y bigotes para comparación de concentración de BC en glaciares Bello y Olivares Alfa.....	98
Figura 96. Análisis factorial de concentraciones de material particulado atmosférico y BC en glaciares Bello y Olivares Alfa.....	99
Figura 97. Correlación Black Carbon v/s número de partículas atmosféricas en glaciar Bello.....	100
Figura 98. Concentración de BC en Santiago.....	101
Figura 99. Correlación Black Carbon v/s número de partículas atmosféricas para distintos tamaños de partícula medidos en Santiago.....	103

Figura 100. Gráfico de peso de componentes adquirido de análisis de componentes principales de BC en sitios de estudio.....	104
Figura 101. pH promedio de la nieve superficial recolectada en el glaciar Bello .....	108
Figura 102. pH promedio de la nieve superficial recolectada en el glaciar Olivares Alfa.....	108
Figura 103. pH promedio para muestras de nieve superficial recolectada en el glaciar Bello y Olivares Alfa.....	109
Figura 104. Conductividad eléctrica (CE) promedio de muestras de nieve superficial recolectada en el glaciar Bello.....	110
Figura 105. Conductividad eléctrica (CE) promedio de muestras de nieve superficial recolectada en el glaciar Olivares Alfa .....	111
Figura 106. CE promedio para muestras de nieve superficial recolectadas en el glaciar Bello y Olivares Alfa.....	111
Figura 107. Concentración promedio de aniones mayoritarios en muestras de nieve superficial recolectadas en el glaciar Bello.....	114
Figura 108. Concentración promedio de cationes mayoritarios en muestras de nieve superficial recolectadas en el glaciar Bello.....	114
Figura 109. Concentración promedio de cationes mayoritarios en muestras de nieve superficial recolectadas en el glaciar Bello.....	115
Figura 110. Concentración promedio de aniones mayoritarios en muestras de nieve superficial en glaciar Olivares Alfa.....	117
Figura 111. Concentración promedio de cationes mayoritarios en muestras de nieve superficial glaciar Olivares Alfa.....	117
Figura 112. Concentración promedio de los aniones mayoritarios en muestras de nieve superficial glaciar Bello y Olivares Alfa.....	119
Figura 113. Concentración promedio de los cationes mayoritarios en muestras de nieve superficial en el glaciar Bello y Olivares Alfa.....	120
Figura 114. Concentración diaria de los aniones mayoritarios en muestras de MP atmosférico en Santiago en campaña 1 ...	122
Figura 115. Concentración diaria de los cationes mayoritarios en muestras de MP atmosférico en Santiago en campaña 1 ...	123
Figura 116. Concentración diaria de los aniones mayoritarios en muestras en fase gaseosa en Santiago en campaña 1 .....	123
Figura 117. Concentración diaria de los cationes mayoritarios en muestras en fase gaseosa en Santiago en campaña 1 .....	124
Figura 118. Concentración diaria de los aniones mayoritarios en muestras en MP atmosférico en Santiago en campaña 2 ...	125

Figura 119. Concentración diaria de los cationes mayoritarios en muestras en MP atmosférico en Santiago en campaña 2...	126
Figura 120. Concentración diaria de los aniones mayoritarios en muestras en fase gaseosa en Santiago en campaña 2.....	126
Figura 121. Concentración diaria de los cationes mayoritarios en muestras en fase gaseosa en Santiago en campaña 2.....	127
Figura 122. Valores promedios para los aniones mayoritarios en MP atmosférico en campaña 1 y campaña 2.....	128
Figura 123. Valores promedios para los cationes mayoritarios en MP atmosférico Campaña 1 y campaña 2.....	128
Figura 124. Valores promedios para las concentraciones de aniones mayoritarios obtenidos durante la campaña 1 y 2.....	129
Figura 125. Valores promedios para los cationes mayoritarios obtenidos en fase gaseosa durante la campaña 1 y campaña 2.....	130
Figura 126. Análisis de componentes principales para iones en muestras de nieve superficial de glaciar Olivares Alfa.....	131
Figura 127. Gráfico de componentes principales para iones en muestras de nieve superficial recolectada en el glaciar Olivares Alfa.....	132
Figura 128. Análisis y clasificación jerárquica para iones en muestras de nieve superficial glaciar Olivares Alfa.....	133
Figura 129. Análisis de componentes principales (variabilidad) para iones en muestras de nieve superficial del glaciar Bello.....	136
Figura 130. Gráfico de componentes principales para iones en muestras de nieve superficial recolectada en el glaciar Olivares Alfa.....	136
Figura 131. Análisis de clasificación jerárquica para iones (clúster) en muestras de nieve superficial del glaciar Bello.....	137
Figura 132. Perfil de concentración de aniones mayoritarios en calicata glaciar Bello.....	146
Figura 133. Perfil de concentración de cationes mayoritarios en calicata glaciar Bello.....	147
Figura 134. Perfil de pH y conductividad eléctrica en calicata glaciar Bello.....	148
Figura 135. Correlación entre las concentraciones de $\text{Ca}^{2+}$ y $\text{SO}_4^{2-}$ en calicata glaciar Bello.....	149
Figura 136. Tendencia entre la concentración de $\text{Ca}^{2+}$ y el $\text{pH}^-$ en calicata glaciar Bello.....	150
Figura 137. Correlación entre la concentración de $\text{SO}_4^{2-}$ y el pH en calicata glaciar Bello.....	151
Figura 138. Correlación entre la concentración total de iones y la conductividad eléctrica en calicata glaciar Bello.....	152

Figura 139. Correlación entre la concentración total de aniones y cationes en calicata glaciar Bello.....	153
Figura 140. Perfil de concentración de aniones mayoritarios en calicata glaciar Olivares Alfa.....	154
Figura 141. Perfil de concentración de cationes mayoritarios en calicata glaciar Olivares Alfa.....	155
Figura 142. Perfil de pH y conductividad eléctrica en calicata del glaciar Olivares Alfa.....	156
Figura 143. Correlación entre las concentraciones de $\text{Ca}^{2+}$ y $\text{SO}_4^{2-}$ en calicata glaciar Olivares Alfa.....	157
Figura 144. Correlación entre la concentración de $\text{Ca}^{2+}$ y el pH en calicata en el glaciar Olivares Alfa.....	158
Figura 145. Correlación entre la concentración de $\text{SO}_4^{2-}$ y el pH en calicata glaciar Olivares Alfa.....	159
Figura 146. Correlación entre la concentración total de iones y la conductividad eléctrica en calicata glaciar Olivares Alfa.....	160
Figura 147. Correlación entre la concentración total de aniones y cationes en calicata glaciar Olivares Alfa.....	161
Figura 148. Tasa de deposición durante el año nivológico para los glaciares Bello y Olivares Alfa.....	164
Figura 149. Mapa referencial de ubicación de calicatas en glaciar Bello.....	165
Figura 150. Concentración promedio de elementos traza en calicatas de glaciar Bello en función de la profundidad.....	169
Figura 151. Dendrograma de análisis de conglomerados para concentración de elementos en muestras de nieve del glaciar Bello.....	173
Figura 152. Mapa referencial de ubicación de calicatas en glaciar Olivares Alfa.....	174
Figura 153. Concentración de elementos en glaciares Bello y Olivares Alfa.....	176
Figura 154. Gráficos de cajas y bigotes para comparación de concentración de elementos traza en nieve superficial.....	177
Figura 155. Concentración promedio de elementos traza en calicatas de glaciar Olivares Alfa.....	179
Figura 156. Gráficos de cajas y bigotes para comparación de concentración de elementos traza en calicatas.....	181
Figura 157. Dendrograma de análisis de conglomerados para concentración de elementos en muestras de nieve del glaciar Olivares Alfa.....	183
Figura 158. Concentración promedio de elementos traza en material particulado PM <sub>2,5</sub> de la ciudad de Santiago.....	184
Figura 159. Distribución de elementos traza en sitios de estudio.....	185

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Coordenadas de ubicación y parámetros de medición en GB.....	35
Tabla 2. Coordenadas de ubicación y parámetros de medición en GOA.....	39
Tabla 3. Parámetros de medición y coordenadas de las estaciones DGA.....	46
Tabla 4. Coordenadas de ubicación y parámetros de medición en GB.....	53
Tabla 5. Resumen de datos de albedo glaciar Bello.....	57
Tabla 6. Rangos de albedo típico de superficies de nuestro planeta.....	58
Tabla 7. Coordenadas de ubicación y parámetros de medición en GOA.....	59
Tabla 8. Resumen de datos de albedo glaciar olivares Alfa.....	64
Tabla 9. Rangos de albedo típico de superficies de nuestro planeta.....	64
Tabla 10. Diferencia porcentual en número promedio de partículas en glaciar Olivares Alfa y glaciar Bello.....	92
Tabla 11. Comparación de concentración de BC en los glaciares estudiados versus BC otros glaciares en el mundo.....	98
Tabla 12. Test de rangos múltiples para valores de concentración de BC observados en Santiago, glaciar Bello y glaciar Olivares Alfa.....	102
Tabla 13. Valore de pH promedios obtenidos en muestra de nieve superficial en glaciares Bello y Olivares Alfa.....	107
Tabla 14. Comparación pH con otros glaciares en el mundo.....	109
Tabla 15. Valores de conductividad eléctrica en glaciares Bello y Olivares Alfa.....	110
Tabla 16. Comparación de conductividad eléctrica en glaciares Bello y Olivares Alfa y otros sitios del mundo.....	112
Tabla 17. Concentración de aniones mayoritarios en muestras de nieve superficial en GB.....	113
Tabla 18. Concentración de cationes mayoritarios en muestras de nieve superficial en GB.....	113
Tabla 19. Concentración de aniones mayoritarios en muestras de nieve superficial en GOA.....	116
Tabla 20. Concentración de cationes mayoritarios en muestras de nieve superficial en GOA.....	116
Tabla 21. Concentración promedio de aniones mayoritarios en muestras de nieve superficial en GB y GOA.....	118

Tabla 22. Concentración promedio cationes mayoritarios en glaciar Bello y Olivares Alfa.....	119
Tabla 23. Análisis de significancia estadística entre el glaciar Bello y Olivares Alfa.....	120
Tabla 24. Concentración promedio de iones mayoritarios en muestras de nieve superficial en glaciar Bello y Olivares Alfa.....	121
Tabla 25. Descripción de la carga factorial del análisis PCA en glaciar Bello, después de realizar la rotación espacial Varimax, para muestras de nieve superficial en glaciar Olivares Alfa.....	134
Tabla 26. Matriz de correlación de Pearson para muestras de nieve superficial glaciar Olivares Alfa.....	135
Tabla 27. Descripción de la carga factorial del análisis PCA de GB.....	138
Tabla 28. Matriz de correlación de Pearson para la muestras de nieve superficial glaciar Bello.....	139
Tabla 29. Factores de Neutralización en glaciar Bello y Olivares Alfa.....	140
Tabla 30. Valores de <b>correlación R2 entre Ca2+ y ΔC</b> en glaciar Bello y Olivares Alfa.....	141
Tabla 31. Factores de enriquecimiento para los iones mayoritarios en glaciar Bello y Olivares Alfa.....	142
Tabla 32. Concentración y porcentajes de sulfato no marino y marino en glaciar Bello y Olivares Alfa y otros lugares del mundo.....	143
Tabla 33. Concentraciones promedio de elementos traza en nieve superficial en glaciar Bello .....	166
Tabla 34. Comparación de resultados obtenidos con literatura.....	166
Tabla 35. FE para elementos en nieve superficial en glaciar Bello.....	168
Tabla 36. Tasa de deposición anual de elementos en glaciar Bello.....	170
Tabla 37. Comparación de tasas de deposición húmeda anual de elementos en glaciar Bello.....	170
Tabla 38. FE calculados para concentración de elementos en calicatas realizadas en el glaciar Bello.....	172
Tabla 39. Concentraciones promedio de elementos traza en nieve superficial glaciar Olivares Alfa.....	175
Tabla 40. FE para elementos en glaciar Olivares Alfa.....	178
Tabla 41. Tasa de deposición anual de elementos en glaciar Bello.....	180
Tabla 42. Comparación de tasas de deposición húmeda anual de elementos en glaciar Bello .....	180
Tabla 43. FE calculados para concentración de elementos en calicatas realizadas en el glaciar Olivares Alfa.....	182

## **AGRADECIMIENTOS**

Los desarrolladores del presente estudio agradecen la hospitalidad del refugio de montaña Lodge Placa Roja del Cajón del Maipo y al refugio de la Fuerza Aérea de Chile (FACH) de Cerro Colorado.

Se agradece también el apoyo de la meteoróloga de la Universidad de Valparaíso Srta. Marta Caneo Figueroa por la elaboración de pronósticos del tiempo durante las campañas de monitoreo.

A la empresa de helicópteros Ecocopter, por su apoyo, excelente disposición y profesionalismo demostrado en la operación durante las campañas de monitoreo.

A todos los miembros del Centro de Tecnologías Ambientales, CETAM de la UTFSM, quienes colaboraron en las distintas tareas que involucraron la realización de este estudio.

## **PRESENTACIÓN**

El **presente estudio titulado** “Caracterización Glacioquímica de Elementos Traza en Muestras de Nieve” **realizado por el Centro de Tecnologías Ambientales (CETAM)** de la Universidad Técnica Federico Santa María, fue realizado por encargo de la Unidad de Glaciología y Nieves de la Dirección General de Aguas, perteneciente al Ministro de Obras Públicas, a través de la licitación pública código ID 1019-53-LP14, realizada el año 2014, la cual tiene por objetivo realizar la caracterización química de muestras de nieve y analizar la composición y distribución de material particulado atmosférico presente en los glaciares Olivares Alfa (GOA) y Bello (GB), según Bases Técnicas y Administrativas.

## I. RESUMEN EJECUTIVO

El presente documento presenta los resultados del estudio denominado "Caracterización Glacioquímica de Elementos Traza en Muestras de Nieve" realizado por el Centro de Tecnologías Ambientales (CETAM) de la Universidad Técnica Federico Santa María, en el marco de la Licitación Pública ID1019-53-LP14 de la Unidad de Glaciología y Nieves de la Dirección General de Aguas, perteneciente al Ministro de Obras Públicas.

Se realizaron campañas de monitoreo en los glaciares Bello (GB) y Olivares Alfa (GOA) entre los días 12-30 Septiembre y 21-29 Octubre del 2014, respectivamente, las que consideraron la toma de muestras de nieve tanto superficial como en profundidad para la determinación de iones, elementos traza, además de otros parámetros físico-químicos como densidad, pH y conductividad eléctrica. Se realizó también monitoreo en tiempo real de material particulado atmosférico y Black Carbon, además de meteorología, incluida la radiación solar para la determinación de albedo.

En forma paralela a las campañas de monitoreo en los glaciares, se realizó una campaña de monitoreo atmosférico en la ciudad de Santiago donde se midieron los mismos contaminantes que fueron medidos en los glaciares. Los principales resultados se describen a continuación:

### Meteorología y Albedo

Durante el período de monitoreo en el GB se registró una temperatura promedio (TP) de  $-8,7^{\circ}\text{C}$ , una humedad relativa promedio (HRP) de 65,7% y vientos predominantes (VP) del norte (27,3% a 3,6-5,7 m/s), siendo esta ubicación donde se registró las mayores intensidades de viento en el estudio. Por su parte durante la campaña en el GOA, la TP fue de  $-1,2^{\circ}\text{C}$  con 36,1% de HRP y VP del norte (33,1% a 0,5-2,1 m/s). Adicionalmente, se analizaron datos meteorológicos de las estaciones de la DGA ubicadas en el glaciar Olivares Gama y en el Valle Olivares, siendo en el glaciar Olivares Gama la TP de  $-2,8^{\circ}\text{C}$ , la HRP de 37,7% y los VP del noreste (40,1% a 3,6-5,7 m/s). Finalmente en el Valle Olivares la TP fue de  $+3,8^{\circ}\text{C}$ , la HRP de 35,7% y los VP también del noreste (100% a 0,5-2,1 m/s).

Respecto de las mediciones de radiación, se observaron diferencias estadísticamente significativas entre los valores registrados de radiaciones de onda corta (incidente menos reflejada) y onda larga (incidente menos reflejada) de los GB y GOA, cuyos valores alcanzaron  $128\text{ watt/m}^2$  y  $50\text{ watt/m}^2$  respectivamente para el GB y  $63\text{ watt/m}^2$  y  $84\text{ watt/m}^2$  para el GOA. Los cálculos de albedo fueron en promedio de 0,77 para el GB y de 0,64 para el GOA. En otras palabras en términos de albedo, el albedo del GB es un 17% mayor que el albedo del GOA. Esta diferencia muy probablemente se deba al tipo de contaminación que está recibiendo este glaciar, afectando directa y negativamente a su albedo. Cuando verificamos estas diferencias de albedo en función de la radiación incidente menos la reflejada para la longitud de onda corta y la comparamos entre ambos glaciares, los resultados indican que el GB presenta 2 veces mayor reflexión que el GOA; cuando realizamos el mismo cálculo para la longitud de onda larga, los resultados indican que el glaciar Bello presenta 1,7 veces mayor reflexión que el glaciar Olivares Alfa.

### Material Particulado y Black Carbon

Se midió la concentración de material particulado atmosférico (MPA) en los GOA y GB, además de la ciudad de Santiago (S). Los resultados indican que la concentración promedio para el período completo de monitoreo de PM10, PM 2,5 y PM1 en el GB fue de  $1,4\text{ }\mu\text{g/m}^3$ ,  $0,5\text{ }\mu\text{g/m}^3$  y  $0,4\text{ }\mu\text{g/m}^3$ ; para el GOA fue de  $1,5\text{ }\mu\text{g/m}^3$ ,  $0,9\text{ }\mu\text{g/m}^3$  y  $0,6\text{ }\mu\text{g/m}^3$  y finalmente para S fue de  $65,7\text{ }\mu\text{g/m}^3$ ,  $25,4\text{ }\mu\text{g/m}^3$  y  $19,4\text{ }\mu\text{g/m}^3$ , respectivamente, siendo esta obviamente superior respecto de ambos glaciares estudiados. A su vez se midió la distribución por tamaños de MPA (0,265 a  $34\text{ }\mu\text{m}$ ) indicando que en los 3 sitios estudiados (S, GB y GOA) predominan las partículas finas ( $\text{MP}<0,425\text{ }\mu\text{m}$ ). Las concentraciones de PM10, PM2,5 y PM1 observadas en el GOA son significativamente distintas y mayores a las observadas en el GB. Este comportamiento en la concentración del material particulado podría ser explicado por el hecho de que el GB se encuentra a mayor distancia (51 Km) que el glaciar GOA (5 Km) de la fuente de emisión más cercana probable que se podría encontrar, como es la actividad minera extractiva cordillerana presente en el área de estudio.

La concentración de Black Carbon (BC) promedio para todo el período de monitoreo para el GB fue de  $108 \text{ ng/m}^3$ , para el GOA fue de  $294 \text{ ng/m}^3$  y finalmente para Santiago fue de  $4.904 \text{ ng/m}^3$ . La concentración de BC en el glaciar Olivares Alfa es significativamente distinta y mayor a la observada en el glaciar Bello. El BC observado en el glaciar Olivares Alfa está asociado a partículas finas ( $\text{PM} < 0,425 \text{ }\mu\text{m}$ ). Este hecho es un indicativo de que las fuentes de BC corresponden a fuentes de combustión, lo que sumado a que tanto BC como partículas provendrían muy probablemente de la misma fuente (actividad minera extractiva) 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. El análisis de componentes principales indica que la concentración de BC de los 3 sitios estudiados (S, GB y GOA) tiene una distribución distinta por lo que se puede inferir que deberían tener distintos orígenes.

Finalmente, al ser la actividad minera la fuente de emisión de partículas más cercana y visiblemente evidente en la zona estudiada, sumado al hecho que estas fuentes de emisión están justamente en la dirección del viento predominante del sector durante la campaña de monitoreo y con la evidencia de la ciclicidad horaria y el aumento de concentración de material particulado en concordancia con la temperatura ambiental diaria, se puede inferir que el material particulado y Black Carbon observado en el glaciar Olivares Alfa muy probablemente son consecuencia de la actividad de dichas zonas de explotación extractiva de minerales.

### **Conductividad eléctrica, pH y iones**

Los valores de pH promedio en muestras de nieve superficial en el glaciar Bello y Olivares Alfa fueron de  $7,82 \pm 0,28$  y  $8,06 \pm 0,41$ ; la conductividad eléctrica (CE) registró valores promedio de  $5,2 \pm 2,74 \text{ }\mu\text{S/cm}$  y  $11,2 \pm 0,41 \text{ }\mu\text{S/cm}$ , respectivamente, no existiendo entre los 2 glaciares en estudio, diferencia estadísticamente significativa en los valores promedios de pH y CE. En el glaciar Bello, las concentraciones promedio en muestras de nieve superficial, fueron para  $\text{NO}_3^-$  ( $14,87 \text{ }\mu\text{Eq/L}$ ),  $\text{Cl}^-$  ( $13,30 \text{ }\mu\text{Eq/L}$ ),  $\text{SO}_4^{2-}$  ( $6,88 \text{ }\mu\text{Eq/L}$ ),  $\text{Ca}^{2+}$  ( $44,88 \text{ }\mu\text{Eq/L}$ ),  $\text{NH}_4^+$  ( $3,82 \text{ }\mu\text{Eq/L}$ ),  $\text{Mg}^{2+}$  ( $1,61 \text{ }\mu\text{Eq/L}$ ),  $\text{K}^+$  ( $1,45 \text{ }\mu\text{Eq/L}$ ) y  $\text{Na}^+$  ( $1,28 \text{ }\mu\text{Eq/L}$ ). En el glaciar Olivares Alfa, las concentraciones de iones fueron:  $\text{NO}_3^-$  ( $8,26 \text{ }\mu\text{Eq/L}$ ),  $\text{Cl}^-$  ( $7,42 \text{ }\mu\text{Eq/L}$ ),  $\text{SO}_4^{2-}$  ( $8,70 \text{ }\mu\text{Eq/L}$ ),  $\text{Ca}^{2+}$  ( $11,85 \text{ }\mu\text{Eq/L}$ ),  $\text{NH}_4^+$  ( $6,97 \text{ }\mu\text{Eq/L}$ ),  $\text{Mg}^{2+}$  ( $2,07 \text{ }\mu\text{Eq/L}$ ),  $\text{K}^+$  ( $1,06 \text{ }\mu\text{Eq/L}$ ) y  $\text{Na}^+$  ( $2,80 \text{ }\mu\text{Eq/L}$ ). Se encontró diferencias estadísticamente significativa para las concentraciones promedio los iones  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Ca}^{2+}$ , entre ambos glaciares. Los análisis multivariados indicarían que  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{NO}_3^-$  puede ser interpretado como iones provenientes de fuentes antropogénicas. Los iones mayoritarios, en ambos glaciares estudiados, se encuentran desde moderadamente enriquecido a extremadamente enriquecido, lo que sugiere una fuente de emisión distinta a los aerosoles marinos. El sulfato no marino ( $>80\%$  del total del  $\text{SO}_4^{2-}$ ), determinado en ambos glaciares estudiados podría tener un origen natural proveniente posiblemente de emisiones volcánicas, cristal ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) o de origen antrópico, como fuentes de combustión o incluso fundiciones.

### **Elementos**

La concentración de elementos observados en nieve superficial en el GB es comparable para algunos elementos a la concentración encontrada en sitios remotos como la Antártica. De todas formas otros elementos como Cu, Zn y Hg se encuentran altamente enriquecidos en nieve superficial, indicando una fuerte influencia antropogénica en la concentración de estos elementos en el GB. La concentración de todos los elementos estudiados en nieve superficial es significativamente distinta y superior en el GOA respecto del GB, así como también en calicatas (snow pit), indicando que el GOA está altamente impactado por actividades antropogénicas, lo cual en conjunto con un alto enriquecimiento de elementos como Cu, Zn, As, Cd, Sb y Hg indican que la fuente más probable de contaminación por elementos traza en el GOA muy probablemente sería la actividad minera extractiva cordillerana.

Se calcularon las tasas de deposición atmosférica para todos los elementos medidos, siendo Cu en el glaciar Olivares Alfa 5,0 veces mayor que en el glaciar Bello, el resto de los elementos presenta un comportamiento similar, a excepción de As, Fe y Al, que presentaron tasas de deposición mayores en el glaciar Bello.

## II. INTRODUCCIÓN

En Chile los glaciares son uno de los recursos naturales menos estudiados, a pesar de ser considerados estratégicos para la economía en el mediano plazo (Rivera y Acuña 1997). Las investigaciones glaciológicas se han desarrollado principalmente en la Patagonia, en las mayores masas de hielo del hemisferio sur (Casassa et al. 2000a; Rivera and Casassa, 2000). Se estima que el aumento de las temperaturas y la disminución de las precipitaciones en el siglo XX tuvieron un papel importante en el comportamiento reciente de los glaciares, mostrando una tendencia general de retroceso y pérdida de masa (Casassa, 1995; Casassa et al. 2000b; Rivera et al. 2000a; Rivera et al. 2002).

El balance de masa de un glaciar está unido a su hidrología y a la atmósfera (Braithwaite, 2002). El balance de masa en un glaciar se define como la suma algebraica entre la acumulación y ablación, o la pérdida de masa al final del periodo de un año, o el cambio neto en la masa (volumen equivalente de agua), entre dos periodos sucesivos (Ostrem y Brugman, 1991).

El proceso más importante de acumulación de masa es la deposición de nieve (Benn & Evans, 1998), que está directamente relacionado con la circulación atmosférica y su interacción con el relieve local (Oerlemans, 2001). La ablación se refiere a la retirada de la nieve y el hielo de un glaciar, debido principalmente a la fusión, así como también por procesos de evaporación y sublimación favorecidos por la acción del viento (Benn and Evans, 1998). El proceso de fusión de un glaciar también está determinado por el balance de energía que se produce en la interfaz superficie-atmósfera (Braithwaite, 1995, Oerlemans, 2001). Una parte importante de la energía radiante que llega a un glaciar es reflejada según el albedo de la superficie, que oscila entre un 0,8 en nieve fresca y 0,3 en hielo con presencia de sustancias exógenas a la naturaleza propia del hielo, las que en la literatura reciben el nombre de contaminantes o impurezas (Lliboutry, 1956). En este sentido, el albedo medido en el hemisferio norte ha mostrado ser más bajo que el valor teórico para nieve pura (0,8), esta diferencia observada se explica por el posible contenido actual de hollín o black carbon (BC) en el manto nivoso. El origen de este BC se debe, muy probablemente, a la contaminación de origen industrial del hemisferio norte (Warren and Wiscombe 1980). Las impurezas o contaminantes que son más propensos a tener un efecto generalizado sobre el albedo de la nieve son el hollín, el polvo de origen crustal (de composición similar a la corteza terrestre) y las cenizas volcánicas. El hollín es aproximadamente

50 veces más efectivo que el polvo (material particulado) y cerca de 200 veces más eficaz que las cenizas en la reducción del albedo de la nieve (Warren S. 1984).

Chile posee una superficie aproximada de 23.000 km<sup>2</sup> de hielo por lo que se hace indispensable contar con un monitoreo detallado sobre su situación. La Unidad de Glaciología y Nieves de la Dirección General de Aguas dependiente del Ministerio de Obras Públicas de Chile ha hecho un esfuerzo importantísimo por aumentar conocimiento disponible de los glaciares de Chile mediante la realización de un inventario de los glaciares con el fin de conocer su cantidad, superficie y otras variables de los glaciares que existen a lo largo del país.

El incremento de la actividad antropogénica, combinada con el crecimiento económico de los países en desarrollo como Chile, demandan un gran consumo energético, el cual es satisfecho principalmente con combustibles fósiles (IMPUESTO AL CARBONO 2010), lo cual ha traído como consecuencia un incremento en las emisiones de material particulado, pudiendo también impactar a los glaciares de Los Andes centrales de Chile.

Para los glaciares Diablerets and Plaine Morte localizados en Los Alpes, se observó que el albedo decreció fuertemente debido a la presencia de contaminantes en la nieve y frecuentemente se ha encontrado valores de albedo bajos dentro del área de ablación (Paul et al. 2005). Flanner et al. (2007) identificaron black carbon (BC) sobre las planicies del Tibet, debido a su proximidad a regiones emisoras de contaminantes atmosféricos del tipo BC, cómo son la India y el suroeste de Asia. Por otro lado, en los Himalaya se ha observado un aumento en la fusión de los glaciares y ha sido atribuido a un incremento en la concentración de BC (Ming et al. 2009; Kaspari et al. 2011). Estudios de campo en las regiones sub polares del hemisferio norte revelan una significativa aceleración en el derretimiento de la nieve, disminuyendo la cubierta blanca anual producto de la presencia de BC en la nieve (Doherty et al. 2010; Aamaas et al. 2011). Estos autores observaron un enriquecimiento de BC en la superficie de esta parte de la criósfera, este proceso puede deberse a que los aerosoles emitidos a la atmósfera como resultado de procesos naturales y antropogénicos, pueden ser removidos a través de fenómenos de deposición húmeda, y/o seca introduciendo partículas y/o gases en la nieve incrementando su ablación, por lo tanto acelerando la pérdida de masa del glaciar, disminuyendo la superficie de reflexión, lo cual finalmente impacta sobre el clima.

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, donde aquellas con un claro origen antropogénico y en general de fuentes móviles y fijas (industrias que utilizan procesos de combustión) están compuestas principalmente de black carbon (BC), participan en la ablación de la nieve y la pérdida de masa de un glaciar.

Dado los antecedentes anteriormente expuestos, es necesario realizar una caracterización química de muestras de aerosoles y de deposición atmosférica, con la finalidad de evaluar el estado actual de la contaminación atmosférica tanto a nivel de las ciudades como de la cordillera de Los Andes, para poder corroborar la hipótesis del transporte local (ciudad-glaciares/industria extractiva de minerales-glaciares) así como global (transporte intercontinental) de contaminantes que son arrastrados hasta la superficie de la criósfera por la deposición seca y/o húmeda como por ejemplo las precipitaciones de nieve. Al mismo tiempo, estos contaminantes una vez depositados en la capa de nieve, pueden modificar el albedo y acelerar su ablación, aumentando así la pérdida de masa glaciar, incrementando el efecto invernadero al perder superficies blancas reflectivas y afectar directamente el cambio climático global, con las consecuencias sobre la pérdida de acumulación y reserva de agua dulce para la población o incluso contaminándola con sustancias químicas indeseables.

Muchos de estos contaminantes pueden provenir de una fuente específica. Iones y elementos traza pueden ayudar a identificar el origen de sus fuentes, aerosoles secundarios como nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) y sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), pueden atribuirse a la combustión de combustibles fósiles en el tráfico y la industria, mientras que el amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) puede ser atribuido a la actividad agrícola y pecuaria (Schwikowski and Eichler, 2010). Calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) y Magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) pueden ser usados como trazadores de aerosoles crustales. Potasio ( $\text{K}^+$ ) puede ser trazador de aerosoles crustales, así como también trazador de la quema de biomasa (Schwikowski et al. 1999; Kaspari et al. 2011). 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 de la Región Metropolitana, indicando que se ve afectada por las emisiones atmosféricas urbanas de Santiago de Chile y/o la actividad minera de montaña. En dicho lugar, se encontró un enriquecimiento significativo para distintos elementos traza relacionada con el tráfico, procesos de fundición y quema de biomasa, entre otros.

### **III. OBJETIVOS**

#### 3.1 Objetivo General

Realizar la caracterización química de muestras de nieve y medir la concentración y distribución de material particulado atmosférico para los Glaciares Olivares Alfa y Bello.

#### 3.2 Objetivos Específicos

- a) Realizar la recolección de muestras de nieve para su caracterización química en los Glaciares Olivares Alfa y Bello.
- b) Analizar la concentración y distribución del material particulado atmosférico presente en el ambiente glaciar.
- c) Determinar de qué manera el material particulado afecta el albedo de los glaciares en estudio.
- d) Analizar la concentración y distribución del material particulado muestreado en la estación MACAM

## IV. METODOLOGÍAS

### 4.1 Muestras de nieve

La preparación de material de muestreo, selección de lugares y realización de los muestreos de nieve se realizaron de acuerdo a protocolos establecidos por USGS (Snowpack Chemistry Monitoring Protocol for the Rocky Mountain Network; Narrative and Standard Operating Procedures). Ver anexo con metodología detallada.

A continuación se presenta una ilustración con la ubicación de los glaciares Bello y Olivares Alfa en verde, faenas mineras de relevante importancia en amarillo y ciudades más cercanas a los glaciares.

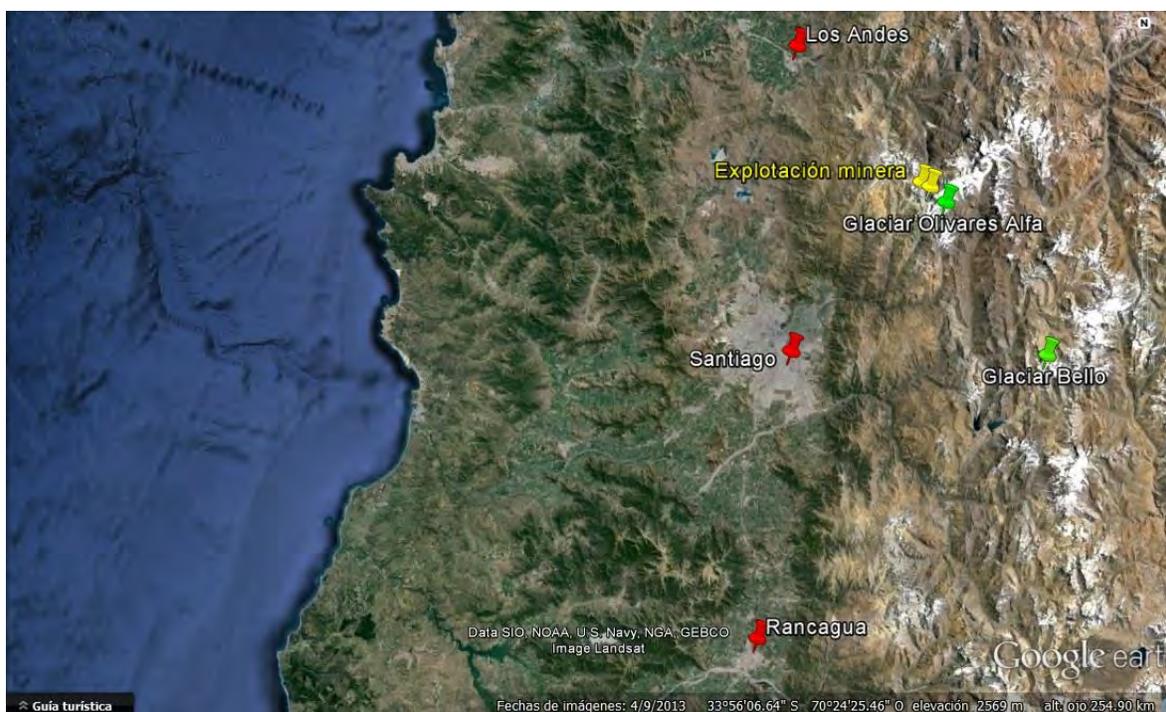


Figura 1: Ilustración de glaciares monitoreados, faenas mineras y principales ciudades.

#### Selección de lugar de monitoreo

- Se seleccionó el lugar de muestreo de forma visual en primer lugar, teniendo la precaución de que el sitio no estuviese intervenido.
- Una vez seleccionado el sitio se procedió a medir la profundidad de nieve utilizando una sonda de avalanchas.
- Una vez seleccionado el punto de muestreo se demarcó un área de alrededor 2 m<sup>2</sup> para comenzar a cavar la calicata o pozo de nieve.
- Se cavaron tres calicatas por glaciar.

### Excavación de las calicatas

- En el área seleccionada para la excavación de cada calicata se trazó una línea perpendicular a la dirección del sol para seleccionar la pared sombreada de la calicata.
- Se cavó cada calicata utilizando palas de aluminio, teniendo la precaución de no transitar por la zona de excavación y la zona de acumulación de nieve.
- Una vez cavada cada calicata, se midió su profundidad.
- Se seleccionó la pared sombreada de cada calicata para la toma de muestras y otra pared para realizar las mediciones de densidad de nieve.
- La pared para toma de muestras se limpió utilizando una pala de policarbonato previamente lavada con un estricto protocolo de limpieza.
- Se definió el intervalo de profundidades de toma de muestras en función de la profundidad de la calicata; para calicatas de 2 m, muestras cada 20 cm.

### Muestreo de nieve en calicata y medición de densidad de nieve

- Se tomaron muestras cada 20 cm (estratos) utilizando palas plásticas previamente lavadas con un estricto protocolo de limpieza y separando cada estrato de muestreo con bandejas plásticas limpias para así evitar contaminación interestratos.
- Las muestras tomadas se almacenaron 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 material de aislapol de alta densidad de 100 L de capacidad (procedencia alemana).
- En la pared opuesta a la de toma de muestras se procedió a la medición de la densidad de nieve utilizando palas del tipo RIP 1 Cutter (1000 cc), Snowmetrics, USA.
- Utilizando una balanza granataria de 0,01 g de exactitud se pesó la pala de densidad vacía.
- Cuidadosamente se introdujo la pala en un punto de los primeros 20 cm de pared de la calicata, teniendo cuidado de no compactar la nieve.
- Se removió la pala de densidad de la pared de la calicata teniendo la precaución de que la nieve sacada ocupe todo el volumen de la pala y no estuviese compactada.
- Finalmente se pesó la pala de densidad con nieve para realizar el cálculo de densidad.

### Muestreo de nieve superficial

- Se demarcó un área de alrededor de 10 m<sup>2</sup> en las cercanías de la calicata de donde se seleccionaron 3 puntos de 1 m<sup>2</sup> 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 1m x 1m, se excavaron los primeros 5 cm de nieve con una pala plástica previamente lavada (mismo protocolo de limpieza).
- 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 material de aislapol de alta densidad de 100 L de capacidad (procedencia alemana).

## 4.2 Medición de material particulado (MP) y Black Carbon (BC)

### Material Particulado

Para la medición continua de la concentración de material particulado atmosférico se utilizó un equipo espectrómetro láser de aerosoles, modelo EDM107 de la firma GRIMM, Alemania. Este equipo portable es capaz de determinar en tiempo real a intervalos mínimos de 6 segundos, la concentración de PM10, PM2,5 y PM1, además de determinar el número y distribución de partículas en 31 tamaños distintos, entre 0,265 y **34 µm** (en 31 canales distintos). Este equipo opera en conformidad con la metodología **EPA EQPM-0311-195**.

El monitoreo continuo se realizó en los tres sitios de muestreo; el glaciar Bello, el glaciar Olivares Alfa y en Santiago en la Estación Parque O´Higgins de la red MACAM, seleccionada por su representatividad. El monitoreo en Santiago se realizó con un segundo equipo GRIMM de las mismas características y de manera paralela a las campañas en los glaciares. Se monitoreó durante al menos 7 días continuos en cada uno de los sitios seleccionados.

En la estación Parque O´Higgins se instaló, además, un equipo de monitoreo atmosférico del tipo Low-Vol Partisol 2300-Speciation Sampler de la firma Thermo, USA, cuyo funcionamiento está diseñado de acuerdo a la metodología EPA IO-2,3. Este equipo cuenta con canales independientes para la utilización de hasta 4 cartridges para especiación química. Se utilizaron cartridges equipados con filtros de cuarzo para el análisis de elementos asociados al material particulado, como también cartridges equipados con filtros de teflón y honeycomb denuders para el análisis de iones asociados tanto a la fase particulada como a la fase gaseosa del aerosol atmosférico (iones). El monitoreo con este equipo

se realizó diariamente y en forma paralela a cada una de las campañas realizadas en los glaciares.

### Black Carbon

La medición de Black Carbon (BC) tanto en el glaciar Bello como en el glaciar Olivares Alfa se realizó utilizando un aethalómetro modelo AE-51 de la firma Aethalometrics, EE.UU, que es un equipo portátil que permite medir BC en tiempo real con intervalos mínimos de medición de 1 minuto.

La medición de BC en Santiago se realizó utilizando un equipo Thermo Scientific 5012 MAAP Multi-Angle: fotómetro de absorción multiángulo que mide BC gracias a su acumulación en un filtro de fibra de vidrio el cual recibe una haz de luz de longitud de onda de 670 nm en varios ángulos distintos para mejorar su exactitud y precisión.

#### 4.3 Medición de variables meteorológicas y albedo

Para medición de albedo se utilizó un equipo Net radiometer, modelo CNR-4, de la firma Kipp & Zonen, Suiza y para variables meteorológicas se utilizó una estación meteorológica U30, de la firma HOBO, USA, para T°, %HR, dirección y velocidad de viento.

#### 4.4 Metodologías de análisis de muestras de nieve y aerosoles

Las muestras de aerosoles así como las de nieves recolectadas en glaciares y las muestras de aerosoles recolectadas en la ciudad de Santiago se analizaron según la metodología que se presenta a continuación y los resultados obtenidos se pueden revisar en este informe final.

##### 4.4.1 Determinación de elementos traza en nieve recolectada en glaciar

Las muestras de nieve fueron sometidas a análisis de especiación química, determinando la concentración de elementos traza mediante Espectrometría de Masas con fuente de Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-MS) utilizando un equipo ELAN DRC II de Perkin Elmer, USA, **que posee la tecnología Dynamic Reaction Cell™ (DRC™) que elimina las interferencias poliatómicas antes de que lleguen al cuadrupolo del espectrómetro de masas lo que permite mejorar la resolución de los análisis y disminuir los límites de detección de elementos complicados de analizar por ICP-MS como Fe, Al, Si, Cu, Sb, As, Pb, Cd, Zn, Cr, Hg alcanzando niveles de ppq.**

Las muestras fueron acidificadas (5%) y filtrada previo a su análisis. Se realizaron estudios de influencia de la matriz de los extractos en cada una de las señales analíticas, comparando las pendientes por curva de calibración normal y adición estándar, este estudio se realizó a través del test t de student para comparar conjuntos de datos al 95% de probabilidad.

Se realizaron estudios de exactitud de la metodología completa (digestión más cuantificación) mediante el análisis material particulado con una concentración certificada de los analitos de interés (material de referencia), estas muestras se adquirieron en el mercado de materiales de referencia (NIST, BCR o CRC). Además se realizaron estudios de recuperación contaminando artificialmente parte de los extractos de manera de asegurar que no existen pérdidas significativas de analito durante la etapa de cuantificación. Todos estos ensayos fueron realizados mediante el test t student de comparación de un valor aceptado como verdadera al 95% de probabilidad.

#### 4.4.2 Determinación de pH, conductividad eléctrica y especies iónicas en nieve recolectada en glaciar

Las muestras obtenidas tanto de nieve superficial como en calicata se sometieron a análisis de pH y conductividad in situ, así como también en cada estrato determinado en la calicata se midió la densidad de la nieve. La medición de pH y conductividad fue realizada con un instrumento de terreno previa calibración de éste, con soluciones buffer y de conductividad certificadas. Los iones inorgánicos  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Ca}^{2+}$  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. El cromatógrafo está equipado con una bomba de doble pistón, célula de conductividad termostatizada, módulo de columna termostatizada, desgasificación por vacío en línea y unidad supresora aniónica.

Para el análisis de aniones se utilizó una columna Metrosep A Supp 5 (Metrohm) la cual está hecha de poli vinil alcohol con grupos de amonio **cuaternario, con tamaño de partículas de 5  $\mu\text{m}$**  y dimensiones de 150 x 4,0 mm. A su vez la columna se encuentra protegida por una precolumna Metrosep A Supp 4/5 Guard (Metrohm) hecha de polivinil alcohol con grupos de amonio cuaternario, con tamaño de partículas de **5  $\mu\text{m}$  y dimensiones de 5 x 4,0 mm**. Tanto la columna como la precolumna pueden trabajar en un rango de pH entre 3 y 12. La

columna se encuentra termostatzada a  $35 \pm 0,2$  °C. Los análisis se realizaron con supresión de cationes.

Para el análisis de cationes se utilizó una columna Metrosep C4 250/4,0 (Metrohm) la cual está hecha de sílica gel con grupos carboxílicos, con **diámetro de partícula de 5  $\mu\text{m}$  y dimensiones de 250 x 4,0 mm, a su vez** la columna se encuentra protegida por precolumna Metrosep C4 Guard/4,0 (Metrohm) hecha de sílica gel con grupos carboxílicos, con **diámetro de partícula de 5  $\mu\text{m}$  y dimensiones de 5 x 4,0 mm.** La columna se encuentra termostatzada a  $35 \pm 0,2$  °C.

La determinación de la concentración de los distintos cationes y aniones en muestras de nieve se realizó mediante el método de curva de calibrado. La identificación se realizó utilizando el criterio de tiempos de retención ( $t_r$ ) y la cuantificación mediante la relación de áreas de picos cromatográficos respecto de las concentraciones en análisis, considerando el Límite de Detección del cromatógrafo ( $3 \times S_{d_{\text{blanco}}}$ ). En ambos casos, identificación y cuantificación, se utilizaron los estándares de calibración del método como unidades de referencia.

4.4.3 Determinación de elementos traza en Material Particulado recolectado en Santiago.

#### Digestión de filtros

Las muestras de material particulado recolectado sobre filtros de cuarzo fueron sometidas a ataque con mezclas ácidas oxidantes compuestas de mezclas de  $\text{HNO}_3$  y  $\text{HCl}$ , calidad suprapuro en proporciones de agua regia. Las muestras fueron digeridas en recipientes cerrados de bombas de teflón por 24 horas para luego completar la digestión aplicando temperaturas de  $170^\circ\text{C}$  por 3 horas. Todas las muestras fueron realizadas en duplicado considerando además un blanco de digestión el cual fue considerado en los cálculos cuantitativos.

#### Filtración y enrase de los extracto

Todos los extractos fueron filtrados previo a su análisis por Espectrometría de Masas con fuente de Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-MS), para ello se utilizaron filtros de membrana  $0,45 \mu\text{m}$  resistentes a ácidos y libres de ceniza, el recipiente de digestión se lavó con agua destilada y desionizada repetidas veces para asegurar la transferencia cuantitativa de los analitos a un aforo para su posterior enrase con agua de la misma calidad, se utilizó el mínimo consumo de agua posible de manera de evitar diluciones innecesarias.

### Análisis de extractos mediante ICP-MS

Todos los extractos enrasados y pesados fueron sometidos a análisis de especiación química, determinando la concentración de elementos traza mediante ICP-MS utilizando un equipo ELAN DRC II, Perkin Elmer USA **que posee la tecnología Dynamic Reaction Cell™ (DRC™) que elimina las interferencias poliatómicas** antes de que lleguen al cuadrupolo del espectrómetro de masa lo que permite mejorar la resolución de los análisis y disminuir los límites de detección de elementos complicados de analizar por ICP-MS como Fe, Ca, K, Mg, As, Se, Cr, V alcanzando niveles de partes por cuadrillón (ppq).

Se realizaron estudios de influencia de la matriz de los extractos en cada una de las señales analíticas, comparando las pendientes por curva de calibración normal y adición estándar, este estudio se realizó a través del test t de student para comparar conjuntos de datos al 95% de probabilidad.

Se realizaron estudios de exactitud de la metodología completa (digestión más cuantificación) mediante el análisis material particulado certificado con una concentración conocida de los analitos de interés (material de referencia), estas muestras se adquirieron en el mercado de materiales de referencia (NIST, BCR o CRC). Además se realizaron estudios de recuperación contaminando artificialmente parte de los extractos de manera de asegurar que no existen pérdidas significativas de analito durante la etapa de cuantificación. Todos estos ensayos fueron realizados mediante el test t student de comparación de un valor aceptado como verdadera al 95% de probabilidad.

#### 4.4.4 Determinación de Iones en aerosoles atmosféricos recolectados en Santiago

##### 4.4.4.1 Extracción de la muestra desde Filtros y Denuders

Para la extracción de filtros de poliamida con partículas, éstos fueron colocados dentro de un vaso precipitado de vidrio, se adicionó agua desionizada y se sometió a extracción por microondas por 10 minutos. El extracto posteriormente fue filtrado y enrasado.

Por otro lado, para la extracción de los Denuders, uno de los extremos del denuder fue cubierto con su tapa de polietileno y se adicionó agua desionizada (Figura A). Posteriormente el denuder es cerrado en su otro extremo por una segunda tapa para ser sometido a agitación manual vigorosa (Figura B). Después de la agitación la tapa es removida

cuidadosamente. La mayor parte del extracto se encuentra en los canales y tapa sin agujero del denuder. El denuder es desprendido cuidadosamente de la segunda tapa, procurando que la mayor cantidad de extracto se encuentre en esta tapa (Figura 2). El análisis requiere 7 a 8 mL de extracto los cuales son transferidos a vial con pipeta pasteur.

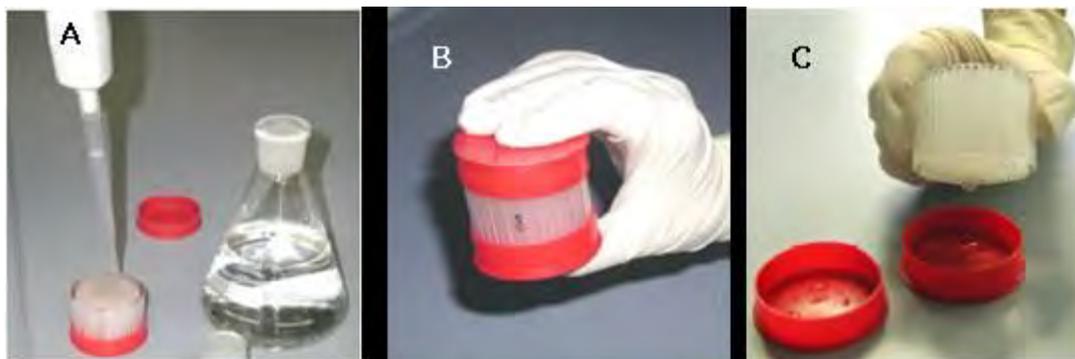


Figura 2: Fases de extracción de muestras de aerosoles atmosféricos inorgánicos en fase gaseosa.

#### 4.4.4.2 Filtración y enrasado de extractos

Para el caso específico de la extracción del filtro, el material particulado presente y extraído en la etapa anterior fue eliminado mediante ultrafiltración a vacío, utilizando sistemas especialmente diseñados para asegurar la calidad analítica del proceso, evitando los procesos de contaminación intra-laboratorio y los efectos de memoria.

#### 4.4.4.3 Análisis de extractos mediante cromatografía iónica (IC)

Los iones inorgánicos  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Ca}^{2+}$ , 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. El cromatógrafo está equipado con una bomba de doble pistón, célula de conductividad termostatizada, módulo de columna termostatizado, desgasificación por vacío en línea y unidad supresora aniónica.

Para el análisis de aniones se utilizó una columna Metrosep A Supp 5 (Metrohm) la cual está hecha de poli vinil alcohol con grupos de amonio **cuaternario, con tamaño de partículas de 5  $\mu\text{m}$  y dimensiones de 150 x 4,0 mm**, a su vez la columna se encuentra protegida por una precolumna Metrosep A Supp 4/5 Guard (Metrohm) hecha de poli vinil alcohol con grupos de amonio cuaternario, con tamaño de partículas de

**5  $\mu\text{m}$  y dimensiones de 5 x 4,0 mm, tanto columna como precolumna** pueden trabajar en un rango de pH entre 3 y 12. La columna se encuentra termostatzada a  $35 \pm 0,2$  °C. Los análisis se realizaron con supresión de cationes.

Para el análisis de cationes se utilizó una columna Metrosep C4 250/4,0 (Metrohm) la cual está hecha de sílica gel con grupos carboxílicos, con **diámetro de partícula de 5  $\mu\text{m}$  y dimensiones de 250 x 4,0 mm, a su vez** la columna se encuentra protegida por precolumna Metrosep C4 Guard/4,0 (Metrohm) hecha de sílica gel con grupos carboxílicos, con **diámetro de partícula de 5  $\mu\text{m}$  y dimensiones de 5 x 4,0 mm.** La columna se encuentra termostatzada a  $35 \pm 0,2$  °C.

La determinación de los distintos cationes y aniones en muestras de nieve se realizó mediante el método de curva de calibrado. La identificación se realizó utilizando el criterio de tiempos de retención ( $t_r$ ) y la cuantificación mediante la relación de áreas de picos cromatográficos respecto de las concentraciones en análisis, considerando el Límite de Detección del cromatógrafo ( $3 \times Sd_{\text{blanco}}$ ). En ambos casos, identificación y cuantificación, se utilizaron los estándares de calibración del método como unidades de referencia.

#### 4.5 Análisis de resultados

Para el análisis de los datos se utilizó el programa StatGrafics Centurion. Con él se realizaron diversas pruebas estadísticas, tanto descriptivas como comparativas, aplicando un nivel de confianza del 95% cuando correspondía. Los análisis específicos aplicados en el análisis de los diversos parámetros evaluados se detallan en cada uno de los capítulos, junto con sus resultados.

En el análisis de material particulado, Black Carbon, iones y elementos se aplicó Análisis de Componentes Principales (ACP) y Análisis de Conglomerado (o clúster) con el fin de identificar grupos de datos similares y posibles fuentes de contaminación (aporte antropogénico). Se trata de procedimientos estadísticos frecuentemente utilizados en estudios ambientales (Panda et al. 2006; Lu et al. 2011; Dragovic et al. 2011; Niu et al. 2014; Gabrielli et al. 2008).

El análisis de componentes principales (ACP) es un método estadístico multivariado que se utiliza para simplificar conjuntos de datos grandes y complejos. El ACP permite reducir la dimensionalidad de los datos,

evitando redundancias y destacando relaciones. Este análisis se basa en la comprobación de que un número pequeño de factores comunes representan un gran porcentaje de la variabilidad de las variables originales medidas. El ACP Transforma el conjunto de  $p$  variables originales en otro conjunto de  $q$  variables correlacionadas llamadas componentes principales (donde  $q \leq p$ ) (Miller y Miller, 2002).

El análisis de conglomerados es otra técnica multivariante cuyo principal propósito es obtener grupos de objetos de forma que, por un lado, los objetos pertenecientes a un mismo grupo sean muy semejantes entre sí, es decir, que el grupo esté cohesionado internamente y, por el otro, los objetos pertenecientes a grupos diferentes tengan un comportamiento distinto con respecto a las variables analizadas, es decir, que cada grupo esté aislado externamente de los demás grupos. El dendrograma es la representación gráfica que mejor ayuda a interpretar el resultado de un análisis clúster (Miller y Miller, 2002).

El Análisis de Conglomerados se combina con el Análisis de Componentes Principales, ya que mediante ACP se homogenizan los datos, lo cual permite realizar posteriormente un análisis de conglomerados sobre los componentes obtenidos (Miller y Miller, 2002).

## V. RESULTADOS

### 5.1. Descripción de las campañas realizadas

#### 5.1.1 Campaña glacial Bello

La campaña de monitoreo en el glaciar Bello se extendió del 12 al 30 de septiembre de 2014.

El equipo consultor se trasladó a la zona de Baños Morales, ubicado al interior del Cajón del Maipo justo en el valle del Monumento Nacional El Morado. Pernoctó en un refugio del lugar para salir temprano al día siguiente desde el Lodge Placa Roja. El equipo consultor contó con la participación de dos guías de montaña certificados por la Escuela Nacional de Montaña de Chile (ENMCH) a cargo de la seguridad del equipo de científicos y de la expedición completa.

Al inicio de la campaña se realizó un vuelo de reconocimiento en helicóptero para seleccionar el sitio más seguro para el emplazamiento del campamento y área de toma de muestras. En este reconocimiento participó personal científico junto con el encargado de seguridad y logística del equipo consultor para definir en conjunto el sitio más seguro y adecuado para la realización de la campaña de monitoreo.



Figura 3: Exploración del terreno para campamento base en GB.

Como se aprecia en la figura 3, se realizó reconocimiento de sitios seguros respecto a la presencia de grietas antes de establecer un perímetro de seguridad para armar el campamento y realizar las actividades de muestreo e instalar los equipos de monitoreo.

Posterior al reconocimiento del sitio para campamento base, el resumen de actividades realizadas es el siguiente:

a) Se realizaron porteos en helicóptero desde Placa Roja hacia el glaciar Bello hasta completar el traslado de carga y personal científico posterior a un reconocimiento y marcaje de una zona segura para acampar.



Figura 4: Carga a transportar desde Placa Roja al glaciar Bello.

En la figura 4 se puede apreciar la carga que posteriormente fue trasladada en helicóptero hacia el glaciar Bello.

b) Una vez en el glaciar Bello, se instaló el Sistema de Energía Fotovoltaica (Figura 7), los equipos de monitoreo ambiental (Figura 8) y el campamento (Figura 10). Para el monitoreo continuo de material particulado se utilizó el equipo espectrómetro laser de aerosoles Grimm, modelo EDM 107, Alemania. Para la medición de black carbon (BC) se utilizó un equipo micro-aethalometer modelo AE51, Aethlabs, USA. Para medición de albedo se utilizó un equipo Net radiometer Kipp & Zonen modelo CNR-4 y para variables meteorológicas se utilizó una estación meteorológica ( $T^{\circ}$ , %HR, dirección y velocidad de viento) modelo E30, marca HOBO, USA (Figura 9). Todo lo anterior se puede observar en la figura 5 y 6, y en la tabla 1 siguiente.

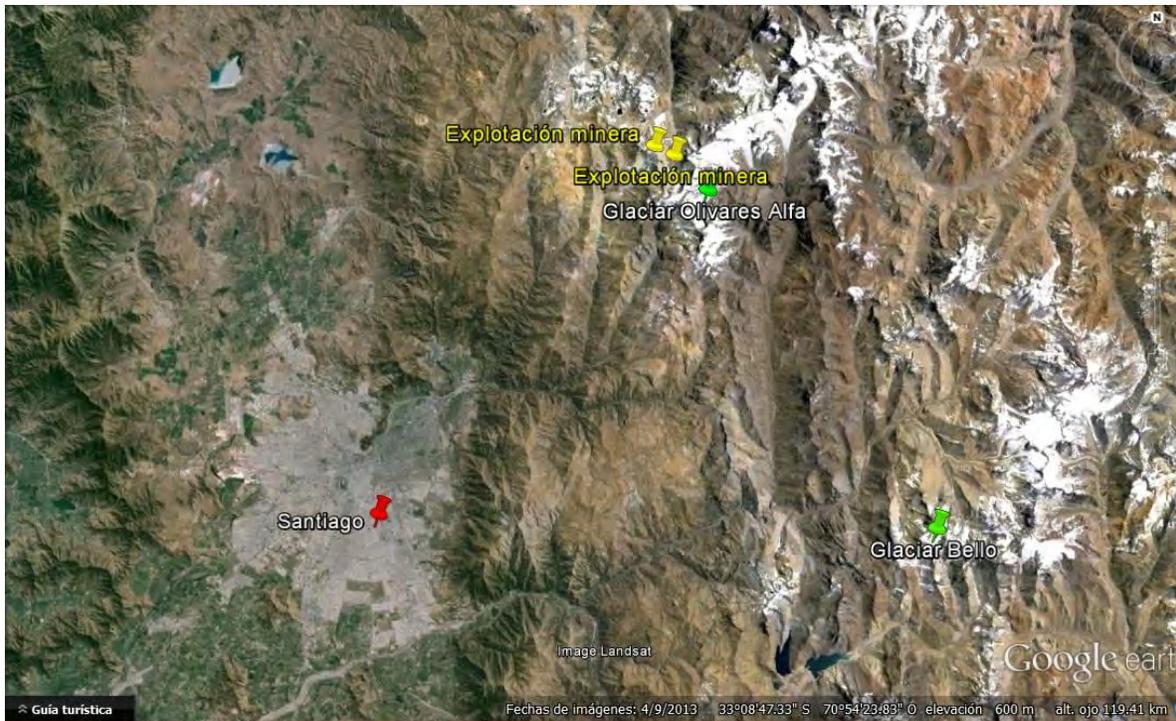


Figura 5: Vista general de la ubicación del glaciar Bello.



Figura 6: Ubicación de puntos de monitoreo, campamento y estación de monitoreo en campaña glaciar Bello.

Tabla 1: Coordenadas de ubicación y parámetros de medición en GB.

N°	Nombre	Latitud	Longitud	Altitud (m.s.n.m.)	Parámetros de medición
1	Campamento Base	33° 31'56,84" S	69° 56'48,83" W	4280	
2	Estación de monitoreo	33° 31'56,9 S,	69° 56'54,73 W	4290	Temp. del Aire (°C) Humedad (%) Dirección del Viento (grados) Velocidad del Vto. (m/s) Rad. Solar SW incidente (Watt/m2) Rad. Solar SW reflejada (Watt/m2) Rad. Solar LW incidente (Watt/m2) Rad. Solar LW reflejada (Watt/m2) Concentración, tamaño y distribución de partículas Black Carbon (ng/m <sup>3</sup> ) Albedo
3	Calicata 1	33° 31'56,8 S	69° 56'52,7 W	4290	Nieve superficial y nieve profunda
4	Calicata 2	33° 31'58,7 S	69° 56'52,7 W	4288	Nieve superficial y nieve profunda
5	Calicata 3	33° 32'01,1 S	69° 56'51,4 W	4273	Nieve superficial y nieve profunda



Figura 7: Labores de instalación de equipos en glaciar Bello. A la izquierda; sistema de energía limpio y paneles fotovoltaicos, a la derecha: Equipo Grimm en proceso de montaje.



Figura 8: Equipo Grimm instalado en su base y programado para entregar datos cada 1 minuto, situado al interior su weather-housing. Micro-aethalometro en el interior del weather-housing.



Figura 9: Estación meteorológica instalada en el glaciar Bello.

c) Posteriormente se montó el campamento base ubicado a 50m de la zona de muestreo, para lo cual se levantó una carpa tipo hangar, que incluye instalaciones de cocina, espacio para comedor y trabajo.



Figura 10: Fotografía que muestra el campamento en glaciar Bello. Al costado derecho; Carpa Hangar CETAM. En la izquierda; campamento de emergencia.

d) Finalmente permanecieron en el glaciar 2 guías de montaña acompañando a dos científicos CETAM, quienes fueron relevados por otros científicos a lo largo de la campaña.

e) Para la realización del monitoreo de nieve (Figura 11 y 12), se exploró el terreno y se midió la profundidad de nieve donde el máximo de profundidad se presentó aproximadamente a los 2 m. Se excavaron 3 calicatas y en ellas se muestreó nieve en estratos de 20 cm partiendo desde la superficie hasta llegar al hielo. Además se muestreó nieve superficial en otros tres puntos del glaciar.



Figura 11: Toma de muestras de nieve en calicata en GB.



Figura 12: Toma de muestras de nieve en calicata en GB.

### 5.1.2 Campaña glaciar Olivares Alfa

La campaña de monitoreo en el glaciar Olivares Alfa se extendió entre el 21 y el 29 de octubre del 2014.

El equipo consultor se trasladó el lunes 20 de octubre al sector del centro de ski El Colorado, específicamente al refugio FACH, ubicado en dicho sector al noreste de Santiago. Se pernoctó en el lugar para salir temprano al día siguiente hacia el glaciar Olivares Alfa. El equipo consultor contó con la participación de dos guías de montaña certificados por la Escuela Nacional de Montaña de Chile (ENMCH) a cargo de la seguridad del equipo de científicos y de la expedición completa.

Al inicio de la campaña se realizó un vuelo de reconocimiento en helicóptero para seleccionar el sitio más seguro para el emplazamiento del campamento y zonas de toma de muestras, de acuerdo a las siguientes Figura 13, 14 y la tabla 2.

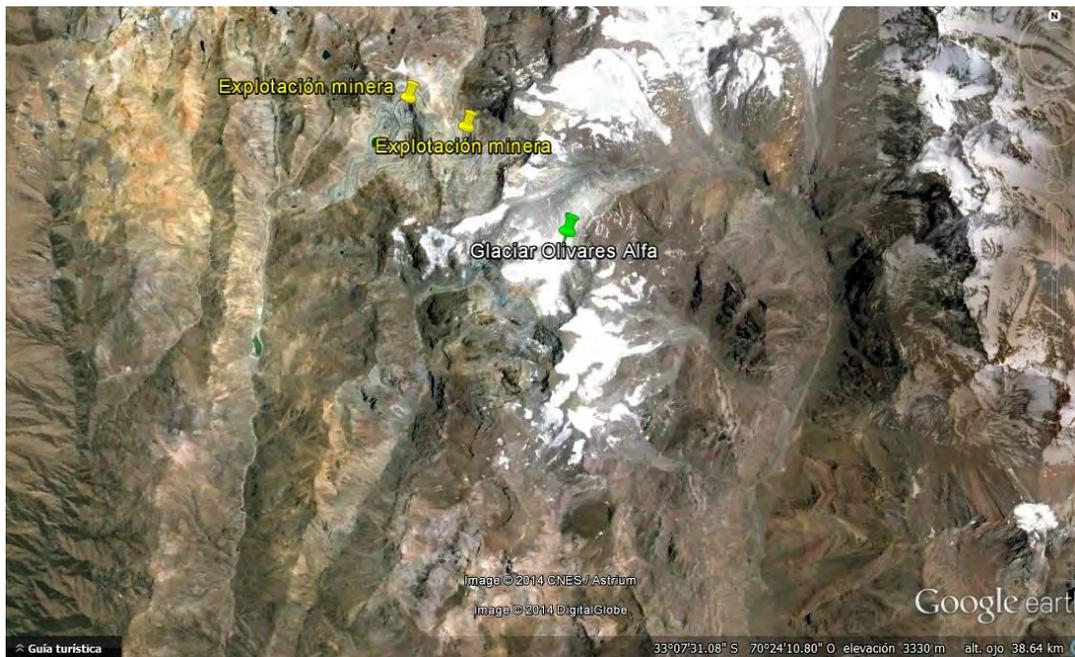


Figura 13: Vista general de la ubicación del glaciar Olivares Alfa.



Figura 14: Imagen de ubicación de sitios de interés en campaña Olivares Alfa. Arriba vista general, abajo vista sobre el glaciar.

Una vez en el glaciar se registraron en GPS los puntos de campamento, del monitoreo atmosférico y meteorológico, y del monitoreo de nieve superficial y profunda. Ver Tabla 2.

Tabla 2: Coordenadas de ubicación y parámetros de medición en GOA.

N°	Nombre	Latitud	Longitud	Altitud (m.s.n.m)	Parámetros de medición
1	Campamento Base	33° 11' 37,67" S	70° 13' 15,91" O	4500	
2	Estación de monitoreo	33° 11' 33,42" S	70° 13' 16,91" O	4470	Temp. del Aire (°C) Humedad (%) Dirección del Viento (grados) Velocidad del Vto. (m/s) Rad. Solar SW incidente (Watt/m2) Rad. Solar SW reflejada (Watt/m2) Rad. Solar LW incidente (Watt/m2) Rad. Solar LW reflejada (Watt/m2) Concentración, tamaño y distribución de partículas Black Carbon (ng/m <sup>3</sup> ) Albedo
3	Calicata 1	33° 11' 37,05" S	70° 13' 14,78" O	4470	Nieve superficial y nieve profunda
4	Calicata 2	33° 11' 33,85" S	70° 13' 14,07" O	4449	Nieve superficial y nieve profunda
5	Calicata 3	33° 11' 30,71" S	70° 13' 13,38" O	4430	Nieve superficial y nieve profunda

En este reconocimiento participó personal científico junto con el encargado de seguridad y logística del equipo consultor para definir en conjunto el sitio más seguro y adecuado para la realización de la campaña de monitoreo.

Una vez en el glaciar Olivares Alfa, se instaló el sistema de energía fotovoltaica, los equipos de monitoreo ambiental y el campamento. Para el monitoreo continuo de material particulado se utilizó el equipo espectrómetro laser de aerosoles Grimm, modelo EDM 107, Alemania. Para la medición de black carbon (BC) se utilizó un equipo micro-aethalometer modelo AE51, Aethlabs, USA. Para medición de albedo se utilizó un equipo Net radiometer Kipp & Zonen modelo CNR-4 y para variables meteorológicas se utilizó una estación meteorológica modelo E30, marca HOBO, USA (T°, %HR, dirección y velocidad de viento). A continuación se presentan algunas fotografías tomadas durante la maniobra de montaje de equipos y campamento (Figura 17 y Figura18), realizada el día 21 de octubre de 2014 en el glaciar Olivares Alfa.



Figura 15: Visión general del glaciar Olivares Alfa y del plateau donde se instalaron el campamento y los equipos de monitoreo durante la campaña.



Figuras 16 y 17: Operaciones de traslado de la carga e instrumentos durante la campaña en el glaciar Olivares Alfa.

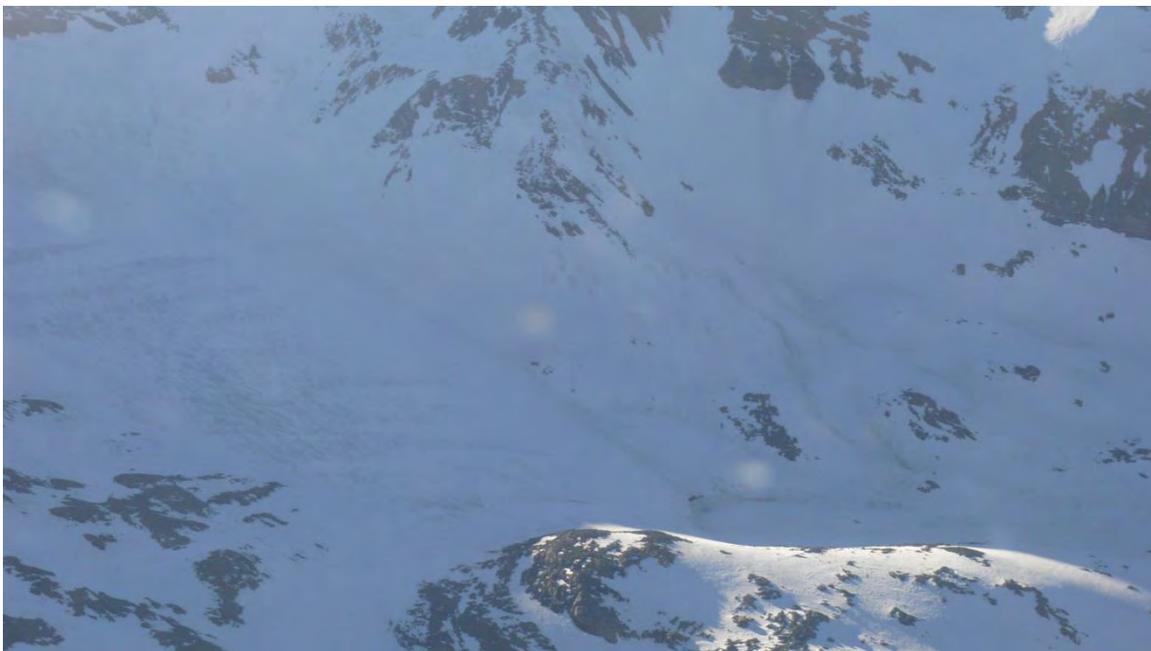


Figura 18: Toma aérea de manchas de partículas depositadas en la superficie de nieve en el glaciar Olivares Alfa.

Como se puede observar en la figura 15 y 18 anterior, se evidencian manchas ondulantes de deposición de material particulado sobre la nieve en los faldeos de montaña que está directamente por delante de las faenas antropogénicas extractivas de cordillera encontradas en las inmediaciones del Glaciar Olivares Alfa. En la siguiente figura 19 se

puede apreciar la instalación de los paneles fotovoltaicos flexibles sobre la carpa hangar. Posterior a ellas, en la Figura 20 se aprecia la instalación de los equipos de monitoreo, alrededor de 60 metros aguas abajo del campamento y posteriormente en la Figura 21, el equipo científico y logístico a cargo de las maniobras descritas en el presente capítulo.



Figura 19: Carpa hangar utilizada por el CETAM para el campamento e instalación de paneles fotovoltaicos flexibles.



Figura 20: Localización de los equipos de monitoreo en GOA, a 60 m de distancia del campamento.



Figura 21: Equipo del CETAM junto a la estación de monitoreo instalada en el glaciar Olivares Alfa.

### 5.1.3 Campaña de monitoreo en Santiago

En paralelo a las actividades en los glaciares Bello y Olivares Alfa se realizaron los muestreos de aerosoles atmosféricos para especiación química junto con la medición en continuo de BC, además de medir concentración y distribución por tamaños de material particulado en la estación de monitoreo de calidad del aire de Parque O´Higgins perteneciente a la red MACAM de Santiago. Esta estación de monitoreo fue seleccionada para el presente estudio porque 1) La estación es representativa de la realidad de la contaminación atmosférica de la ciudad de Santiago (Gramsch et al. 2006), 2) Posee condiciones de seguridad y accesibilidad para la instalación de equipos por períodos prolongados y esporádicamente, 3) Concentra una larga data de registros de monitoreo ambiental atmosférico, lo cual le otorga cualidades como representatividad estadística temporal, 4) En ella se realiza monitoreo atmosférico de todos los contaminantes criterios y otros, los cuales son de gran importancia al momento de intercomparar registros y analizar la dinámica de la atmósfera y las reacciones químicas que ocurren en ella 5) es la estación donde nuestro grupo de investigación ha desarrollado las campañas de especiación química de aerosoles desde el año 2000 en forma sistemática, por lo que tenemos una larga data con que comparar la evolución de los contaminantes atmosféricos de la ciudad de Santiago.

Durante esta campaña de monitoreo se tomó una muestra diaria de aerosoles en filtro (24 h continuas) y se midió en continuo la concentración y distribución de partículas, además de la medición de Black Carbon en tiempo real durante todos los días de la campaña. En las Figura 22, 23 y 24 se puede apreciar el recinto donde se sitúa la estación MACAM y los equipos instalados para el presente estudio.



Figura 22: Estación de monitoreo Parque O'Higgins.



Figura 23: Equipo de monitoreo de Black Carbon - Multi Angle Absorption Photometer (MAAP) 5012, Thermo y equipo Espectrómetro Laser de Aerosoles, GRIMM.



Figura 24: Equipo Low Vol, Partisol 2300-Speciation Sampler, Thermo.

Para el muestreo de aerosoles atmosféricos en la ciudad de Santiago se utilizó el equipo Low Vol, Partisol 2300-Speciation Sampler (S.Samp), Thermo, USA, provisto con cartridges para especiación inorgánica (iones y elementos).

## 5.2 Análisis Meteorológico

Para iniciar el análisis de la meteorología de los sitios de estudio, primeramente se realizó un análisis de la meteorología registrada en dos estaciones de la DGA, las estaciones glaciaria Olivares Gamma (GOG) y Valle Olivares (VO), cercanas a los sitios de estudio. A continuación se presentan las Figura 25, 26 y la tabla 3 donde se expone la ubicación, características de emplazamiento y funcionamiento de las estaciones antes mencionadas.

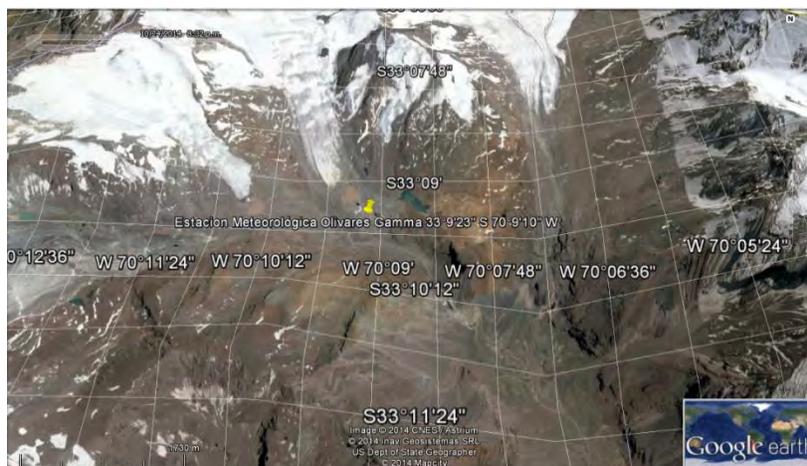


Figura 25: Ilustración de la ubicación de la estación DGA Olivares Gamma.

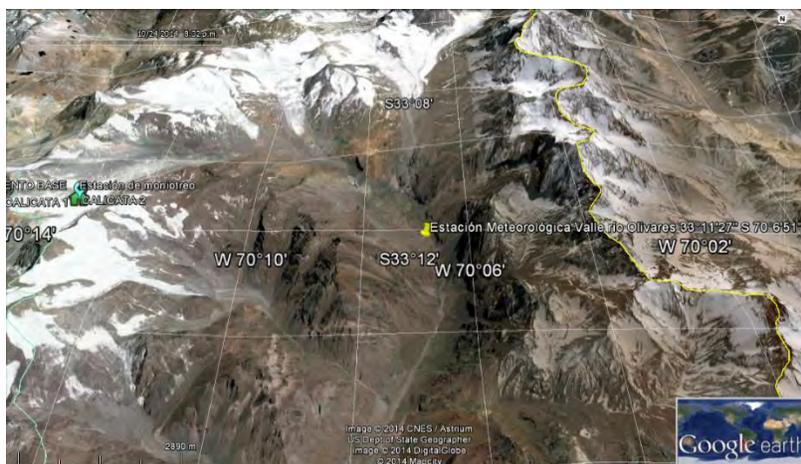


Figura 26: Ilustración de la ubicación de la estación DGA Valle Olivares.

Tabla 3: Parámetros de medición y coordenadas de las estaciones DGA.

N°	Nombre	Latitud*	Longitud*	Altitud m.s.n.m	Parámetros de medición
1	Estación glaciar Olivares Gamma	33°9'23"S	70°9'10"O	3600	Temperatura del Aire (°C) Humedad Relativa (%) Dirección del Viento (grados) Presión Atmosférica (mb) Altura de Nieve (cm) Rad. Solar SW incidente (Watt/m <sup>2</sup> ) Velocidad del Viento (m/s) Temperatura del Aire 2 (°C) Rad. Solar LW incidente (Watt/m <sup>2</sup> ) Rad. Solar LW reflejada (Watt/m <sup>2</sup> ) Rad. Solar SW reflejada (Watt/m <sup>2</sup> )
2	Estación Valle Olivares	33°11'27"S	70°6'51"O	2840	Temperatura del Aire (°C) Humedad (%) Dirección del Viento (grados) Altura de Nieve (cm) Rad. Solar SW incidente (Watt/m <sup>2</sup> ) Velocidad del Viento (m/s) Temperatura del Aire 2 (°C) Rad. Solar LW incidente (Watt/m <sup>2</sup> )

\*Datos obtenidos a través de la página web de la DGA.

## 5.2.1 Meteorología glaciar Olivares Gamma

### 5.2.1.1 Monitoreo de Temperatura del Aire y Humedad Relativa en sector de estudio – glaciar Olivares Gamma

La temperatura del aire y humedad relativa registrada entre los días 18 de mayo y 2 de noviembre del año 2014 en la estación meteorológica ubicada en el glaciar Olivares Gamma se presenta en las Figura 27 y 28.

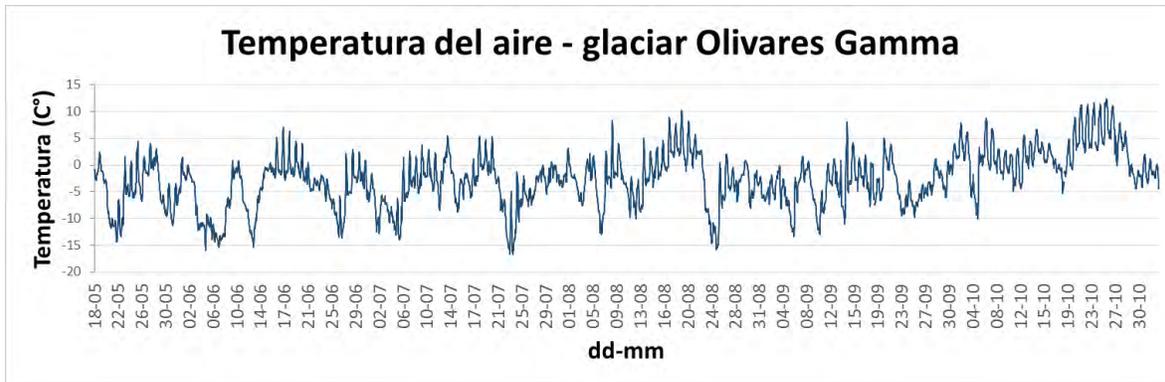


Figura 27: Monitoreo de temperatura instantánea medida en el glaciar Olivares Gamma (datos horarios).

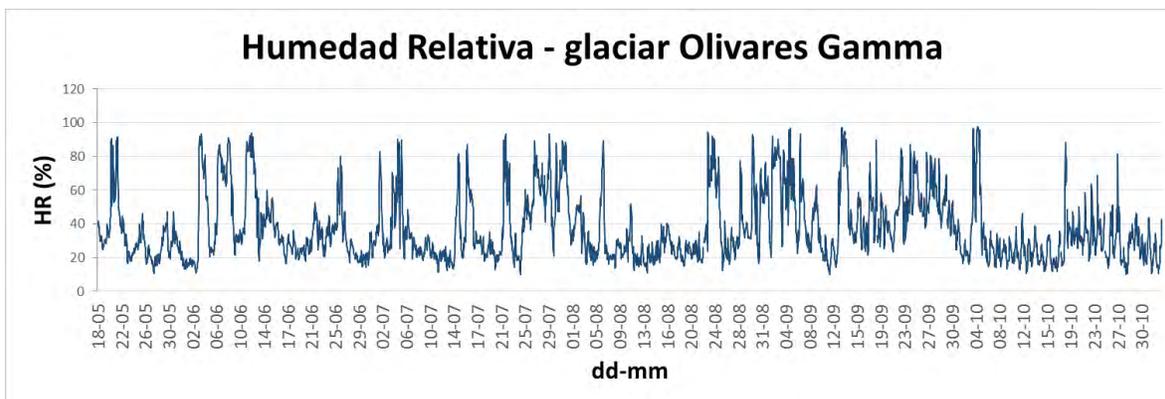


Figura 28: Monitoreo de Humedad Relativa en glaciar Olivares Gamma (datos horarios).

La temperatura promedio registrada en el período fue de  $-2,8^{\circ}\text{C}$ , con una mínima de  $-16,7^{\circ}\text{C}$  registrada el día 18-05-2014 a las 19:00 h y una máxima de  $12,3^{\circ}\text{C}$  registrada el día 25-10-2014 a las 16:00 h, presentando una amplitud de temperatura del período de  $29,0^{\circ}\text{C}$  (Figura 27).

La humedad relativa promedio para el período monitoreado fue de  $37,3\%$ , presentando una mínima de  $10\%$  y máxima de  $97,6\%$  (Figura 28).

### 5.2.1.2 Monitoreo de radiación solar en glaciar Olivares Gamma

La radiación solar de onda corta y larga registrada entre el 18 de mayo y el 2 de noviembre de 2014 en la estación meteorológica del glaciar Olivares Gamma se presenta en la Figura 29 y 30.

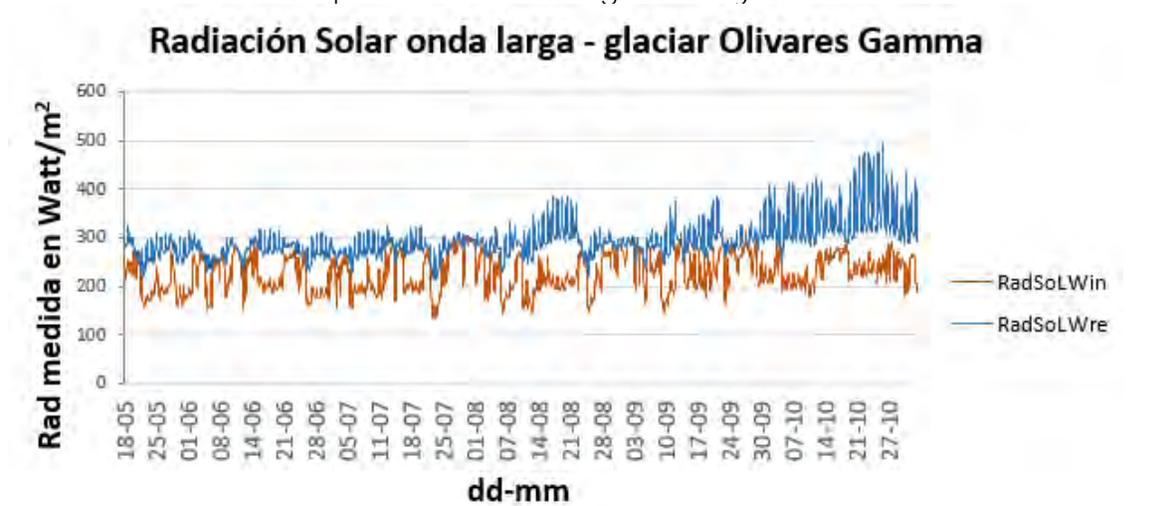


Figura 29: Monitoreo de radiación solar, onda corta en glaciar Olivares Gamma (datos horarios).

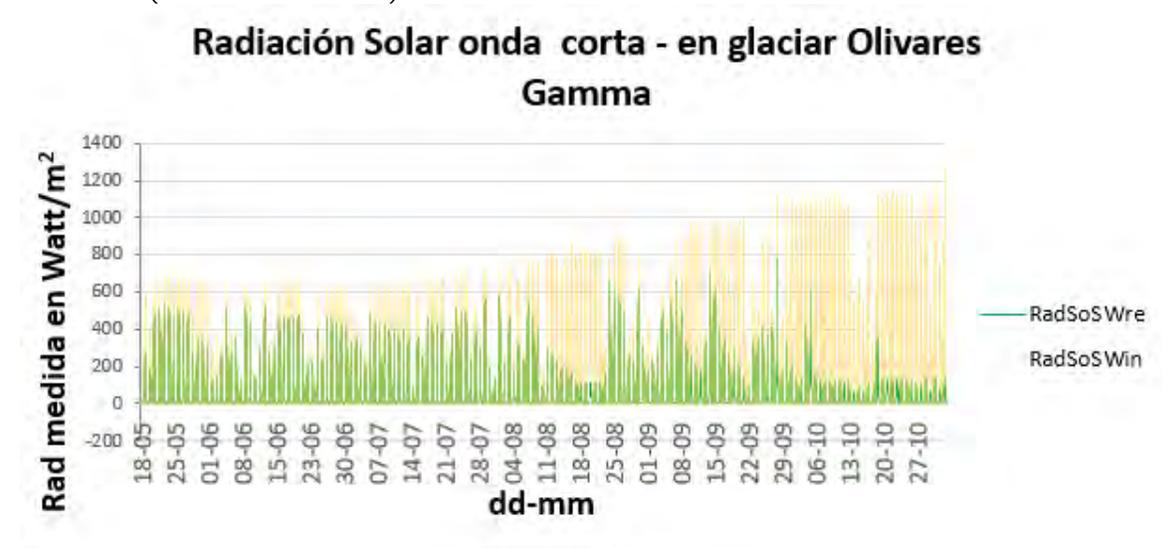


Figura 30: Monitoreo de radiación solar, larga, en glaciar Olivares Gamma (datos horarios).

La radiación solar de onda corta incidente presentó un valor promedio de  $177,9 \text{ w/m}^2$  y la reflejada de  $79,1 \text{ w/m}^2$ . Por su parte, la radiación

solar de onda larga incidente presentó un valor promedio de 227,5 w/m<sup>2</sup> y la reflejada de 294,9 w/m<sup>2</sup> (Figura 29).

### 5.2.1.3 Rosa de vientos en sector de estudio – glaciar Olivares Gamma.

A continuación se presenta en la figura 30 la rosa de vientos (dirección e intensidad de viento en m/s) calculada en base la información proporcionada por la DGA, correspondiente a los datos observados entre el 18 de mayo y el 2 de noviembre del 2014 en la estación meteorológica ubicada en el glaciar Olivares Gamma.

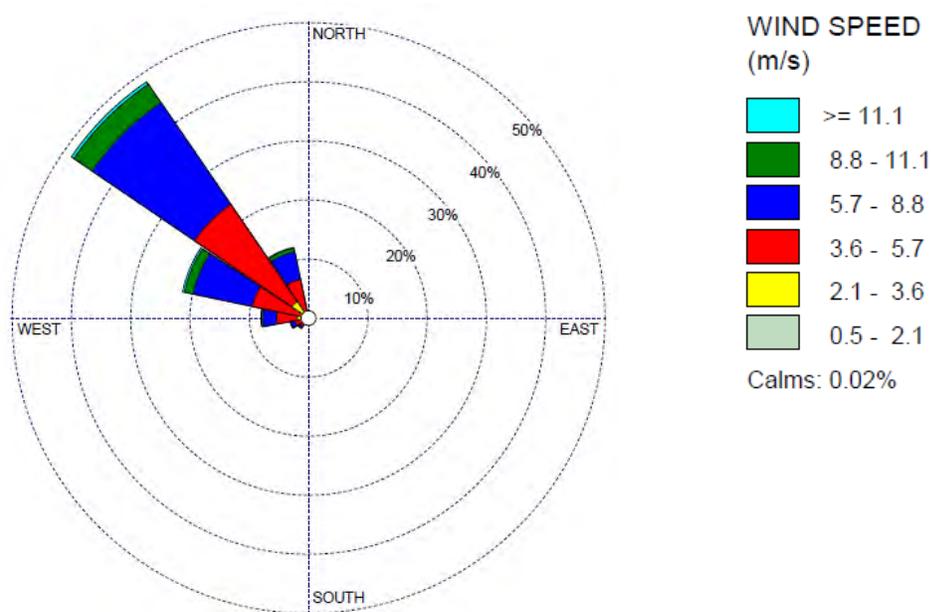


Figura 31: Rosa de Vientos del glaciar Olivares Gamma.

La dirección de viento que se observa con mayor frecuencia en el glaciar Olivares Gamma corresponde a vientos noroeste. Las mayores frecuencias de intensidades de viento fueron; 40,1% de vientos con intensidades entre 3,6 y 5,7 m/s y un 39,3% de vientos con intensidades entre 5,7 y 8,8 m/s, siendo éstas las intensidades más recurrentes del período (Figura 31).

## 5.2.2 Meteorología de Valle Olivares

### 5.2.2.1 Monitoreo de Temperatura del Aire y Humedad Relativa en Valle Olivares.

La temperatura del aire y humedad relativa registrada en Valle Olivares entre los días 19 de mayo y 2 de noviembre del año 2014, se presenta en las Figura 32 y 33.

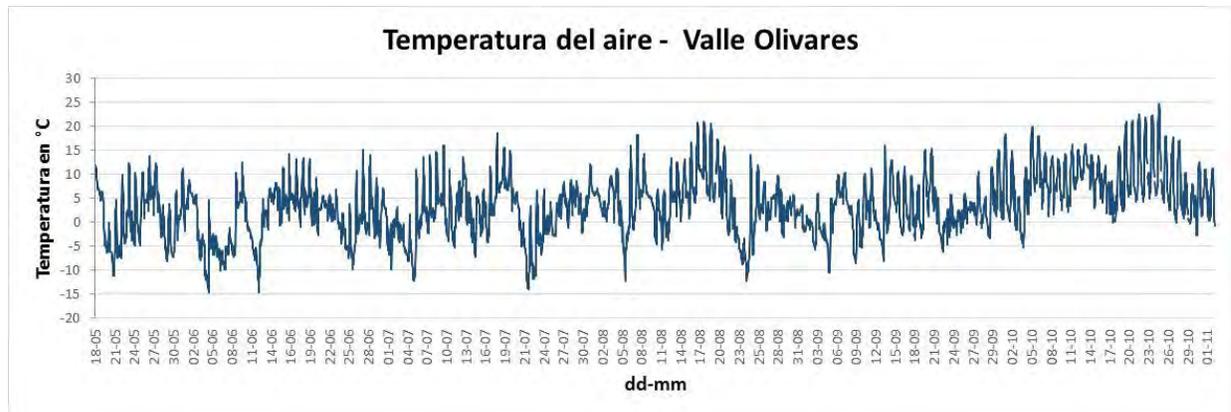


Figura 32: Monitoreo de temperatura del aire en Valle Olivares (datos horarios).

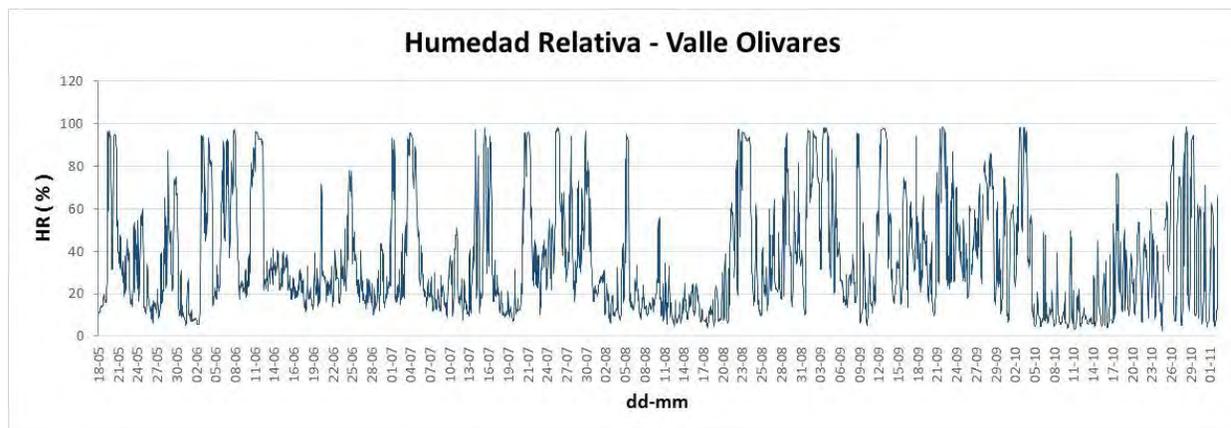


Figura 33: Monitoreo de Humedad Relativa en Valle Olivares (datos horarios).

La temperatura medida en Valle Olivares presentó un valor promedio de 3,8°C para el período monitoreado, con una mínima de -13,9°C registrada el día 02-11-2014 a las 7:41 h y una máxima de 23,2°C registrada el día 25-10-2014 a las 15:41 h, presentando una amplitud de temperatura del período de 37,1°C (Figura 32).

La humedad relativa medida en Valle Olivares registró un valor promedio de 35,7%, con un mínimo de 2,9% y máximo de 98,7% (Figura 33).

#### 5.2.2.2 Monitoreo de radiación solar en Valle Olivares

La radiación solar de onda corta y larga incidente medida entre el 19 de mayo y el 2 de noviembre de 2014 en Valle Olivares, se presenta a continuación en la Figura 34.

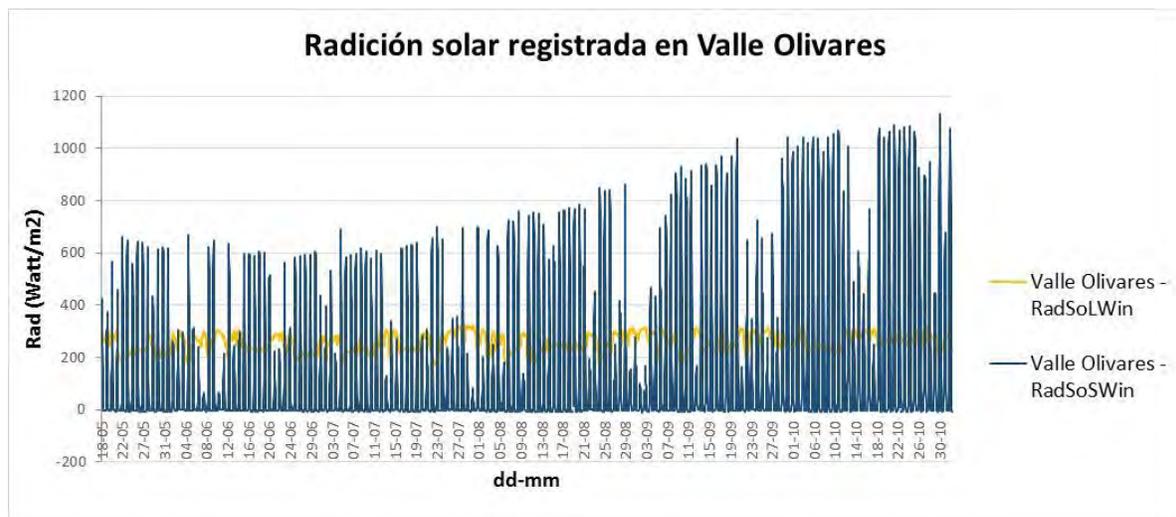


Figura 34: Monitoreo de radiación solar incidente en Valle Olivares (datos horarios).

La radiación solar de onda larga incidente presentó un promedio de 258,7 Watt/m<sup>2</sup>. Por su parte la radiación solar de onda corta incidente presentó un promedio de 140,8 Watt/m<sup>2</sup>. No se registran otros valores de radiación en este sitio de monitoreo (Figura 34).

#### 5.2.2.3 Rosa de vientos en Valle Olivares

La rosa de vientos (dirección e intensidad de viento en m/s) calculada en base a los registros de la estación Valle Olivares (Estación DGA) para el período 19 de mayo al 02 de noviembre de 2014, se presenta a continuación en la Figura 35.

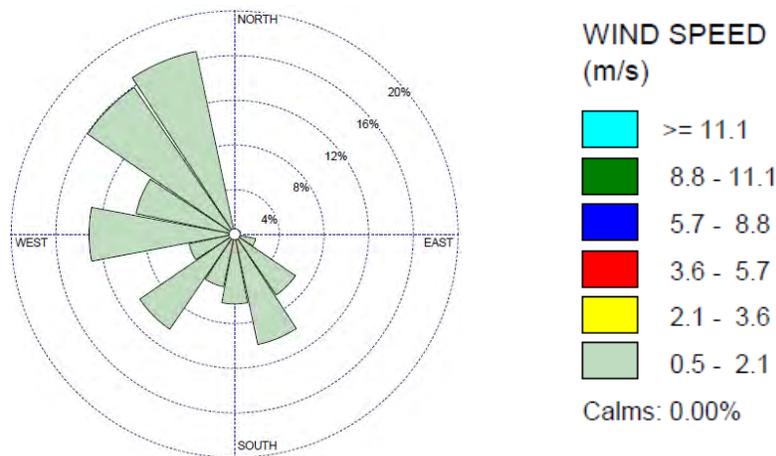


Figura 35: Rosa de vientos en Valle Olivares.

La dirección de viento que se registró con mayor frecuencia en Valle Olivares correspondió a vientos noroeste. Respecto a las intensidades de viento, el 100% de los registros muestran vientos que van desde los 0,5 a 2,1m/s de intensidad (Figura 35).

#### 5.2.2.4 Precipitación en Valle Olivares

La precipitación horaria y acumulada medida en Valle Olivares (estación DGA) para el período entre el 19 de mayo y el 2 de noviembre del 2014, se presenta a continuación en la Figura 36.



Figura 36: Precipitación horaria v/s acumulada en Valle Olivares (Datos horarios)

La precipitación en Valle Olivares presentó un valor acumulado de 39,7 mm para un período aproximado de 6 meses (Figura36).

#### 5.2.3 Meteorología en glaciar Bello

La ubicación de la estación meteorológica instalada sobre el glaciar Bello durante los días de campaña, es decir, entre el 12 y el 30 de septiembre de 2014, se presenta a continuación en la figura 37. En la tabla 4 se puede encontrar mayor información como coordenadas geográficas de ll emplazamiento de la estación y el detalle de los parámetros medidos.



Figura 37: Ubicación de la estación meteorológica en glaciar Bello.

Tabla 4: Coordenadas de ubicación y parámetros de medición en GB.

N°	Nombre	Latitud	Longitud	Altitud (m.s.n.m.)	Parámetros de medición
1	Estación de monitoreo	33° 31' 56,9" S	69° 56' 54,73" W	4290	Temp. del Aire (°C) Humedad (%) Dirección del Viento (grados) Velocidad del Vto. (m/s) Rad. Solar SW incidente (Watt/m2) Rad. Solar SW reflejada (Watt/m2) Rad. Solar LW incidente (Watt/m2) Rad. Solar LW reflejada (Watt/m2) Concentración, tamaño y distribución de partículas Black Carbon (ng/m <sup>3</sup> )

### 5.2.3.1 Monitoreo de Temperatura del Aire y Humedad Relativa en Glaciar Bello

Los registros de temperatura del aire y humedad relativa medidos en el glaciar Bello para el período desde el 12 al 30 de septiembre de 2014 se presentan a continuación en la Figura 38.

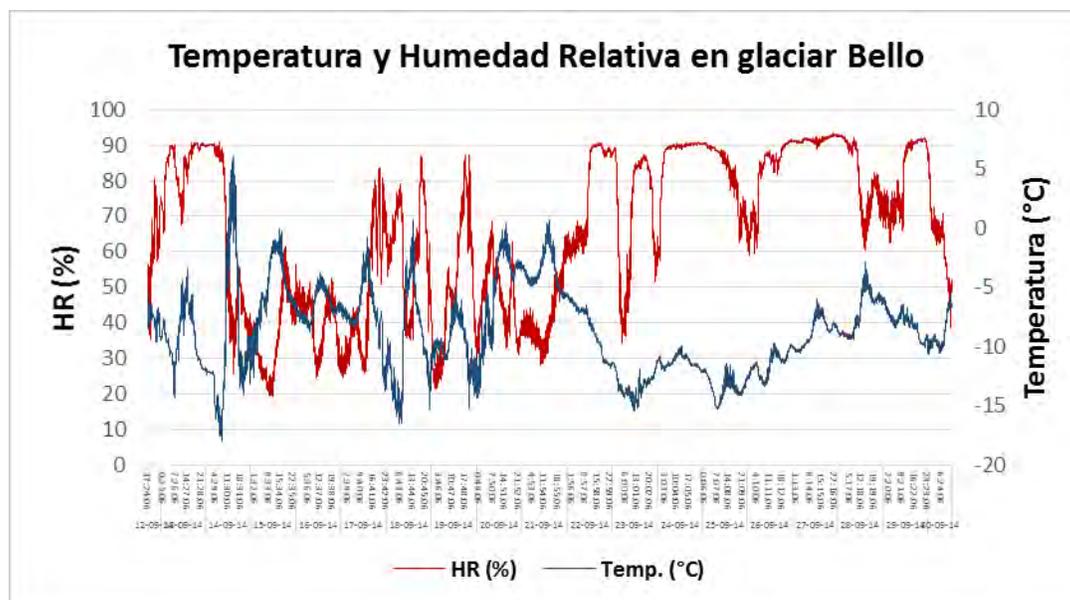


Figura 38: Monitoreo de Temperatura del Aire v/s Humedad Relativa en glaciar Bello.

En la figura 38 se puede apreciar la temperatura medida en el glaciar Bello, la cual presentó un valor promedio de  $-8,7^{\circ}\text{C}$  durante el período de monitoreo. La máxima temperatura registrada alcanzó  $6,1^{\circ}\text{C}$  y la mínima de  $-17,9^{\circ}\text{C}$ , registrándose una amplitud máxima en el período de  $23,1^{\circ}\text{C}$ . Respecto a la Humedad Relativa, ésta presentó un promedio de  $65,7\%$ , con una mínima de  $19,3\%$  y una máxima de  $93,3\%$ .

### 5.2.3.2 Rosa de vientos en glaciar Bello

La rosa de vientos (dirección e intensidad de viento en m/s) calculada en base a los registros medidos en el glaciar Bello para el período del 12 al 30 de septiembre de 2014, se presenta a continuación en la Figura 39.

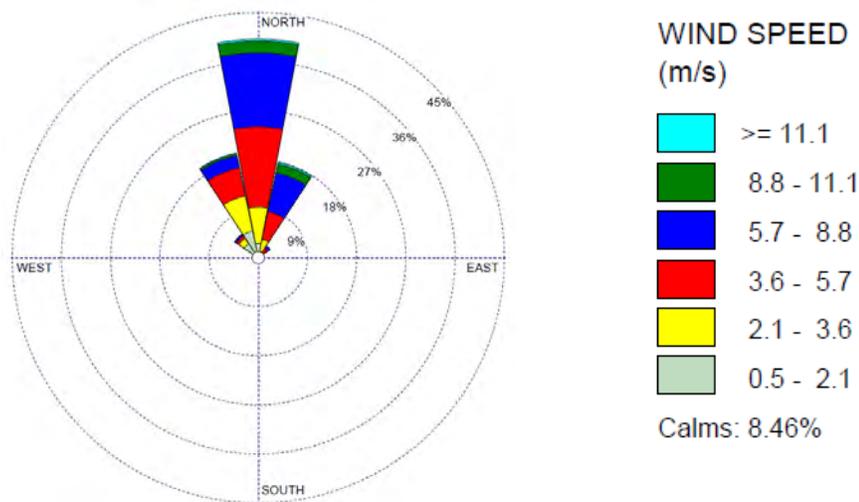


Figura 39: Rosa de Vientos en glaciar Bello.

Se puede apreciar que la dirección con mayor frecuencia registrada corresponde a vientos norte. Respecto a la velocidad del viento, el 27,3% de los casos presenta intensidades que fluctúan entre 3,6 y 5,7 m/s y un 23,9% de los vientos presentan intensidades entre 5,7 y 8,8 m/s, siendo ambas las intensidades más recurrentes del período (Figura 39).

### 5.2.3.3 Monitoreo de radiación solar y albedo en glaciar Bello

Las variables radiación solar y albedo medidas en el glaciar Bello entre el 18 y el 21 de septiembre de 2014 se presentan a continuación en las Figura 40 a 44.

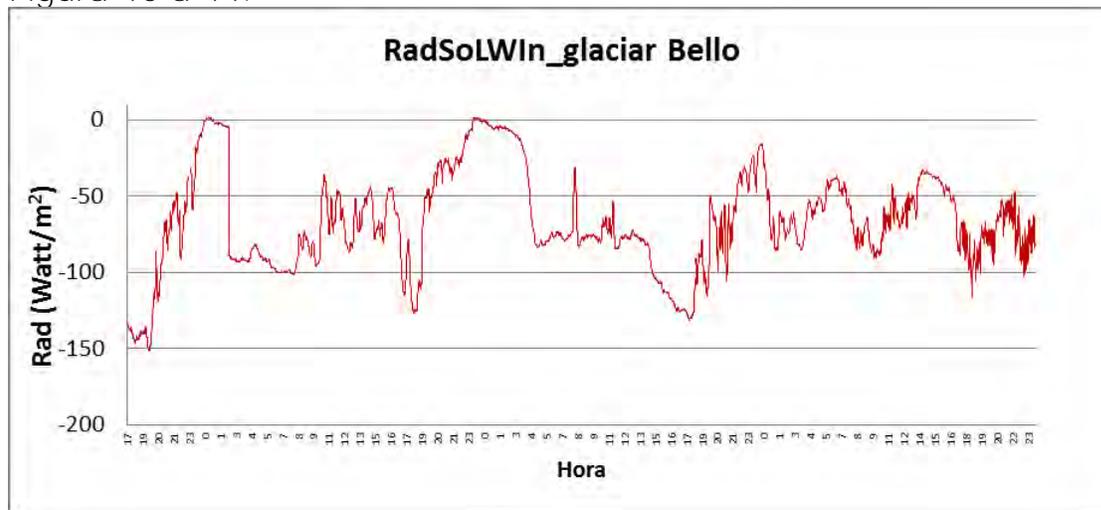


Figura 40: Radiación solar onda larga incidente en glaciar Bello.

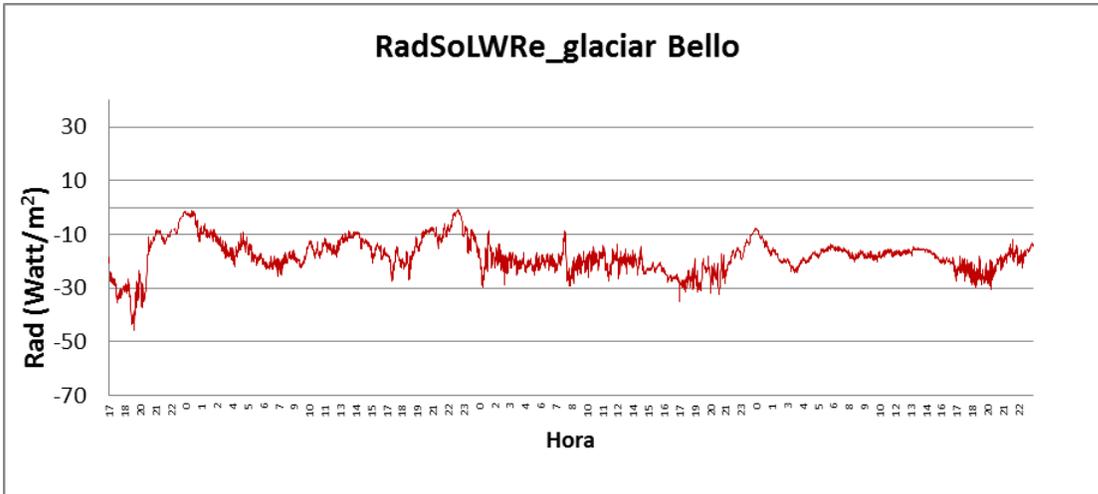


Figura 41: Radiación solar onda larga reflejada en glaciar Bello.

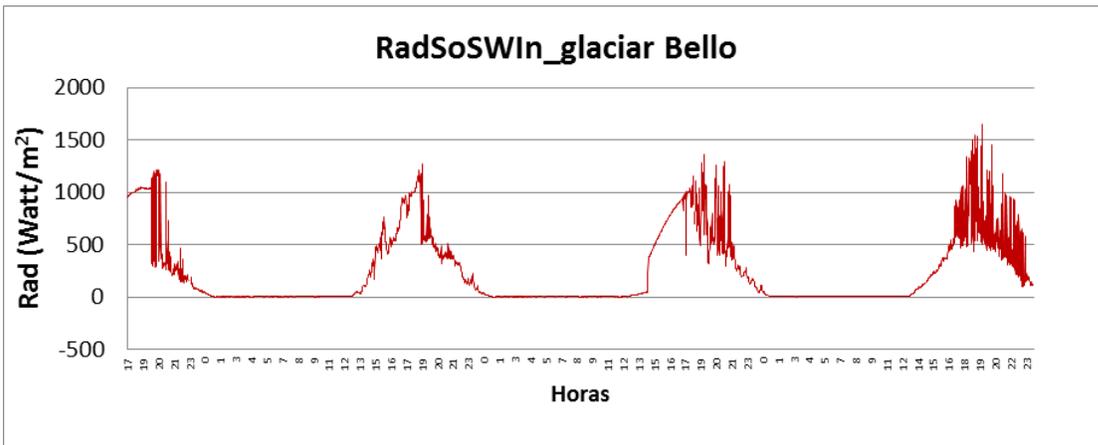


Figura 42: Radiación solar onda corta incidente en glaciar Bello.

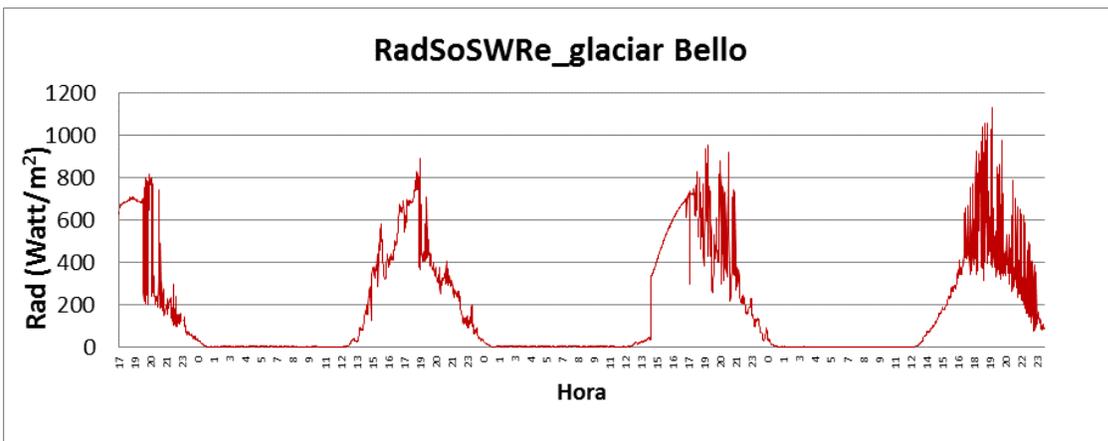


Figura 43: Radiación solar onda corta reflejada en glaciar Bello.

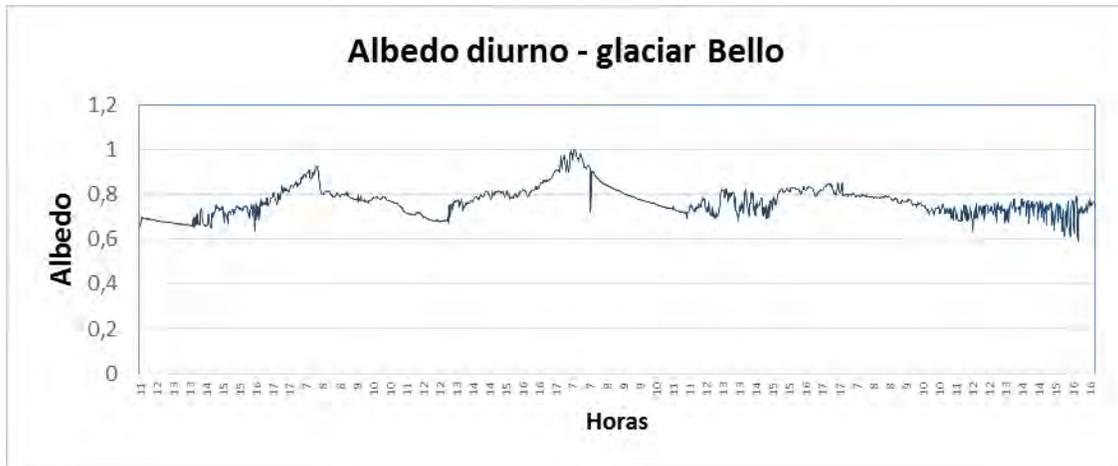


Figura 44: Albedo en glaciar Bello (los datos nocturnos fueron extraídos para lograr una mejor visualización de las series de datos).

La radiación de onda larga incidente, Figura 40 y 41, presentó un promedio de  $-68 \text{ w/m}^2$ , mientras que la reflejada presentó un promedio de  $-18 \text{ w/m}^2$ . La radiación de onda corta incidente, Figura 42, presentó un valor promedio de  $491 \text{ w/m}^2$ , mientras que la reflejada, figura 43, correspondió a  $363 \text{ w/m}^2$ .

El cálculo de albedo (diurno) del glaciar Bello graficado en la Figura 44, presentó un valor promedio de 0,77, obteniéndose un valor mínimo de 0,59 y un máximo de 1,00. Esto en consideración de la ecuación para el cálculo de albedo o coeficiente de reflexión ( $r$ ) que corresponde a la relación entre la radiación solar reflejada y la radiación solar incidente.

$$r = \text{rad. reflejada} / \text{rad. Incidente}$$

Tabla 5: Resumen de datos de albedo glaciar Bello.

ALBEDO GLACIAR BELLO					
	Corta Inc	Corta Ref	Larga Inc	Larga Ref	Albedo
Prom	491	363	-68	-18	0,77
Max	1646	1132	2	-1	0,59
Min	2	5	-151	-46	1,00

Respecto a bibliografía encontrada para contrastar los valores medidos, recomendamos leer la siguiente información:

Observaciones:

Se tienen otras mediciones de albedo discontinuas desarrolladas durante esta campaña que no fueron representadas en este gráfico, en donde se privilegió exponer el albedo medido en un período de tiempo en forma continua.

El albedo promedio de la tierra es normalmente 0,31. El albedo de diversas superficies varía con la vegetación y los diferentes suelos del planeta. A continuación se presenta un listado de rangos de albedos encontrados en literatura, correspondientes a superficies de nuestro planeta.

Tabla 6: Rangos de albedo típico de superficies de nuestro planeta. (<http://earthobservatory.nasa.gov/Features/Clouds/>)

<b>Superficies</b>	<b>Rangos de Albedo</b>
Nieve fresca	0,80 a 0,90
Nieve vieja derretida	0,40 a 0,80
Arena de desierto	0,40
Praderas o pastizales	0,25
Árbol de hojas caducas	0,15 a 0,18
Coníferas	0,08 a 0,15
Tundra	0,20
Océanos	0,07 a 0,10

## 5.2.4 Meteorología en glaciar Olivares Alfa

Para iniciar el análisis de la meteorología en el glaciar Olivares Alfa (GOA), se presenta a continuación en la Figura 45 la ubicación de la estación meteorológica instalada sobre el glaciar durante los días de campaña, es decir, entre el 21 y el 29 de octubre del 2014.



Figura 45: Imagen de ubicación de la estación de monitoreo en glaciar Olivares Alfa.

Tabla 7: Coordenadas de ubicación y parámetros de medición en GOA.

N°	Nombre	Latitud	Longitud	Altitud (m.s.n.m.)	Parámetros de medición
1	Estación de monitoreo	33°11'33,42"S	70°13'16,91"O	4470	Temp. del Aire (°C) Humedad (%) Dirección del Viento (grados) Velocidad del Vto. (m/s) Rad. Solar SW incidente (Watt/m2) Rad. Solar SW reflejada (Watt/m2) Rad. Solar LW incidente (Watt/m2) Rad. Solar LW reflejada (Watt/m2) Concentración, tamaño y distribución de partículas Black Carbon (ng/m <sup>3</sup> )

### 5.2.4.1 Monitoreo de Temperatura del Aire y Humedad Relativa

Respecto al monitoreo de temperatura del aire y humedad relativa medido en el glaciar Olivares Alfa, se presenta a continuación la gráfica para el período comprendido entre el 21 y el 29 de octubre de 2014.

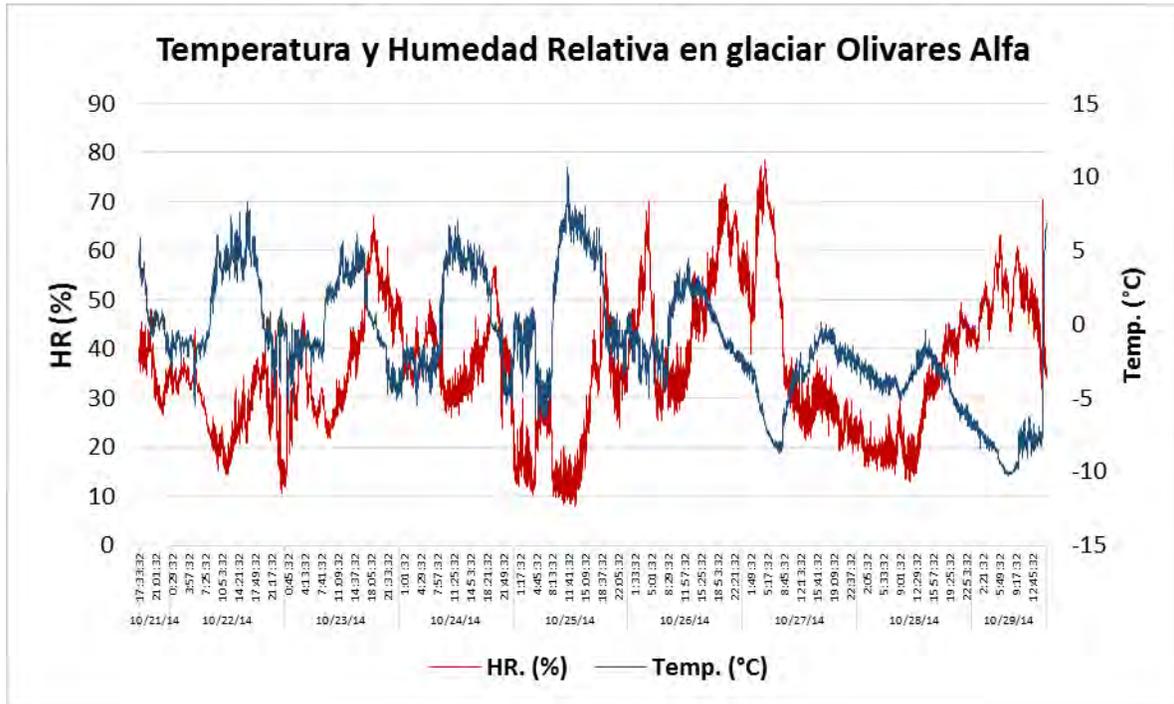


Figura 46: Monitoreo de temperatura v/s humedad relativa en glaciar Olivares Alfa.

En la Figura 46, 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  $10,7\text{ }^{\circ}\text{C}$  y la mínima  $-10,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , registrándose una amplitud máxima en el período de  $21,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Respecto a la Humedad Relativa, Figura 46, presentó un promedio de  $36,1\%$ , una mínima de  $7,9\%$  y una máxima de  $78,6\%$ .

### 5.2.4.2 Rosa de Vientos

La rosa de vientos (dirección e intensidad de viento en m/s) calculada para el glaciar Olivares Alfa en base a los registros medidos entre el 21 y el 29 de Octubre de 2014 se presenta a continuación en la figura 47.

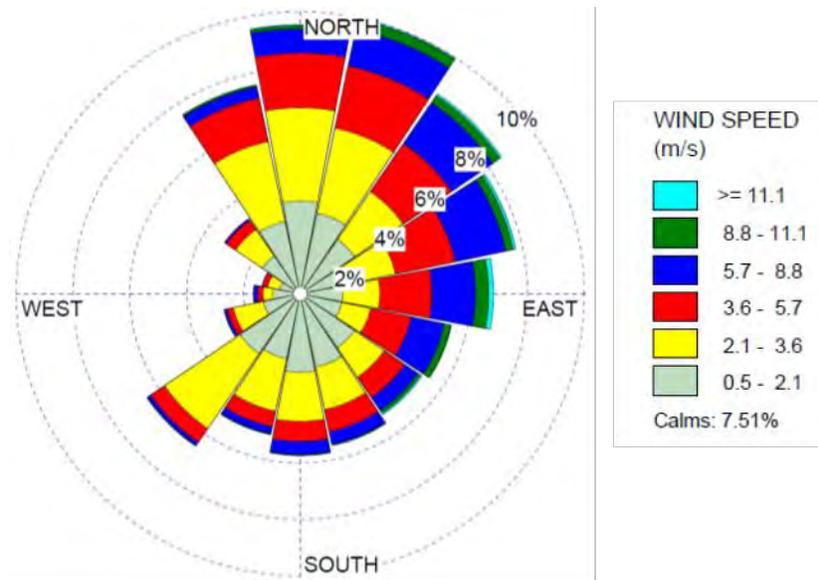


Figura 47: Rosa de vientos en glaciar Olivares Alfa.

La dirección con mayor frecuencia observada en el GOA durante el período de monitoreo corresponde a vientos nor-noreste. Los registros de las intensidades de viento mostraron que las mayores frecuencias van desde un 33,1% para vientos con intensidades entre 0,5 y 2,1 m/s, y un 27,9% de vientos con intensidades entre 2,1 y 3,6 m/s, siendo ambas las intensidades más recurrentes del período (Figura 47). De todos modos sería importante tener en consideración que la dirección predominante este agrupa también a vientos con una importante frecuencia durante el período de monitoreo en el GOA. Esto será usado posteriormente en los próximos capítulos para explicar el comportamiento de los aerosoles y el BC.

#### 5.2.4.3 Monitoreo de radiación solar y albedo en glaciar Olivares Alfa

Las variables radiación solar y albedo registradas en el glaciar Olivares Alfa entre el 21 y el 29 de octubre de 2014 se presentan a continuación en las figuras 48 a 51. Las gráficas muestran las radiaciones de onda corta y larga, incidente y reflejada respectivamente, además de la gráfica de albedo medido.

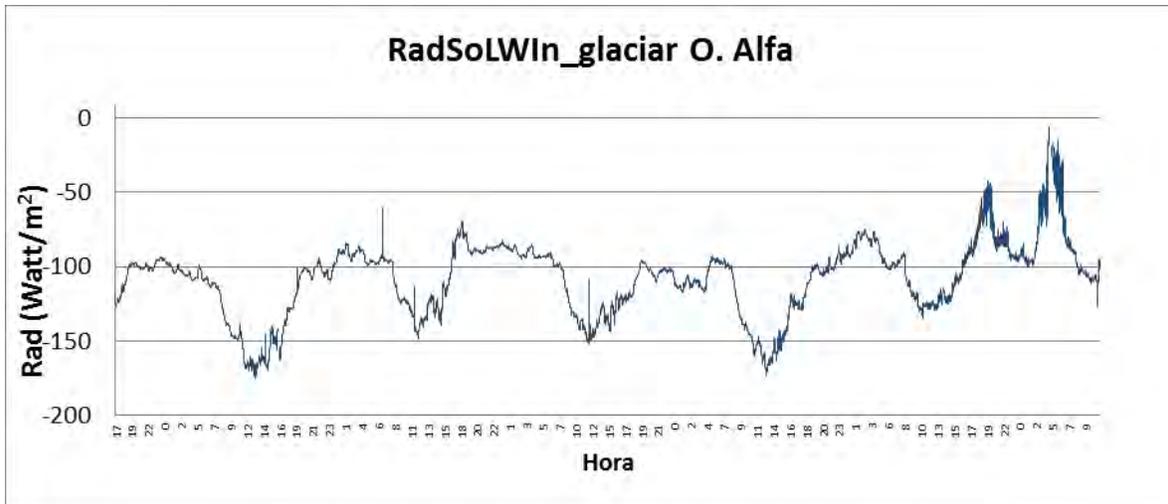


Figura 48: Radiación solar onda larga incidente en glaciar Olivares Alfa.

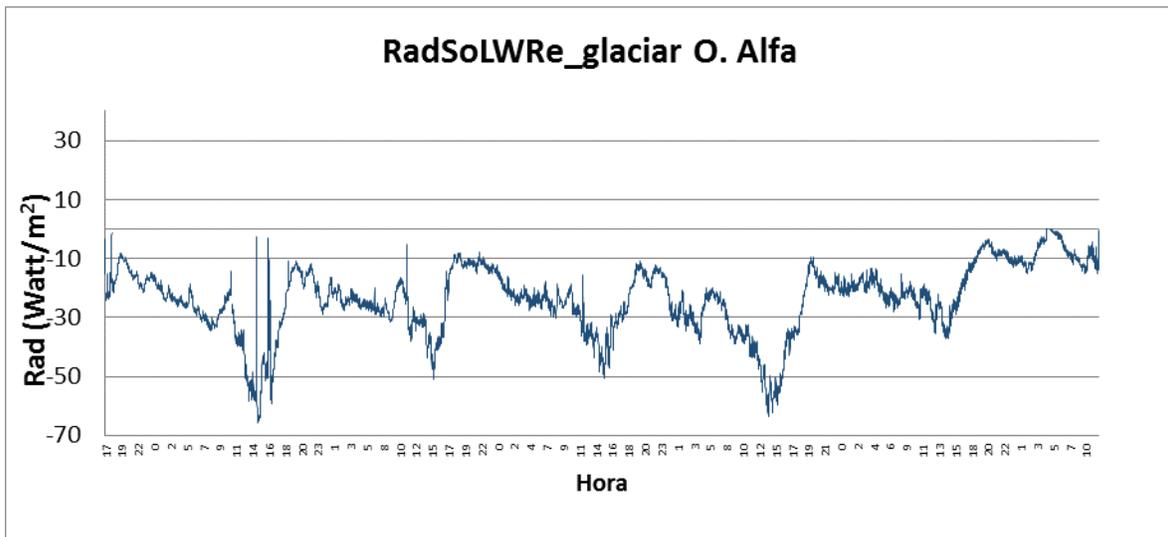


Figura 49: Radiación solar onda larga reflejada en glaciar Olivares Alfa.

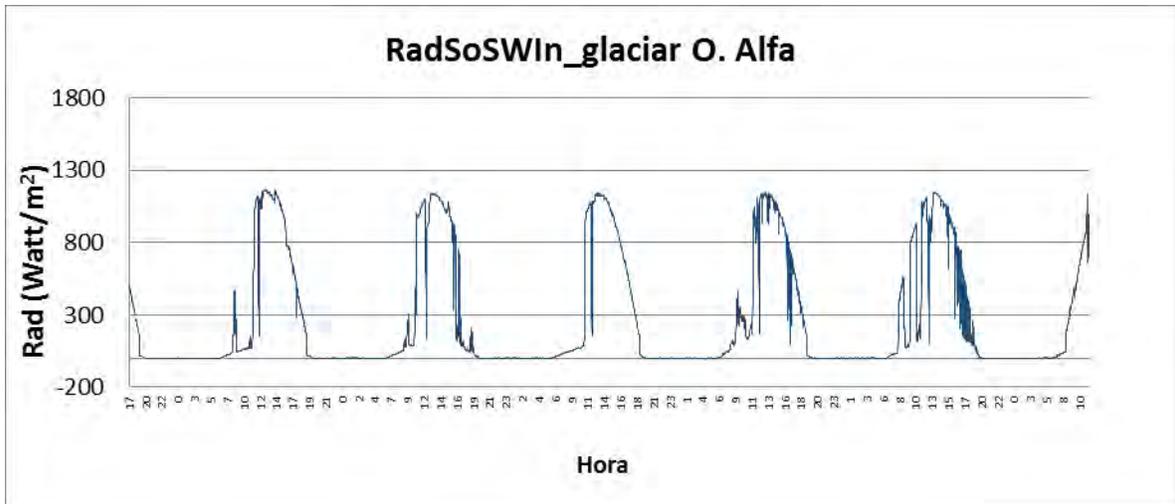


Figura 50: Radiación solar onda corta incidente en glaciar Olivares Alfa.

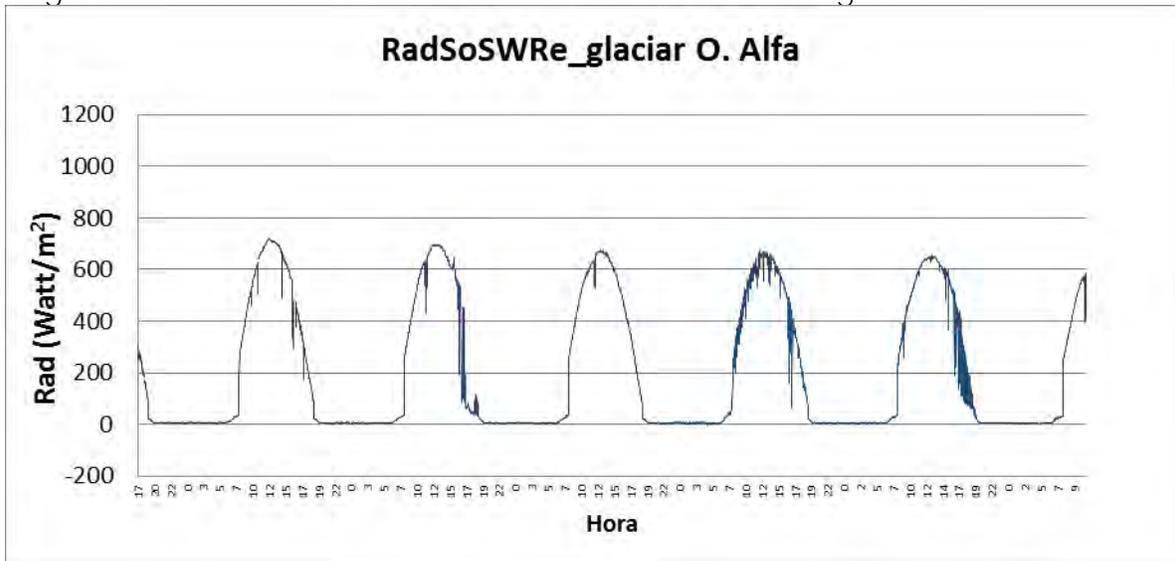


Figura 51: Radiación solar onda corta reflejada en glaciar Olivares Alfa.



Figura 52: Albedo en glaciar Olivares Alfa (datos nocturnos fueron extraídos para lograr una mejor visualización de las series de datos).

Respecto al monitoreo de radiación en GOA, la radiación de onda larga incidente (Figura 48) presentó un valor promedio de  $-108 \text{ w/m}^2$ , mientras que la reflejada (Figura 49) presentó un promedio de  $-24 \text{ w/m}^2$ . Por su parte la radiación de onda corta incidente (Figura 50) presentó un valor promedio de  $270 \text{ w/m}^2$ , mientras que la reflejada (Figura 51) un valor promedio de  $207 \text{ w/m}^2$ .

El cálculo de albedo en GOA presentó un promedio de 0,64 y una mínima y máxima de 0,36 y 0,99, respectivamente (Figura 52).

Tabla 8: Resumen de datos de albedo glaciar olivares Alfa.

RADIACIONES GLACIAR OLIVARES ALFA					
	Corta -in	Corta -ref	Larga -in	Larga-ref	Albedo
Promedio	270	207	-108	-24	0,64
Min	-7	-2	-175	-66	0,36
Max	1166	720	-6	0	0,99

Respecto a bibliografía encontrada para contrastar los valores medidos, recomendamos leer la siguiente información:

Observaciones:

El albedo promedio de la tierra es normalmente 0,31. El albedo de diversas superficies varía con la vegetación y los diferentes suelos del planeta. A continuación se presenta un listado de rangos de albedos encontrados en literatura, correspondientes a superficies de nuestro planeta.

Tabla 9: Rangos de albedo típico de superficies de nuestro planeta. (<http://earthobservatory.nasa.gov/Features/Clouds/>)

<b>Superficies</b>	<b>Rangos de Albedo</b>
Nieve fresca	0,80 a 0,90
Nieve vieja derretida	0,40 a 0,80
Arena de desierto	0,40
Praderas o pastizales	0,25
Árbol de hojas caducas	0,15 a 0,18
Coníferas	0,08 a 0,15
Tundra	0,20
Océanos	0,07 a 0,10

### 5.2.5 Comparación de mediciones de radiación solar en glaciares Bello y Olivares Alfa

Con el objetivo de contrastar las mediciones de radiación solar medidas en las dos campañas de monitoreo realizadas, a continuación se presentan en las figuras 53 y 54 la comparación de la radiación solar de onda corta incidente entre el glaciar Olivares Alfa y Bello, como también la comparación de la radiación solar de onda corta reflejada en cada glaciar.

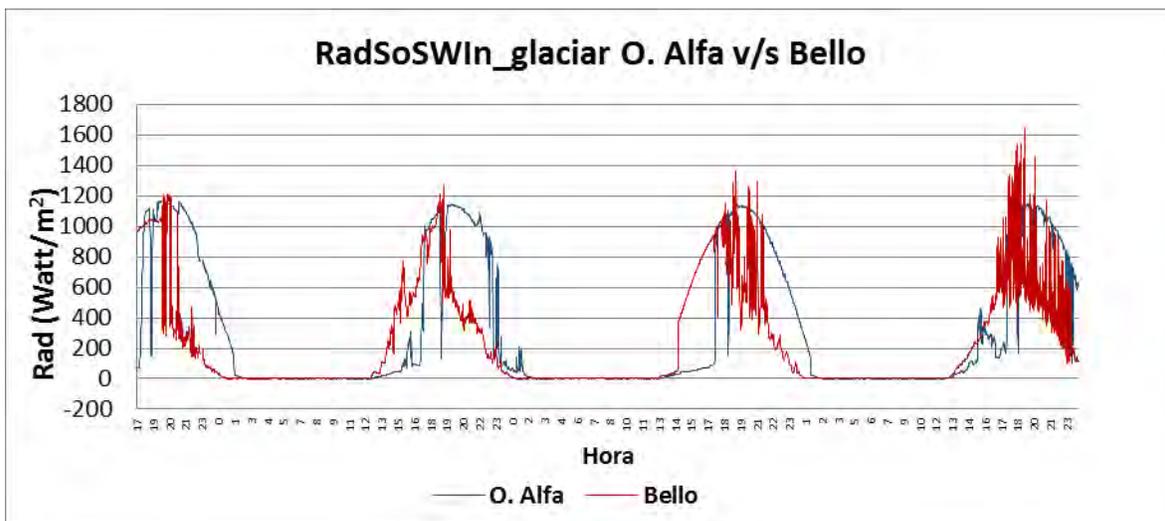


Figura 53: Radiación onda corta incidente glaciar Olivares Alfa v/s glaciar Bello.

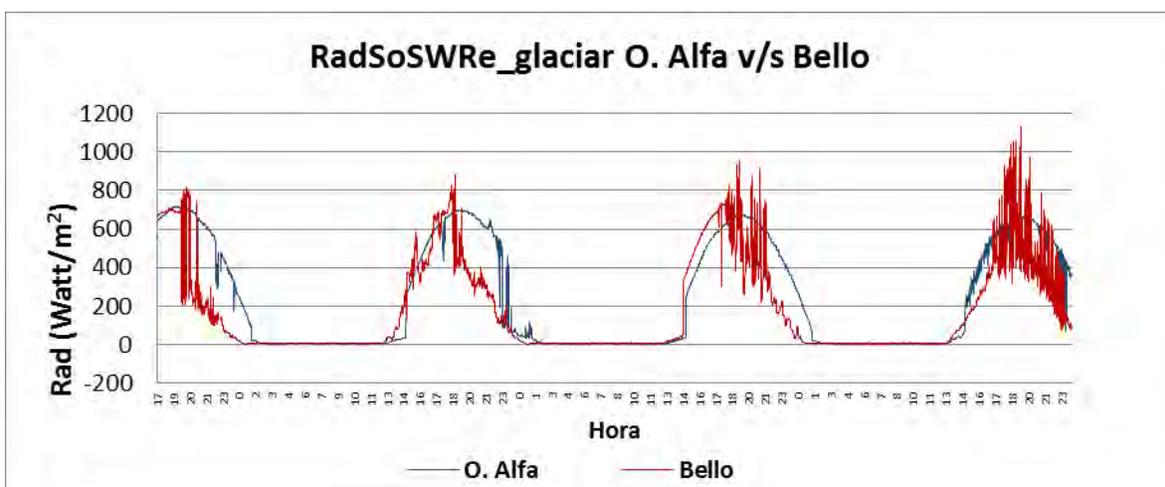


Figura 54. Comparación de mediciones de radiación solar de onda corta reflejada en horarios similares en glaciares Olivares Alfa y Bello.

La radiación de onda corta, incidente y reflejada, presentó un comportamiento similar si se compara en ambos glaciares estudiados y a simple vista parecieran poseer valores similares de radiación (Figura 53 y Figura 54). No obstante, para corroborar esta similitud, se realizaron ensayos estadísticos con los valores observados mediante pruebas de comparación de medias y aplicando el estadístico de Kolmogorov-Smirnov, los cuales arrojaron que existen diferencias estadísticamente significativas (95% probabilidad) entre las radiaciones incidentes y reflejada de onda corta al comparar ambos glaciares. Esto en términos simples, se asociaría a que las campañas se realizaron en momentos distintos del año, con un desfase de casi un mes entre una y otra, lo cual sin duda se refleja primero en el desfase temporal de las curvas graficadas en cada caso, como también en la magnitud de su intensidad y amplitud.

Con el énfasis de contrastar las mediciones de radiación solar medidas en las dos campañas de monitoreo realizadas, a continuación se presenta en la figura 55 la comparación de la radiación solar de onda larga incidente entre el glaciar Olivares Alfa y Bello, como también la comparación de la radiación solar de onda larga reflejada en cada glaciar en la figura 56.

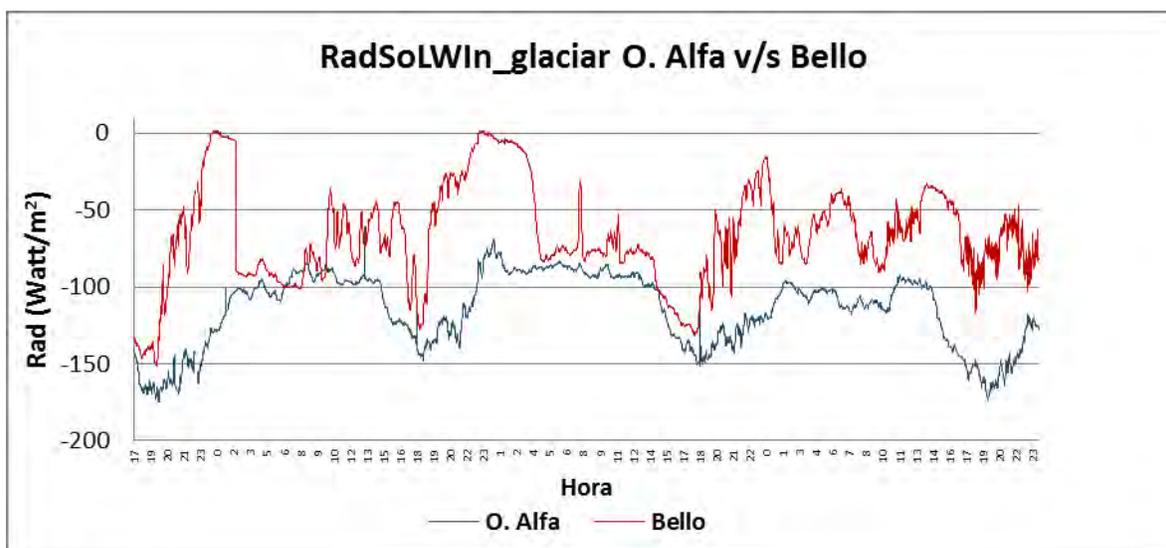


Figura 55: Radiación onda larga incidente glaciar Olivares Alfa v/s glaciar Bello.

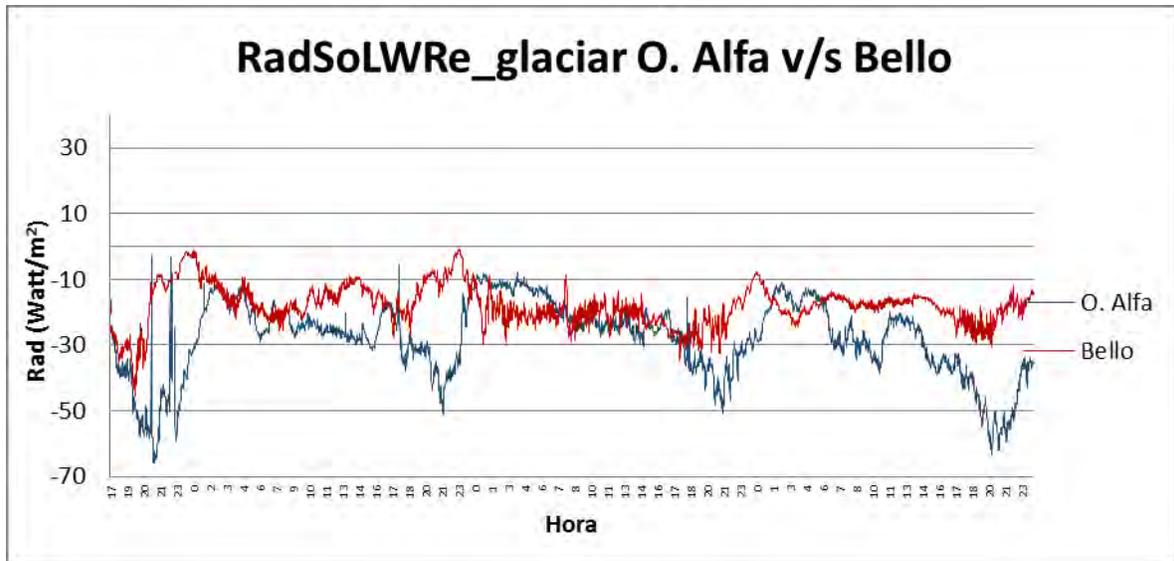


Figura 56: Comparación de mediciones de radiación solar de onda larga reflejada en glaciares Olivares Alfa y Bello.

Como se observa en la figura 55 y 56, la radiación de onda larga incidente presenta un comportamiento similar en ambos glaciares estudiados. No obstante, se puede ver a simple vista que la magnitud de la radiación incidente que llega al glaciar Bello es mayor a la radiación incidente del glaciar Olivares Alfa. Así también, la radiación solar de onda larga reflejada muestra valores mayores en el glaciar Bello. No obstante lo anterior y para corroborar diferencias entre los valores observados, dichas series de datos fueron sometidas a pruebas estadísticas de comparación de medias y aplicando el estadístico de Kolmogorov-Smirnov los cuales arrojaron que existen diferencias estadísticamente significativas (95% probabilidad) entre las radiaciones incidentes y reflejada de onda larga de los glaciares Bello y Olivares Alfa. Habiendo realizado este ensayo y tal como se describe en los párrafos anteriores, se realizó el cálculo de las diferencias de radiación en cada glaciar por separado ( $\text{RadSolWin} - \text{RadSolWre}$ ), esto como método de normalización de los datos para cada glaciar y en cada rango de longitud de onda, en este caso onda larga. Con este método de comparación, se puede evidenciar y evaluar si existe una variación intra grupo de datos (diferencias entre las radiaciones registradas en un mismo glaciar) y si dichas diferencias son significativas. Esta comparación se puede apreciar en la Figura 58.

A continuación se presentan en las gráficas 57 y 58 las diferencias absolutas de radiación solar incidente y reflejada en ambos glaciares en estudio.

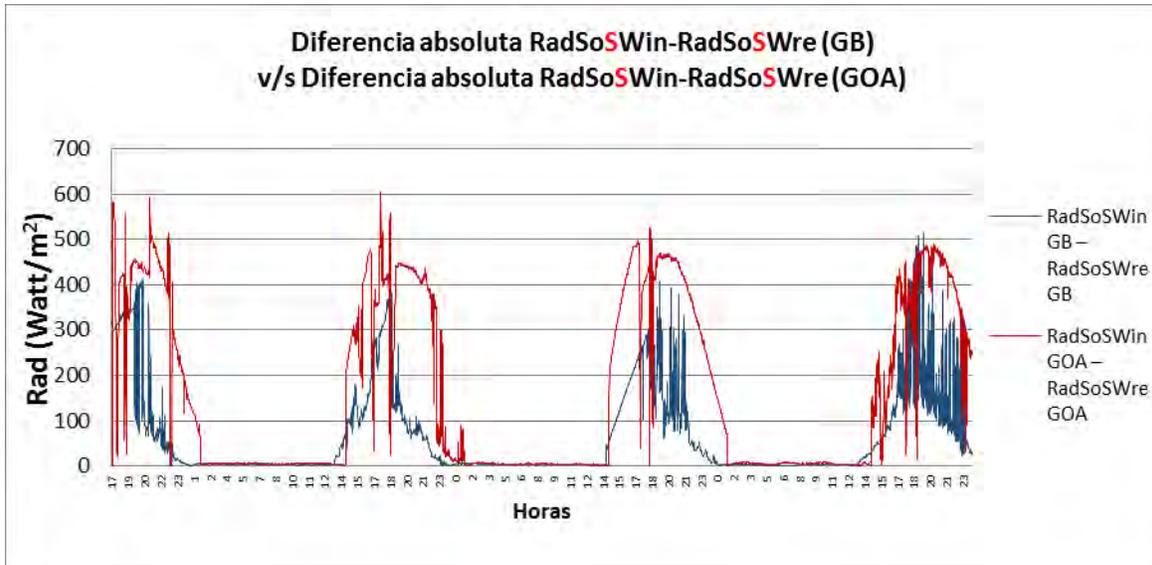


Figura 57: Diferencia absoluta de onda corta incidente-reflejada en glaciar Bello y glaciar Olivares Alfa.



Figura 58: Diferencia absoluta de radiación de onda larga incidente-reflejada en glaciar Bello y glaciar Olivares Alfa.

Respecto a las figuras 57 y 58, se calculó la diferencia absoluta entre la energía incidente y reflejada en cada glaciar por separado, a estos datos

también se les aplicó el ensayo estadístico de comparación de medias y del estadístico de Kolmogorov-Smirnov para corroborar la similitud o diferencia entre las series observadas. Los resultados estadísticos arrojaron que existen diferencias estadísticamente significativas (95% probabilidad) entre las radiaciones incidente y reflejada de cada glaciar, considerando los datos de onda corta y de onda larga respectivamente y para ambos glaciares. Los valores de las diferencias de radiación antes mencionadas, entregaron para la diferencia entre (RadSoSWin GB – RadSoSWre GB) un valor promedio de 66,5; para la diferencia entre (RadSoLWin GB – RadSoLWre GB), un valor promedio de 50,0; para la diferencia entre (RadSoSWin GOA – RadSoSWre GOA) un valor de 164,5; y finalmente para la diferencia entre (RadSoLWin GOA – RadSoLWre GOA) un valor promedio de 86,5. Estos resultados dan cuenta que al analizar cada glaciar por separado éstos presentan una tasa de absorción de energía distinta y característica de cada uno de ellos, lo cual estaría supeditado, en primer lugar y en términos generales, a las características físicas de su superficie de reflexión, lo cual sin duda condiciona su capacidad de reflejar la radiación incidente y de esta forma transferir a la atmósfera gran parte de la radiación recibida. Como se puede ver en la figura 57 y 58, las diferencias entre la energía incidente y reflejada serían mayor en el glaciar Olivares Alfa en comparación con el glaciar Bello, lo cual estaría indicando que el primero de ellos estaría absorbiendo o reteniendo mayor cantidad de energía en su superficie, en ambos tipos de longitud de onda, lo cual sin duda podría estar condicionado por la presencia de agentes o sustancias (material particulado) que absorben o retienen parte de la radiación incidente en la superficie del glaciar.

En otras palabras, el albedo del glaciar Bello es un 17% mayor que el albedo del glaciar Olivares Alfa, esta diferencia muy probablemente se deba al tipo de contaminación que está recibiendo este glaciar, afectando directa y negativamente a su albedo. Cuando verificamos estas diferencias de albedo en función de la radiación incidente menos la reflejada para la longitud de onda corta, los resultados indican que el glaciar Bello presenta 2,47 veces mayor reflexión que el glaciar Olivares Alfa; cuando realizamos el mismo cálculo para la longitud de onda larga, los resultados indican que el glaciar Bello presenta 1,73 veces mayor reflexión que el glaciar Olivares Alfa.

Los resultados de la meteorología registrada y analizada entre e intra glaciar, así como de radiación será contrastada y complementada con los monitoreos de aerosoles y nieve en los siguientes capítulos.

### 5.3. Mediciones de concentración y distribución por tamaño de material particulado atmosférico (MP)

#### 5.3.1 Material particulado atmosférico en glaciar Olivares Alfa

Se midió la concentración de material particulado atmosférico en tiempo real (cada 1 minuto) utilizando un equipo espectrómetro laser de aerosoles (EDM 107, Grimm, Alemania) entre los días 21 y 29 de octubre del 2014. Los resultados pueden ser observados en la figura 59.

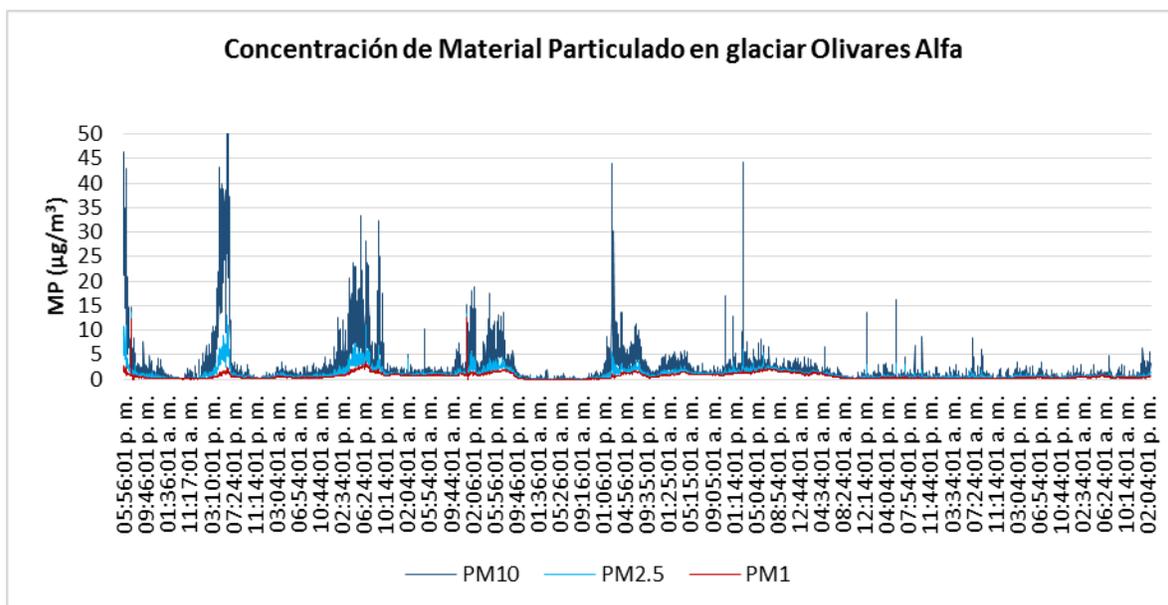


Figura 59. Concentración de material particulado PM10, PM2,5 y PM1 en glaciar Olivares Alfa.

En la figura 59 se puede observar que la concentración de material particulado atmosférico presenta ciclos marcados de aumento y disminución de concentración durante los primeros 6 días de muestreo, aumentando la concentración de PM10, PM2,5 y PM1 entre las 12:00 y las 20:00 h. aproximadamente. A partir del séptimo día de muestreo no se observó el mismo fenómeno, produciéndose un decrecimiento de la concentración promedio de 78%, 66% y 61% para la concentración de PM10, PM2,5 y PM1, respectivamente.

Para intentar establecer el origen de estos aumentos cíclicos de concentración de material particulado se hizo un análisis de dirección del viento por separado para los primeros 6 días de monitoreo y los resultados se aprecian en la figura 60.

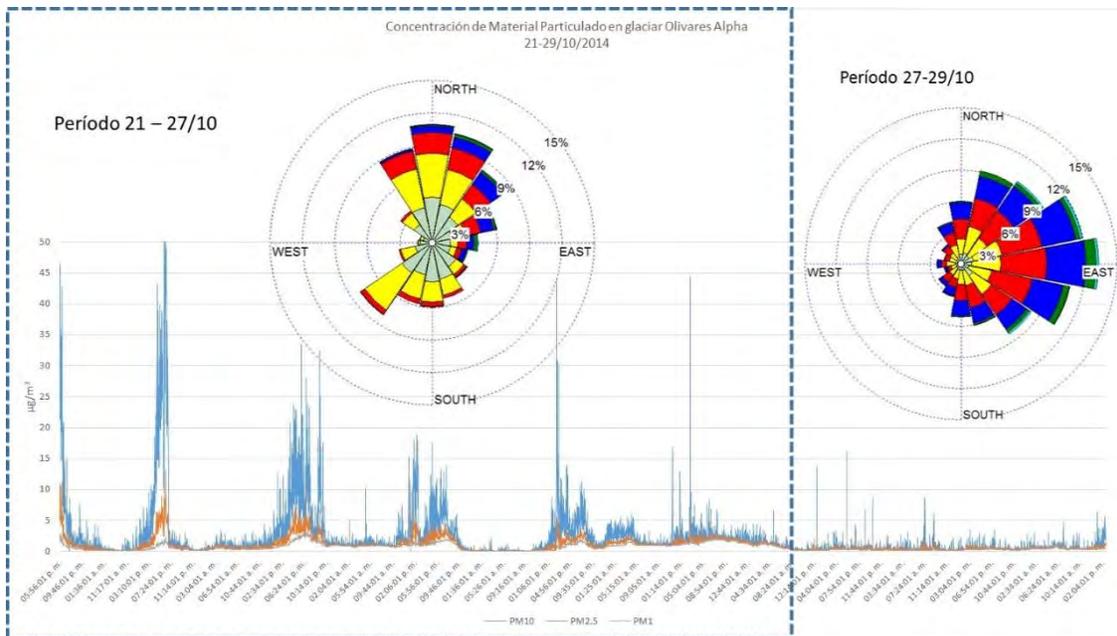


Figura 60. Rosas de vientos separada por períodos específicos de monitoreo (21-27/10/2014 y 27-29/10/2014) en glaciar Olivares Alfa.

Como se observa en la figura 60, durante el período del 21 al 27 de Octubre, cuando se observan los ciclos de aumento y disminución de concentración de partículas atmosféricas, el viento proviene mayoritariamente de la dirección nor-noroeste. Posteriormente, en el período comprendido entre el 27 y 29 de Octubre, cuando desaparecen los ciclos de aumento y disminución de concentración de material particulado atmosférico, el viento cambia de dirección proviniendo mayoritariamente desde el Este. Para intentar establecer la procedencia del material particulado atmosférico, fundamentalmente cuando éste contaminante manifiesta los ciclos de aumento y disminución de concentración, se superpusieron las rosas de vientos construidas para cada período de monitoreo sobre un mapa de la zona de estudio del glaciar Olivares Alfa (figura 61).

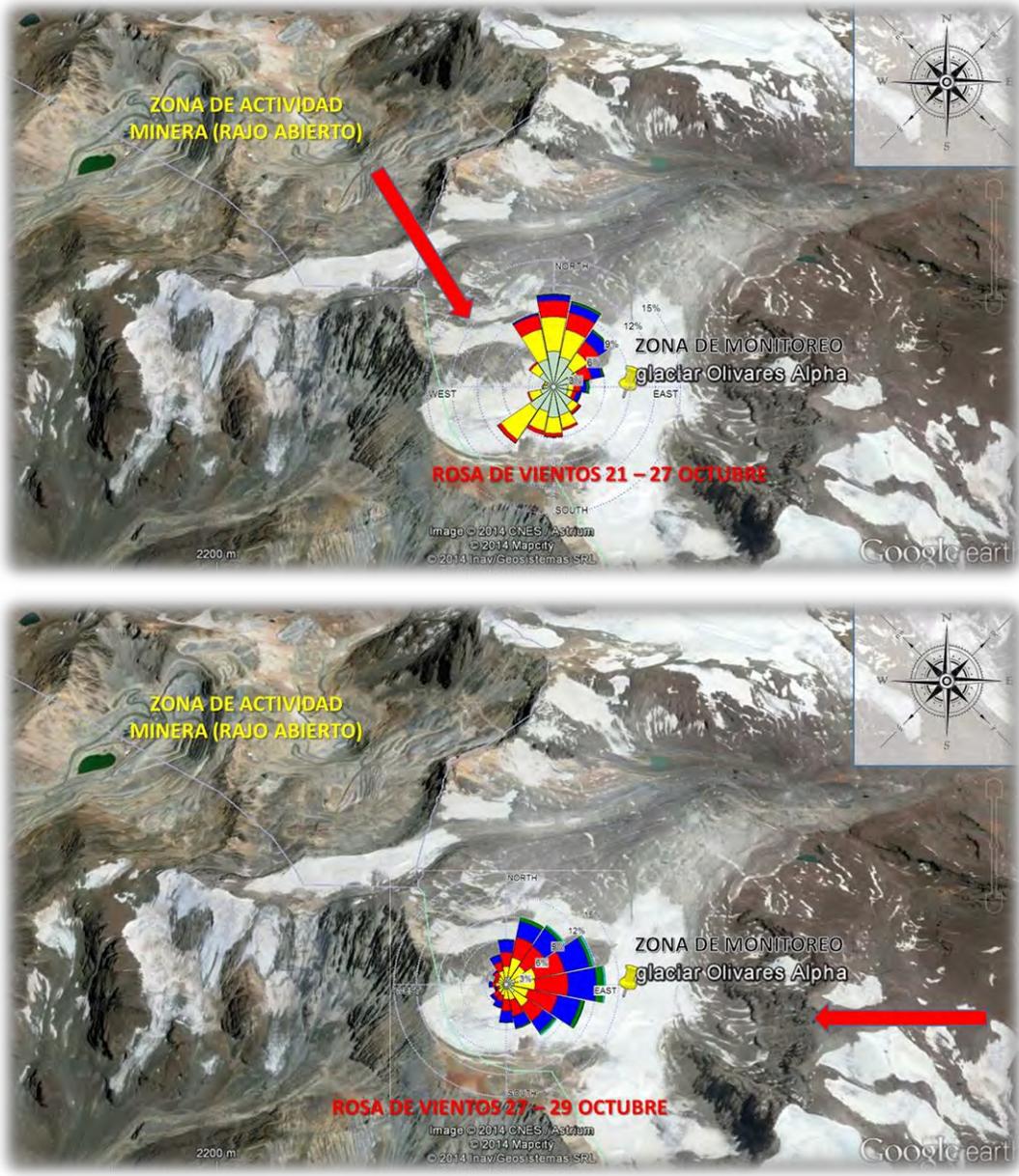


Figura 61. Ilustración de zona de estudio en glaciar Olivares Alfa con superposición de rosas de vientos para períodos específicos de monitoreo (flecha roja indica procedencia predominante del viento).

Como se observa en la figura 61, durante el período de monitoreo comprendido entre el 21 y 27 de Octubre, período en el cual se observaron los ciclos de aumento y disminución de material particulado atmosférico, el viento predominante proviene desde la dirección nor-noroeste, justo en la dirección donde se encuentra la actividad antropogénica extractiva de la zona (aproximadamente a 5 Km en dirección noroeste), mientras que en el período comprendido entre el 27 y 29 de Octubre, la dirección del viento cambia proviniendo

mayoritariamente del este (lado Argentino de la cordillera), lo cual es coincidente con la desaparición de los ciclos de aumento y disminución de la concentración de material particulado atmosférico medido en la estación de monitoreo instalada en el glaciar. Adicionalmente, se puede observar un decrecimiento de la concentración promedio de 78%, 66% y 61% para la concentración de PM10, PM2,5 y PM1, respectivamente. Al ser la actividad antropogénica extractiva la fuente de emisión de partículas más cercana y visiblemente evidente a la zona estudiada, sumado al hecho que estas zonas están justamente en la dirección del viento predominante del sector durante la campaña de monitoreo, se puede inferir que los ciclos de aumento y disminución de BC y material particulado atmosférico observados en el glaciar Olivares Alfa son producto de la actividad de dichas zonas de explotación. Por otro lado, y con la intención de entender mejor el comportamiento cíclico del aumento de concentración que experimenta el material particulado atmosférico en suspensión se graficó contra algunas variables meteorológicas, encontrándose que la temperatura ambiental registrada en la zona de estudio sigue la misma tendencia (figura 62).

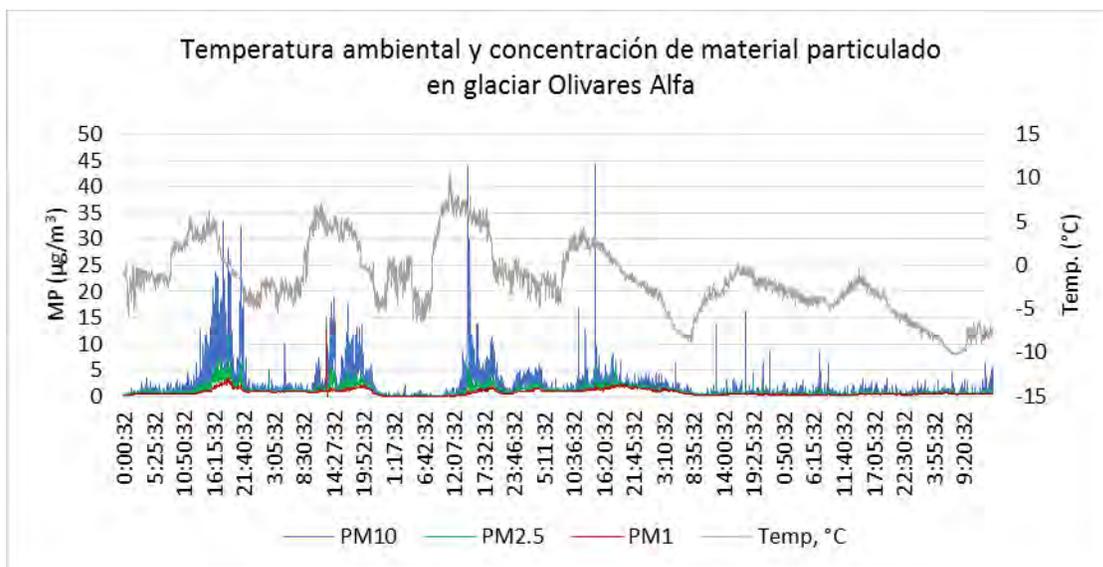


Figura 62. Relación de material particulado atmosférico con la temperatura ambiental en glaciar Olivares Alfa.

Como se observa en la figura 62, los ciclos de aumento de concentración de material particulado son coincidentes con los horarios de aumento de temperatura ambiental en el sector estudiado. Una explicación plausible para este fenómeno podría ser que el material particulado emitido permanentemente por la actividad antropogénica extractiva de la zona, permanece confinado en el rajo del área de extracción hasta que es capaz de superar la barrera altitudinal que

constituye el cordón montañoso que la separa del glaciar Olivares Alfa (la figura 63 muestra una foto aérea de la nube de PM saliendo del rajo generado por la actividad industrial extractiva), permitiendo a las partículas emitidas llegar hasta éste glaciar.



Figura 63: Fotos aéreas tomadas desde el helicóptero el 21 de octubre 2014 a las 17:45hrs. sobre el rajo, al borde del portezuelo de la montaña del glaciar OA, donde se muestra la nube de PM que genera la actividad industrial extractiva: en (1) vista norponiente desde el glaciar OA, en (2) y (3) aproximación a la parte suroriente de las faenas mineras extractivas y (4) vista superior de faena minera.

El fenómeno estaría gobernado por la altura de la capa de mezcla atmosférica, la cual va subiendo en altura acorde al aumento gradual de la temperatura con el transcurrir del día. Al mediodía, muy probablemente la altura de mezcla está suficientemente arriba del límite que constituye el cordón montañoso antes señalado y entonces esto, sumado al aumento de la velocidad del viento cuya dirección predominante es nor-noroeste, permitiría que se transporte este material particulado atmosférico al GOA, fenómeno observado durante los primeros 6 días de monitoreo. Llegada la noche aproximadamente a las 20 PM ocurriría el fenómeno contrario al disminuir la temperatura, ya que también lo hace la altura de la capa de mezcla, dejando nuevamente confinadas a las partículas en el rajo de la zona de explotación extractiva antropogénica, repitiéndose este fenómeno diariamente como lo indican los resultados monitoreados en el glaciar. Este fenómeno desaparece como se observó en la Fig 60 y 61, cuando el viento cambia de dirección, donde muy probablemente las partículas emitidas igualmente han alcanzado la altura suficiente para salir del

rajo de la mina, pero dado que el viento sopla en dirección este (desde Argentina) no son depositadas en el GOA sino transportadas hasta otras zonas de montaña, no investigadas en este estudio.

La concentración promedio de PM10 observada para el período completo de monitoreo (21–29/10/2014) fue de  $1,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  con máximos de  $44,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , mientras que la concentración promedio de PM2,5 fue de  $0,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$  alcanzando máximos de  $6,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Por último la concentración promedio de PM1 fue de  $0,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , alcanzando máximos de  $2,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Figura 64).

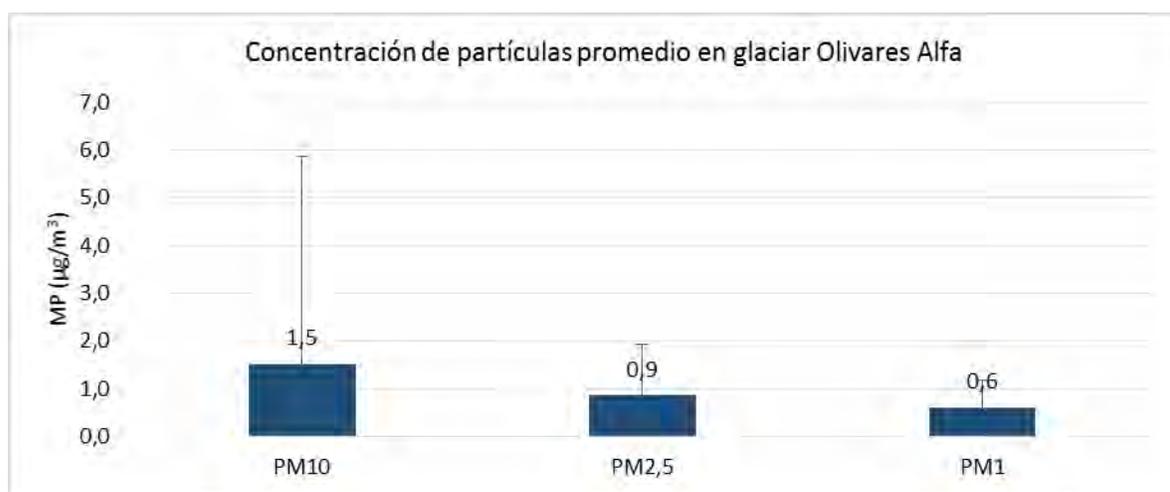


Figura 64. Concentración promedio de PM10, PM2,5 y PM1 en glaciar Olivares Alfa.

La distribución por tamaño de material particulado atmosférico muestra una clara predominancia de partículas finas ( $0,265-0,615 \mu\text{m}$ ), con valores promedio de 6.948 partículas de  $0,265 \mu\text{m}$  (Figura 65 A) las cuales logran alcanzar máximos de 32.755 partículas. En la figura 65 B se muestra el número de partículas finas atmosféricas ( $0,265 \mu\text{m}$ ) minuto a minuto durante el período de monitoreo. Se observa que las partículas finas manifiestan el mismo comportamiento cíclico que la concentración de material particulado atmosférico PM1.0, lo que refleja que la mayor parte de éste corresponde a partículas finas.

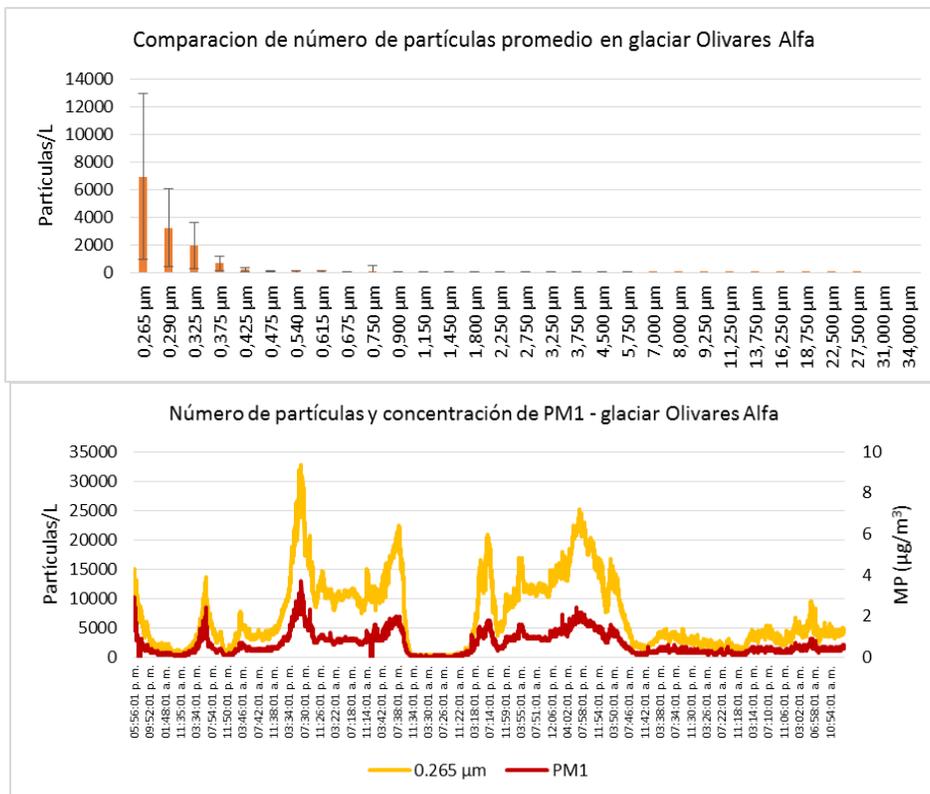


Figura 65 (A) Distribución por tamaño de material particulado en glaciari Olivares Alfa, (B) Evolución temporal de partículas finas (0,265 µm) y concentración de material particulado atmosférico PM1 en GOA.

La figura 66 muestra la distribución porcentual de partículas finas (0,265 µm ≤ MP ≤ 0,425 µm) respecto del total de partículas medidas en el glaciari Olivares Alfa.

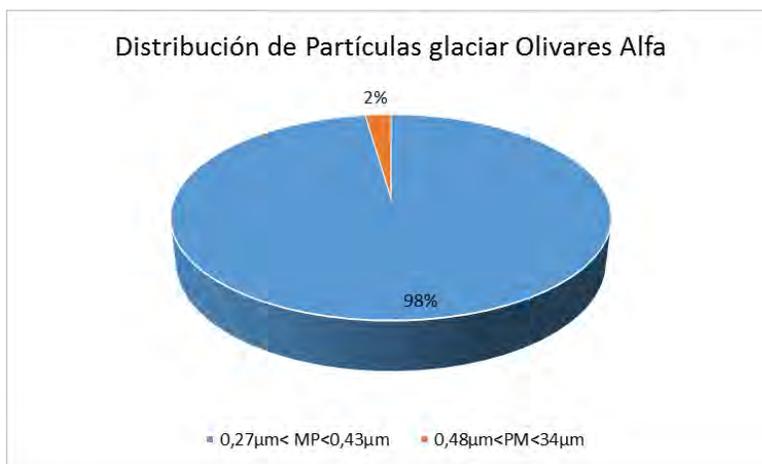


Figura 66. Distribución del material particulado atmosférico en glaciari Olivares Alfa.

La figura 66 muestra que el 98% de las partículas atmosféricas observadas en el glaciar Olivares Alfa corresponde a partículas finas ( $MP \leq 0,425 \mu m$ ).

### 5.6.2 Material particulado atmosférico en glaciar Bello

Se midió la concentración de material particulado atmosférico en tiempo real (cada 1 minuto) utilizando un equipo espectrómetro laser de aerosoles (EDM 107, Grimm, Alemania) entre el 12 y 30 de septiembre. Los resultados se presentan en la figura 67.

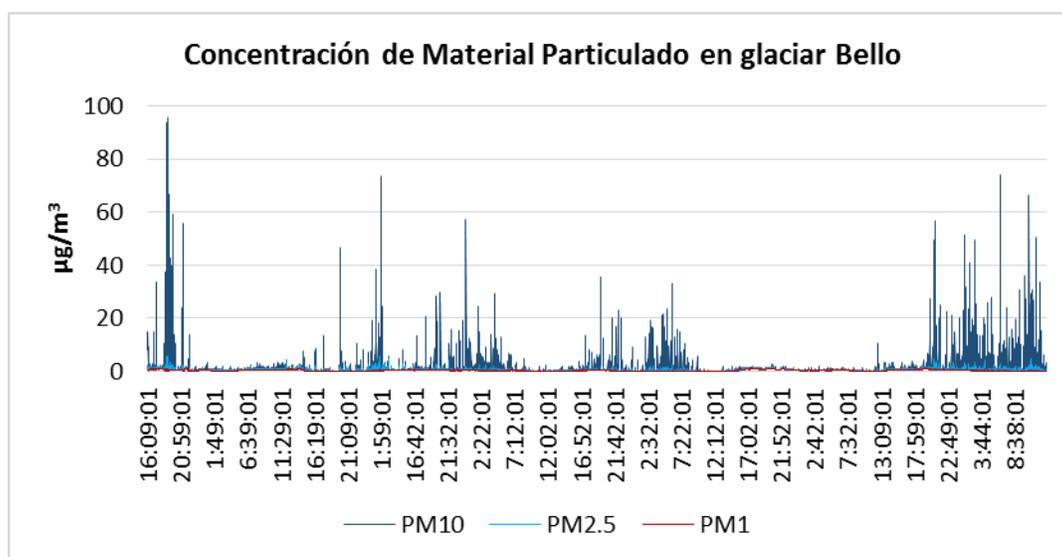


Figura 67. Evolución temporal del material particulado atmosférico PM10, PM2,5 y PM1 en glaciar Bello.

En la figura 68 se observan aumentos en la concentración de material particulado atmosférico los cuales son coincidentes con el aumento en la velocidad de los vientos.

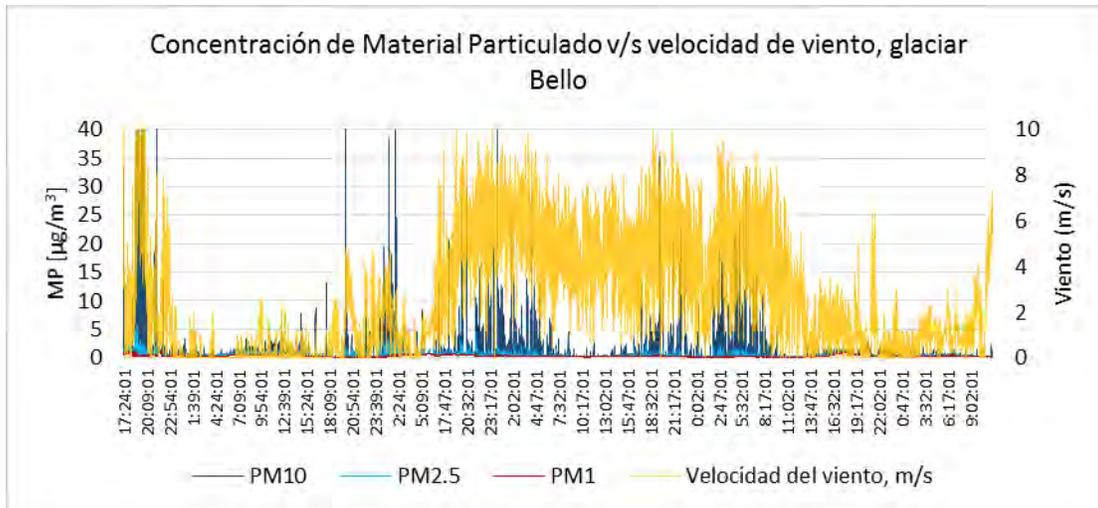


Figura 68. Velocidad de viento y concentración de material particulado en glaciar Bello.

El origen del material particulado encontrado en el glaciar Bello podría explicarse debido al transporte desde una zona geográfica ubicada al nor-noroeste de este glaciar (dirección predominante de los vientos en el glaciar Bello), dirección en la cual se encuentra la zona de explotación extractiva antropogénica colindante con el glaciar Olivares Alfa (figura 69).

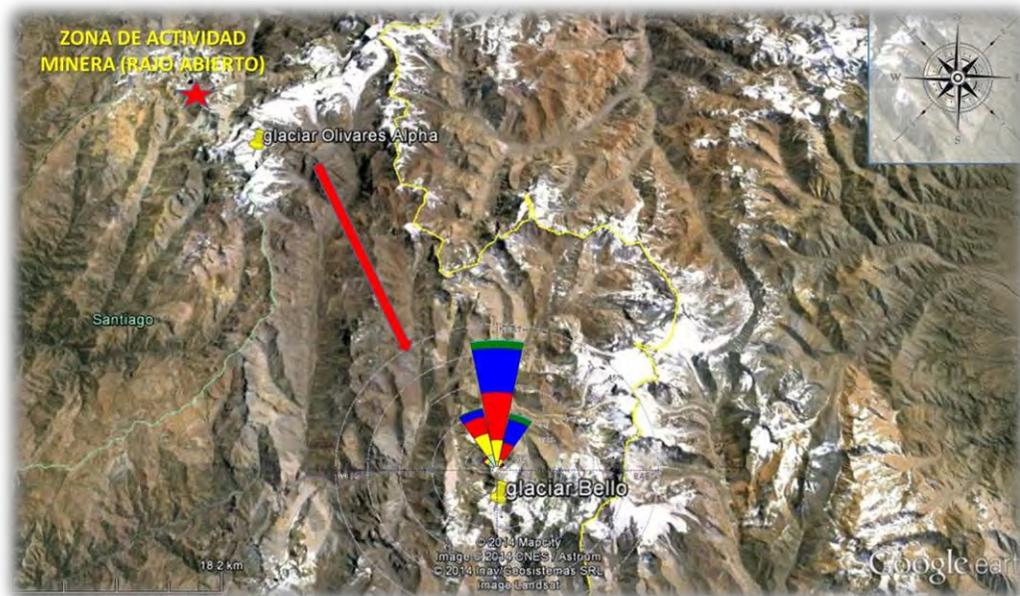


Figura 69. Imagen de la zona de estudio en glaciar Bello con superposición de rosas de vientos (Flecha roja indica procedencia de viento).

La concentración promedio de PM10 observada en el glaciar Bello fue de  $1,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  con máximos de  $95,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , mientras que la concentración promedio de PM2,5 fue de  $0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  alcanzando máximos de  $5,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , por último la concentración promedio de PM1 fue de  $0,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  alcanzando máximos de  $1,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Figura 70).



Figura 70. Concentración promedio de PM10, PM2,5 y PM1 en glaciar Bello.

La distribución por tamaño de material particulado atmosférico muestra un claro predominio de partículas finas ( $0,265-0,425 \mu\text{m}$ ), con valores promedio de 4.225 partículas de  $0,265 \mu\text{m}$ , las cuales logran alcanzar máximos de 14.115 partículas (Figura 71).



Figura 71. Distribución promedio de material particulado atmosférico en glaciar Bello.

En la figura 72 se muestra el número de partículas finas atmosféricas ( $0,265 \mu\text{m}$ ) minuto a minuto durante el período de monitoreo. Ahí se observa que las partículas finas presentan el mismo comportamiento cíclico que la concentración de material particulado PM1.0, lo que refleja que la mayor parte de éste corresponde también a partículas finas.

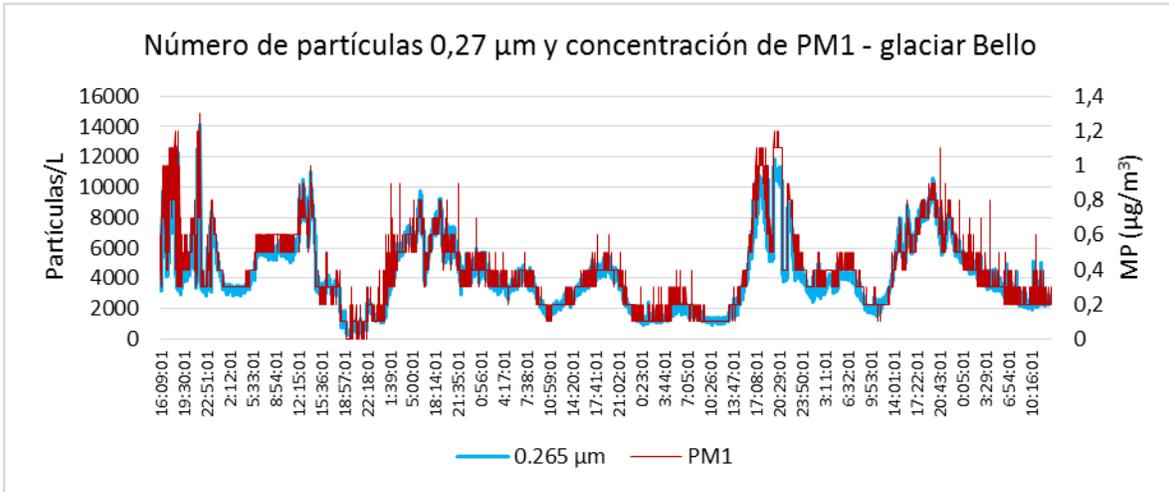


Figura 72. Evolución temporal para partículas finas ( $0,265 \mu\text{m}$ ) y concentración de material particulado atmosférico PM1 en glaciar Bello.

La figura 73 muestra la distribución porcentual de partículas finas ( $0,265 \mu\text{m} \leq \text{MP} \leq 0,425 \mu\text{m}$ ) respecto del total de partículas medidas en el glaciar Bello.

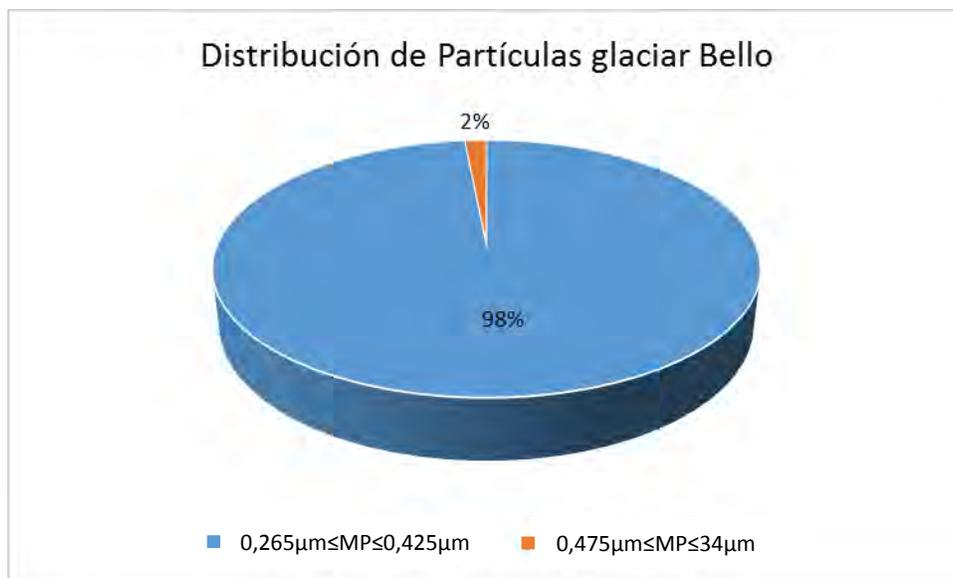


Figura 73. Distribución del material particulado en glaciar Bello.

La figura 73 muestra que el 98% de las partículas observadas en el glaciar Bello corresponde a partículas finas ( $MP \leq 0,425 \mu m$ ).

Tanto los valores de concentración, así como de número de partículas observados en el glaciar Bello, son aparentemente menores que los observados en el glaciar Olivares Alfa. Para corroborar esto, los resultados fueron sometidos a diversas pruebas estadísticas en la sección de comparación de resultados de material particulado atmosférico.

### 5.6.3 Material particulado atmosférico en Santiago

Se midió en Santiago (estación Parque O´Higgins) la concentración de material particulado atmosférico en tiempo real (cada 1 minuto) entre el 06/09 y el 29/10 del 2014 utilizando un equipo espectrómetro laser de aerosoles (EDM 107, Grimm, Alemania). Los resultados se presentan en la figura 74.

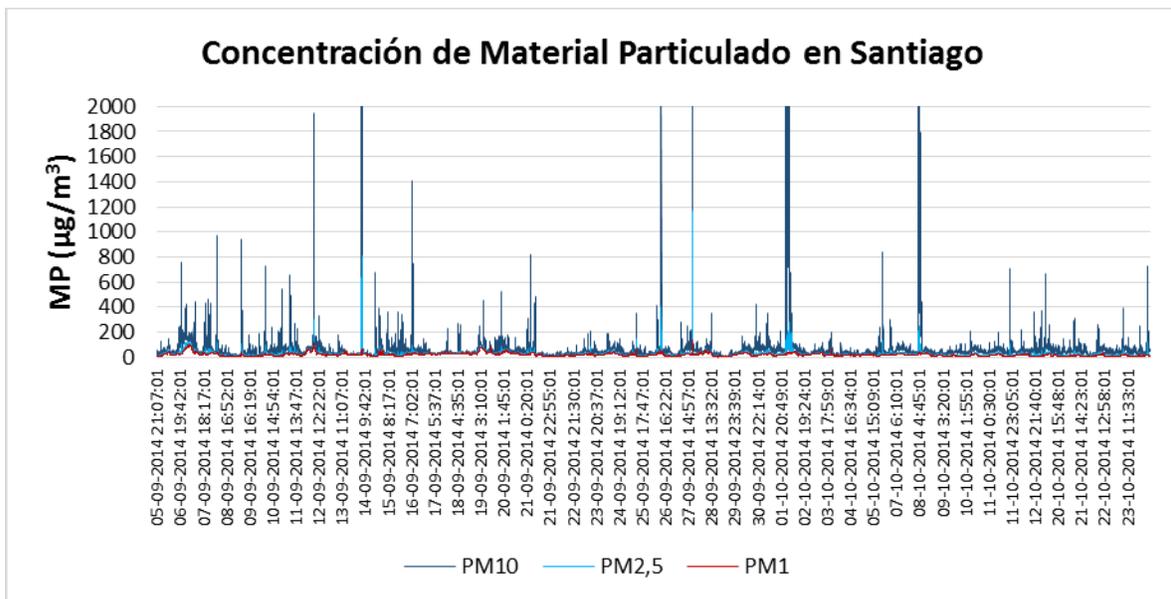


Figura 74. Evolución temporal del material particulado atmosférico PM10, PM2,5 y PM1 en Santiago (estación Parque O´Higgins).

En la figura 74 se puede observar que la concentración de material particulado atmosférico presenta ciclos marcados de aumento de concentración durante las mañanas (7:00 a 10:00 h aproximadamente) y durante las tardes (18:00 a 21:00 h) lo que es coincidente con las horas punta del tránsito vehicular diario de la ciudad de Santiago.

Como se aprecia en la figura 75, la concentración promedio de PM10 observada fue de  $65,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  con máximos de  $9.803 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , mientras que la concentración promedio de PM2,5 fue de  $25,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  alcanzando máximos de  $1.162,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , por último la concentración promedio de PM1 fue de  $19,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  alcanzando máximos de  $137,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

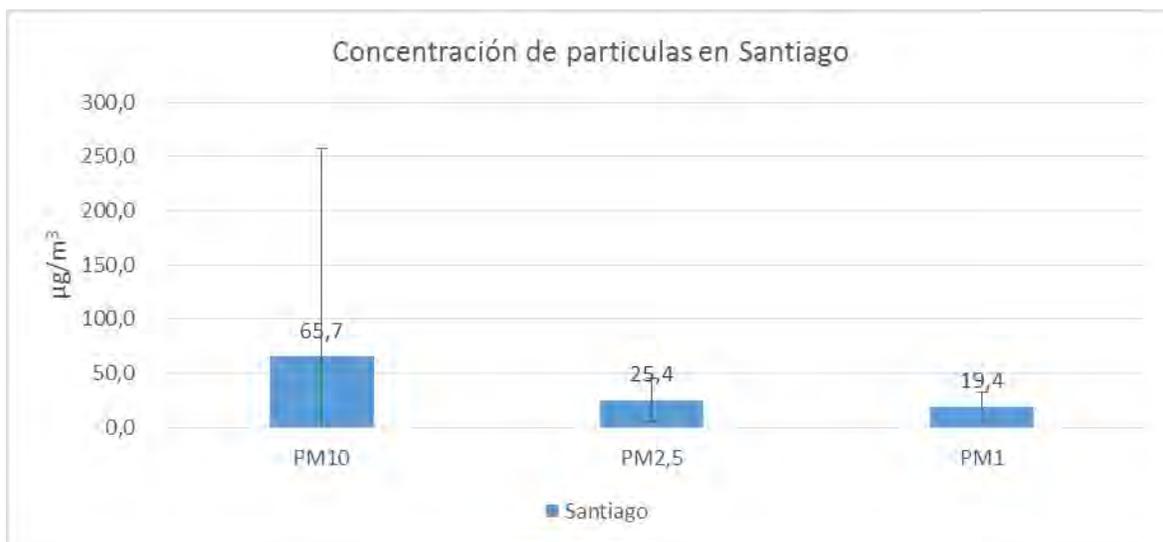


Figura 75. Concentración promedio de PM10, PM2,5 y PM1 en Santiago.

La distribución por tamaño de material particulado atmosférico muestra una clara predominancia de partículas finas (0,265–0,615  $\mu\text{m}$ ), con valores promedio de 87.171 partículas de 0,265  $\mu\text{m}$ , las cuales logran alcanzar máximos de 603.901 partículas (Figura 76).



Figura 76. Distribución promedio de material particulado en Santiago.

En la figura 77 se muestra el número de partículas finas ( $0,265 \mu\text{m}$ ) minuto a minuto durante el período de monitoreo. Se observa que las partículas finas manifiestan el mismo comportamiento cíclico que la concentración de material particulado atmosférico PM1.0, lo que es reflejo de que la mayor parte de éste corresponde a partículas finas.

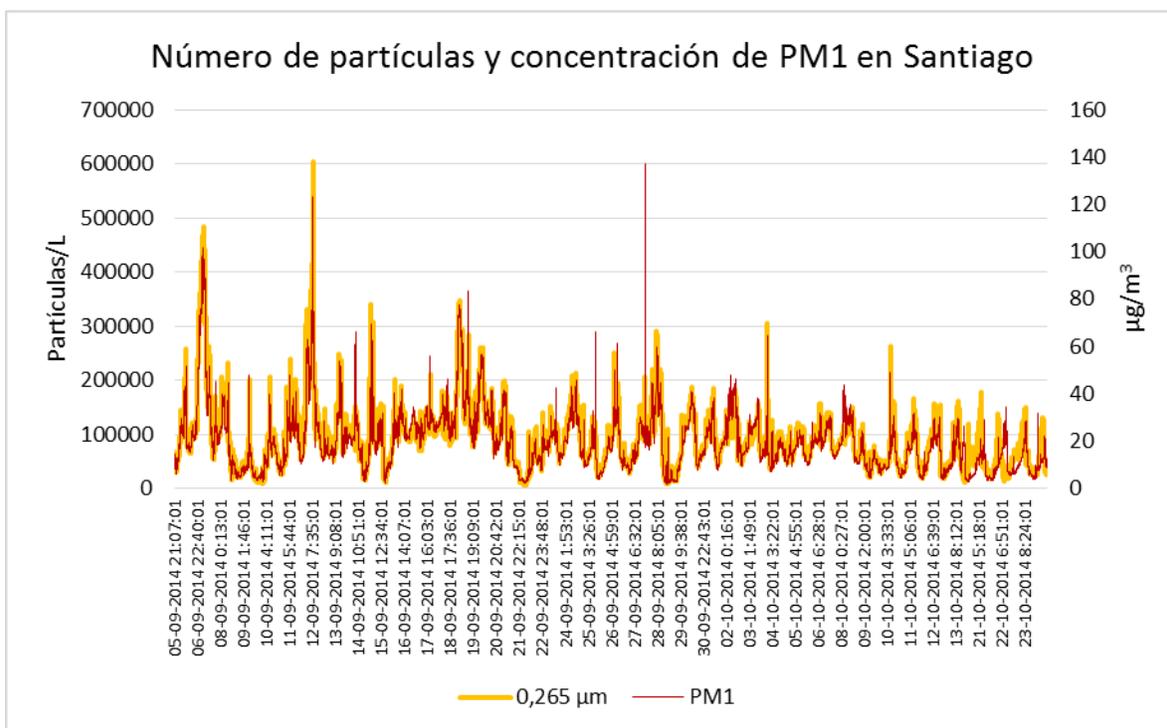


Figura 77. Evolución temporal, datos cada 1 minuto, para partículas finas ( $0,265 \mu\text{m}$ ) y concentración de material particulado atmosférico PM1 en Santiago.

La figura 78 muestra la distribución porcentual de partículas finas ( $0,265 \mu\text{m} \leq \text{MP} \leq 0,425 \mu\text{m}$ ) respecto del total de partículas medidas en la ciudad de Santiago.



Figura 78. Distribución de material particulado atmosférico en Santiago.

La figura 78 muestra que el 97% de las partículas observadas en Santiago corresponde a partículas finas ( $MP \leq 0,425 \mu m$ ).

Tanto los valores de concentración como de número de partículas observados en Santiago son evidentemente mayores que los observados en ambos glaciares estudiados. Para corroborar esto, los resultados fueron sometidos a diversas pruebas estadísticas en la sección de comparación de resultados de material particulado atmosférico, que se presenta a continuación.

#### 5.6.4 Comparación de resultados de concentración y distribución de material particulado atmosférico en zonas de estudio

La concentración de material particulado promedio para los 3 sitios estudiados (Santiago, glaciar Olivares Alfa y glaciar Bello) se puede apreciar en comparación en la figura 79.

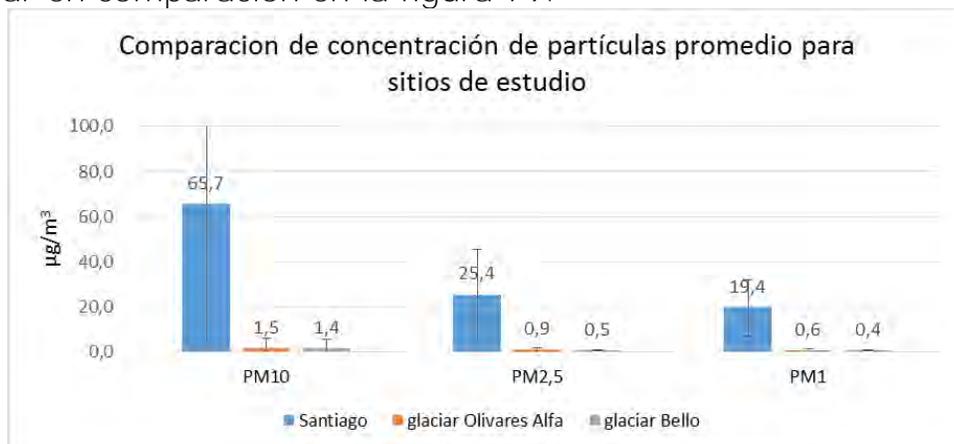


Figura 79. Comparación de concentración de PM10, PM2,5 y PM1 para Santiago, glaciar Olivares Alfa y glaciar Bello.

La concentración promedio de PM10 observada en Santiago es 46 veces mayor a la observada en los glaciares Bello y Olivares Alfa, así mismo la concentración promedio de PM2,5 es 50 y 28 veces superior a la observada en los glaciares Bello y Olivares Alfa respectivamente. Por último la concentración promedio de PM1 observada en Santiago es 48 y 32 veces superior a la observada en los glaciares Bello y Olivares Alfa respectivamente (Figura 79). Si bien es cierto estos resultados son esperados, de todas formas los valores obtenidos fueron sometidos a pruebas estadísticas de comparación de medias y de Kolmogorov – Smirnov para corroborar si estas diferencias son estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95%. Los resultados de estas pruebas se observan a continuación en la figura 80.

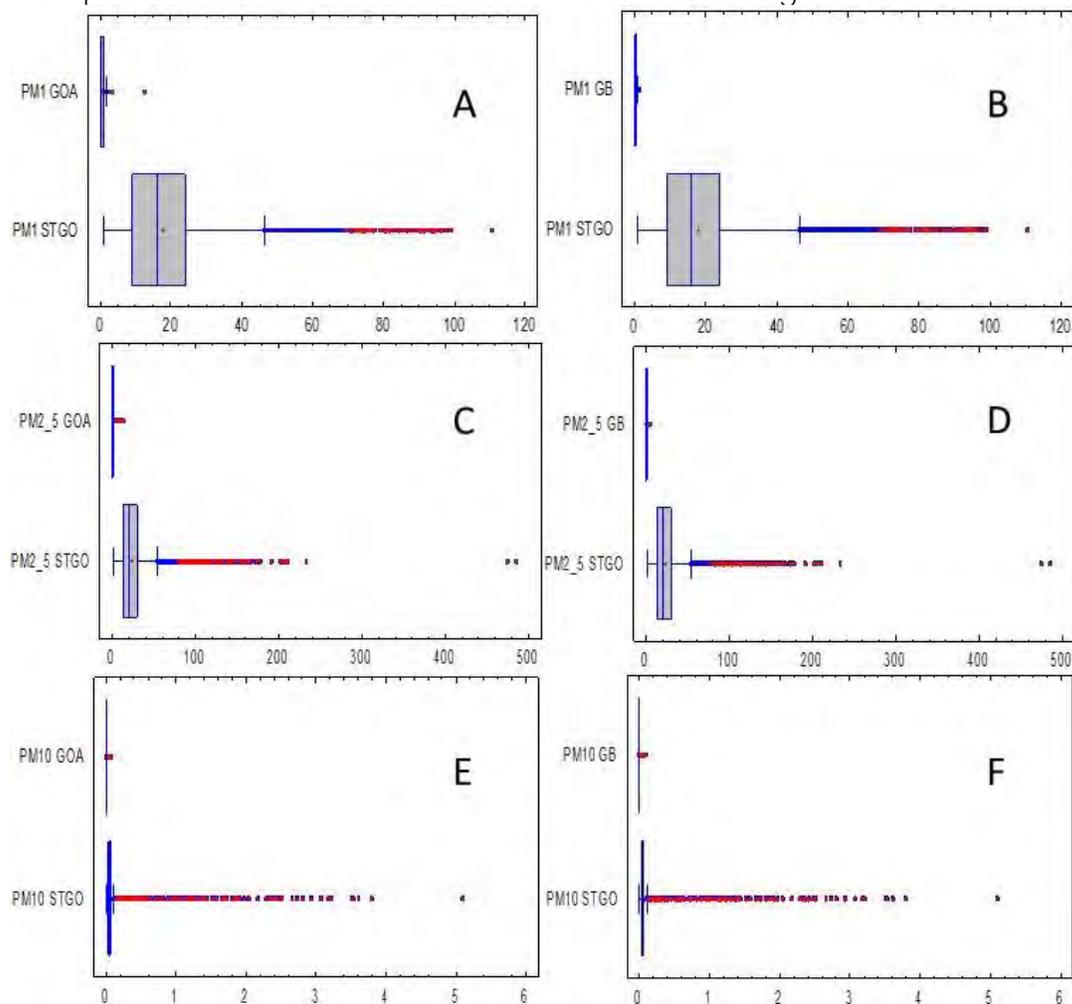
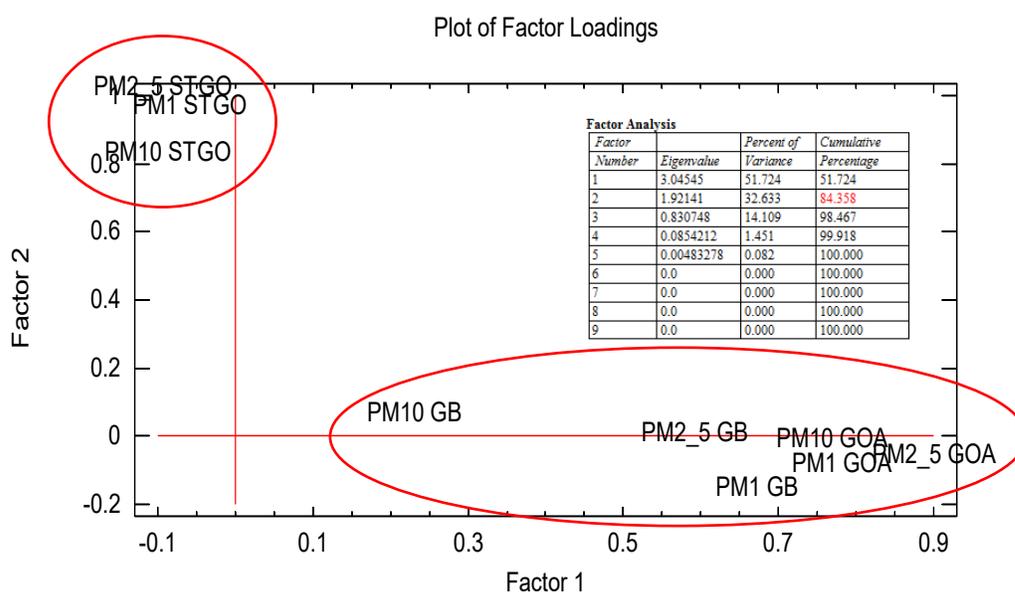


Figura 80. Gráficos de cajas y bigotes para comparación de concentración de material particulado atmosférico: (A) PM1 Olivares Alfa v/s PM1 Santiago; (B) PM1 Bello v/s PM1 Santiago; (C) PM2,5

Olivares Alfa v/s PM2,5 Santiago; (D) PM2,5 Bello v/s PM2,5 Santiago; (E) PM10 Olivares Alfa v/s PM10 Santiago; (F) PM10 Bello v/s PM10 Santiago.

Luego de someter los resultados a las pruebas estadísticas de comparación de medias y de Kolmogorov-Smirnov, se puede decir que la concentración de material particulado PM10, PM2,5 y PM1 es significativamente distinta y mayor en la ciudad de Santiago respecto de los glaciares Olivares Alfa y Bello (Figura 80).

Para intentar establecer si el origen del material particulado atmosférico observado en las 3 zonas de estudio podría tener un origen común, se realizó un análisis factorial a los datos obtenidos (Figura 81). El análisis factorial es una herramienta estadística de reducción de datos usada para explicar las correlaciones entre las variables observadas en términos de un número menor de variables no observadas llamadas factores. Las variables observadas se modelan como combinaciones



La concentración de material particulado atmosférico, PM10, PM2,5 y PM1 se asocia en 2 grupos que explican el 84% de la variabilidad del total de datos, el primer grupo está compuesto por el material particulado atmosférico de la ciudad de Santiago y el segundo grupo está constituido por el material particulado atmosférico observado en ambos glaciares estudiados (Figura 81). Estas asociaciones sugieren

que el origen del MP en ambos glaciares podría ser común y distinto al de la ciudad de Santiago, esto en conjunto con los datos expuestos anteriormente respecto de la relación del material particulado atmosférico con la meteorología de ambos glaciares y la concentración de BC, hacen sugerir que una de las fuentes importantes de partículas en ambos glaciares muy probablemente correspondería a la actividad extractiva antropogénica contigua al glaciar Olivares Alfa.

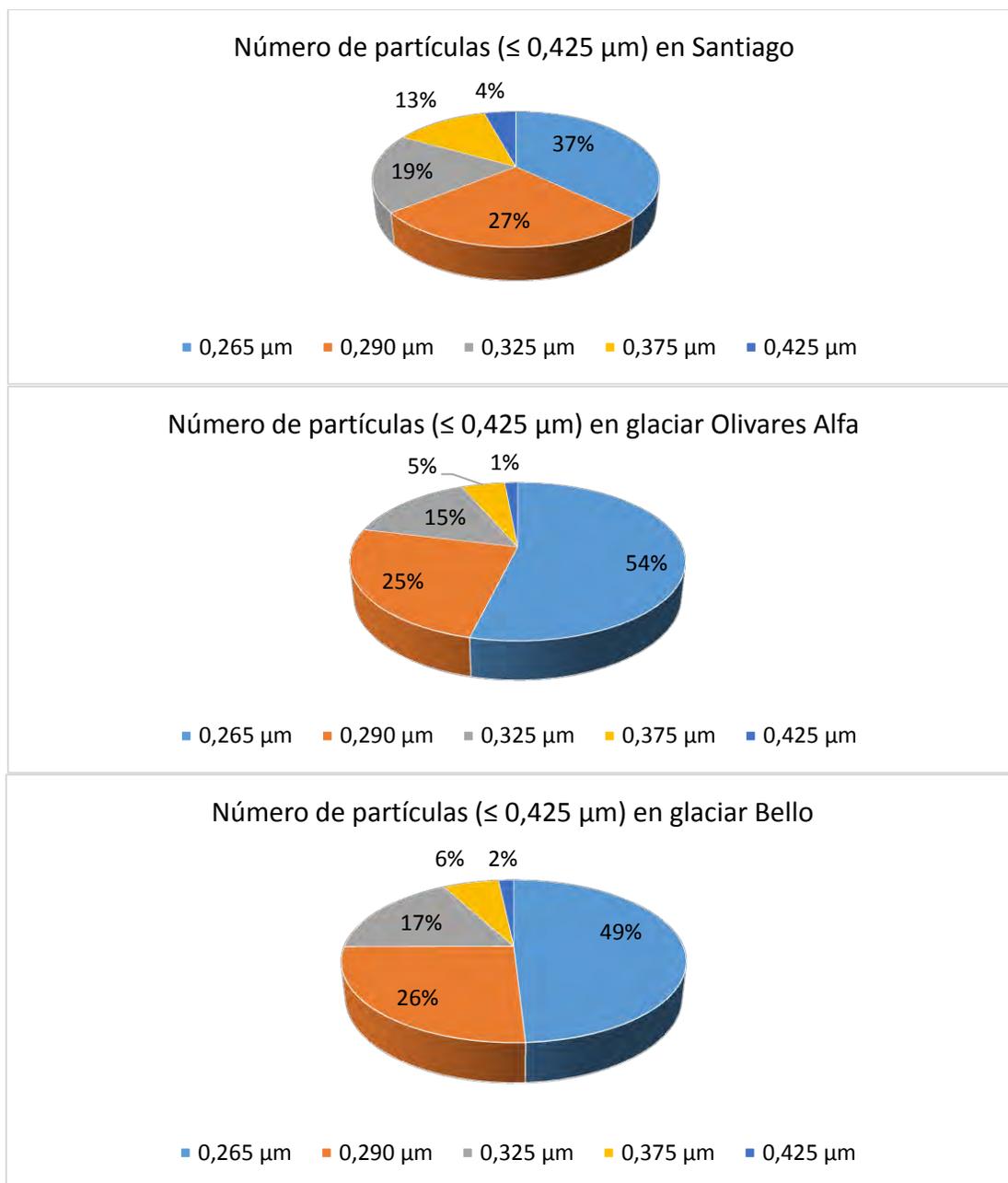


Figura 82. Composición porcentual del material particulado atmosférico fino ( $\text{MP} \leq 0,425 \mu\text{m}$ ) en los 3 sitios de estudio.

Otro antecedente que da cuenta de las diferencias entre el material particulado atmosférico encontrado en ambos glaciares respecto del material particulado atmosférico de la ciudad de Santiago es su distribución por tamaño para partículas finas ( $MP \leq 0,425 \mu m$ ), como se observa a continuación en la figura 82.

Las partículas de  $0,265 \mu m$  presentan proporciones similares en los glaciares Bello y Olivares Alfa (49 y 54% respectivamente), mientras que en Santiago su porcentaje alcanza al 37%. Por otro lado, las partículas de  $0,375 \mu m$  representan un 6 y 5% de la fracción fina del material particulado atmosférico en los glaciares Bello y Olivares Alfa respectivamente, mientras que en la ciudad de Santiago alcanza un 13% (Figura 82). Estas diferencias de distribución permiten inferir que las partículas finas de la ciudad de Santiago muy probablemente son distintas de las partículas finas encontradas en los glaciares Bello y Olivares Alfa, las cuales serían similares, lo que constituye otro indicativo de que su origen es común.

La figura 83 muestra la comparación de la concentración promedio de material particulado atmosférico obtenida en los glaciares Olivares Alfa y Bello.

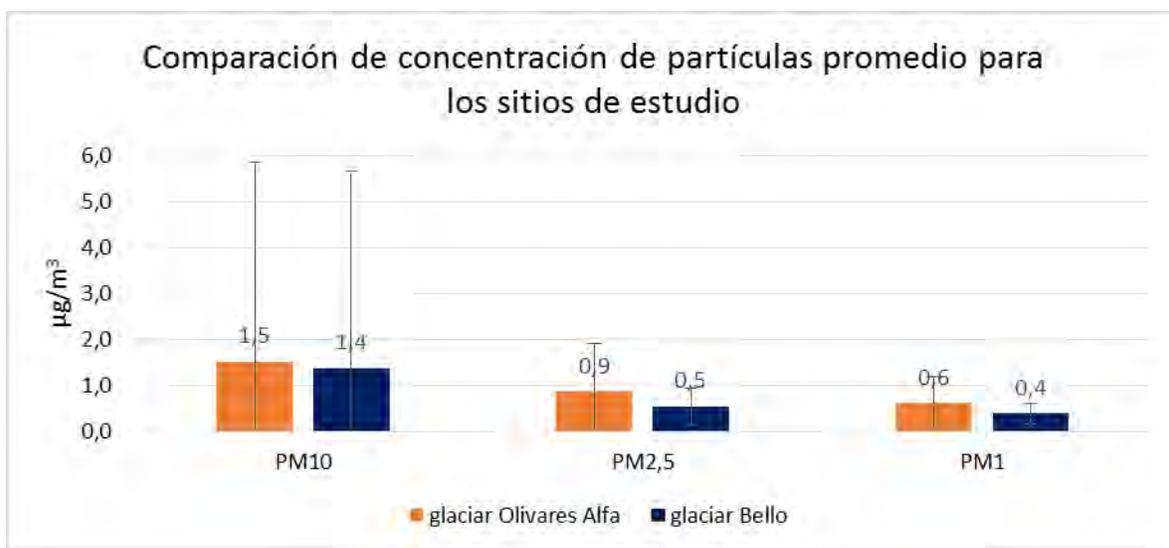


Figura 83. Comparación de concentración de PM10, PM2,5 y PM1 para glaciar Olivares Alfa y glaciar Bello.

La concentración promedio de PM10 observada en el glaciar Olivares Alfa es similar a la observada en el glaciar Bello. Sin embargo, la concentración promedio de PM2,5 es 1,8 veces mayor en el glaciar Olivares Alfa y la concentración promedio de PM1 en el glaciar Olivares

Alfa 1,5 veces mayor que el glaciar Bello (Figura 83). Para establecer si las diferencias observadas son estadísticamente significativas, los resultados obtenidos fueron sometidos a pruebas estadísticas de comparación de medias y de Kolmogorov-Smirnov (probabilidad 95%)(Figura 84).

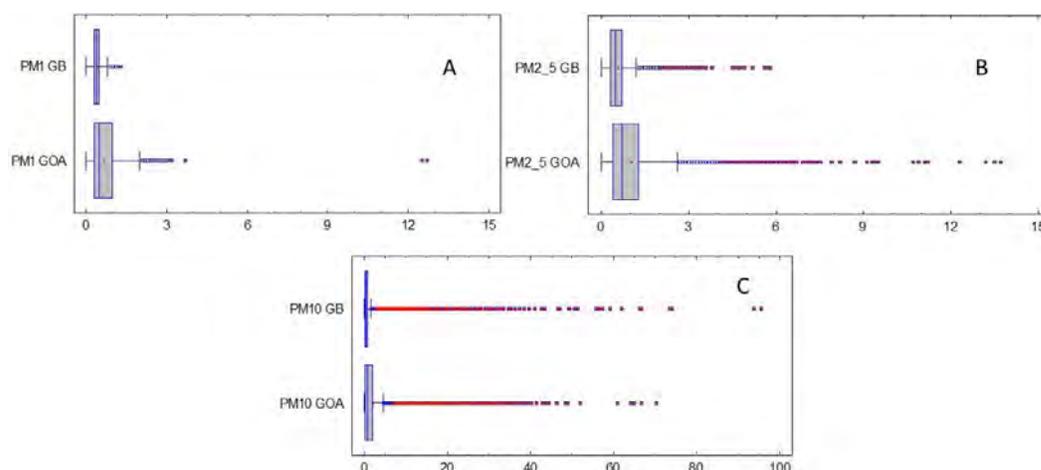


Figura 84. Gráficos de cajas y bigotes para comparación estadística de diferencias entre: (A) PM1 glaciar Bello v/s PM1 glaciar Olivares Alfa; (B) PM2,5 glaciar Bello v/s PM2,5 glaciar Olivares Alfa; (C) PM10 glaciar Bello v/s PM10 glaciar Olivares Alfa.

Las pruebas estadísticas de comparación de medias y de Kolmogorov-Smirnov indicaron que las concentraciones de PM10, PM2,5 y PM1 observadas en el glaciar Olivares Alfa son significativamente distintas y mayores a las observadas en el glaciar Bello (Figura 84). Este comportamiento en la concentración del material particulado atmosférico podría ser explicado por el hecho de que el glaciar Bello se encuentra a mayor distancia (51 Km) que el glaciar Olivares Alfa (5 Km) de la fuente de emisión más cercana probable que se podría encontrar, como es la actividad extractiva cordillerana.

Respecto al número de partículas, la comparación de la distribución por tamaño promedio de partículas en los tres sitios de estudio se presenta en la figura 85.



Figura 85. Comparación de número de partículas atmosféricas promedio (0,265 – 34 µm) para Santiago, glaciar Olivares Alfa y glaciar Bello.

El número de partículas finas (0,265 µm) observado en la ciudad de Santiago es 12,6 y 20,8 veces mayor que los glaciares Olivares Alfa y Bello respectivamente (Figura 85). Para corroborar estas diferencias los resultados fueron sometidos a pruebas estadísticas de comparación de medias y de Kolmogorov-Smirnov (Figura 86).

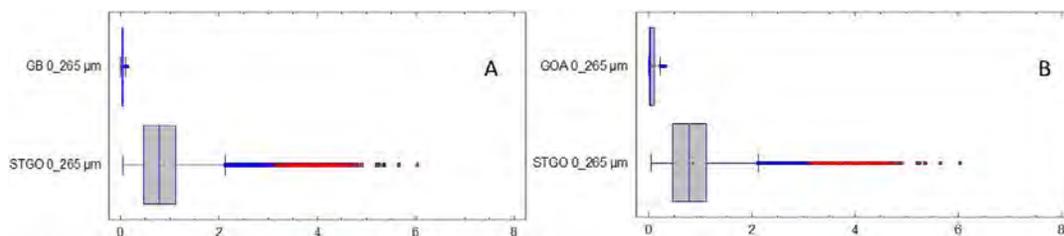


Figura 86. Gráficos de cajas y bigotes para comparación estadística de diferencias entre: (A) N° de partículas 0,265 µm Santiago v/s glaciar Bello; (B) N° de partículas 0,265 µm Santiago v/s glaciar Olivares Alfa.

El número de partículas finas (0,265 µm), las cuales son predominantes en todos los sitios de estudio, es significativamente distinto y mayor en Santiago respecto de los glaciares Bello y Olivares Alfa (95% probabilidad) (Figura 86).

La figura 87 muestra la comparación de la distribución por tamaño promedio de material particulado atmosférico obtenido en los glaciares Olivares Alfa y Bello.

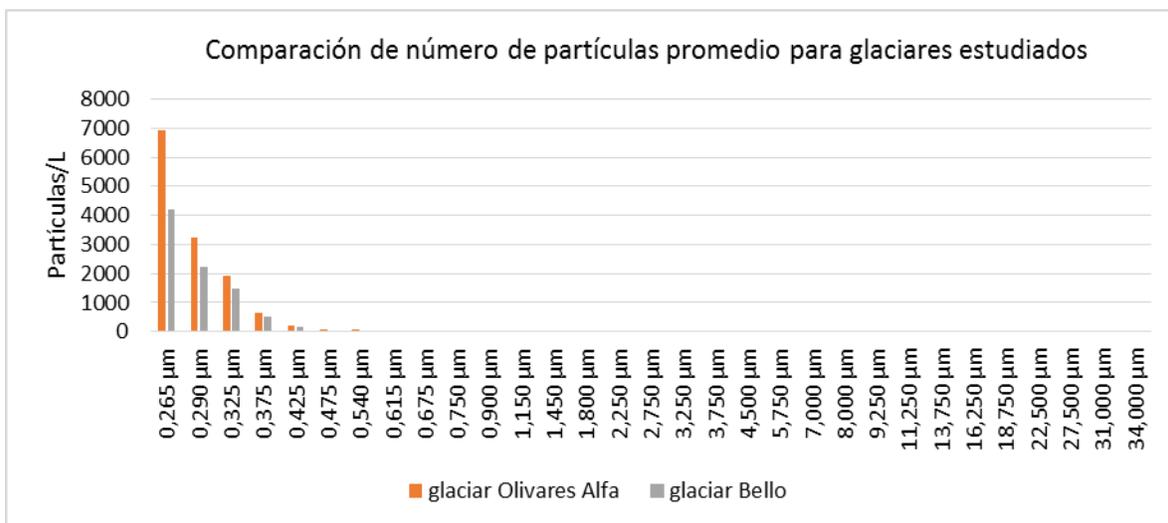


Figura 87. Comparación de número de partículas atmosféricas promedio (0,265 – 34 µm) para glaciar Olivares Alfa y glaciar Bello.

Como se aprecia en la figura 87, el número promedio de partículas finas (0,265 µm) observadas en el glaciar Olivares Alfa es 39% superior al glaciar Bello, las partículas de 0,615 µm son 52% mayores en el glaciar Olivares Alfa y así en todos los tamaños de partícula medidos, el glaciar Olivares Alfa presenta una mayor cantidad de partículas respecto del glaciar Bello (Tabla 10), antecedente que es coincidentes con el comportamiento de la concentración de material particulado atmosférico y que también podría ser explicado por la mayor distancia del glaciar Bello respecto de la fuente de emisión de partículas más probable y predominante en la zona (actividad extractiva cercana al GOA).

Tabla 10. Diferencia porcentual en número promedio de partículas en glaciar Olivares Alfa y glaciar Bello.

	0,265 µm	0,290 µm	0,325 µm	0,375 µm	0,425 µm	0,475 µm	0,540 µm	0,615 µm
<b>glaciar Olivares Alfa</b>	6.948	3.223	1.902	641	193	74	71	47
<b>glaciar Bello</b>	4.225	2.221	1.474	538	148	49	38	23
<b>Diferencia %</b>	39	31	22	16	23	33	46	52

Para corroborar estas diferencias, los valores medidos fueron sometidos a pruebas estadísticas de comparación de medias y de Kolmogorov-Smirnov (Figura 88).

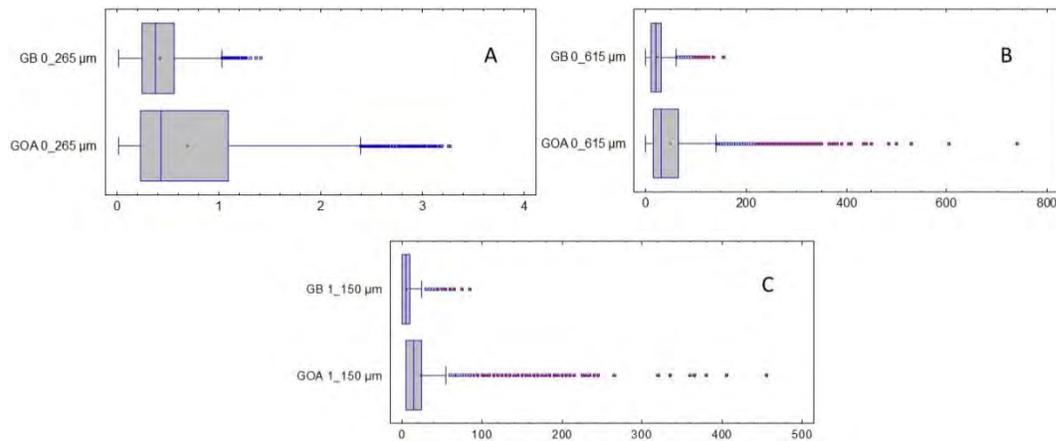


Figura 88. Gráficos de cajas y bigotes para comparación estadística de diferencias entre: (A) N° de partículas 0,265 µm glaciar Olivares Alfa v/s glaciar Bello; (B) N° de partículas 0,615 µm glaciar Olivares Alfa v/s glaciar Bello; (C) N° de partículas 1,150 µm glaciar Olivares Alfa v/s glaciar Bello.

De los resultados de los análisis estadísticos de la distribución por tamaño de material particulado atmosférico (Figura 88), se puede afirmar que la cantidad de partículas atmosféricas observadas en el glaciar Olivares Alfa es significativamente distinta (95% probabilidad) y mayor que las observadas en el glaciar Bello, indicando que el glaciar Olivares Alfa está más impactado por material particulado atmosférico en suspensión que el glaciar Bello, muy probablemente por encontrarse más cerca de la fuente de emisión.

## 5.4 Monitoreo de Black Carbon (BC).

### 5.4.1 Concentración de Black Carbon en glaciar Olivares Alfa.

Se realizó el monitoreo de la concentración de Black Carbon (BC) en el glaciar Olivares Alfa en el período comprendido entre el 21 y 29 de Octubre de 2014. Las mediciones fueron tomada cada 1 minuto utilizando un etalómetro portátil microAeth® Model AE51 de la firma Aethlabs, EE.UU. Los resultados de las mediciones minuto a minuto para el período de monitoreo se observan en la figura 89.

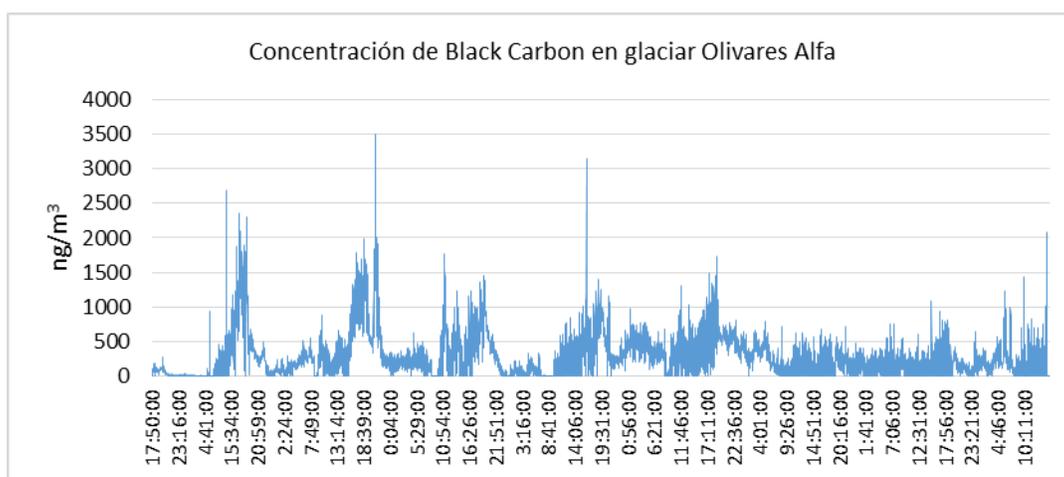


Figura 89. Concentración de BC en glaciar Olivares Alfa.

La concentración promedio de BC en el glaciar Olivares Alfa para el período de monitoreo estudiado fue de 294 ng/m<sup>3</sup>, alcanzando máximos de 3.504 ng/m<sup>3</sup> (Figura 89). Llama la atención, además, que la concentración de BC observada presenta marcados ciclos diarios de aumento de concentración a partir de aproximadamente las 11 de la mañana hasta las 22 h. durante los primeros 6 días de muestreo. Estos ciclos de aumento de concentración son coincidentes con los ciclos de aumento de concentración de material particulado atmosférico, tal y como se observa a continuación en la figura 90.

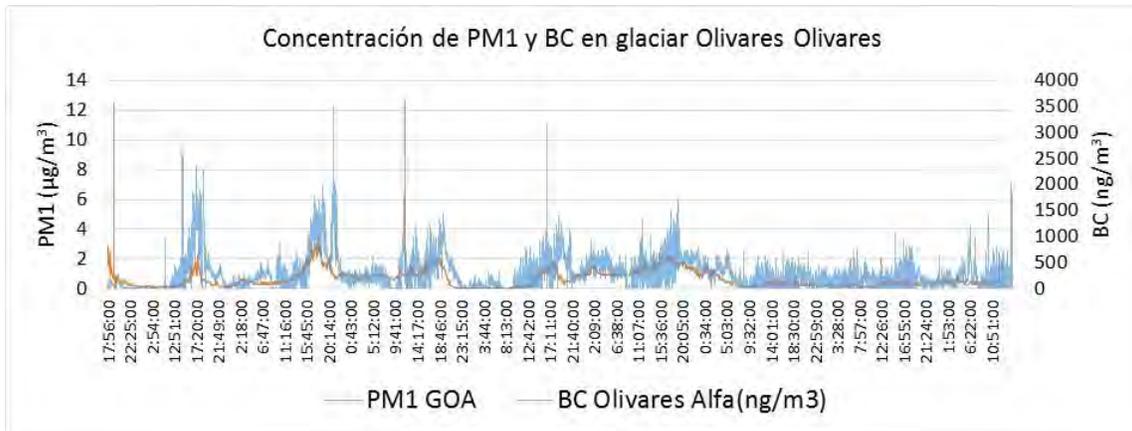


Figura 90. Concentración atmosférica de PM1 y BC cada 1 minuto en glaciador Olivares Alfa.

Para intentar establecer el origen de estos aumentos cíclicos de concentración de BC se hizo un análisis de la dirección del viento por separado para los primeros 6 días de monitoreo y los resultados se aprecian a continuación en la figura 91.

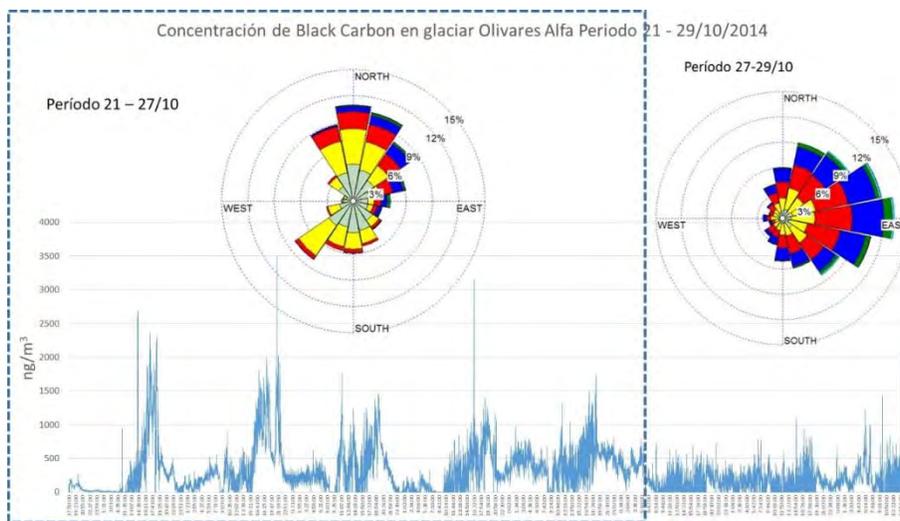


Figura 91. Rosas de vientos separada por períodos específicos de monitoreo (21-27/10/2014 y 27-29/10/2014) para glaciador Olivares Alfa en superposición con los datos de monitoreo de BC.

En glaciador Olivares Alfa, durante el período del 21 al 27 de Octubre, cuando se observan los ciclos de aumento y disminución de concentración de BC en forma periódica y en correlación con los valores de PM1.0, el viento proviene mayoritariamente de la dirección noroeste-noreste. Posteriormente, en el período comprendido entre el 27 y 29 de Octubre, cuando desaparecen los ciclos de aumento y disminución de concentración de BC y material particulado atmosférico, el viento

cambia de dirección proviniendo mayoritariamente desde el este, lado argentino de la cordillera (Figura91).

Para intentar establecer la procedencia del BC, fundamentalmente cuando éste manifiesta los ciclos de aumento y disminución de concentración, se superpusieron las rosas de viento construidas para cada período de monitoreo sobre un mapa de la zona de estudio del glaciar Olivares Alfa, como se muestra a continuación en la figura 92.

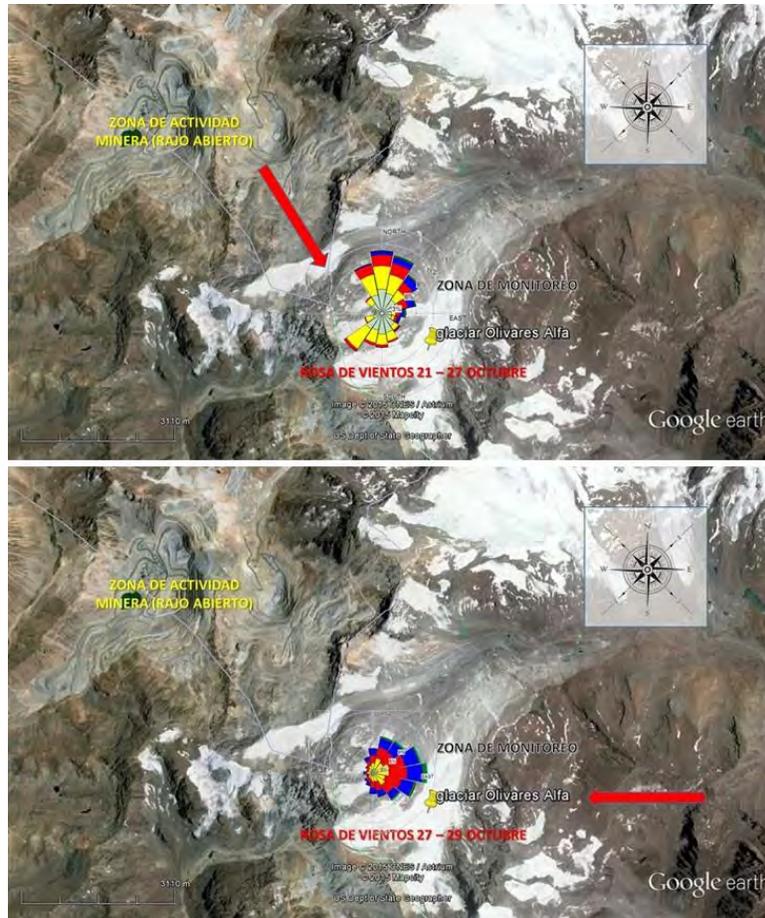


Figura 92. Mapa de zona de estudio en glaciar Olivares Alfa con superposición de rosas de vientos para diferentes períodos de monitoreo (flecha indica procedencia de vientos).

Durante el período de monitoreo comprendido entre el 21 y 27 de Octubre, período en el cual se observaron los ciclos de aumento y disminución de BC y material particulado atmosférico, el viento predominante proviene desde la dirección noroeste-noreste, coincidiendo en gran parte con la dirección donde se encuentra la actividad extractiva de la zona (aproximadamente a 5 Km en dirección

noroeste), mientras que en el período comprendido entre el 27 y 29 de Octubre, la dirección del viento cambia proviniendo mayoritariamente del este, lo cual es coincidente con la desaparición de los ciclos de aumento y disminución de la concentración de BC y material particulado atmosférico, medido en la estación de monitoreo instalada en el glaciar (Figura 92). Al ser la faena extractiva la fuente de emisión de partículas más cercana y visiblemente evidente a la zona estudiada, sumado al hecho que estas zonas de explotación están justamente en la dirección del viento predominante del sector durante la campaña de monitoreo, se puede inferir que los ciclos de aumento y disminución de BC y material particulado atmosférico observados en el glaciar Olivares Alfa serían producto de la actividad de dichas zonas de explotación.

Con la finalidad de establecer cuál es el origen del BC que se observó en glaciar Olivares Alfa, fue necesario evaluar con qué fracción del material particulado atmosférico monitoreado estaba asociado. Para ello se correlacionó con la distribución de partículas por tamaño, utilizando el número de partículas por cada tamaño de partículas estudiado. Los resultados se grafican a continuación en la figura 93.

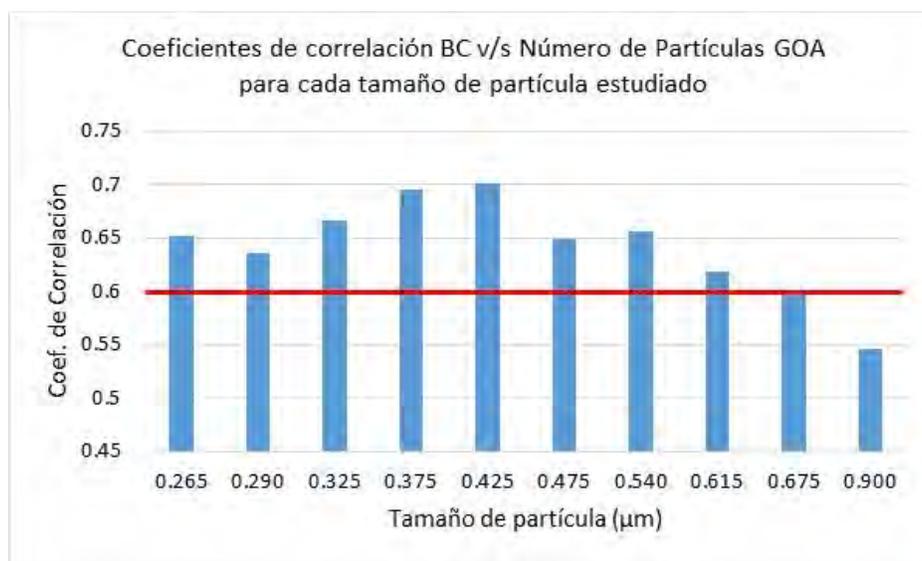


Figura 93. Correlación de Black Carbon v/s número de partículas atmosférico para distintos tamaños de partícula medidos en glaciar Olivares Alfa.

La gráfica muestra que en este glaciar existe una correlación significativa ( $>0,6$ ) entre BC y partículas hasta  $0,615 \mu\text{m}$ . Sobre este tamaño de partículas, la correlación con BC disminuye rápidamente, indicando que el Black Carbon observado en el glaciar Olivares Alfa está

asociado a partículas finas (Figura 93). Este hecho es un indicativo de que las fuentes de BC corresponden a fuentes de combustión, lo que sumado a que tanto BC como partículas provendrían de la misma fuente (actividad extractiva) 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 industrial en cordillera.

#### 5.4.2 Concentración de Black Carbon en glaciar Bello

Se realizó el monitoreo de la concentración de Black Carbon (BC) en el glaciar Bello en el período comprendido entre el 12 y 30 de Septiembre de 2014. Las mediciones fueron tomada cada 1 minuto utilizando un etalómetro portátil microAeth® Model AE51 de la firma Aethlabs, EE.UU. Los resultados de estas mediciones se presentan en la figura 94.

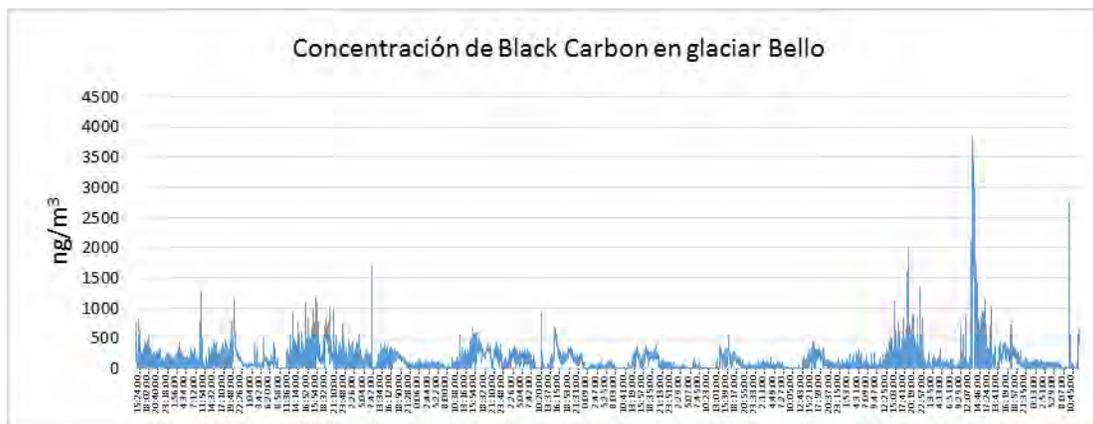


Figura 94. Concentración de BC en glaciar Bello.

La concentración de BC medida en el glaciar Bello presentó un promedio para el período de monitoreo de  $108 \text{ ng/m}^3$  alcanzando un máximo de concentración de  $3.867 \text{ ng/m}^3$  (Figura 94). Como se muestra en la tabla 11, sitios como la estación McMurdo (Antártica) y el monte Sonnblick (Alpes Austríacos) han presentado concentraciones promedio de BC de  $146 \text{ ng/m}^3$  (Hansen et al. 2011) y  $240 \text{ ng/m}^3$  (Hitzenberger et al. 2001), respectivamente, lo que hace presumir que los niveles de concentración promedio de BC observados en el glaciar Bello son bajos y aparentemente menores que en el glaciar Olivares Alfa ( $294 \text{ ng/m}^3$ ). Para establecer si las diferencias observadas son significativas, los valores de BC observados en ambos glaciares fueron sometidos a pruebas estadísticas de comparación de medias y de Kolmogorov-Smirnov (figura 95).

Tabla 11: Comparación de concentración de BC en los glaciares estudiados versus BC otros glaciares en el mundo.

BC [ng/m <sup>3</sup> ]	Glaciar Bello*	Glaciar Olivares Alfa*	McMurdo (Antártica)**	Sonnblick (Alpes Austríacos)***
Valor promedio	108	294	146	240
Valor Máximo	3.867	3.504	nr	nr

\* Este estudio, \*\* Hansen et al. 2011, \*\*\* Hitzemberger et al. 2001.

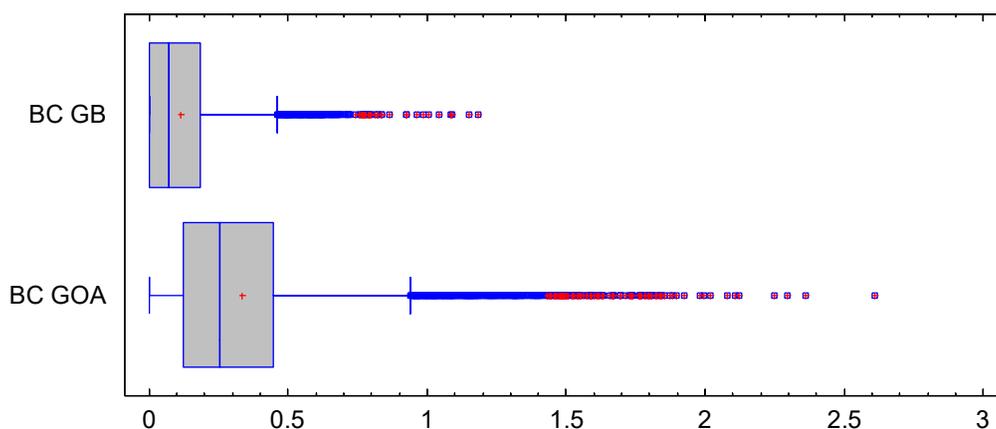


Figura 95. Gráficos de cajas y bigotes para comparación de concentración de BC en glaciares Bello y Olivares Alfa.

De acuerdo a las pruebas estadística realizadas, la concentración de BC observada en el glaciar Olivares Alfa es significativamente distinta y mayor a la observada en el glaciar Bello (Figura 95). Para intentar establecer si el origen del BC observado en el glaciar Bello, se realizó un análisis estadístico multivariado denominado análisis factorial que asocia los datos de acuerdo a su similitud permitiendo establecer si los conjuntos de variables agrupados tienen origen común, cuyos resultados se presentan a continuación en la figura 96.

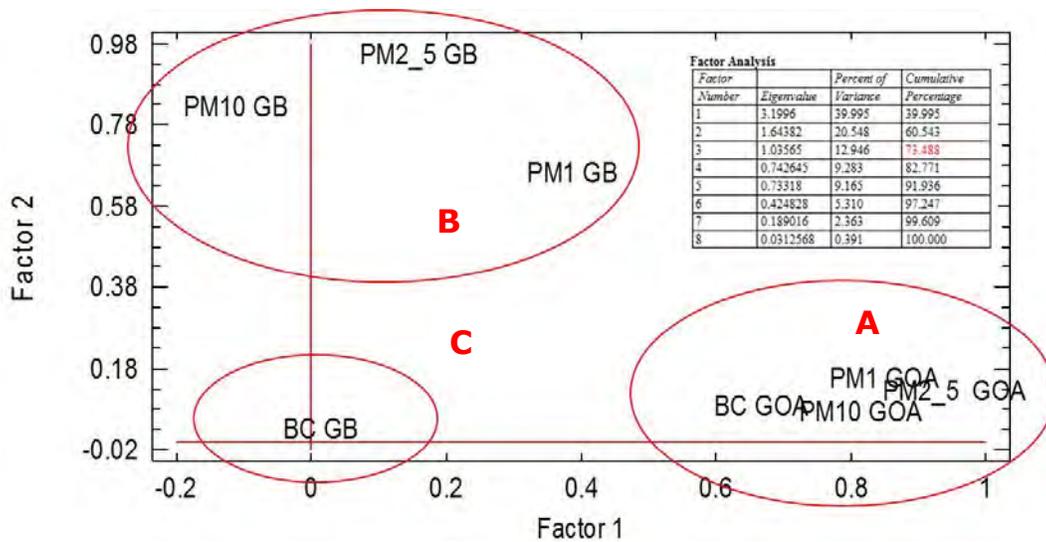


Figura 96. Análisis factorial de concentraciones de material particulado atmosférico y BC en glaciares Bello y Olivares Alfa.

Los datos de concentración de partículas y BC se asocian en 3 grupos claramente definidos, los cuales explican el 73% de la varianza de la totalidad de los datos. El primer grupo formado (A) está constituido por el material particulado atmosférico (PM10, PM2,5 y PM1) y BC observados en el glaciar Olivares Alfa; el segundo grupo (B) está formado por el material particulado atmosférico del glaciar Bello; y por último el tercer grupo (C) está formado por el Black Carbon del glaciar Bello. Los resultados obtenidos en el análisis factorial permiten obtener una primera conclusión que indicaría que muy probablemente el Black Carbon observado en el glaciar Bello tendría un origen distinto al del material particulado atmosférico observado en el mismo glaciar. Por otra parte y dado que el BC del glaciar Bello tampoco se agrupa con el BC del glaciar Olivares Alfa (A), permite inferir que el BC observado en el glaciar Bello muy probablemente no provendría de la misma fuente, en este caso la actividad extractiva colindante con el glaciar Olivares Alfa. Para corroborar la afirmación de que el BC observado en el glaciar Bello no se encuentra asociado al material particulado atmosférico observado en la zona (como si ocurre en el GOA), los resultados obtenidos fueron sometidos a análisis de correlaciones, los cuales se presentan en la figura 97.

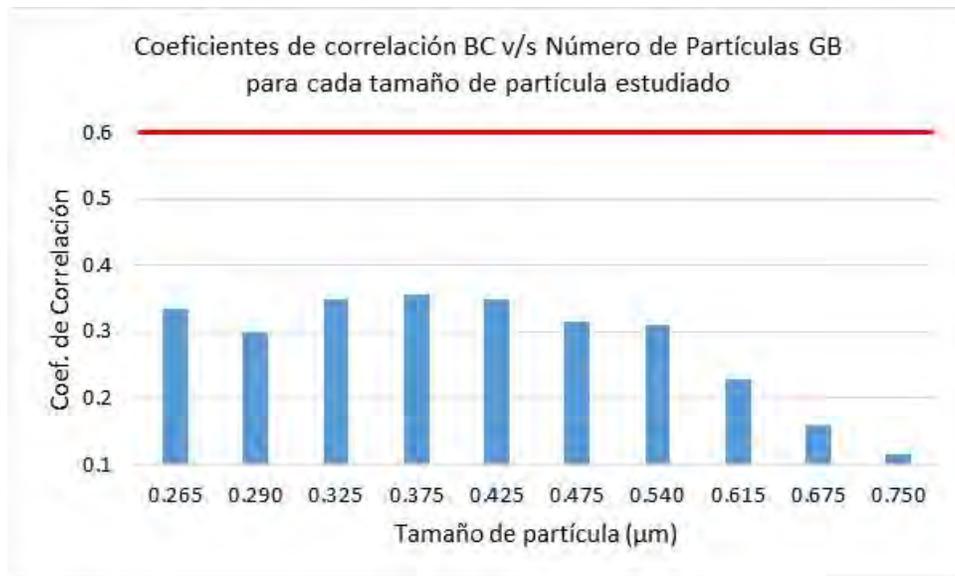


Figura 97. Correlación Black Carbon v/s número de partículas para distintos tamaños de partícula medidos en glaciar Bello.

La figura 97 muestra que no existe correlación significativa ( $>0,6$ ) entre BC y partículas finas, indicando que el Black Carbon observado en el glaciar Bello no está asociado al material particulado atmosférico medido en dicho glaciar y corroborando los resultados observados en el análisis factorial. Este hecho es un indicativo de que las fuentes de BC del glaciar Bello son distintas a las de material particulado atmosférico y no es posible establecer su origen con la información analizada hasta ahora.

Otro antecedente que refuerza las discusión anterior, tiene referencia con el análisis factorial realizado para evaluar la similitud entre el PM atmosférico observado en ambos glaciares estudiados. Como se observa en la figura 81, la concentración de material particulado atmosférico, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub> y PM<sub>1</sub> se asocia en 2 grupos que explican el 84% de la variabilidad del total de datos, el primer grupo está compuesto por el material particulado atmosférico de la ciudad de Santiago y el segundo grupo está constituido por el material particulado atmosférico observado en ambos glaciares estudiados. Estas asociaciones sugieren que el origen del MP en ambos glaciares podría ser común y distinto al de la ciudad de Santiago, esto en conjunto con los datos expuestos anteriormente respecto de la relación del material particulado con la meteorología de ambos glaciares hacen sugerir que una de las fuentes importantes de partículas en ambos glaciares correspondería muy probablemente a la actividad extractiva contigua al glaciar Olivares Alfa.

### 5.4.3 Concentración de Black Carbon en Santiago

Se realizó el monitoreo de la concentración de Black Carbon (BC) en Santiago en el período comprendido entre el 06/09 y 29/10/2014. Las mediciones fueron tomadas cada 5 minutos utilizando un equipo Multi Angle Absorption Photometer (MAAP) modelo 5012 de la firma Thermo, EE.UU. Los resultados de las mediciones para el período de monitoreo se presentan a continuación en la figura 98.

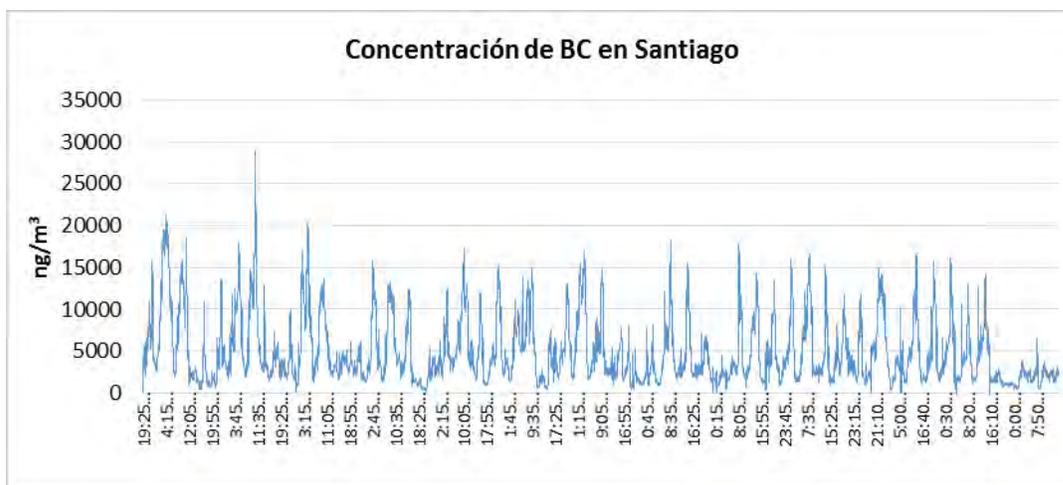


Figura 98. Concentración de BC en Santiago.

La concentración de BC observada en Santiago experimenta, como suele suceder, una ciclicidad diaria acorde a la observada en otras zonas urbanas del mundo (Perez et. al., 2010), donde se produce una correlación y asociación directa con el material particulado atmosférico emitido por fuentes de combustión comunes a estos dos contaminantes atmosféricos, destacando principalmente las fuentes móviles, seguidas de las fijas (Perez et. al., 2010). En este sentido, el comportamiento de BC en la ciudad de Santiago es similar al descrito anteriormente y su concentración alcanzó un valor promedio de  $4.904 \text{ ng/m}^3$ , con un máximo de  $28.880 \text{ ng/m}^3$ , siendo concordante con concentraciones encontradas en entornos urbanos, como por ejemplo Viena, donde se observó una concentración promedio de BC en período invernal de  $6.580 \text{ ng/m}^3$  (Heitzenberg et. al., 2001) o Barcelona con concentraciones del orden de  $4.000 \text{ ng/m}^3$  (Perez et. al., 2010).

Como era de esperar, la concentración de BC encontrada en Santiago es superior a la encontrada en los glaciares estudiados. Sin embargo, los resultados obtenidos en los tres sitios de estudio fueron sometidos de igual forma a pruebas estadísticas de rangos múltiples para ver si dichas diferencias son estadísticamente significativas y si sus distribuciones son

distintas, lo que permitió dar indicios de si el black carbon encontrado en la ciudad de Santiago y en los glaciares estudiados tienen un origen común (tabla 12).

Tabla 12. Test de rangos múltiples para valores de concentración de BC observados en Santiago, glaciar Bello y glaciar Olivares Alfa.

	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
BC glaciar Bello	108	X
BC glaciar Olivares Alfa	294	X
BC Santiago	4904	X

En este test estadístico, el concepto de **X de la columna "Grupos Homogéneos"** alineadas verticalmente indica similitud; por el contrario concepto de **X de la columna "Grupos Homogéneos" desalineadas** indican diferencia significativa.

Como se observa en la tabla 12, las distribuciones de concentración de BC son distintas en los 3 sitios estudiados, por lo tanto se puede decir que la concentración de BC observada en Santiago es distinta y mayor que la observada en el glaciar Olivares Alfa, la cual a su vez es significativamente distinta y mayor a la concentración de BC observada en el glaciar Bello; y la del glaciar Bello es distinta y menor que la del glaciar Olivares Alfa.

Para poder entender mejor la fuente de emisión del BC en la ciudad de Santiago, se debe establecer a qué fracción del material particulado atmosférico está asociado este contaminante observado en la ciudad y de esta forma intentar establecer su origen. Para ello se correlacionó la concentración de BC con el número de partículas por cada tamaño de partículas estudiado en este entorno urbano (figura 99).

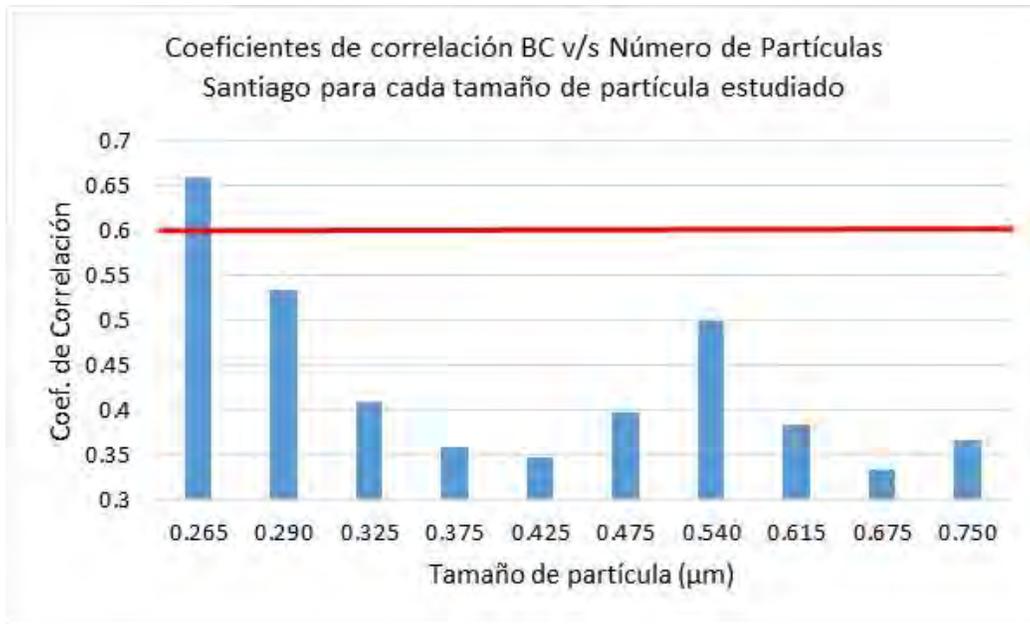


Figura 99. Correlación Black Carbon v/s número de partículas atmosféricas para distintos tamaños de partícula medidos en la ciudad de Santiago.

La figura 99 muestra que sólo existe correlación significativa ( $>0,6$ ) entre BC y partículas en el tamaño más fino capaz de medir con nuestro instrumento ( $0,265 \mu\text{m}$ ). A medida que aumenta el tamaño de partículas atmosféricas, la correlación con BC disminuye, indicando que el Black Carbon observado en Santiago está asociado principalmente a partículas ultrafinas. Este hecho es un indicativo de que las fuentes de BC corresponden a fuentes de combustión, lo que en Santiago puede ser atribuible fundamentalmente al parque vehicular de la ciudad. Este hecho también se condice con información obtenida de literatura, en donde en variados entornos urbanos el BC está asociado a fuentes móviles y con una buena correlación con este tipo de partículas atmosféricas características (Perez et. al., 2010).

Para establecer si el origen del BC en los 3 sitios estudiados corresponde a un origen común, se realizó un análisis de componentes principales (PCA) cuyos resultados se observan en la figura 100.

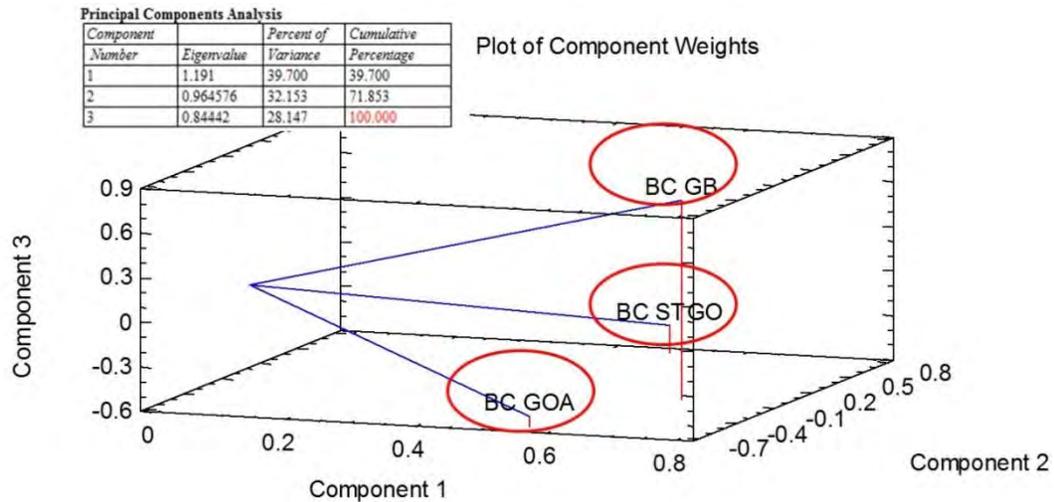


Figura 100. Gráfico de peso de componentes adquirido de análisis de componentes principales realizado a valores de concentración de BC observados en los 3 sitios de estudio.

El análisis de componentes principales indicó que los datos de BC observados se separaron en 3 componentes (BC Santiago, BC glaciar Bello y BC glaciar Olivares Alfa), los cuales explican el 100% de la varianza de los datos. El análisis PCA (Principal Component Analysis) indica que la concentración de BC de los 3 sitios tiene una distribución distinta por lo que se puede inferir que deberían tener distintos orígenes.

Estos resultados reafirman las hipótesis anteriores, las cuales señalan que el origen del Black Carbon en ambos glaciares estudiados es distinto, siendo el del glaciar Olivares Alfa muy probablemente asociado a la actividad extractiva y el del glaciar Bello indeterminado, lo que a la luz del análisis de componentes principales de la figura 96 muy probablemente tampoco provendría de la ciudad de Santiago, indicando que los resultados obtenidos no entregan suficiente información para establecer el origen de los bajos niveles de concentración de BC en el glaciar Bello.

## 5.5 DETERMINACIÓN DE IONES EN AEROSOLES Y NIEVE

### 5.5.1. Determinación de pH y conductividad eléctrica (CE) en los glaciares Bello y Olivares Alfa

Antecedentes.

En literatura se ha reportado que las medidas de pH y conductividad eléctrica realizados sobre testigos de hielo proveen información de las características de la contaminación atmosférica a través del tiempo (Herron, 1982; Wolff y Peel 1985), y han sido ampliamente utilizadas con el propósito de realizar estudios paleoclimáticos y paleoquímicos que permitan analizar la historia de la contaminación ambiental y sus impactos sobre una zona determinada (Millar, 1982; De Angelis et al. 1987; Jouzel et al. 1990; Mayewski et al. 1993, 1994, 1996; Kimitaka et al. 1996). Los registros de pH y conductividad eléctrica sobre nieve superficial y neviza también son capaces de dar cuenta de la contaminación atmosférica reciente de un lugar en particular, como por ejemplo, los glaciares de alta montaña (Hammer, 1980; Barrie et al. 1985; Taylor et al. 1993; Wolff et al. 1995; Hempel et al. 2000).

La deposición húmeda (lluvia, nieve, niebla, rocío) y seca son los únicos mecanismos que remueven en forma definitiva los gases y partículas de la atmósfera (Sanhueza et al. 2005) y las precipitaciones (sólidas o líquidas) juegan un papel preponderante en la remoción de los compuestos atmosféricos solubles.

Los distintos tipos contaminantes atmosféricos se pueden clasificar en dos principalmente: gases y partículas. Dentro de los contaminantes del tipo partículas se encuentra el material particulado atmosférico, el cual se refiere a un conjunto de diminutas partículas sólidas y pequeñas gotas de líquido que se hallan presentes en el aire. Por otra parte, la dispersión de un sólido o de un líquido, en el aire es lo que se conoce como aerosol atmosférico (Orozco, 2003).

Se han realizado estudios para determinar la influencia cualitativa y cuantitativa de aerosoles de origen marinos y continentales en el contenido de iones principales en las precipitaciones, pudiéndose ver que el  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{Mg}^{2+}$  son de contribución primaria de los aerosoles marinos, mientras que en el caso de aerosoles continentales domina el contenido de  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{Ca}^{2+}$  en la precipitación, siendo el  $\text{Ca}^{2+}$  de fuentes primarias, y de fuentes secundarias (antropogénicas fundamentalmente) el  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NH}_4^+$ , como productos de reacciones químicas en la atmósfera. (Mihajlidi-Zelić, 2006).

Por otra parte, todas las partículas presentes en la atmósfera acaban depositándose en la corteza terrestre, dentro de las cuales se pueden visualizar dos maneras de deposición, la húmeda y seca. La deposición húmeda se produce cuando las partículas presentes en la atmósfera son arrastradas por la acción de los hidrometeoros (partículas acuosas, líquidas o sólidas que caen a través de la atmósfera, como la nieve, el granizo, la lluvia, el rocío y la niebla), que las transporta hasta la superficie de la tierra. La deposición húmeda constituye uno de los mecanismos más importantes y eficientes para la limpieza natural atmosférica, permitiendo la remoción de compuestos químicos contaminantes asociados tanto a gases como a partículas. En este sentido, de entre los distintos hidrometeoros (lluvia, nieve, niebla, granizo y rocío), la nieve es uno de los hidrometeoros más eficientes como mecanismo de limpieza y deposición atmosférica (Telmer et al. 2004).

La producción de ácidos fuertes a partir de la presencia de gases atmosféricos como  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$ , son los principales causantes de precipitaciones ácida. Los óxidos de azufre y de nitrógeno una vez formados son oxidados por radicales hidroxilos ( $\text{OH}^-$ ) con lentitud (horas o días) en la atmósfera, hasta formar los respectivos ácidos, sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) y nítrico ( $\text{HNO}_3$ ). Este fenómeno ha sido identificado en muchas zonas del mundo y está asociado principalmente a los procesos industriales de alta temperatura tales como combustión de petróleo, gasolina y carbón; tostación y fundición de minerales; plantas de producción de cemento; generación de energía, entre otras.

La precipitación ácida se refiere estrictamente a la deposición húmeda y/o seca de sustancias de carácter ácido. Desde el punto de vista químico puede tener una composición en la que incluye diversos tipos de sustancias, pero los principales constituyentes son ácidos, como el sulfúrico, nítrico o clorhídrico, o sales derivadas de la reacción de los mismos cationes existentes en la atmósfera. Si bien el pH de la lluvia oscila entre 5,5 y 5,7 (en condiciones libres de contaminación), siendo ligeramente ácido debido a la solubilidad del dióxido de carbono atmosférico (Orozco, 2003), se considera lluvia ácida, la que tiene valores de pH inferiores a 5,6 según la normativa de la EPA<sup>1</sup> pudiendo alcanzar valores muy bajos de hasta 3 unidades de pH o incluso menores.

Por otro lado, el fenómeno de la deposición ácida aumenta la acidez de las aguas de ríos, lo que se traduce en importantes daños en la vida

---

<sup>1</sup> <http://www.epa.gov/acidrain/spanish/measure/index.html>

acuática, tanto piscícola como vegetal. También aumenta la acidez de los suelos, lo que se traduce en cambios en su composición, produciéndose lixiviación de nutrientes importantes para las plantas, tales como el calcio, y movilizándolo metales tóxicos, como el aluminio, cadmio, níquel, manganeso, plomo, mercurio, entre otros, que de esta forma se introducen también en las corrientes de agua. Por otro lado y como se ha explicado, el fenómeno de la lluvia ácida, que está directamente asociado a la deposición húmeda, puede verse disminuido debido a la presencia de iones neutralizantes en la atmósfera como  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , entre otros.

#### 5.5.1.1 Determinación de pH en glaciar Bello y Olivares Alfa.

Los resultados obtenidos para la medición de pH de muestras de nieve superficial durante las campañas de monitoreo en el glaciar Bello (12 al 30/09/2014) y en el glaciar Olivares Alfa (21 al 29/10/2014) se presenta a continuación en la tabla 13.

Tabla 13: Valores de pH promedios obtenidos de las muestras de nieve superficial recolectada en tres sitios por glaciar, durante la campaña de monitoreo en los glaciares Bello y Olivares Alfa.

	Sitio 1		Sitio 2		Sitio 3	
	pH Prom n=3	SD	pH Prom n=3	SD	pH Prom n=3	SD
Glaciar Bello	7,97	0,10	7,46	0,09	8,02	0,13
Glaciar Olivares Alfa	8,10	0,41	7,75	0,45	8,32	0,29

Al observar los valores presentados en la tabla 13, éstos son mayores a 5,6 (pH normal de los hidrometeoros en condiciones sin contaminación atmosférica) y de carácter básico, lo cual indicaría que ambos lugares se encontrarían libres de contaminación ácida proveniente de actividades humanas y/o natural (por. ej. volcanes cercanos a los glaciares en estudio, San José<sup>2</sup> y Tupungatito<sup>3</sup> al Bello y Olivares Alfa respectivamente), o que en su defecto las deposiciones ácidas (secas/húmedas) han sido debidamente neutralizadas en la atmosfera o

<sup>2</sup> <http://www.sernageomin.cl/archivosVolcanes/20121029125714338FichaVnTupungatito.pdf>

<sup>3</sup> [http://www.sernageomin.cl/reportesVolcanes/-/20140915102517853RAV\\_RMetroplitana\\_2014\\_agosto\\_vol\\_8.pdf](http://www.sernageomin.cl/reportesVolcanes/-/20140915102517853RAV_RMetroplitana_2014_agosto_vol_8.pdf)

directamente en el lugar de deposición, por la presencia de iones neutralizantes, aspecto que será abordado en este estudio. En la figuras 101 a 103 se representa en forma gráfica los datos expuesto en la tabla anterior.

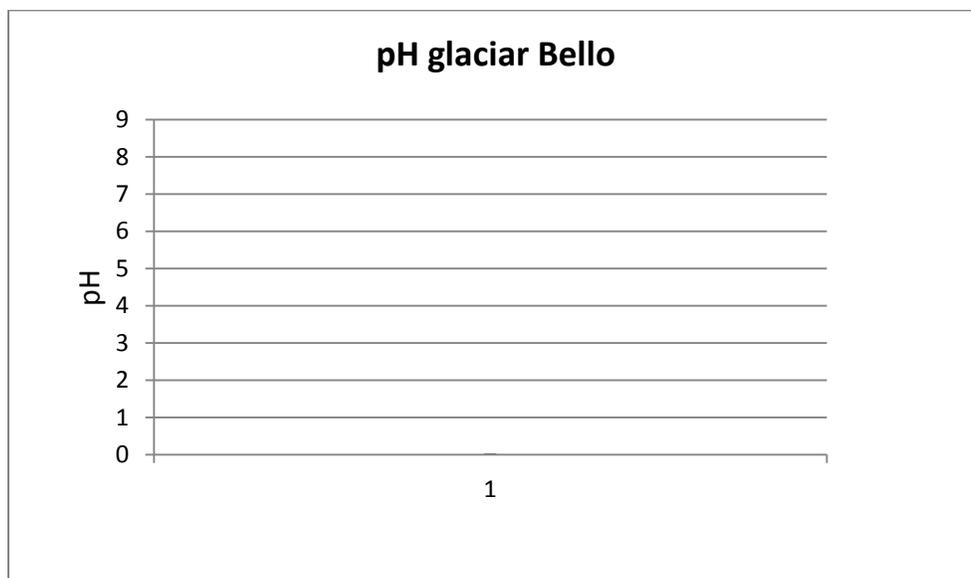


Figura 101. pH promedio de la nieve superficial recolectada el glaciar Bello.

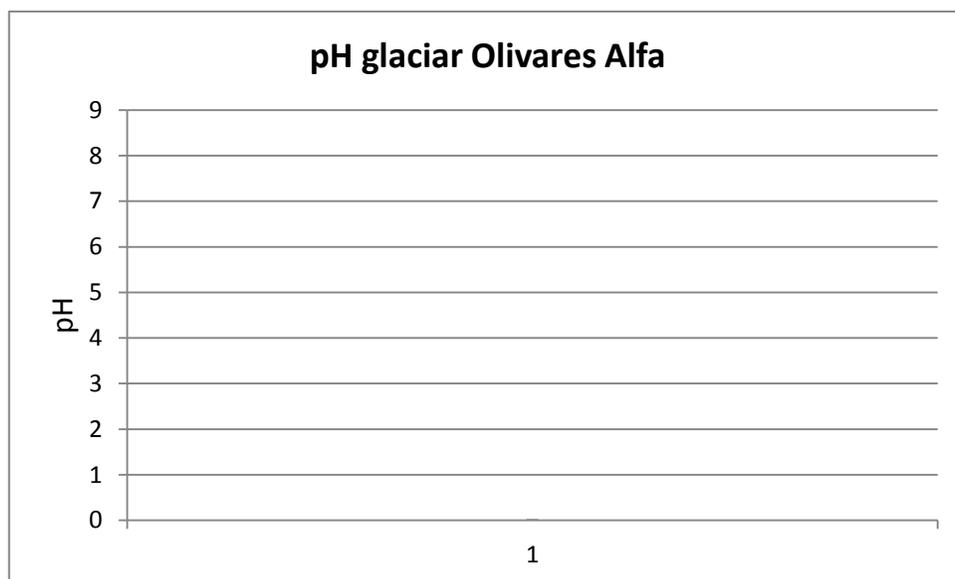


Figura 102. pH promedio de la nieve superficial recolectada en el glaciar Olivares Alfa.

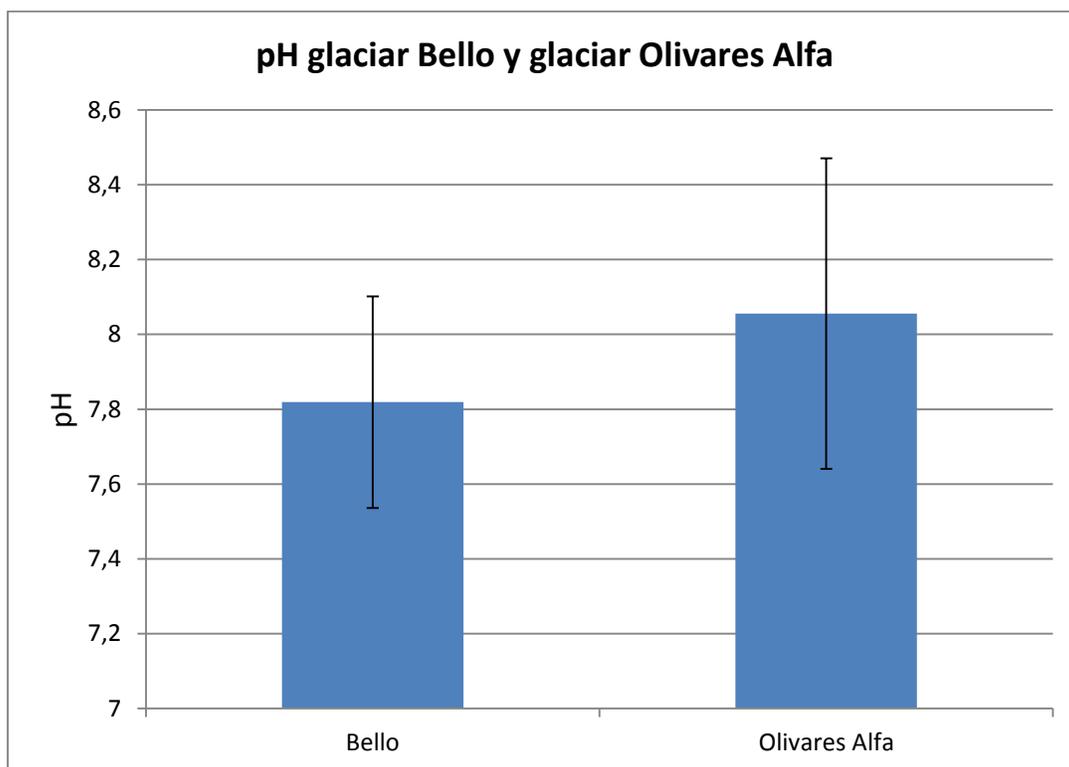


Figura 103. pH promedio para muestras de nieve superficial recolectada en el glaciar Bello y Olivares Alfa.

El análisis estadístico de significancia para los valores de pH entre los dos glaciares en estudio, mediante la prueba de Kruskal Wallis, arrojó que no hay diferencia significativa entre ellos.

Los valores de pH registrados para ambos glaciares son similares a los observados en otros glaciares de alta montaña, como por ejemplo, en el glaciar Baishui N°1 en el Tíbet con un pH promedio anual de 6,60 (Zhu et al. 2012) o en el glaciar N°1 en Tianshan, China donde se reportaron valores de pH comprendidos entre 5,79 y 8,05, con un promedio anual de 6,66 (Li et al. 2007) (Tabla 14).

Tabla 14. Comparación pH promedio con otros glaciares en el mundo.

	Glaciar Bello(*)	Glaciar Olivares Alfa (*)	Tíbet, glaciar Baishui N°1(**)	Tíbet glaciar N°1 (***)	Antártica (****)
pH	7,82 (±0,28)	8,06(±0,41)	6,60 (6,27-7,01)	6,66 (7,61-8,05)	6,1

\*Este estudio, \*\* Zhu et al. 2012, \*\*\*Li et al. 2007; \*\*\*\*Ali et al. 2010.

### 5.5.1.2 Determinación de la conductividad eléctrica (CE) en glaciar Bello y Olivares Alfa.

A continuación se presentan los resultados obtenidos para la medición de CE en las muestras de nieve superficial obtenidas durante la campaña de glaciar Bello (12 al 30/9/2014) y Olivares Alfa (21 al 30/10/2014).

Tabla 15: Valores promedio de conductividad eléctrica en  $\mu\text{S}/\text{cm}$  obtenidos de las muestras de nieve superficial en los glaciares Bello y Olivares Alfa.

	Sitio 1		Sitio 2		Sitio 3	
	CE Prom n=3	SD	CE Prom n=3	SD	CE Prom n=3	SD
Glaciar Bello	7,2	4,0	3,0	0,56	5,4	0,49
Glaciar Olivares Alfa	8,8	1,7	14,1	7,7	10,8	1,5

En la tabla 15 se puede observar que el glaciar Olivares Alfa presenta una mayor CE promedio en cada sitio de muestreo con respecto al glaciar Bello.

En las siguientes figuras (104 a 106) se representan en forma gráfica la CE en los distintos lugares de muestreo para cada glaciar en estudio.

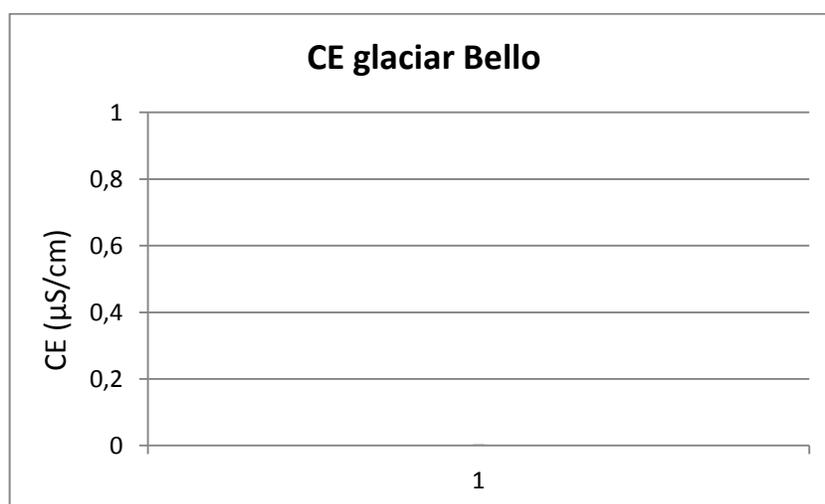


Figura 104. Conductividad eléctrica (CE) promedio de muestras de nieve superficial recolectada en el glaciar Bello.

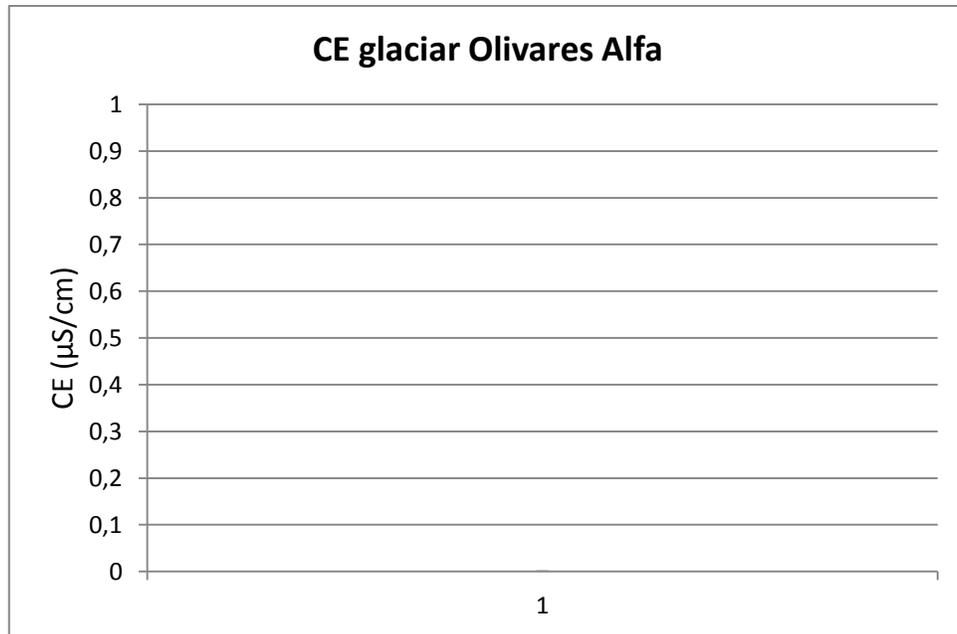


Figura 105. Conductividad eléctrica (CE) promedio de muestras de nieve superficial recolectada en el glaciar Olivares Alfa.

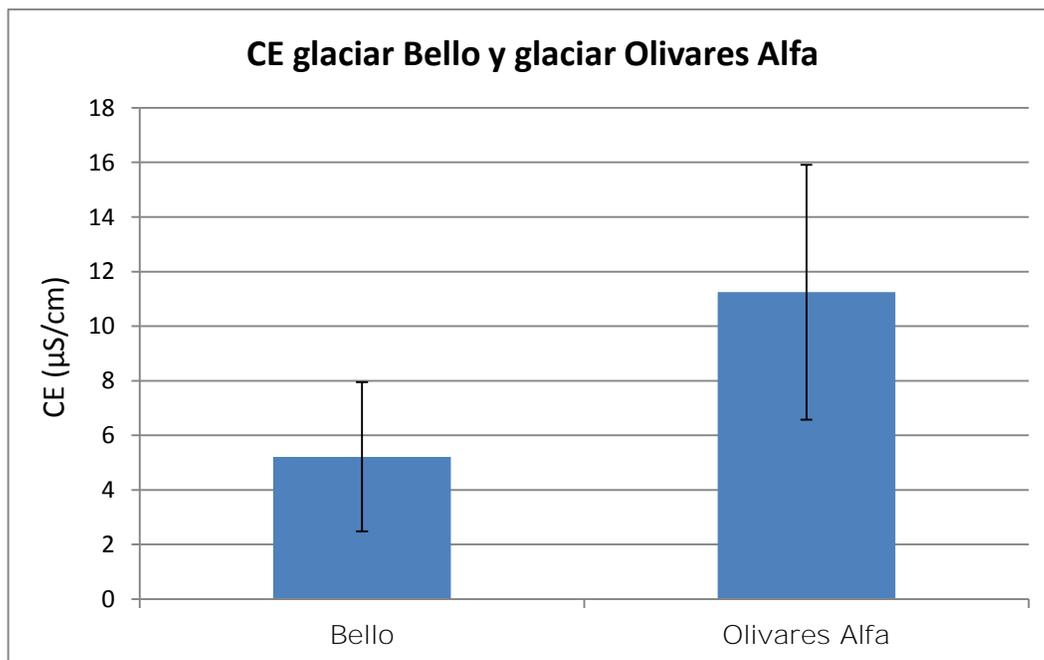


Figura 106. CE promedio para muestras de nieve superficial recolectadas en el glaciar Bello y Olivares Alfa.

El análisis estadístico de significancia para los valores de CE entre los dos glaciares en estudio, mediante la prueba de Kruskal Wallis, arrojó que no hay diferencia significativa entre ellos.

Los valores de CE registrados para ambos glaciares son comparables a los observados en otros glaciares de alta montaña, como por ejemplo, en el glaciar Baishui N°1 en el Tibet con una CE comprendida entre 4,29 y 15,41  $\mu\text{S}/\text{cm}$  con un promedio de 11,56  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Zhu et al. 2012) y en el glaciar N°1 en Tianshan en China, se registraron valores de CE comprendidos entre 2,14 y 95,5  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , con un promedio anual de 12,74  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Li et al. 2007) (tabla 16).

Tabla 16. Comparación de conductividad eléctrica

	Glaciar Bello(*)	Glaciar Olivares Alfa (*)	Tíbet, glaciar Baishui N°1(**)	Tíbet glaciar N°1 (***)	Himalaya (****)
CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	5,2	11,2	11,56 (4,29-15,41)	12,74 (2,14-95,5)	3,58

\*\*Este estudio, \*\* Zhu et al. 2012, \*\*\*Li et al. 2007 \*\*\*\* Kang et al. 2002.

## 5.5.2 Determinación de iones mayoritarios en muestras de nieve superficial recolectadas en los glaciares Bello y Olivares Alfa

### 5.5.2.1 Iones en el glaciar Bello

En la Tabla 17 y 18 se muestran las concentraciones promedio, valores mínimos y máximos encontrado para los aniones y cationes mayoritarios en muestras de nieve superficial colectadas durante la campaña.

Tabla 17. Concentración de aniones mayoritarios en muestras de nieve superficial ( $\mu\text{Eq/L}$ ) recolectadas en el glaciar Bello.

Concentración de aniones mayoritarios en muestras de nieve superficial ( $\mu\text{Eq/L}$ ) n=9												
	$\text{Cl}^-$				$\text{NO}_3^-$				$\text{SO}_4^{2-}$			
	Prom	SD	Min	Max	Prom	SD	Min	Max	Prom	SD	Min	Max
Sitio1	9,51	5,01	3,93	20,88	8,38	2,89	5,67	14,26	2,65	0,74	1,20	3,74
Sitio2	6,77	8,60	1,70	28,21	10,92	7,60	3,74	22,96	2,81	1,08	1,75	5,26
Sitio3	23,62	12,22	6,17	41,89	25,31	9,49	14,79	42,11	15,16	6,72	7,90	29,07

De los resultados expuestos anteriormente se puede observar que el sitio 3 presenta las mayores concentraciones para todos los aniones determinados;  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ .

En los casos particulares de  $\text{Cl}^-$ , en el sitio 2 se observó la menor concentración promedio, para  $\text{NO}_3^-$  la menor concentración promedio se registró en el sitio 1, finalmente para  $\text{SO}_4^{2-}$  la menor concentración promedio se observó también en el sitio 1.

Tabla 18. Concentración de cationes mayoritarios en muestras de nieve superficial ( $\mu\text{Eq/L}$ ) recolectadas en el glaciar Bello.

Cationes mayoritarios en muestras de nieve superficial ( $\mu\text{Eq/L}$ ) n=9																				
	$\text{Na}^+$				$\text{NH}_4^+$				$\text{K}^+$				$\text{Mg}^{2+}$				$\text{Ca}^{2+}$			
	Prom	SD	Min	Max	Prom	SD	Min	Max	Prom	SD	Min	Max	Prom	SD	Min	Max	Prom	SD	Min	Max
Sitio 1	1,31	0,76	0,09	2,13	2,77	1,53	0,82	4,98	1,39	0,60	0,48	2,30	1,26	0,45	0,55	1,94	14,04	6,82	2,57	22,51
Sitio 2	0,45	0,70	0,07	0,83	3,06	1,23	0,82	5,57	0,75	0,79	0,16	2,71	0,73	0,50	0,26	1,86	23,69	34,71	1,64	104,5
Sitio 3	1,28	0,73	0,19	2,09	5,64	1,69	3,90	8,61	2,23	1,03	0,89	3,69	2,84	1,02	1,38	4,14	96,92	40,73	28,61	153,4

En el caso de los cationes mayoritarios  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Ca}^{2+}$ , la mayor concentración promedio se observa en el sitio 3 con excepción de  $\text{Na}^+$  que la mayor concentración se observa en el sitio 1, siendo levemente superior al sitio 3.

En los casos particulares, de  $\text{Na}^+$  la menor concentración se registró en el sitio 2. Para el caso de  $\text{NH}_4^+$  su menor concentración promedio se registró en el sitio 1. En el caso de  $\text{K}^+$ , la menor concentración promedio se detectó en el sitio 2. En los casos de  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Ca}^{2+}$  la menor concentración promedio se observó en el sitio 2 y 1 respectivamente.

Lo descrito anteriormente se puede apreciar en forma visual en la figuras 107, 108 y 109.

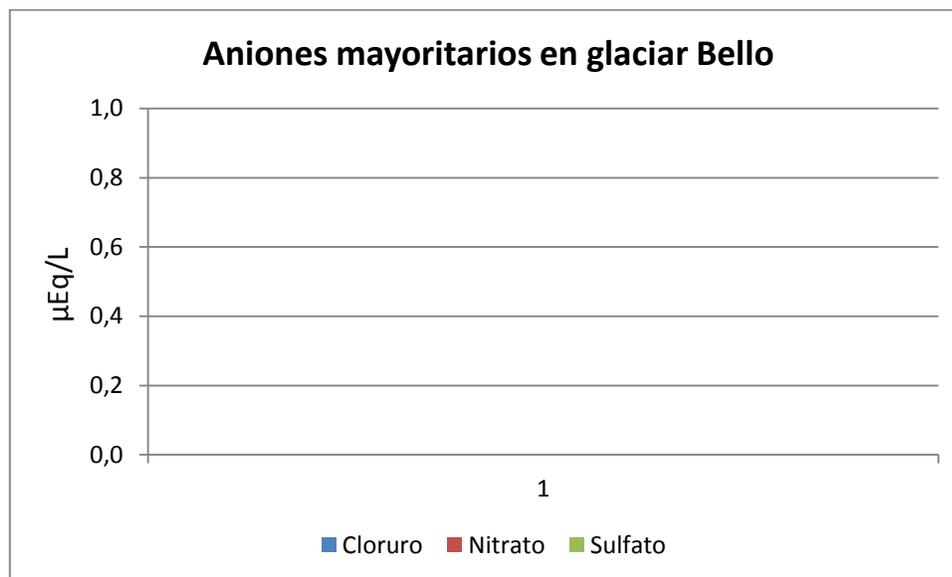


Figura 107. Concentración promedio de aniones mayoritarios en muestras de nieve superficial recolectada en el glaciar Bello.

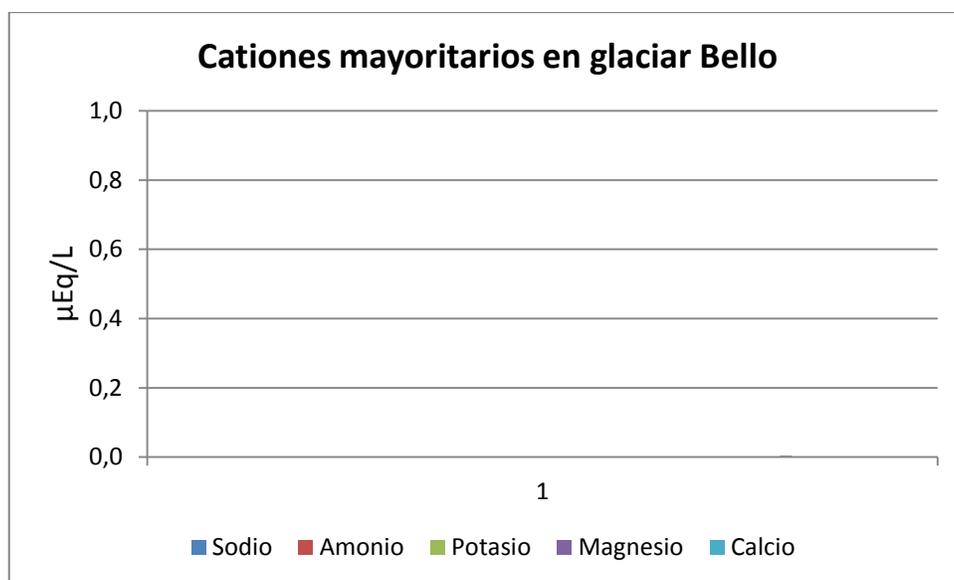


Figura 108. Concentración promedio de cationes mayoritarios en muestras de nieve superficial recolectadas en el glaciar Bello.

De las figuras 107 y 108 se puede desprender que en el caso de los aniones no hay un ión en particular que predomine en concentración en

los 3 sitios de muestreo. En el caso del  $\text{SO}_4^{2-}$ , éste presentó la menor concentración en los 3 sitios de muestreo. En el caso de los cationes, el ión  $\text{Ca}^{2+}$  predomina en todos los sitios de muestreo.

En la figura 109 se presenta la concentración de los cationes sin  $\text{Ca}^{2+}$  para una mejor apreciación de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , que están en menor concentración. Adicionalmente, se puede observar que el  $\text{NH}_4^+$ , le sigue, en orden decreciente de concentración al  $\text{Ca}^{2+}$  en los 3 sitios de muestreo.

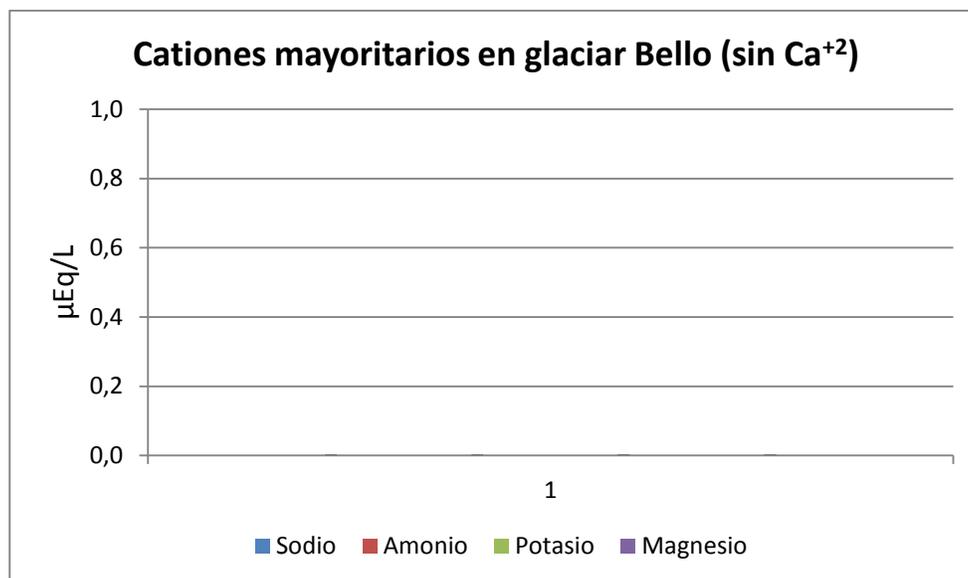


Figura 109. Concentración promedio de cationes mayoritarios (sin Calcio) en muestras de nieve superficial recolectadas en el glaciar Bello.

#### 5.5.2.2 Iones en el glaciar Olivares Alfa.

En la Tabla 19 y 20 se muestran las concentraciones promedio, valores mínimos y máximos encontrado para los aniones y cationes mayoritarios en muestras de nieve superficial recolectadas durante la campaña en el glaciar Olivares Alfa. De los resultados expuestos en las tablas indicadas anteriormente, se puede observar que en el caso de los aniones  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ , la mayor concentración se presenta en el sitio 2. Para el ión  $\text{NO}_3^-$  la mayor concentración se observa el sitio 3.

Tabla 19. Concentración de aniones mayoritarios en muestras de nieve superficial ( $\mu\text{Eq/L}$ ).

Aniones Mayoritarios en muestras de nieve superficial ( $\mu\text{Eq/L}$ ) n=9												
	$\text{Cl}^-$				$\text{NO}_3^-$				$\text{SO}_4^{2-}$			
	Prom	SD	Min	Max	Prom	SD	Min	Max	Prom	SD	Min	Max
Sitio1	6,36	2,23	3,75	9,82	6,63	3,16	2,82	12,45	6,59	3,75	2,76	11,10
Sitio2	9,24	3,99	5,64	16,49	8,79	3,13	5,69	14,94	11,60	3,34	8,67	18,89
Sitio3	6,99	1,93	4,00	10,24	9,35	2,53	5,38	12,45	7,92	2,66	4,66	11,38

Para los 3 aniones mayoritarios su menor concentración se observó en el sitio 1.

Para el caso de los cationes mayoritarios  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Ca}^{2+}$  su mayor concentración se registró en el sitio 2.

La menor concentración de los cationes se observó en el sitio 1 con excepción para el ión  $\text{NH}_4^+$ , el cual presentó su menor concentración en el sitio 3.

Tabla 20. Concentración de cationes mayoritarios en muestras de nieve superficial ( $\mu\text{Eq/L}$ ).

Cationes Mayoritarios en muestras de nieve superficial glaciar Olivares Alfa ( $\mu\text{Eq/L}$ ) n=9																				
	$\text{Na}^+$				$\text{NH}_4^+$				$\text{K}^+$				$\text{Mg}^{2+}$				$\text{Ca}^{2+}$			
	Prom.	SD	Min	Max	Prom	SD	Min	Max	Prom	SD	Min	Max	Prom	SD	Min	Max	Prom	SD	Min	Max
Sitio1	2,25	1,56	0,64	4,85	7,40	4,57	2,29	14,27	0,73	0,44	0,24	1,43	1,60	1,04	0,49	3,12	7,47	5,33	0,62	14,40
Sitio2	3,44	1,83	1,86	7,14	7,83	2,72	4,42	11,86	1,32	0,98	0,65	3,47	2,37	0,43	1,76	2,91	17,49	10,88	6,65	39,23
Sitio3	2,80	1,87	0,14	5,60	5,67	0,90	4,68	7,09	1,12	0,41	0,38	1,58	2,25	0,73	1,53	3,38	10,58	2,71	6,16	14,15

Lo descrito anteriormente se representa en forma gráfica en las figuras 110 y 111.

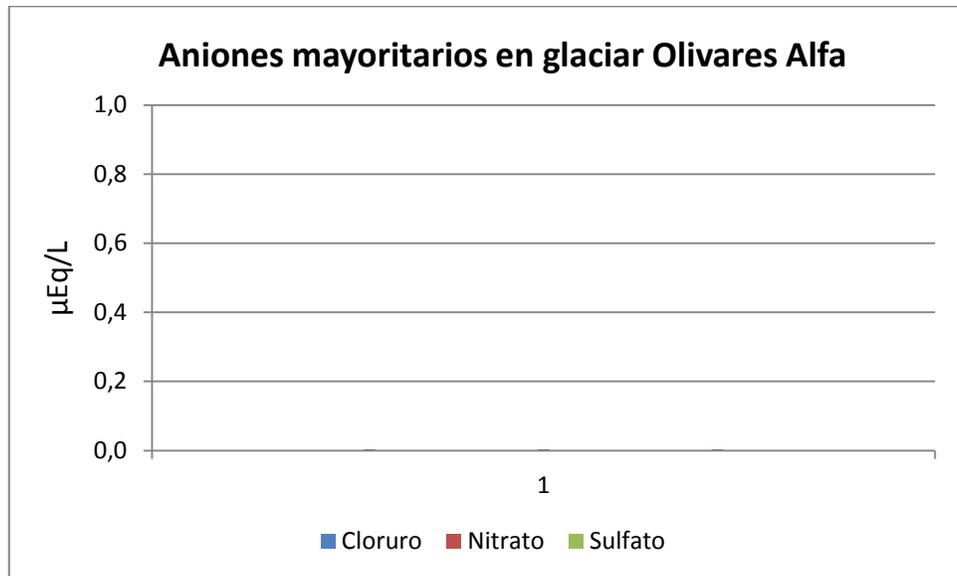


Figura 110. Concentración promedio de aniones mayoritarios en muestras de nieve superficial recolectadas en el glaciar Olivares Alfa.

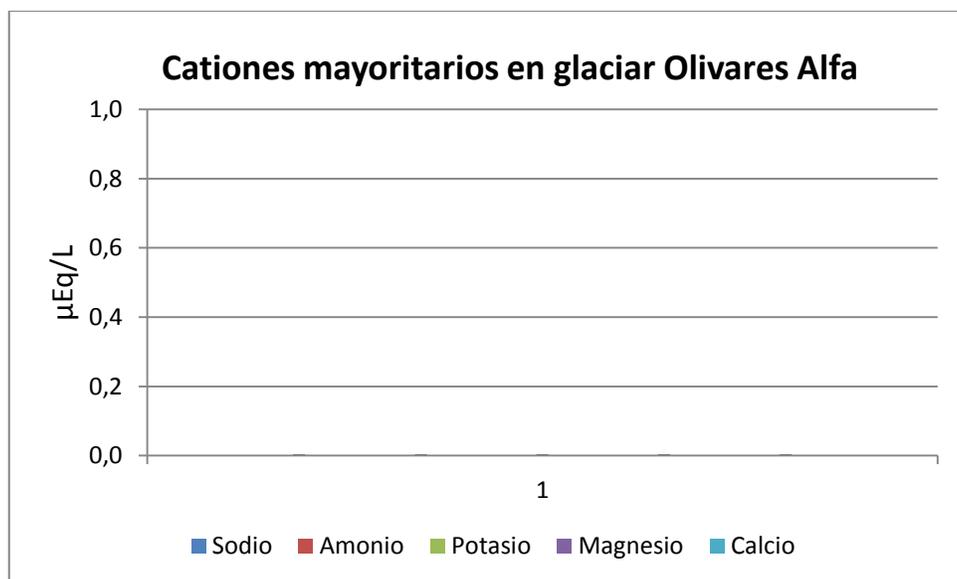


Figura 111. Concentración promedio de cationes mayoritarios en muestras de nieve superficial recolectadas en el glaciar Olivares Alfa.

Al igual que el glaciar Bello, el glaciar Olivares Alfa, el  $\text{Ca}^{2+}$  presenta una concentración mayoritaria en los 3 sitios de muestreo seguido por el ión  $\text{NH}_4^+$ . A diferencia del glaciar Bello, en los 3 sitios de muestreo, la menor concentración se observó para el ión  $\text{K}^+$ .

En general se puede apreciar que existe una variación en la concentración de los iones en los diferentes sitios de muestreo en ambos glaciares. Esta variación no corresponde a la incertidumbre o variabilidad intrínseca del método instrumental, sino que muy por el contrario, es debida a la variabilidad ambiental y debe interpretarse como algo normal producto de la variabilidad natural de muestras ambientales sujetas en esta caso a la variabilidad del proceso de deposición atmosférico, lo que sumado a la variabilidad meteorológica, en particular a la dirección y/o la velocidad del viento pueden generar una gran variabilidad en los contaminantes depositados sobre la nieve, sobre todo en una superficie tan grande como la correspondiente a un glaciar.

#### 5.5.2.3 Comparación de mediciones de iones entre los glaciares en estudio.

La concentración promedio de los aniones mayoritarios medidos en muestras superficiales recolectadas en el glaciar Bello y Olivares Alfa se representan a continuación en la tabla 21 y la figura 112. De ellos se desprende que la mayor concentración tanto de  $\text{Cl}^-$  como de  $\text{NO}_3^-$  se presenta en el glaciar Bello, con excepción del  $\text{SO}_4^{2-}$  que presenta una mayor concentración en el glaciar Olivares Alfa.

Tabla 21. Concentración promedio de aniones mayoritarios en muestras de nieve superficial recolectadas en los glaciares Bello y Olivares Alfa.

Concentración promedio de aniones mayoritarios en muestras de nieve superficial ( $\mu\text{Eq/L}$ ) n=27						
Glaciar	$\text{Cl}^-$		$\text{NO}_3^-$		$\text{SO}_4^{2-}$	
	Prom	SD	Prom	SD	Prom	SD
Bello	13,30	11,53	14,87	10,28	6,88	7,08
Olivares Alfa	7,42	3,02	8,26	3,08	8,70	3,82

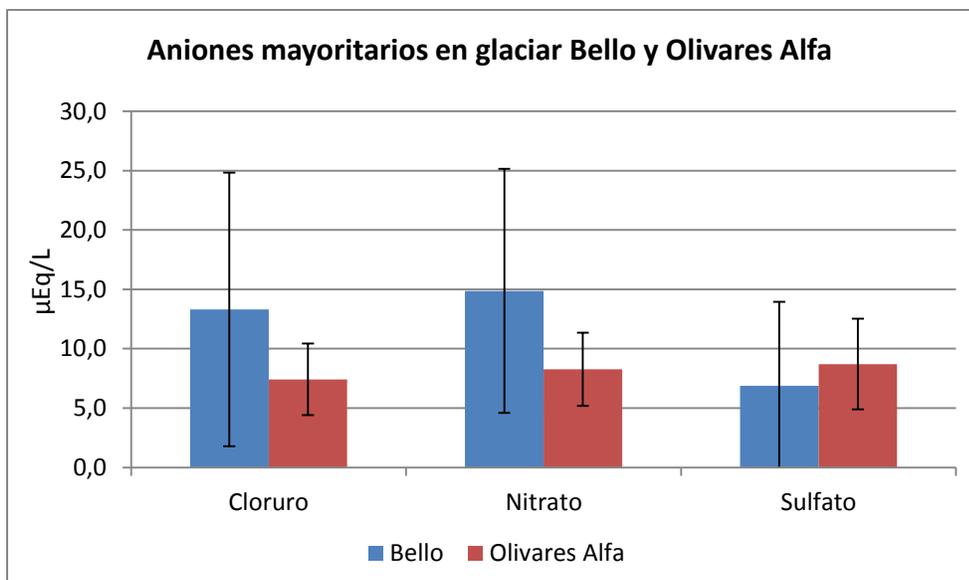


Figura 112. Concentración promedio de los aniones mayoritarios en muestras de nieve superficial recolectadas en los glaciares Bello y Olivares Alfa.

En la tabla 22 y figura 113 se puede apreciar los datos y la representación de la concentración promedio de los cationes mayoritarios en el glaciar Bello y Olivares Alfa. De ellos se desprende que el glaciar Olivares Alfa presenta una mayor concentración para los cationes  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{Mg}^{2+}$  mientras que  $\text{K}^+$  y  $\text{Ca}^{2+}$  presentan una mayor concentración en glaciar Bello.

Tabla 22. Concentración promedio cationes mayoritarios en glaciar Bello y Olivares Alfa.

Concentración promedio cationes mayoritarios en glaciar Bello y Olivares Alfa ( $\mu\text{Eq/L}$ ) n=27										
Glaciar	$\text{Na}^+$		$\text{NH}_4^+$		$\text{K}^+$		$\text{Mg}^{2+}$		$\text{Ca}^{2+}$	
	Prom	SD	Prom	SD	Prom	SD	Prom	SD	Prom	SD
Bello	1,28	0,81	3,82	1,95	1,45	1,00	1,61	1,14	44,88	48,14
Olivares Alfa	2,80	1,72	6,97	3,14	1,06	0,68	2,07	0,82	11,85	8,10

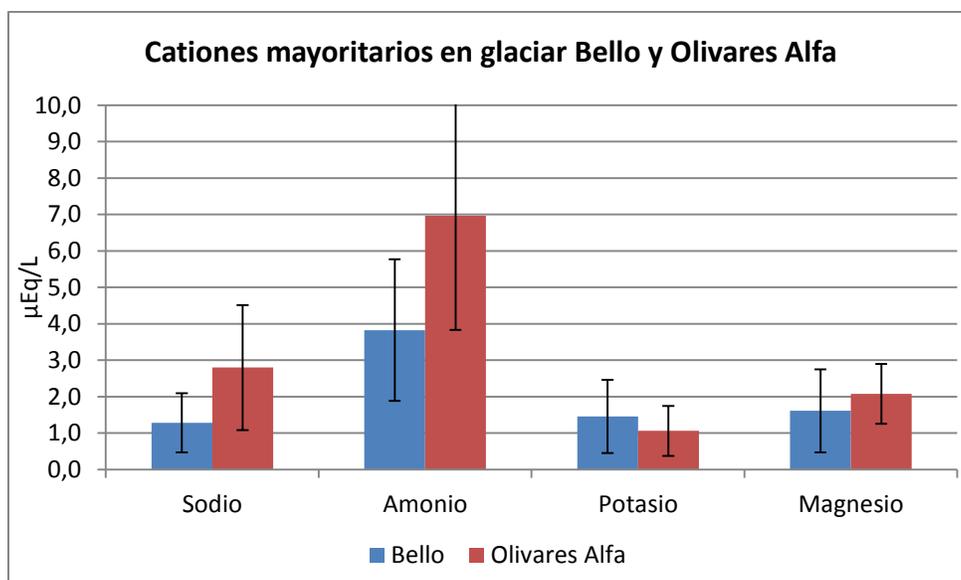


Figura 113. Concentración promedio de los cationes mayoritarios en muestras de nieve superficial en el glaciar Bello y Olivares Alfa.

Se realizó un análisis de significancia para la concentración de cada uno de los iones, entre ambos sitios de estudio, con el fin de verificar si hay diferencia en su concentración entre ambos glaciares en estudio. El análisis estadístico de significancias se realizó mediante la prueba estadística de Kruskal Wallis. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 23; letras iguales para un mismo ión entre los 2 glaciares en estudio quiere decir que no hubo diferencia estadística significativa en la concentración promedio. Letra diferente indica que sí hubo diferencia estadísticamente significativa en la concentración promedio para ese ión en particular, entre los glaciares estudiados.

Tabla 23. Análisis de significancia estadística entre el glaciar Bello y Olivares Alfa.

Glaciar/Ion	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>
Bello	A	A	A	A	A	A	A	A
Olivares Alfa	A	B	B	B	B	A	B	B

Los iones SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Na<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> y Mg<sup>2+</sup> presentan una concentración mayor y estadísticamente significativa en el glaciar Olivares Alfa con respecto al

glaciar Bello.  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{Ca}^{2+}$  presentan una concentración menor y estadísticamente significativa en glaciar Olivares Alfa con respecto al glaciar Bello. En el caso de los iones  $\text{Cl}^-$  y  $\text{K}^+$ , no presentan una diferencia estadísticamente significativa en su concentración entre ambos glaciares en estudio.

Al comparar los valores obtenidos con otros estudios realizados en glaciares realizados en los Andes centrales de Chile y patagónicos, los valores promedios encontrados para los iones en estudios, resultaron ser comparables como se muestra en la tabla 24.

Tabla 24. Concentración promedio de iones mayoritarios en muestras superficiales en glaciar Bello y Olivares Alfa comparada con otras concentraciones de iones encontradas en literatura para los Andes centrales y Patagonia. Valores en  $\mu\text{Eq/L}$ .

Glaciar/Ion	$\text{Cl}^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Na}^+$	$\text{NH}_4^+$	$\text{K}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$
Bello RM	13,30	14,87	6,88	1,28	3,82	1,45	1,61	44,88
Olivares Alfa RM	7,42	8,26	8,70	2,80	6,97	1,06	2,07	11,85
Mercedario San Juan Argentina*	1,25	2,82	5,14	2,36	1,07	0,16	0,90	3,96
Esmeralda* (cerro el Plomo RM)	2,15	4,53	17,28	1,54	3,09	0,14	1,86	11,24
Tapado*. IV región	1,90	3,11	8,55	1,60	1,17	0,37	0,68	9,76
Marinelli** Tierra del Fuego. XII región	9,60	0,30	2,30	8,15	n/i	0,50	1,72	0,71

\*Bolius et al. 2006. \*\*Grigholm et al. 2009.

#### 5.5.2.4 Iones en Santiago.

Primera campaña del 9 al 17 de septiembre del 2014.

En las figuras siguientes se presentan los resultados obtenidos para el análisis de iones mayoritarios a partir de muestras de material particulado atmosférico (MP) recolectadas en la ciudad de Santiago, campaña realizada en paralelo a la campaña en el glaciar Bello (9-17/9/2014). En la figura 114 se puede observar que durante la realización de la campaña, el ión  $\text{Cl}^-$  presenta la mayor concentración en los días estudiados. En orden decreciente en concentración le siguen  $\text{SO}_4^{2-}$  y luego  $\text{NO}_3^-$ .

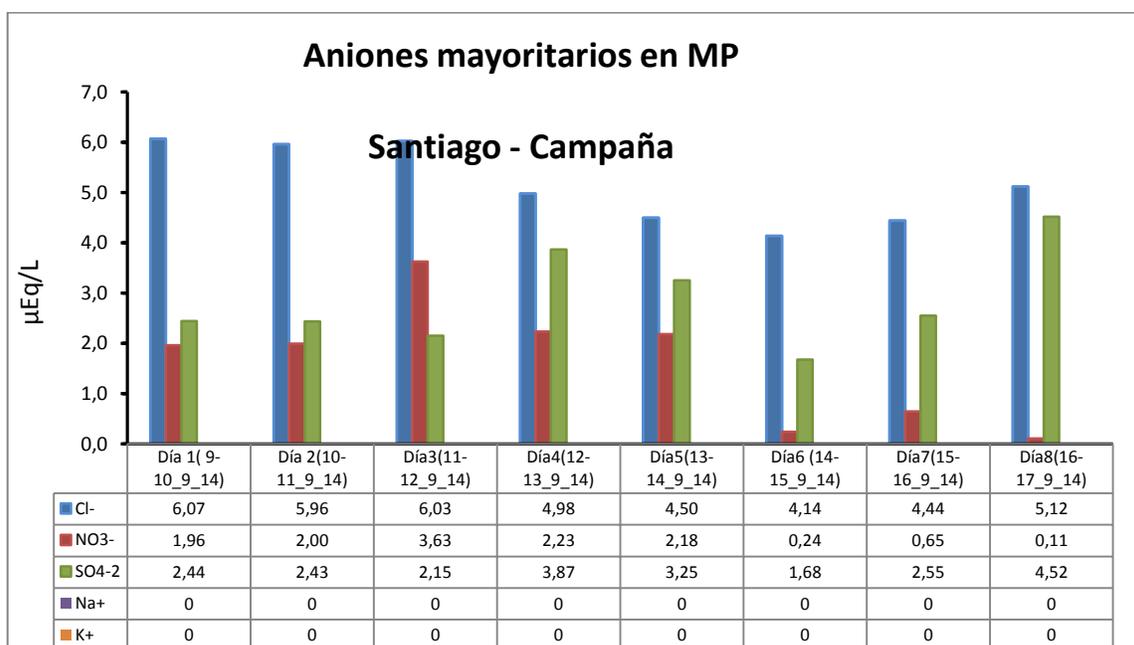


Figura 114. Concentración diaria de los aniones mayoritarios en muestras de MP atmosférico recolectadas en Santiago en campaña 1.

En la figura 115 se puede observar que en forma diaria se logró detectar y cuantificar  $\text{NH}_4^+$  y ocasionalmente  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Ca}^{2+}$  en las muestras colectadas. El resto de los cationes no se detectaron o estuvieron bajo el límite de cuantificación.

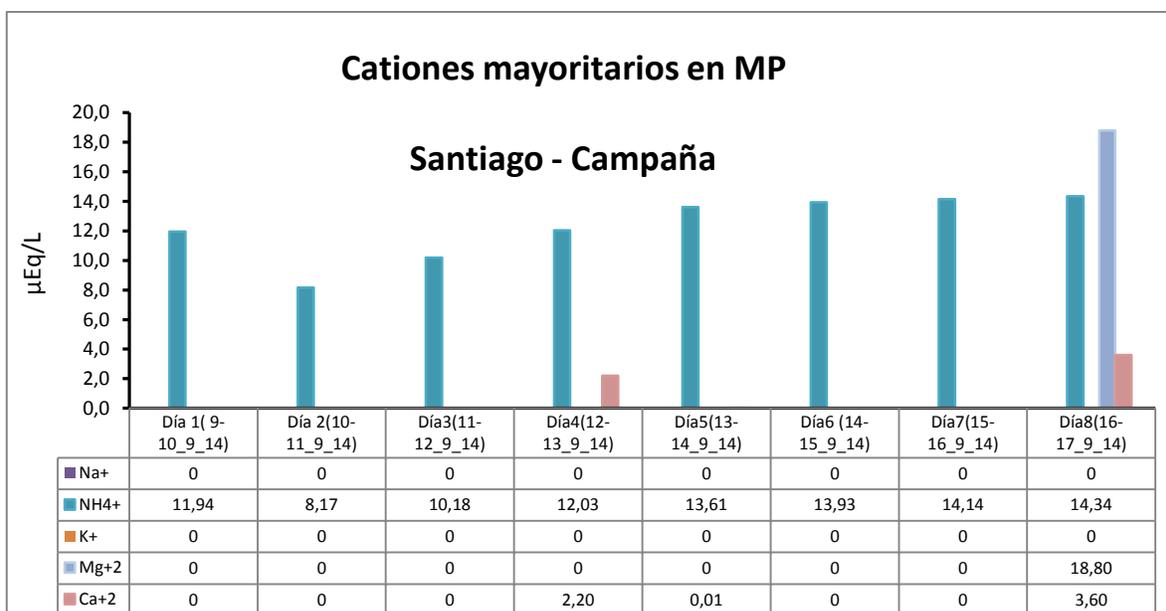


Figura 115. Concentración diaria de los cationes mayoritarios en muestras de MP atmosférico recolectadas en Santiago en campaña 1.

En la figura 116 se muestra el valor obtenido en forma diaria para los aniones mayoritarios contenidos en fase gaseosa. Al igual que el caso del MP, la mayor cantidad registrada corresponde a  $\text{Cl}^-$ , seguida por  $\text{SO}_4^{2-}$  exceptuando el día 6 de la campaña, donde la cantidad de  $\text{NO}_3^-$  fue mayor que la de  $\text{SO}_4^{2-}$ .

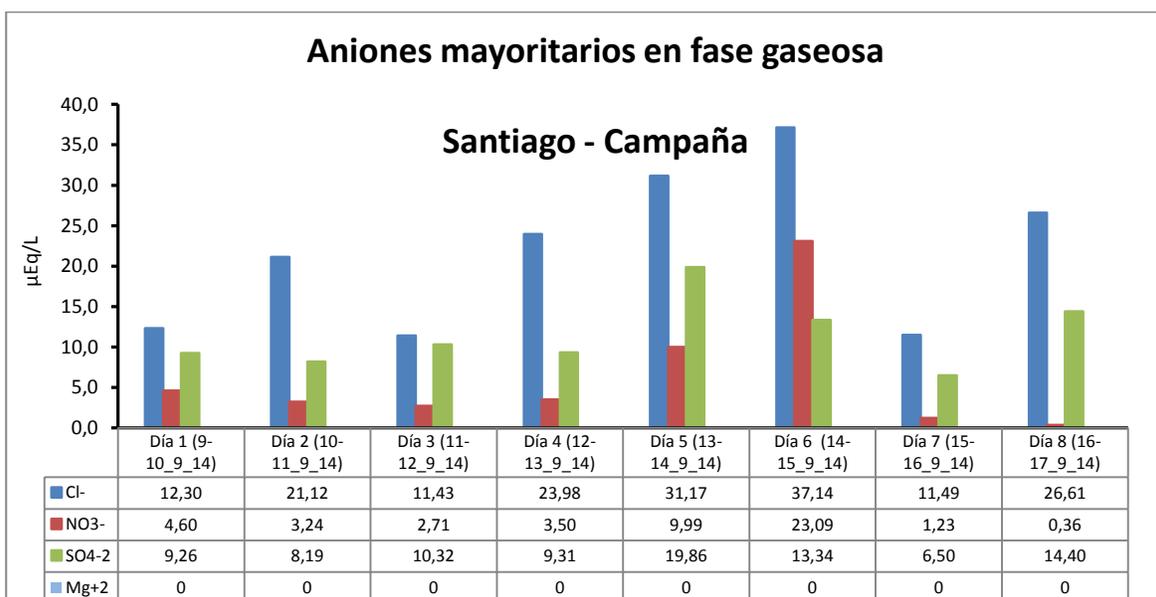


Figura 116. Concentración diaria de los aniones mayoritarios en muestras en fase gaseosa recolectadas en Santiago en campaña 1.

En la figura 117 se puede observar que en forma diaria sólo se logró detectar y cuantificar  $K^+$  y  $Ca^{2+}$  en las muestras recolectadas. El resto de los cationes no se detectaron o estuvieron bajo límite de cuantificación. Para el caso particular de los iones  $Na^+$  y  $NH_4^+$ , el método de toma de muestras (denuders), no permite la determinación  $Na^+$  y  $NH_4^+$  contenido en la fase gaseosa.

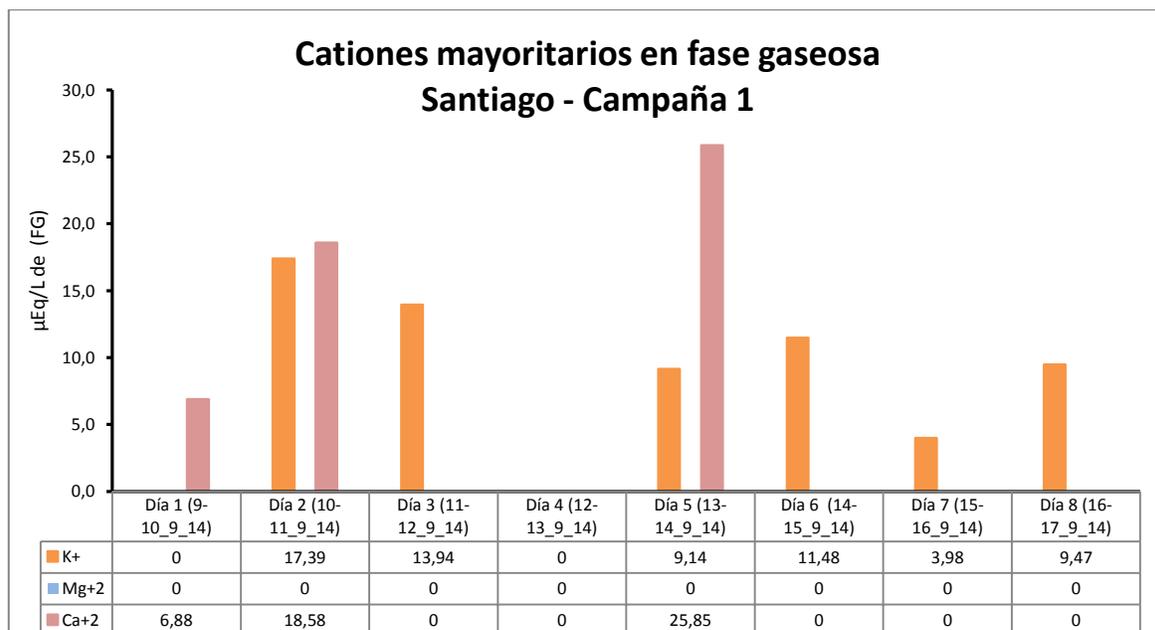


Figura 117. Concentración diaria de los cationes mayoritarios en muestras en fase gaseosa recolectadas en Santiago en campaña 1.

En el caso particular de los cationes,  $NH_4^+$  se detecta y cuantifica sólo en fase de material particulado, en cambio el  $K^+$  se detecta y cuantifica sólo en fase gaseosa. Ambos iones están asociados a actividad antrópica;  $NH_4^+$  a actividad agropecuaria,  $K^+$  a la quema de biomasa (leña).

Otro aspecto importante a considerar es la mayor concentración de iones en fase gaseosa respecto de aquella encontrada en el PM atmosférico. Este efecto se da tanto en los aniones como en los cationes de la fase gaseosa del aerosol atmosférico, lo que da cuenta que la vía de incorporación de estos iones a otros compartimentos ambientales estaría prioritariamente desplazado hacia una deposición en fase gas. Obviamente dependiendo de los equilibrios termodinámicos gobernados por las características de los compuestos químicos estudiados y las variables meteorológicas, estos podrán pasar a la fase sólida o húmeda del aerosol atmosférico y en consecuencia depositarse sobre las superficies de la tierra en la forma correspondiente.

Segunda campaña del 21 al 30 de octubre del 2014.

En el caso de la segunda campaña realizada en octubre, realizada en paralelo a la campaña en el glaciar Olivares Alfa, se encontraron los siguientes resultados. En la figura 118 se puede observar las cantidades encontradas para los aniones mayoritarios. Se puede observar, al igual que la campaña de septiembre, que el  $\text{Cl}^-$  presenta su mayor abundancia, seguido de  $\text{SO}_4^{2-}$ , con excepción de los días 8 y 9, donde  $\text{NO}_3^-$  presentó una abundancia mayor a  $\text{SO}_4^{2-}$ . Cabe mencionar en forma adicional que los iones  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ , están ligados preferentemente a actividad antropogénica.

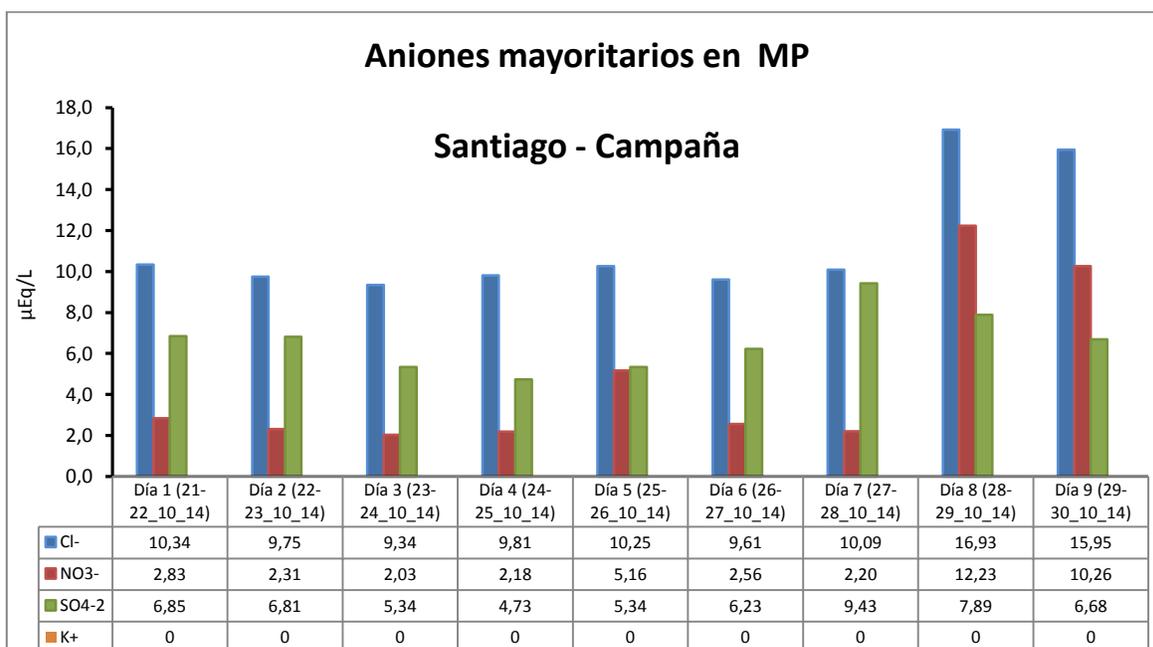


Figura 118. Concentración diaria de los aniones mayoritarios en muestras en MP atmosférico en Santiago en campaña 2.

En las figura 119, se presentan las cantidades encontradas para los cationes mayoritarios en MP. Al igual que en la campaña del mes de septiembre se observó una mayor abundancia para el  $\text{NH}_4^+$ , le sigue en orden decreciente  $\text{Ca}^{2+}$ , con excepción del día 7, donde  $\text{Mg}^{2+}$ , fue más importante. Luego en orden decreciente le sigue  $\text{K}^+$  y finalmente  $\text{Mg}^{2+}$ . En el caso particular de  $\text{Na}^+$ , este no se detectó o estuvo bajo el límite de cuantificación.

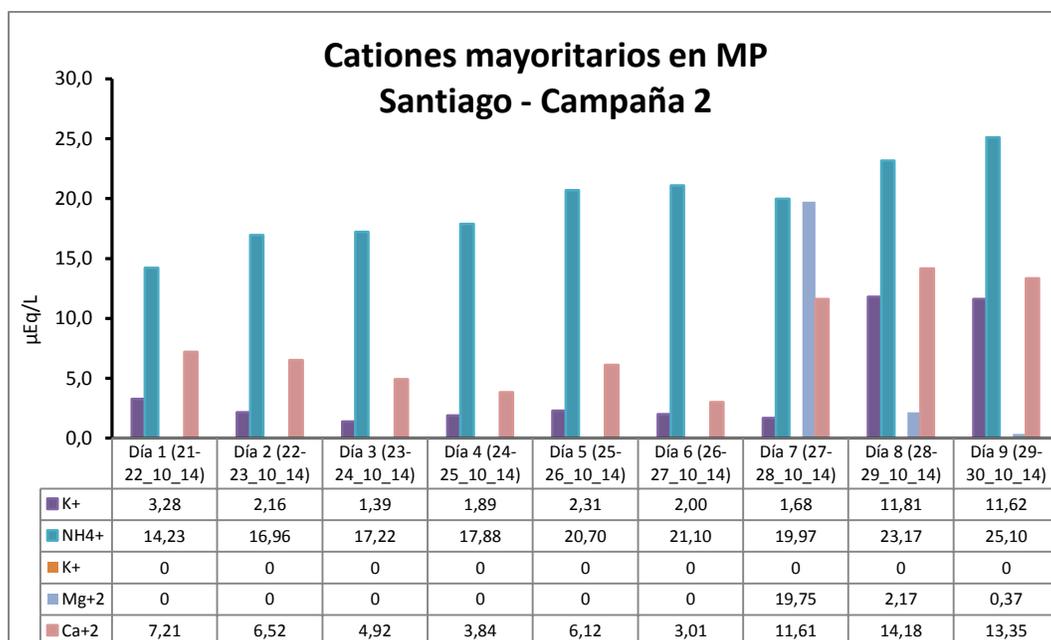


Figura 119. Concentración diaria de los cationes mayoritarios en muestras en MP atmosférico en Santiago en campaña 2.

En la figura 120 se representa las cantidades encontradas diariamente, para los aniones mayoritarios contenidos en fase gaseosa durante la realización de la campaña en el mes de octubre. A diferencia de lo encontrado en el MP atmosférico, la mayor cantidad registrada corresponde a  $\text{SO}_4^{2-}$ , seguida por  $\text{Cl}^-$  y finalmente por  $\text{NO}_3^-$ .

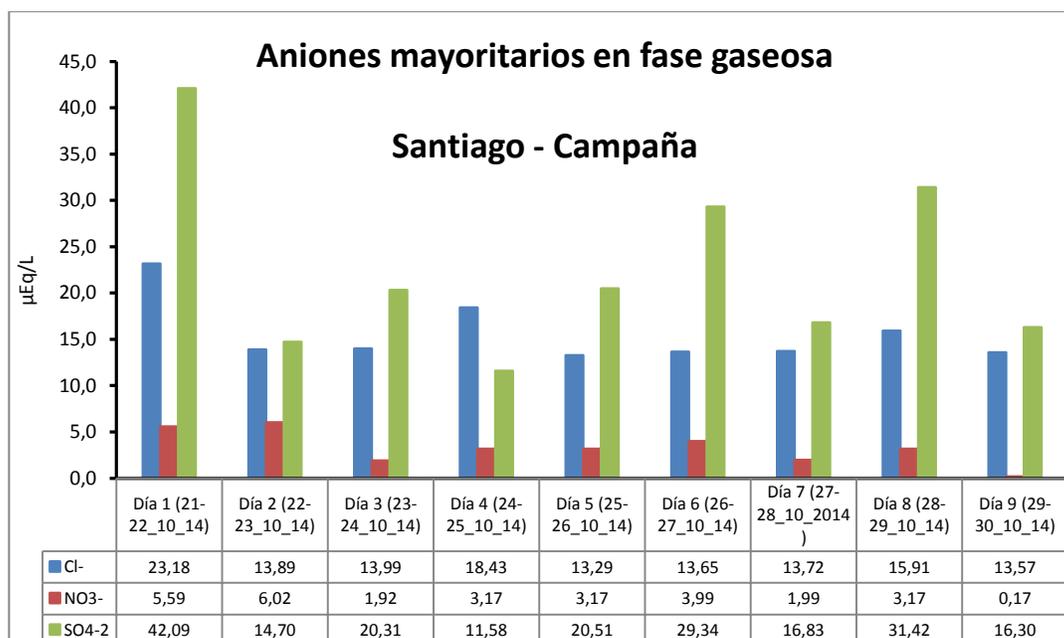


Figura 120. Concentración diaria de los aniones mayoritarios en muestras en fase gaseosa en Santiago en campaña 2.

En la figura 121 se puede observar que en forma diaria se logró detectar y cuantificar  $K^+$  en diariamente.  $Mg^{2+}$  y  $Ca^{2+}$  se detectó y cuantificó en el día 1 de la campaña. El resto de los cationes no se detectaron o estuvieron bajo límite de cuantificación. Para el caso particular de los iones  $Na^+$  y  $NH_4^+$ , el método de toma de muestras (denuders), no permite la determinación  $Na^+$  y  $NH_4^+$  contenido en la fase gaseosa.

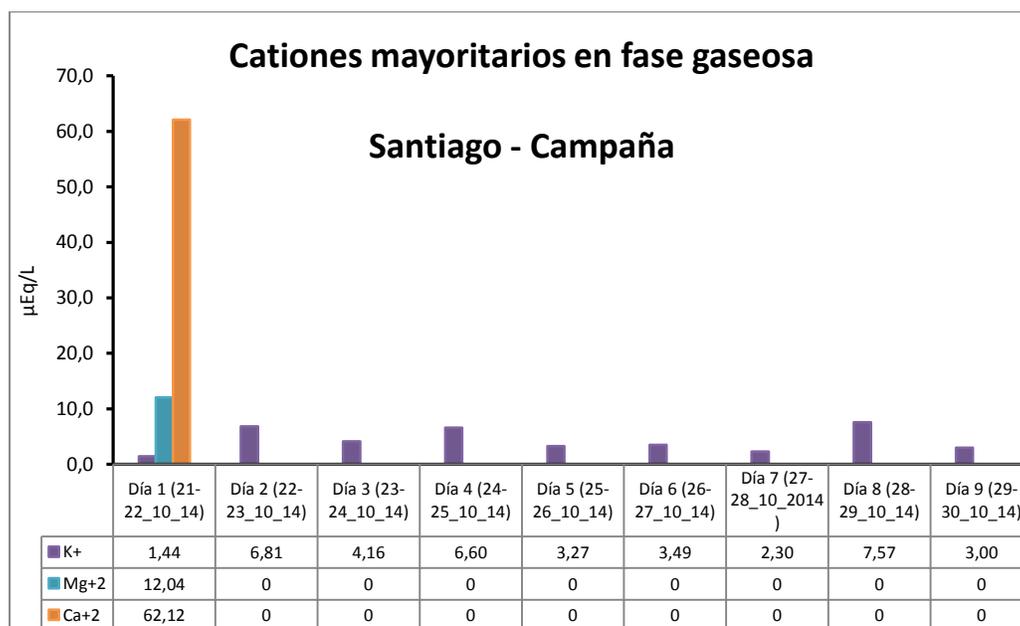


Figura 121. Concentración diaria de los cationes mayoritarios en muestras en fase gaseosa en Santiago en campaña 2.

Al igual que en la primera campaña se observa una mayor concentración de iones en fase gaseosa respecto de aquella encontrada en el PM atmosférico. Este efecto se da tanto en los aniones como en los cationes de la fase gaseosa del aerosol atmosférico, lo que da cuenta que la vía de incorporación de estos iones a otros compartimentos ambientales estaría prioritariamente desplazado nuevamente hacia una deposición en fase gas. Obviamente dependiendo de los equilibrios termodinámicos gobernados por las características de los compuestos químicos estudiados y las variables meteorológicas, estos podrán pasar a la fase sólida o húmeda del aerosol atmosférico y en consecuencia depositarse sobre las superficies de la tierra en la forma correspondiente.

A modo de comparación, en la figura 122 se presentan los valores promedios para las concentraciones de los aniones mayoritarios en MP atmosférico obtenidos durante la campaña 1 (septiembre 2014) y campaña 2 (octubre 2014). Se puede observar que para  $Cl^-$ ,  $NO_3^-$  y  $SO_4^{2-}$  estos presentaron una mayor abundancia promedio en la segunda campaña.

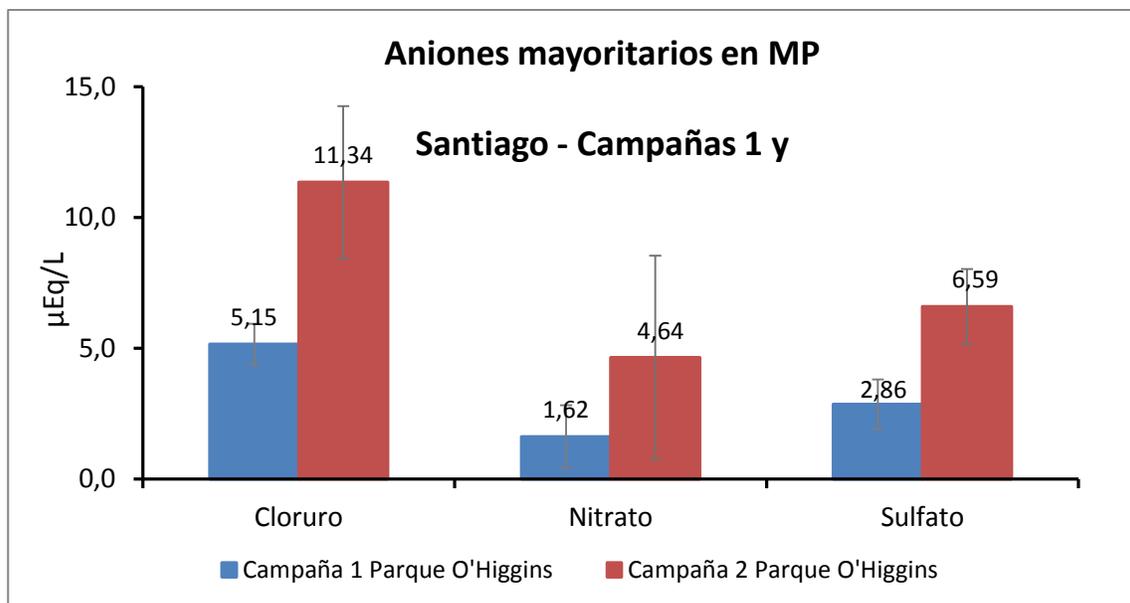


Figura 122. Valores promedios para los aniones mayoritarios en MP. Campaña 1 (septiembre 2014) y campaña 2 (octubre 2014).

La figura 123, presenta los valores promedios para los cationes mayoritarios en MP obtenidos durante la campaña 1 (septiembre 2014) y campaña 2 (octubre 2014). Se puede observar que  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{Ca}^{2+}$  presentaron una mayor abundancia promedio en la campaña 2. En el caso particular de  $\text{Na}^+$  en la primera campaña no fue detectado o su concentración estuvo debajo del límite de cuantificación, la misma situación para  $\text{K}^+$ .

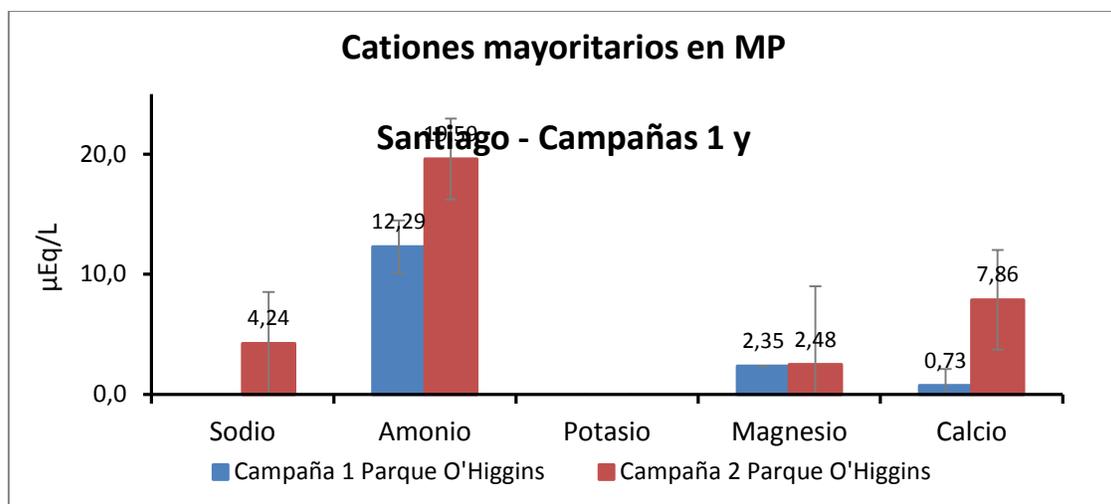


Figura 123. Valores promedios para los cationes mayoritarios en MP. Campaña 1 (septiembre 2014) y campaña 2 (octubre 2014).

En la figura 124 se presentan los valores promedios para las concentraciones de los aniones mayoritarios en fase gaseosa obtenidos en fase gaseosa durante la campaña 1 (septiembre 2014) y campaña 2 (octubre 2014). Se puede observar, a diferencia de lo encontrado en MP, que para  $\text{Cl}^-$  y  $\text{NO}_3^-$  presentaron una mayor abundancia promedio en la campaña 1.  $\text{SO}_4^{2-}$  presentó, al igual que en MP, una mayor cantidad en la segunda campaña.

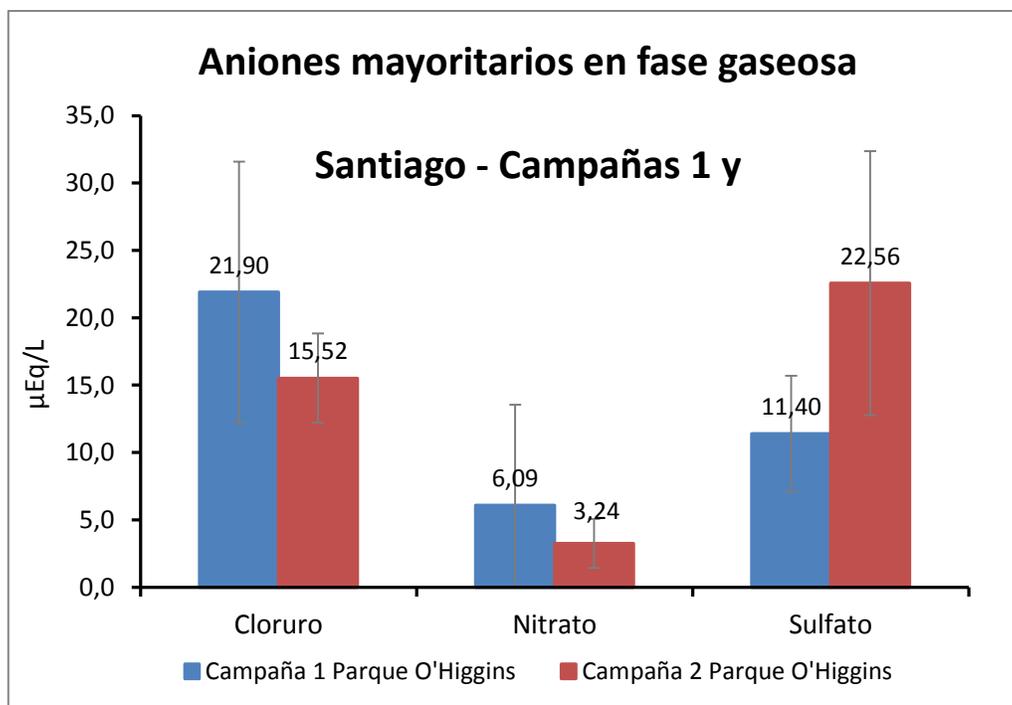


Figura 124. Valores promedios para las concentraciones de los aniones mayoritarios en fase gaseosa obtenidos durante la campaña 1 (septiembre 2014) y campaña 2 (octubre 2014).

La figura 125 presenta los valores promedios para los cationes mayoritarios obtenidos en fase gaseosa durante la campaña 1 (septiembre 2014) y campaña 2 (octubre 2014). En el caso particular de  $\text{Na}^+$  y  $\text{NH}_4^+$  no se presentan resultados, ya que el método de muestreo de gases (denuders), no permite su determinación. En el caso de  $\text{K}^+$ , este presentó una mayor abundancia promedio en la campaña 1 con respecto a la campaña 2, esto puede estar asociado a que la realización de la campaña 1 fue más cerca del invierno donde hay una mayor quema de biomasa (leña) y el  $\text{K}^+$  se encuentra ligado a este proceso.  $\text{Mg}^{2+}$ , se detectó y cuantificó en la campaña 2, y  $\text{Ca}^{2+}$  su abundancia fue similar en ambas campañas.

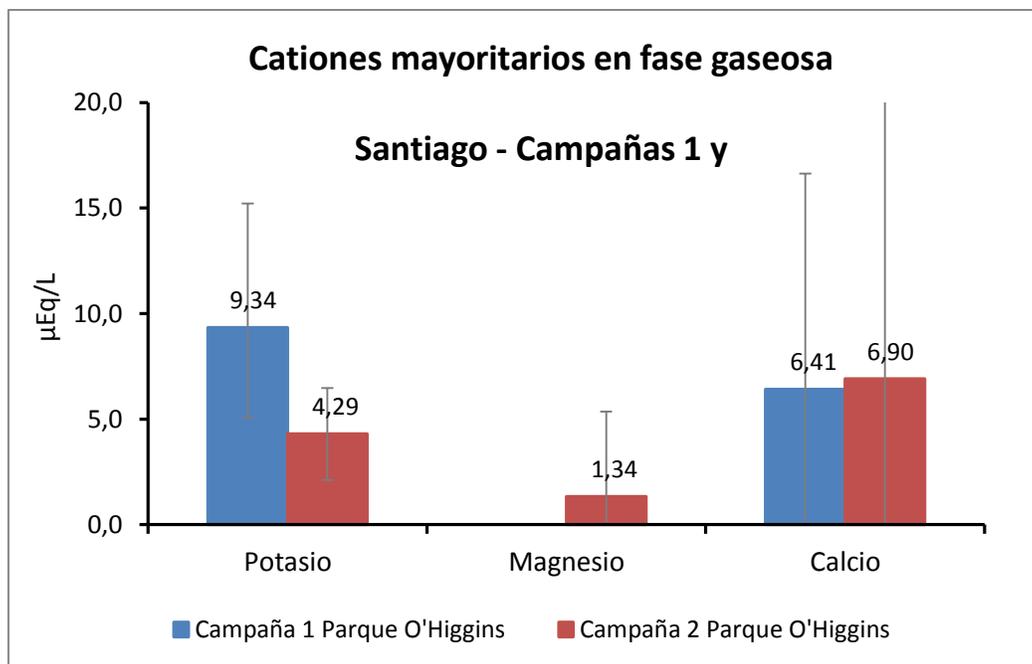


Figura 125. Valores promedios para los cationes mayoritarios obtenidos en fase gaseosa durante la campaña 1 (septiembre 2014) y campaña 2 (octubre 2014).

### 5.5.3 Análisis de componentes principales y jerárquicos (dendrograma).

El Análisis de Componentes Principales (PCA) es un método receptor cuyo objetivo es identificar grupos de fuentes, reduciendo un gran número de variables a un conjunto más pequeño de factores que mantienen la mayoría de la información (variabilidad) de la base de datos originales (P.K. Hopke, 1991). Esta herramienta de reconocimiento de patrones multivariados, se aplicó a las concentraciones de iones mayoritarios de todas las muestras superficiales de nieve colectadas durante la campaña de los glaciares Bello y Olivares Alfa.

#### 5.5.3.1. Análisis de componentes principales y jerárquicos (dendrograma), para el glaciar Olivares Alfa.

El análisis de PCA (Figura 126 y 127) arrojó como resultado que los 4 primeros factores explican un 94,7% de la variabilidad observada en los resultados obtenidos.

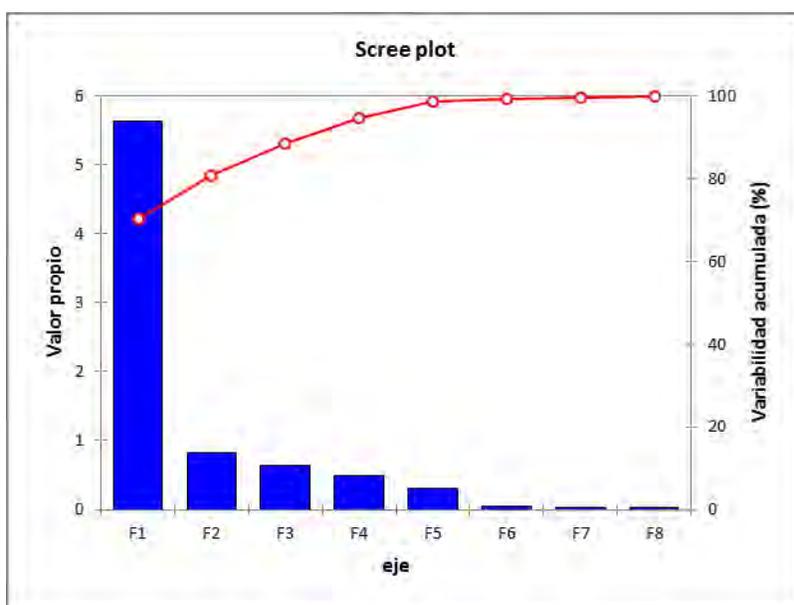


Figura 126. Análisis de componentes principales (variabilidad) para iones en muestras de nieve superficial del glaciar Olivares Alfa.

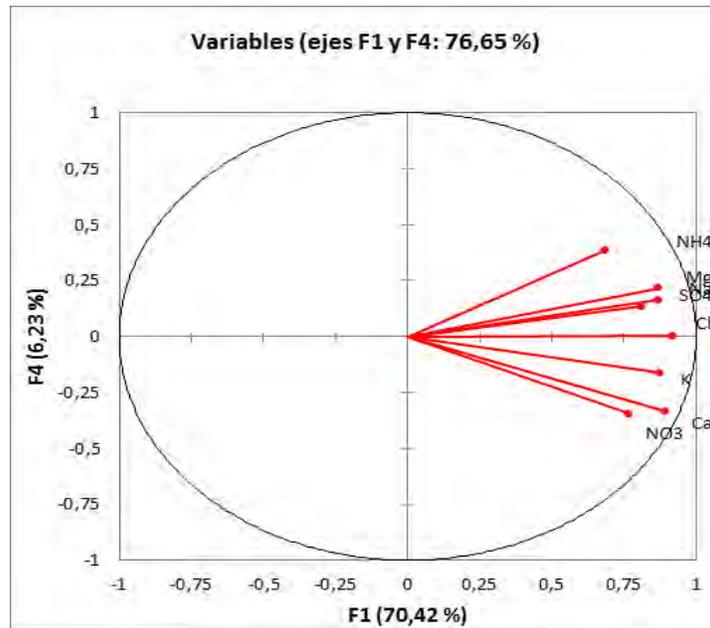


Figura 127 Gráfico de componentes principales para iones en muestras de nieve superficial recolectada en el glaciar Olivares Alfa.

La figura 128 muestra el dendrograma obtenido para las muestras superficiales de nieve recolectadas en el glaciar Olivares Alfa. En ella se pueden observar 4 agrupaciones principales; un primer grupo constituido por  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ , los cuales pueden ser atribuidos a aerosoles marinos, un segundo grupo constituido por  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , un tercer grupo conformado solo por  $\text{NH}_4^+$  y finalmente el cuarto grupo formado por  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{Ca}^{2+}$ .

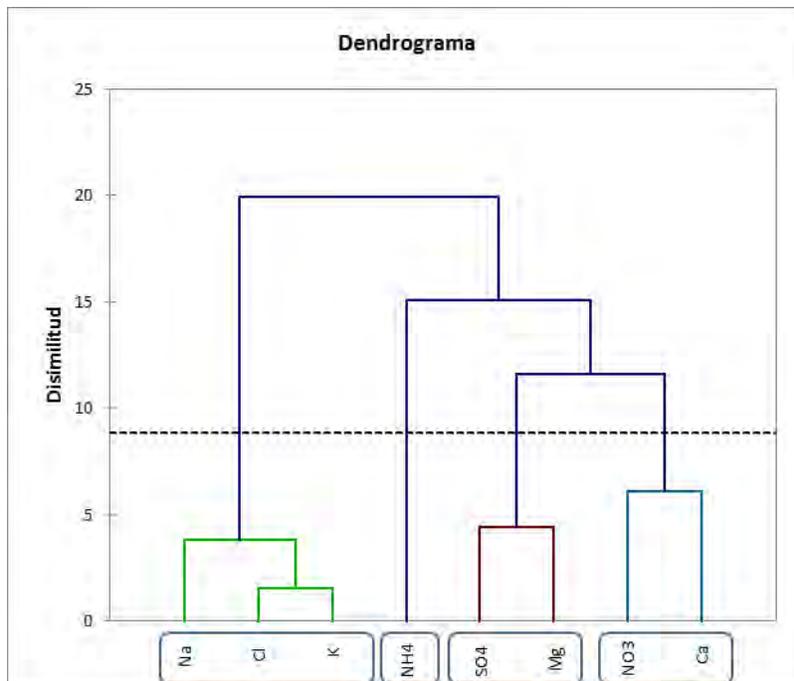


Figura 128. Análisis de clasificación jerárquica para iones (clúster) en muestras de nieve superficial recolectada en el glaciar Olivares Alfa.

En concordancia con el dendrograma mostrado anteriormente, la tabla 25 muestra la carga factorial después de haber realizado la rotación espacial Varimax, con la finalidad de asignarle importancia a cada uno de los iones de cada factor. A partir de esta información, se puede decir que el 1er factor D1 es interpretado como una fuente de iones cuyo aporte provendría de un origen regional más un aporte local. Fuentes potenciales para estos iones podrían incluir aerosoles minerales (suelo ricamente mineralizado) que se incorporan a la atmósfera por fuertes vientos, así como aportes de un transporte a mayor distancia cuyo origen podría ser crustal o marino. Antecedentes de la literatura indican que desprendimiento de material rocoso, así como material sólido de las morrenas y del sedimento glaciar podrían ser una fuente factible para este tipo de iones (Luo, 1983; Williams et al. 1992; Hou y Qin, 2002).

En el factor D1, compuesto por  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ , pueden ser atribuidos a aerosoles marinos. El factor D2, compuesto por  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  y el D4, compuesto por  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{Ca}^{2+}$ , solo pueden ser interpretados como iones provenientes de fuentes antropogénicas el  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$ , donde se incluyen las emisiones producto de la combustión de combustibles fósiles y quema de biomasa; por el contrario los iones  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Ca}^{2+}$ , normalmente pueden atribuirse a un origen crustal natural, provenientes muy probablemente de polvo natural resuspendido por el viento. Finalmente, el factor D3, compuesto solo por  $\text{NH}_4^+$ , se puede atribuir un

origen asociado a emisiones de plántulas de producción ganadera y fertilizantes naturales como artificiales. Este tipo de iones estaría dando cuenta del transporte y posterior deposición sobre la nieve de contaminantes que podrían provenir de la Región Metropolitana, por ser el sector urbano industrial más cercano a los glaciares estudiados, debido a la circulación regional atmosférica de masa de vientos que podrían llegar por los cajones cordilleranos hasta los glaciares. Esto podría producirse ya sea en condiciones anticiclónicas con una capa de mezcla elevada en altura cuando las temperaturas diurnas y la buena ventilación alcanzan altos valores (situación que se da en primavera y/o verano), o en condiciones ciclónicas de mal tiempo (invierno), cuando la turbulencia atmosférica y la velocidad del viento es tal, que permite arrastrar contaminantes hasta las altas cumbres de montaña. Por otra parte,  $Mg^{2+}$  y  $Ca^{2+}$ , que son complemento de los factores D2 y D4, respectivamente, son componentes principalmente crustales, provenientes muy probablemente de polvo natural resuspendido por el viento.

Tabla 25. Descripción la carga factorial del análisis PCA, después de realizar la rotación espacial Varimax, para la muestras de nieve superficial glaciar Olivares Alfa (los valores en negrita mayores a 0,5 es para destacar la mayor correlación).

	D1	D2	D3	D4
Cl	<b>0,858</b>	0,293	0,280	0,257
NO3	0,202	0,318	0,295	<b>0,838</b>
SO4	0,295	<b>0,847</b>	0,124	0,320
Na	<b>0,829</b>	0,488	0,160	0,053
NH4	0,264	0,197	<b>0,909</b>	0,232
K	<b>0,898</b>	0,146	0,194	0,335
Mg	0,358	<b>0,781</b>	0,307	0,303
Ca	0,554	0,342	0,154	<b>0,683</b>

Adicionalmente, se entrega la matriz de correlación de Pearson (tabla 26), la cual nuevamente muestra la correlación existente entre los diferentes iones presentes en la nieve. En ella se puede ver claramente la alta correlación que existe entre el ión  $Cl^-$  y el sodio, el potasio y el calcio principalmente, típicamente asociado a la formación de sales de  $NaCl$ ,  $KCl$ ,  $CaCl_2$ , respectivamente, proveniente de los aerosoles marinos. En el caso de amonio, la mayor correlación de este ión se daría justamente con el cloruro, donde estaría formando la sal de cloruro de

amonio ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ), asociado a emisiones de plántulas de producción ganadera y fertilizantes naturales como artificiales. Para el caso del nitrato, este obtiene una buena correlación con magnesio y calcio, formando las especies más típicamente asociadas a la incorporación de nitrógeno en el ciclo biogeoquímico de este elemento, como son el  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ , asociado a fertilizantes y el  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ , este último también asociado a la industria siderúrgica y de la construcción, para la fabricación de cementos especiales refractarios; aunque también está presente en forma natural en las rocas sedimentarias de tipo evaporita, o a partir de una desecación de lagos salados ricos en magnesio. Adicionalmente, el ión  $\text{NO}_3^-$  y el ión  $\text{SO}_4^{2-}$  fuertemente correlacionados con los iones  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Ca}^{2+}$ , refuerzan las conclusiones del párrafo anterior, respecto de su origen principalmente antrópico. Finalmente, el sodio posee una importante correlación con potasio y magnesio, y en menor medida con calcio, dan cuenta de su origen común proveniente de los aerosoles marinos y/o crustales de origen natural.

Tabla 26. Matriz de correlación de Pearson para las muestras de nieve superficial en el glaciar Olivares Alfa. (Los valores en negrita mayores a 0,5 son para destacar la correlación).

Variables	Cl	NO3	SO4	Na	NH4	K	Mg	Ca
Cl	<b>1</b>							
NO3	0,551	<b>1</b>						
SO4	0,636	0,573	<b>1</b>					
Na	<b>0,888</b>	0,458	0,651	<b>1</b>				
NH4	0,601	0,554	0,458	0,461	<b>1</b>			
K	<b>0,941</b>	0,575	0,513	<b>0,862</b>	0,516	<b>1</b>		
Mg	0,686	<b>0,718</b>	<b>0,830</b>	<b>0,770</b>	0,571	0,611	<b>1</b>	
Ca	<b>0,804</b>	<b>0,766</b>	<b>0,751</b>	0,652	0,540	<b>0,788</b>	<b>0,660</b>	<b>1</b>

### 5.5.3.2. Análisis de componentes principales (PCA) y jerárquicos (dendrograma) para el glaciar Bello

El análisis de PCA (Figuras 129 y 130) muestra que los 2 primeros factores explican un 77,6% de la variabilidad observada en los resultados obtenidos.

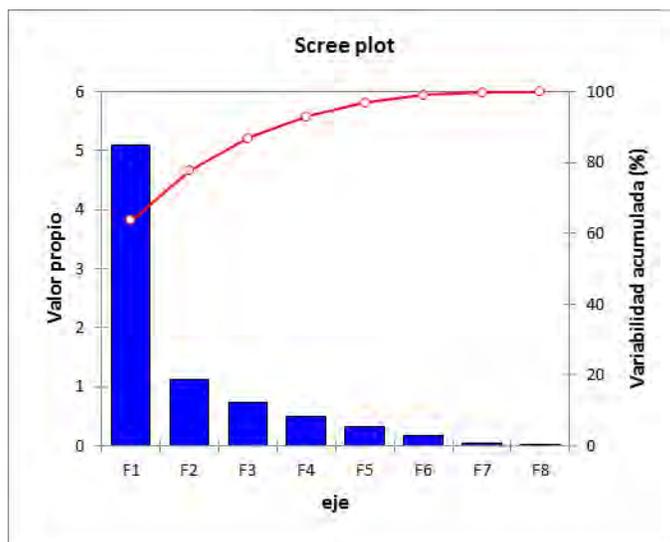


Figura 129. Análisis de componentes principales (variabilidad) para iones en muestras de nieve superficial del glaciar Bello.

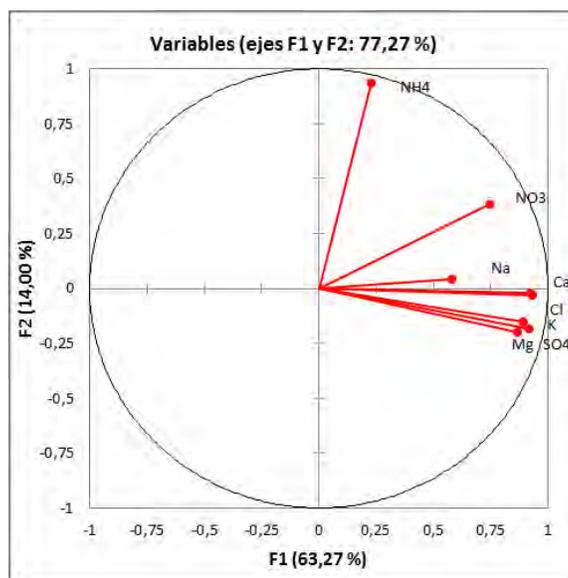


Figura 130. Gráfico de componentes principales para iones en muestras de nieve superficial recolectada en el glaciar Olivares Alfa.

El análisis de componentes principales (PCA) (tabla 27), así como la figura 131, muestran el dendrograma obtenido del análisis de clúster para iones en muestras de nieve superficial del glaciar Bello, en ella se puede observar la formación de 2 grupos, el primero constituido por  $\text{NH}_4^+$ , un segundo constituido por el resto de los aniones y cationes:  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{NO}_3^-$ . De ellos, los iones  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  pueden ser atribuidos a fuentes naturales, donde los 3 primeros son mayoritariamente representativos de fuentes cuyo origen serían los aerosoles marinos y los dos últimos tienen un origen principalmente crustal, provenientes muy probablemente de polvo natural resuspendido por el viento. Por otra parte los iones  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{NO}_3^-$  suelen ser atribuidos a fuentes antropogénicas, donde se incluyen las emisiones producto de la combustión de combustibles fósiles y quema de biomasa, emisiones de planteles de producción ganadera y fertilizantes naturales como artificiales.

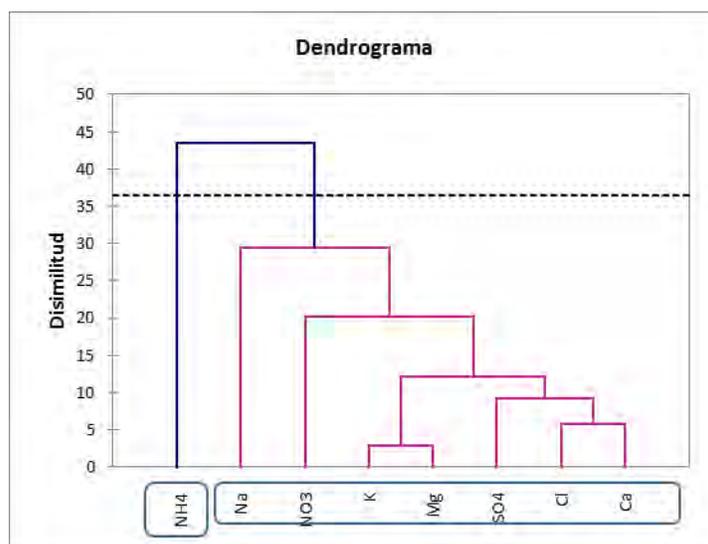


Figura 131. Análisis de clasificación jerárquica para iones (clúster) en muestras de nieve superficial del glaciar Bello.

Tabla 27. Descripción de la carga factorial del análisis PCA, después de realizar la rotación espacial Varimax, para la muestras de nieve superficial glaciar Bello (Los valores en negrita mayores a 0,5 es para destacar la correlación).

	D1	D2
Cl	<b>0,917</b>	0,180
NO3	<b>0,645</b>	0,539
SO4	<b>0,891</b>	-0,001
Na	<b>0,555</b>	0,168
NH4	0,014	<b>0,963</b>
K	<b>0,935</b>	0,027
Mg	<b>0,902</b>	0,052
Ca	<b>0,906</b>	0,183

Adicionalmente, se entrega la matriz de correlación de Pearson (tabla 28), la cual nuevamente muestra la correlación existente entre los diferentes iones presentes en la nieve en este glaciar. En ella se puede ver claramente la alta correlación que existe entre el ión Cl<sup>-</sup> y el potasio, el magnesio, el calcio y el sulfato principalmente, donde el cloro actúa como contra ion con los cationes, formando típicamente las sales de KCl, MgCl<sub>2</sub> y CaCl<sub>2</sub>, respectivamente; para el caso del SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, este correspondería a un origen asociado a los aerosoles marinos, que es el origen común más plausible también para las sales de cloro antes mencionadas. En el caso del ion NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, quien presenta una fuerte correlación con el ión Ca<sup>2+</sup> y en menor medida con el SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, estarían indicando para el primer ión la formación de especies típicamente asociadas a la incorporación de nitrógeno en el ciclo biogeoquímico de este elemento, como son el Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, asociado a fertilizantes; para el caso de su asociación con SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, este se podría vincular mayormente con actividad antrópica, toda vez que estos iones tienen una buena correlación entre sí. Con estos antecedentes, se puede deducir que para el caso del SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, este podría entonces presentar un origen natural (aerosoles marinos) y uno antrópico difícil de especificar por el momento. Finalmente, el ión NH<sub>4</sub><sup>+</sup> no presenta correlación con ningún otro ión analizado, por lo que su origen sería posiblemente de tipo antrópico, donde principalmente se podrían identificar emisiones de actividades agrícolas, planteles de producción ganadera y fertilizantes naturales como artificiales.

Tabla 28. Matriz de correlación de Pearson para la muestras de nieve superficial glaciar Bello (Los valores en negrita mayores a 0,7 es para destacar la correlación).

Variables	Cl	NO3	SO4	Na	NH4	K	Mg	Ca
Cl	<b>1</b>							
NO3	0,591	<b>1</b>						
SO4	<b>0,770</b>	<b>0,604</b>	<b>1</b>					
Na	0,499	0,308	0,331	<b>1</b>				
NH4	0,219	0,402	0,026	0,150	<b>1</b>			
K	<b>0,839</b>	0,581	<b>0,779</b>	0,497	0,080	<b>1</b>		
Mg	<b>0,843</b>	0,551	<b>0,713</b>	0,464	0,115	<b>0,944</b>	<b>1</b>	
Ca	<b>0,890</b>	<b>0,724</b>	<b>0,875</b>	0,500	0,150	<b>0,741</b>	0,693	<b>1</b>

La información de la concentración de iones obtenida para el glaciar Bello estaría en concordancia con los resultados encontrados para el glaciar Olivares Alfa, en donde se aprecian fuentes muy similares para los iones encontrados destacándose las fuentes naturales cuyo origen serían los aerosoles marinos y crustal, esta última provenientes muy probablemente de polvo natural resuspendido por el viento, para los iones  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ . Por el contrario las asociaciones encontradas para los iones  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{NO}_3^-$  entrega una información en cuyo caso las fuentes más probables serían de origen antrópico, destacándose las emisiones producto de la combustión de combustibles fósiles y quema de biomasa, emisiones de planteles de producción ganadera y fertilizantes naturales como artificiales. Finalmente, para el caso del  $\text{SO}_4^{2-}$ , este podría presentar un origen natural (aerosoles marinos) y uno antrópico difícil de especificar con los resultados analizados por el momento, aspecto que se retomará con nuevos antecedentes más adelante en este informe.

#### 5.5.4 Factores de neutralización y enriquecimiento glaciar Bello y Olivares Alfa.

Se realizó el cálculo de los Factores de Neutralización (FN) para saber cuáles de los cationes serían los principales responsables de la neutralización en la zona de estudio. Mientras más alto el valor del factor para un catión determinado, implica un mayor efecto neutralizante.

El FN fue obtenido mediante la siguiente la siguiente relación utilizando la concentración promedio de cada ion en el glaciar Bello.

$$FN = \frac{uEq(iones)(neutralizador)}{\sum uEq(iones)(precursores)} \quad (\text{Zhu et al, 2012})$$

Donde los iones precursores corresponden a  $SO_4^{2-}$  y  $NO_3^-$ .

En la tabla 29, se presentan los resultados de factores de neutralización (FN) en el glaciar Bello y Olivares Alfa. Destaca el ion  $Ca^{2+}$  como principal agente neutralizante, seguido para ambos glaciares en menor medida por el ion  $NH_4^+$  esto podrían sugerir la presencia de iones alcalinos tales como carbonatos. (W. Davison, 1988).

Tabla 29. Factores de Neutralización en el glaciar Bello y Olivares Alfa.

	Sodio	Amonio	Potasio	Magnesio	Calcio
Glaciar Bello	0,06	0,18	0,07	0,07	2,06
Glaciar Olivares Alfa	0,16	0,41	0,06	0,12	0,70

Para ambos glaciares el ion que contribuye de mayor forma al proceso de neutralización, corresponde a  $Ca^{2+}$ , siendo más importante su contribución en el glaciar Bello.

También se investigó la concentración de las diferentes especies **químicas presentes en el "snow pack" o nieve acumulada, en forma anual** para este estudio. El objetivo de esto es poder comprender la cantidad de iones totales acumulados por deposición (húmeda/seca) durante un período nival.

Tomando en cuenta la información antes mencionada, adicionalmente se **calculó el balance iónico “ΔC” de cada pozo de nieve** estudiado (snow pit), esto consiste en la diferencia entre la concentración de todos los cationes y aniones mayoritarios determinados (n=27 muestras) en una calicata de nieve, estandarizando los resultados hasta 2 m de profundidad, dado la diferencia de profundidad de las calicatas, donde algunas de ellas fueron más profundas que otras.

Luego se calculó la correlación existente entre los valores de ΔC y de la concentración de calcio (Ca<sup>2+</sup>) (tabla 30), si esta correlación es buena se **puede inferir que el ΔC representa principalmente la presencia de carbonato/bicarbonato** en la nieve, dando cuenta de que esta sería la especie química predominante en términos del equilibrio químico que determina el pH de la nieve, lo que se condice directamente con el hecho de haber encontrado para ambos glaciares que el FN mayor es para en ion Ca<sup>2+</sup> quien es el contra ion positivo de las especies de carbonato/bicarbonato en la nieve (Wake et al. 1992).

Tabla 30. Valores correlación R<sup>2</sup> entre Ca<sup>2+</sup> y ΔC obtenidos sitios de monitoreo.

Sitios de monitoreo	
Glaciar Bello	0,76
Glaciar Olivares Alfa	0,64

El valor de correlación fue calculado considerando la totalidad de los datos obtenidos en las calicatas practicadas en cada uno de los glaciares estudiados.

Por otra parte, una forma de cuantificar los aportes de iones de un origen distinto del marino es calculando el Factor de Enriquecimiento (FE), según la siguiente ecuación:

$$FE = \frac{(Ion\ de\ interés / Sodio\ en\ la\ muestra)}{(Ion\ de\ interés\ en\ el\ mar / sodio\ en\ el\ mar)} \quad (\text{Grigholm et al 2009})$$

Donde se puede definir según Sutherland (Sutherland 2000), que el factor, ion de interés en el mar/sodio en el mar, son conocidos mediante

bibliografía (B. Mason, 1960). Esto da origen a los siguientes criterios de interpretación de los FE calculados:

- 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

Valores cercanos a la unidad indican que no existe un enriquecimiento (por el entorno) del ion de interés, siendo este proveniente principalmente del aerosol marino. Los factores de enriquecimiento calculados para los datos provenientes de la concentración promedio de los iones mayoritarios en el glaciar Bello y Olivares Alfa se muestran en la tabla 31, respectivamente. Se puede observar que los iones se encuentran desde moderadamente enriquecido a extremadamente enriquecido, lo que indicaría que el glaciar Bello y Olivares Alfa hay una fuente distinta a los aerosoles marinos. En ambos glaciares se puede apreciar que el ion más enriquecido corresponde a  $\text{Ca}^{2+}$ . El caso del glaciar Bello le sigue en el  $\text{K}^+$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  en orden decreciente de enriquecimiento. En el glaciar Olivares Alfa se observa,  $\text{SO}_4^{2-}$  en segundo lugar de importancia seguido por K. En todo caso en ambos glaciares los iones  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Ca}^{2+}$  son los que se encuentran más enriquecidos.

Tabla 31. Factores enriquecimiento para los iones mayoritarios.

	Cloruro	Sulfato	Potasio	Magnesio	Calcio
Glaciar Bello	8,93	44,71	55,04	5,40	805,08
Glaciar Olivares Alfa	2,28	25,86	18,28	3,18	97,16

### 5.5.5 Sulfato no marino glaciar Bello y Olivares Alfa.

El ion sulfato también se encuentra presente en aerosoles marinos (Mihajlidi-Zelić, 2006), por lo que es de vital importancia estimar cuanto del sulfato encontrado es de origen marino y cuanto del mismo es de origen distinto al marino (sulfato no marino, SNM). La relación matemática que se muestra a continuación (Gabrieli et al. 2011) se aplicó para las muestras de nieve superficial obtenidas en la campaña del glaciar Bello.

$$[\text{SO}_4^{2-}]_{\text{No Marino}} = [\text{SO}_4^{2-}]_{\text{Muestra}} - [\text{Cl}^-]_{\text{Muestra}} * \left[ \frac{[\text{SO}_4^{2-}]_{\text{Mar}}}{[\text{Cl}^-]_{\text{Mar}}} \right]$$

En donde la concentración de sulfato y cloruro en el mar se asumen constantes con valores de 1,6 Eq/L y 15,5 Eq/L respectivamente (B. Mason, 1960)

En la tabla 32 se exponen los resultados obtenidos de sulfato no marino para muestras de nieve superficial del glaciar Bello y Olivares Alfa, en donde se puede ver que el aporte distinto del marino en los glaciares en estudio es realmente importante con un valor por sobre el 80%.

Tabla 32. Concentración y porcentajes de sulfato no marino y marino.

Glaciar	Sulfato No Marino (µEq/L)	% Sulfato No Marino	Sulfato Marino (µEq/L)	% Sulfato Marino	SO42-nm/SO42-m
<b>Bello*</b>	5,50	80,0	1,38	20,0	3,9
<b>Olivares Alfa*</b>	7,93	91,1	0,77	8,9	10,3
<b>Mercedario**</b>	4,55	88,5	0,59	11,5	7,7
<b>Esmeralda* *</b>	16,89	97,7	0,39	2,3	43,3
<b>Tapado**</b>	8,15	95,3	0,4	4,7	20,4
<b>Marinelli** *</b>	1,01	49,8	1,02	50,2	0,99
<b>Glacier Alto dell'Ortles (Alpes)***</b>	-	-	-	-	15,7

\*Este estudio. \*\* Grigholm et al. 2009. \*\*\* Gabrieli et al. 2009

Este sulfato no marino calculado en ambos glaciares estudiados podría tener un origen natural proveniente por ejemplo de emisiones volcánicas o de origen antrópico (Grigholm et al. 2009). En el primer tipo de fuentes, se puede mencionar que en el sector estudiado existen volcanes, donde al menos hasta donde nuestra información alcanza, el volcán San José y Tupungatito estaría activo emitiendo una débil pero permanente fumarola (Sernageomin 2014), que podría ser parte de este aporte natural de SNM a los glaciares estudiados; por otra parte en el sector del Yeso en el Cajón del Maipo, existe una mina de extracción activa del mineral de yeso que da origen al nombre del lugar, cuya composición química es fundamentalmente  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Este lugar está a 30 Km en línea recta del Glaciar Bello, siendo muy probablemente un importante contribuyente de sulfato y calcio en este glaciar. Ambas fuentes estarían incorporando los compuestos químicos antes nombrados mediante procesos de deposición atmosférica sobre la nieve. Explicando no solo la gran presencia de SNM, sino que también la presencia importante de calcio en la nieve.

Respecto de la comparación con otras zonas de montaña, se puede mencionar que los valores obtenidos para el porcentaje de SNM presente en ambos glaciares estudiados no son muy diferentes de otros resultados obtenidos en glaciares de la cordillera de Los Andes. Por otra parte el cociente entre el SNM/SM, se interpreta asumiendo que cuanto mayor sea su valor, mayor será la importancia del SNM en la muestra, en este sentido, cuando se observa que el resultado de este cociente para el GOA posee un cociente 2,6 veces mayor que el obtenido en el GB, estaría indicando la fuerte presencia de sulfato proveniente de un origen distinto del natural en este glaciar. En la tabla se observa que el mayor valor (43,3) es obtenido para el glaciar Esmeralda, ubicado en el Cerro el Plomo muy cercano a la ciudad de Santiago y altamente influenciado muy probablemente por sus fuentes antropogénicas, donde se incluyen las emisiones producto de la combustión de combustibles fósiles en fuentes móviles y fijas, las fundiciones de metales y actividades metalúrgicas, la quema de carbón, entre otros. En el caso opuesto está el glaciar patagónico Marinelli, el cual está en una zona prístina, alejado de fuentes antrópicas con un valor de 0,99 que refleja justamente esta realidad, le sigue el GB con un valor de 3,9, indicando que este glaciar estudiado está menos influenciado por fuentes de tipo antropogénicas que el GOA y que otros glaciares de la cordillera de Los Andes y del mundo, sin embargo no está exento de la presencia de SNM de un origen que puede ser tanto de origen antropogénico como natural.

Finalmente, de la tabla 32 se puede observar que el glaciar Olivares Alfa presenta un 62% más de  $\text{SO}_4^{2-}$  no marino respecto al glaciar Bello,

dando cuenta que el glaciar Olivares Alfa presenta un mayor aporte de  $\text{SO}_4^{2-}$  proveniente de una fuente distinta a la marina, como ya se explicó anteriormente. A lo expuesto anteriormente se puede mencionar, como un posible contribuyente al  $\text{SO}_4^{2-}$  no marino, presente en el GOA, aquella proveniente de fuentes antropogénicas como es el  $\text{SO}_2$  producido por la combustión de combustibles fósiles (Gabrieli et al. 2009) generado en la propia actividad extractiva industrial de cordillera cercana a este glaciar (Bolius et al. 2006) o incluso la contribución de  $\text{SO}_2$  proveniente de fundiciones metalúrgicas instalada en las inmediaciones de la Región Metropolitana y cerca también de la ciudad de Santiago.

#### 5.5.6 Caracterización fisicoquímica de calicata.

##### 5.5.6.1 Caracterización fisicoquímica de calicata glaciar Bello.

En la figura 132, se puede observar que la concentración del ion  $\text{Cl}^-$  presentó una baja variabilidad a lo largo del perfil realizado en comparación con la concentración observada para  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$ . La variabilidad observada para el ion  $\text{SO}_4^{2-}$  se ha registrado también en glaciares del Tibet. Esta variabilidad se explica por distintos fenómenos como el proceso de infiltración, fusión y congelamiento, así como la percolación que afectan en mayor o menor medida a los distintos aniones según su naturaleza química (Li et al. 2007).

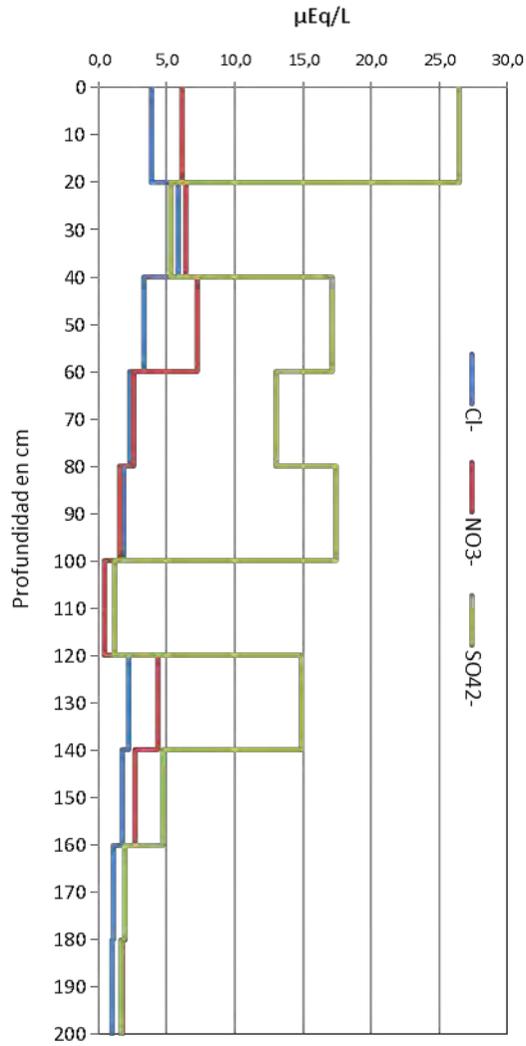


Figura 132. Perfil de concentración de aniones mayoritarios en calicata glaciar Bello.

En el caso del perfil de la concentración de cationes (Figura 133), los iones  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{Ca}^{2+}$  son los que presentan la mayor variabilidad a lo largo del pozo.

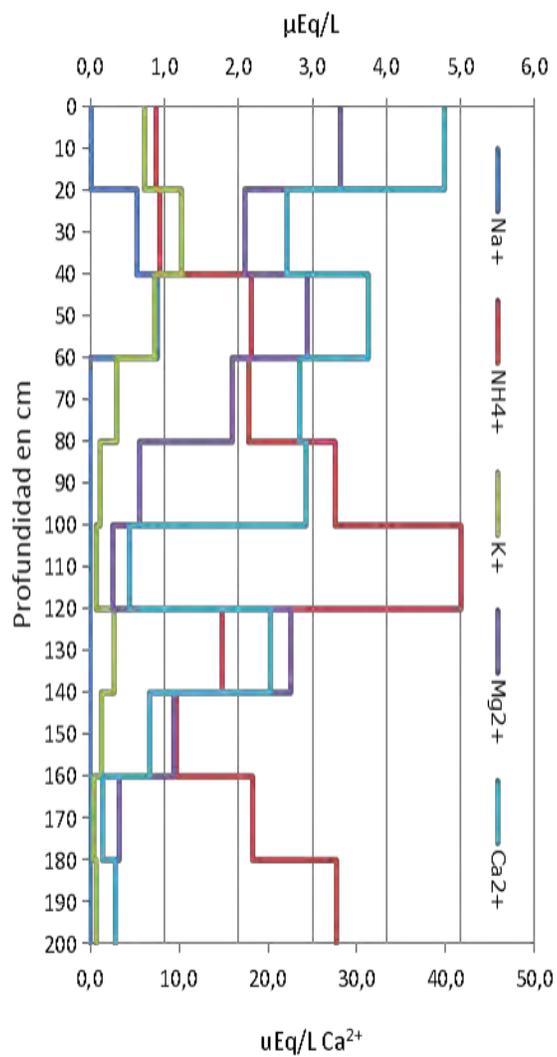


Figura 133. Perfil de concentración de cationes mayoritarios en calicata glaciar Bello.

En la figura 134 se muestra el perfil de pH y conductividad eléctrica a lo largo de la calicata, presentando una variabilidad que es natural como era de esperarse, de acuerdo a la variación de la concentración de los iones.

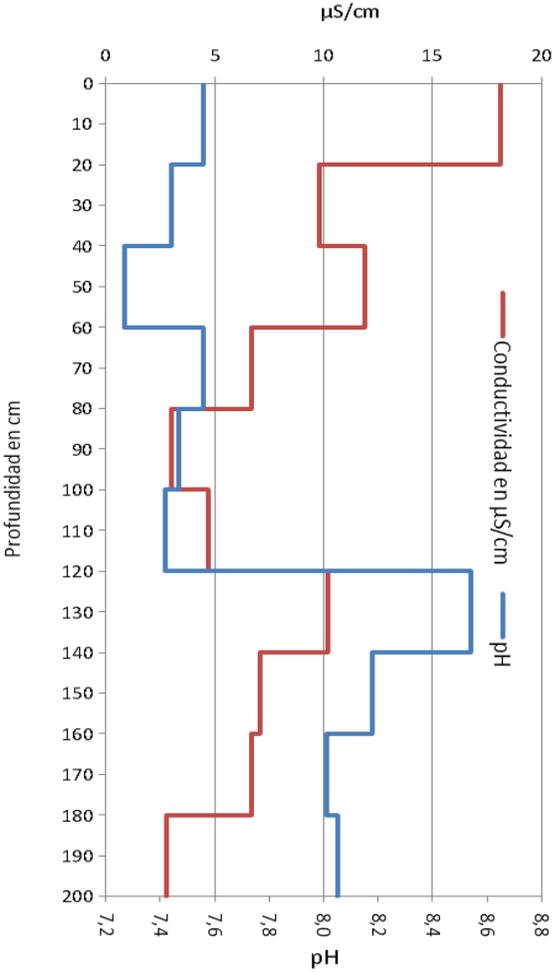


Figura 134 Perfil de pH y conductividad eléctrica en calicata glaciario Bello.

En la figura 135, se puede observar la correlación existente entre la concentración de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ , lo cual estaría de acuerdo con la especie postulada de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .

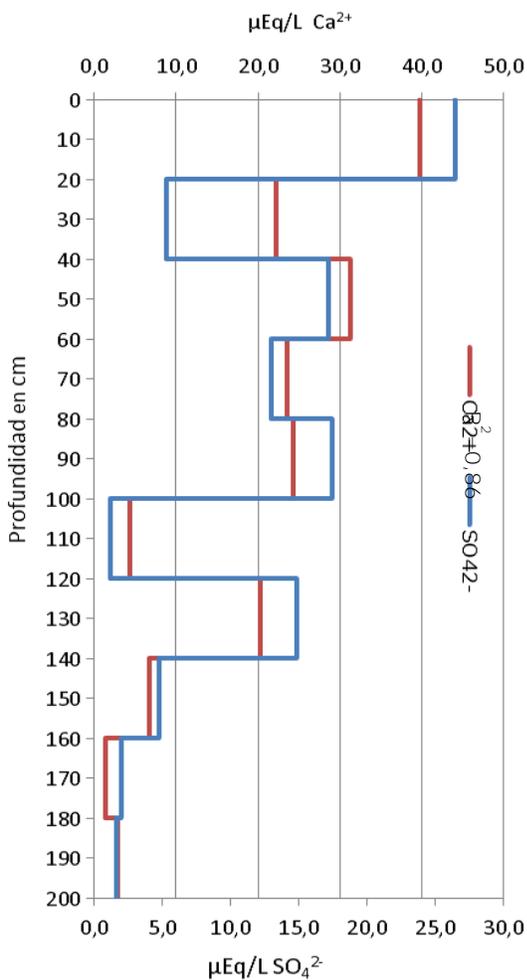


Figura 135. Correlación entre las concentraciones de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  en calicata glaciar Bello.

En la figura 136, se puede observar que mayoritariamente que la variación del pH a través de la calicata está de acuerdo con la variación de la concentración de  $\text{Ca}^{2+}$ , principal agente neutralizador encontrado en ambos glaciares.

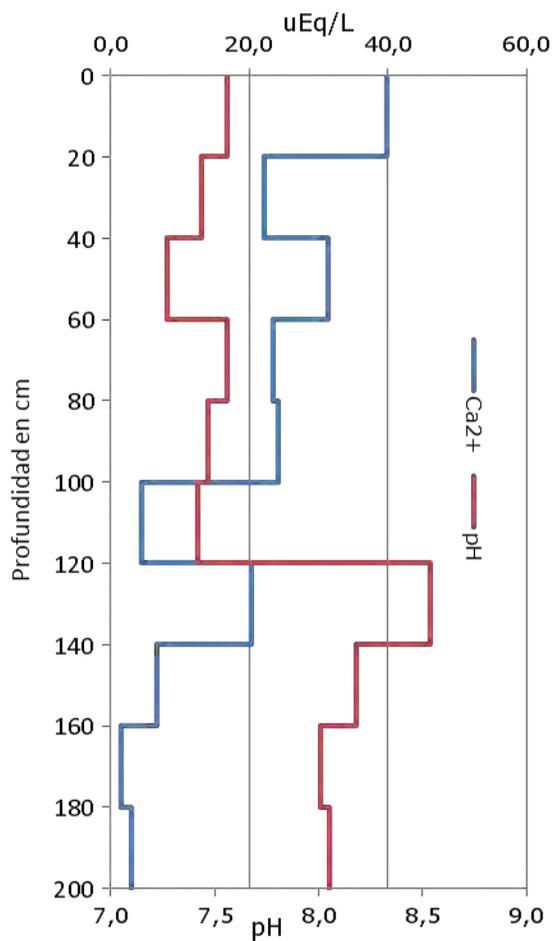


Figura 136. Tendencia entre la concentración de  $\text{Ca}^{2+}$  y el pH en calicata glaciar Bello

En la figura 137, se puede observar una baja correlación ( $R^2=0,1$ ) entre la concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$  y el pH, dando cuenta que este anión no está asociado con el pH de los distintos estratos de la calicata.

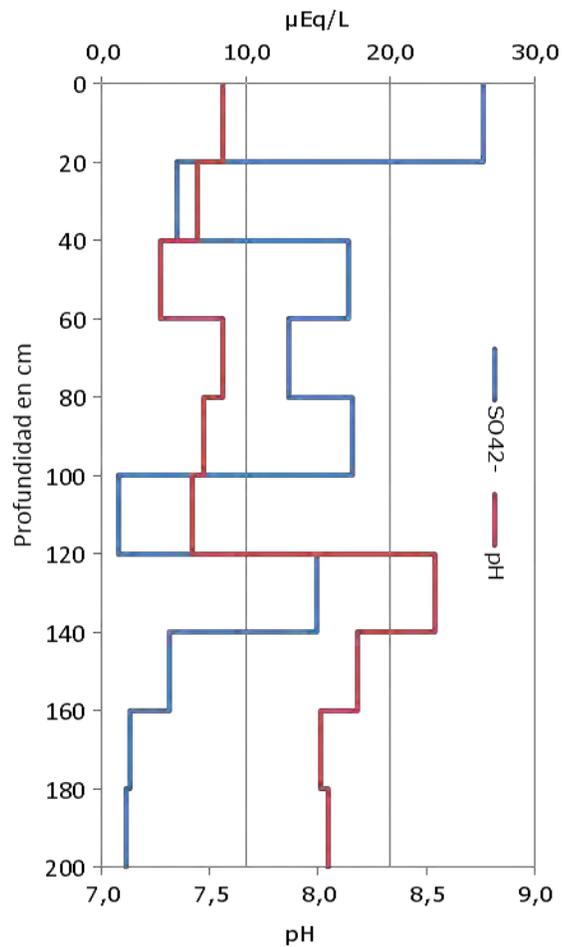


Figura 137. Correlación entre la concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$  y el pH ( $R^2=0,1$ ) en calicata glaciario Bello.

En la figura 138, se muestra la variación de la CE en función de la concentración total de iones, la cual presenta una correlación  $R^2$  mayor a 0,5 lo que indica, como debiera esperarse, la CE está directamente relacionada con la carga iónica de cada estrato de la calicata.

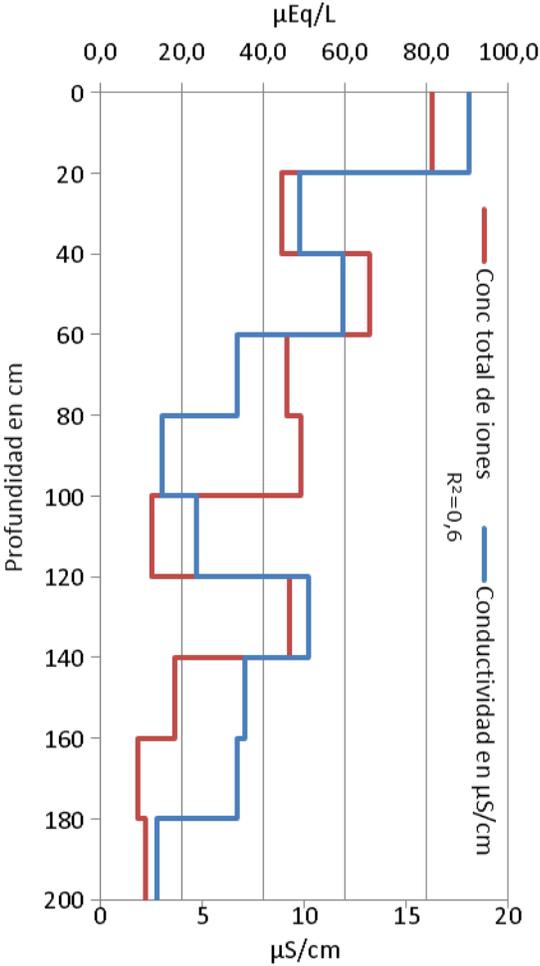


Figura 138. Correlación entre la concentración total de iones y la conductividad eléctrica en calicata glaciaria Bello.

En la figura 139, se muestra correlación entre la concentración total de aniones y la concentración total de cationes. De acuerdo al principio de electroneutralidad, debiera esperarse una concentración igual entre aniones y cationes, pero esto no se cumple totalmente ya que su correlación no es igual a 1, sin embargo muy cercana a este valor ( $R=0,94$ ) debido a que solo se determinan los iones mayoritarios dejando de lado aniones inorgánicos minoritarios como  $F^-$  y orgánicos de 1 y 2 átomos de carbono, como son el formiato y acetato.

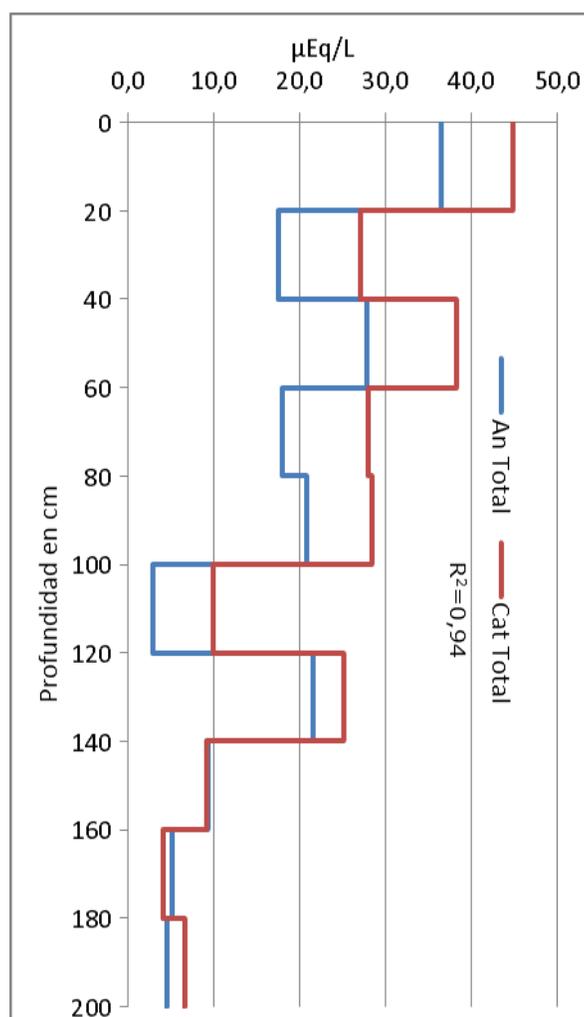


Figura 139. Correlación entre la concentración total de aniones y cationes en calicata glaciar Bello.

### 5.5.6.2. Caracterización fisicoquímica de calicata glaciar Olivares Alfa.

En la figura 140, se puede observar que los iones  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  presentan variación en su concentración a lo largo de la calicata realizada. La concentración del ión  $\text{Cl}^-$  presentó una baja variabilidad a lo largo del perfil en comparación con la variabilidad en la concentración observada para  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$ . Esta misma situación fue observada en la calicata del glaciar Bello y es lo esperable para estos iones.

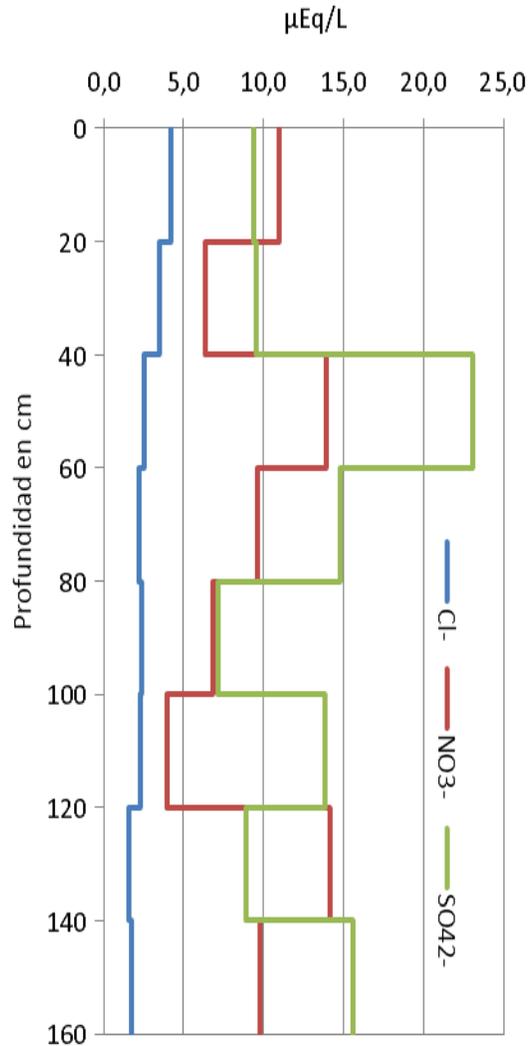


Figura 140. Perfil de concentración de aniones mayoritarios en calicata glaciar Olivares Alfa.

En la figura 141, se presenta el perfil de concentración de los cationes mayoritarios a lo largo de la calicata. En ella se puede observar que los iones  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{Ca}^{2+}$  presentan la mayor variabilidad en su concentración a lo largo de la calicata y es lo esperable para estos iones.

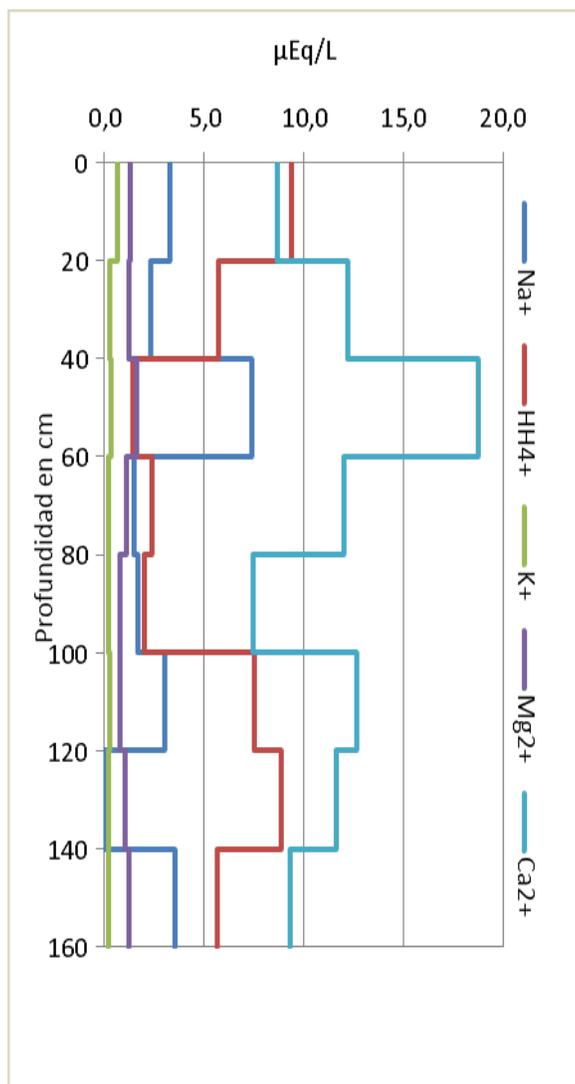


Figura 141. Perfil de concentración de cationes mayoritarios en calicata glaciar Olivares Alfa.

En la figura 142, se presenta el perfil del pH y la conductividad eléctrica a lo largo de la calicata. En ella se puede observar que ambos parámetros presentan una variación a lo largo de la calicata.

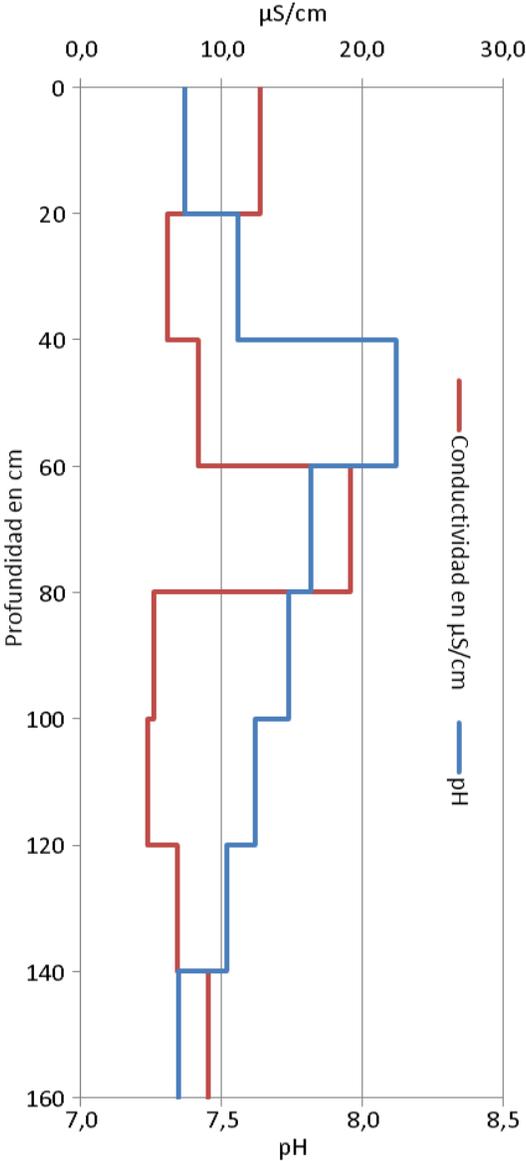


Figura 142. Perfil de pH y conductividad eléctrica en calicata glaciar Olivares Alfa.

La figura 143 presenta la correlación observada entre los iones  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ . Esta es mayor a 0,5 lo cual daría cuenta de una asociación entre estos iones con la especie química ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) propuesta como aquella más probable presente en la calicata.

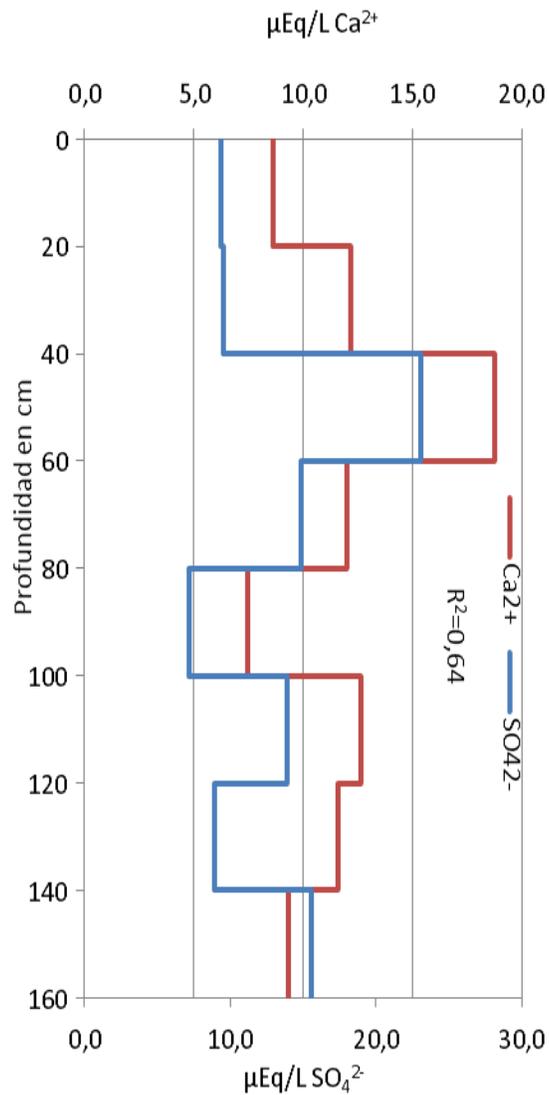


Figura 143. Correlación entre las concentraciones de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  en calicata glaciar Olivares Alfa.

La figura 144, muestra la correlación entre la variación en la concentración de  $\text{Ca}^{2+}$  y el pH a través de la calicata, dando cuenta que el pH a través de la calicata es dependiente de la variación de la concentración de  $\text{Ca}^{2+}$  a través de la misma; siendo el calcio el principal agente neutralizador encontrado en ambos glaciares.

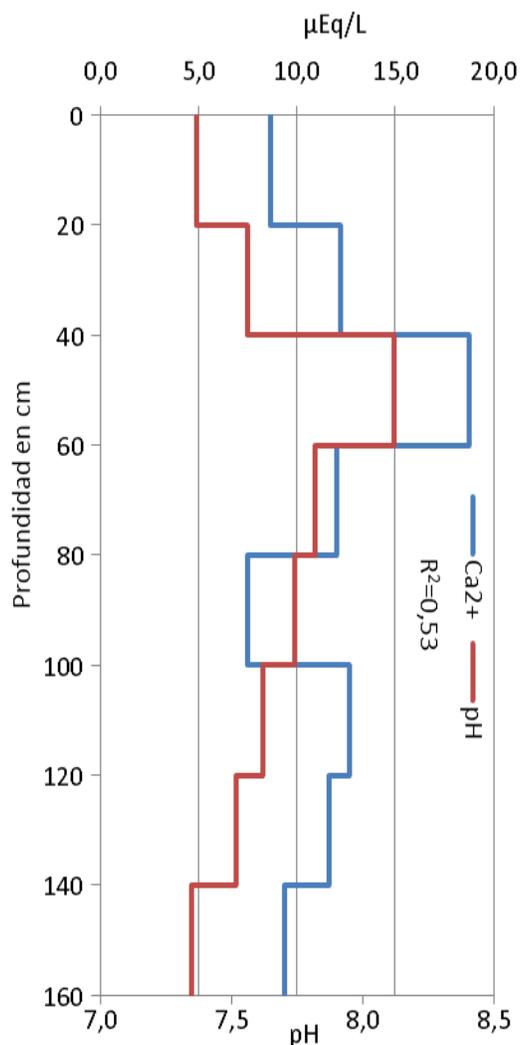


Figura 144. Correlación entre la concentración de  $\text{Ca}^{2+}$  y el  $\text{pH}^-$  en calicata en el glaciar Olivares Alfa.

La figura 145, ilustra la correlación que se observó entre la concentración del  $\text{SO}_4^{2-}$  y el pH en la calicata estudiada. El resultado obtenido da cuenta que el pH tampoco sería dependiente de la concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$  en este glaciar.

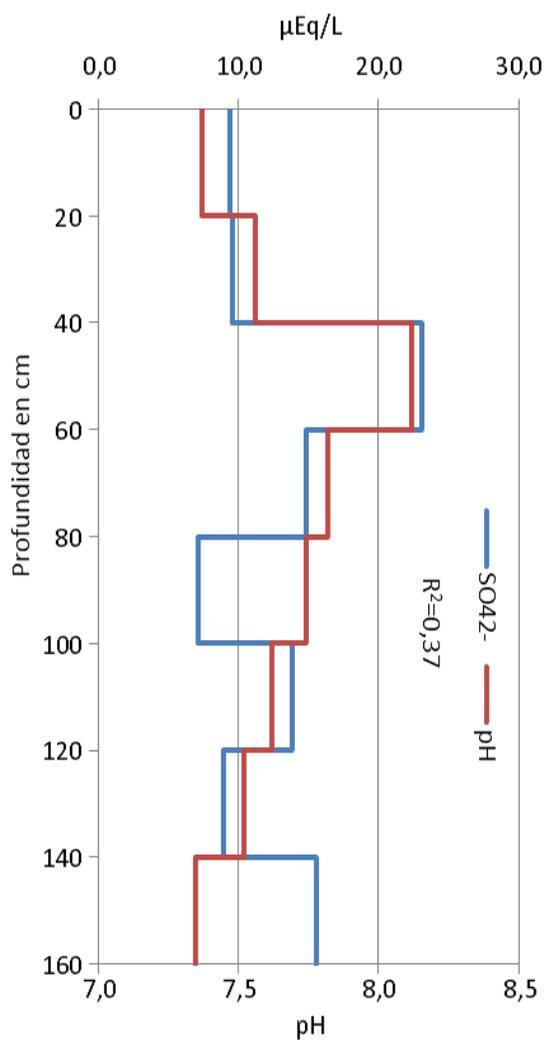


Figura 145. Correlación entre la concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$  y el pH en calicata glaciar Olivares Alfa.

En la figura 146, se puede observar la correlación a lo largo de la calicata, entre la concentración total de iones y la conductividad eléctrica, dando cuenta que este último parámetro es dependiente de la concentración de iones, como era de esperarse.

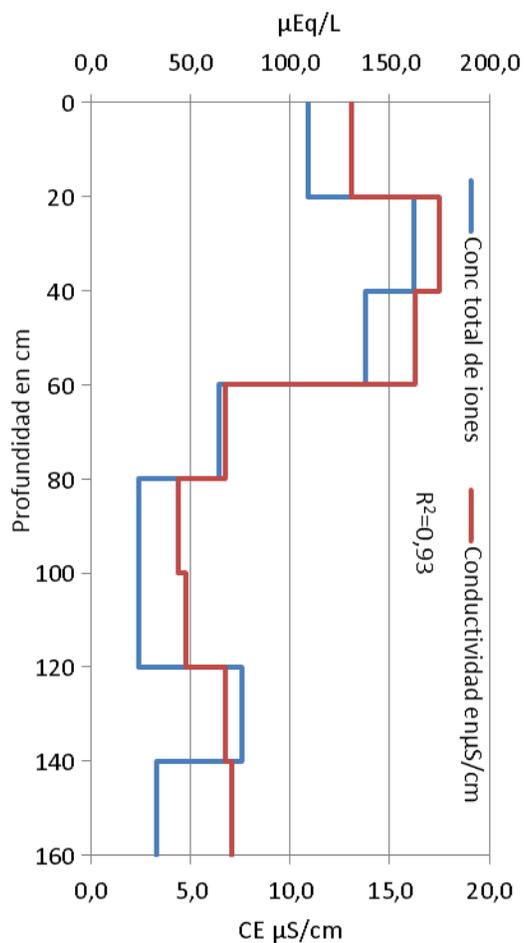


Figura 146. Correlación entre la concentración total de iones y la conductividad eléctrica en calicata glaciar Olivares Alfa.

En la figura 147, se muestra correlación entre la concentración total de aniones y la concentración total de cationes. De acuerdo al principio de electroneutralidad, debiera esperarse una concentración igual entre aniones y cationes, pero esto no se cumple totalmente ya que su correlación no es igual a 1, sin embargo cercana a este valor ( $R=0,88$ ) debido a que solo se determinan los iones mayoritarios dejando de lado aniones inorgánicos minoritarios como  $F^-$  y orgánicos de 1 y 2 átomos de carbono, como son el formiato y acetato.

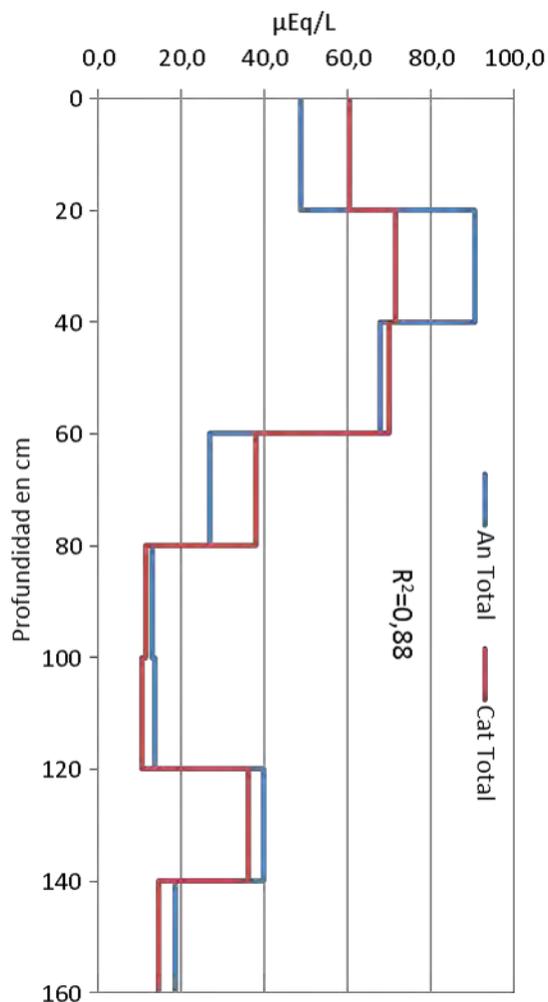


Figura 147. Correlación entre la concentración total de aniones y cationes en calicata glaciar Olivares Alfa.

### 5.5.6.3. Discusión sobre la movilidad de iones en calicatas

En los glaciares templados como los de la zona central de la cordillera de Los Andes en Chile, la nieve sufre transformaciones convirtiéndose en hielo por procesos de infiltración y recongelamiento. Específicamente la nieve derretida se infiltra hacia capas inferiores de la nivología acumulada (snow pack) donde esta se recongela como hielo infiltrado en la zona de percolación (Shumskii, 1964; Paterson, 1994). Como la nieve derretida percola en forma vertical en el perfil de nieve, entonces se produce un fenómeno de elución de las especies químicas presentes en la nieve superficial hacia horizontes más profundos (neviza). Si la temperatura de la nieve/neviza es suficientemente fría, entonces las especies químicas se pueden inmovilizar en el hielo de infiltración, esto es lo que se llama proceso de elución. Un ejemplo de esto serían las diferentes concentraciones de iones que se pueden observar en los distintos horizontes de las calicatas realizadas (snow pit) en este estudio, explicando las diferencias que hay en las concentraciones de estos iones dependiendo de la profundidad de la calicata y de los fenómenos de elución que estos iones hayan sufrido a lo largo del tiempo, el cual en este caso corresponde a la nivología acumulada de un año (Johannessen and Henriksen, 1978; Brimblecombe et al. 1985, 1987; Bales et al. 1989; Hewit et al. 1991).

Otro aspecto a considerar es que la lixiviación de iones desde la nieve y neviza a horizontes más profundos, ocurre con diferentes eficiencias y sus secuencias de elución se pueden determinar comparando los cocientes de los diferentes iones, donde las secuencias más comunes de elución son las siguientes  $\text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{NH}_4^+$  (Brimblecombe et al. 1985, 1987; Tanter et al. 1992, Izuka et al. 2002). Los fenómenos de elución varían dependiendo de las características específicas de las especies químicas, tales como la concentración inicial del ion en la nieve, la distribución del analito durante los procesos de metamorfismo de la nieve, la capacidad de formar compuestos volátiles y la solubilidad en la nieve/neviza. Por ejemplo magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) y amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) son iones que han demostrado experimentar una variación mínima, incluso durante fenómenos de elución, los cuales se incrementan durante períodos de fuerte ablación de la nieve en las estaciones de verano, donde la concentración de los iones en las capas superficiales de la nieve disminuye progresivamente por estos fenómenos.

En este estudio se puede observar que las calicatas realizadas en ambos glaciares presentan un comportamiento muy similar al descrito, con una gran movilidad de  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , sin embargo a

diferencia de lo descrito en la literatura los iones de  $\text{NH}_4^+$  presentan una gran presencia en los distintos horizontes de las calicatas estudiadas. Una posible explicación podría ser las cercanías de estos glaciares con zonas agrícolas donde la aplicación de fertilizantes naturales y/o artificiales, junto con otras actividades agropecuarias aportan  $\text{NH}_4^+$  en forma permanente durante todo el año. Produciéndose una deposición también permanente en los perfiles de nieve que se van acumulando, dejando estos iones  $\text{NH}_4^+$  atrapados en cada horizonte, aspecto que se ve reflejado en las altas y variables concentraciones de  $\text{NH}_4^+$  presentes en este estudio y en ambos glaciares. Por otra parte la correlación existente entre  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$ , en la nieve superficial, como en calicata encontrada en los sitios de monitoreo, hace presumir que todos estos iones tendrían un origen antropogénico, tal como se ha explicado anteriormente, reafirmando el origen antrópico del ion  $\text{NH}_4^+$ .

Finalmente, es interesante considerar la correlación que tiene habitualmente  $\text{Mg}^{2+}$  con respecto al aporte de material particulado atmosférico más grueso proveniente fundamentalmente de polvo resuspendido, sugiriendo que mucho del  $\text{Mg}^{2+}$  que está presente en la nieve superficial está fijo en la superficie de las partículas de polvo, siendo de esta forma menos susceptibles de ser movilizado por fenómenos de lixiviación durante la elución, respecto de otros iones que están localizados en la superficie de los granos de hielo, siendo estos último más fáciles de lavar por la nieve derretida, pudiendo migrar hasta horizontes más profundos (Zhongquin et al. 2006).

### 5.5.7. Tasa de deposición anual de iones

En la figura 148 se presenta la representación gráfica de la tasa de deposición anual para ambos glaciares estudiados. En ella se puede observar que el glaciar Olivares Alfa podría presentar una mayor tasa de deposición anual para los iones  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{NH}_4^+$ . Para el resto de los iones estudiados,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Ca}^{2+}$  se observó una tasa mayor aparente de deposición en glaciar Bello.

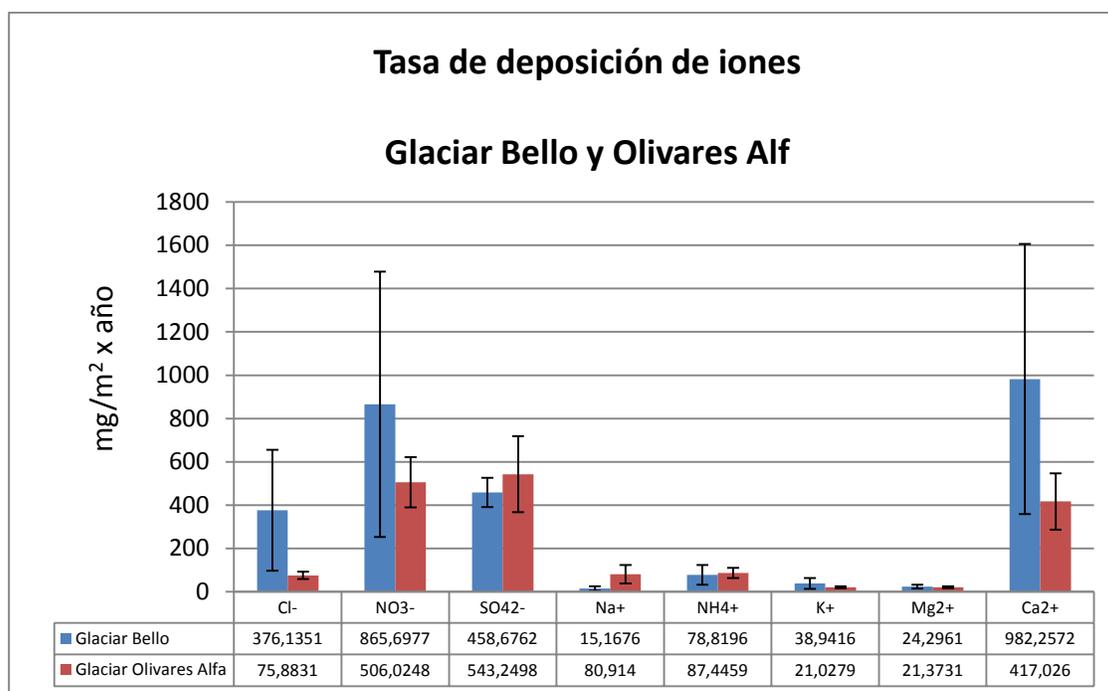


Figura 148. Tasa de deposición durante el año nivológico para los glaciares Bello y Olivares Alfa.

Sin embargo, a pesar de que se observan diferencias en las tasas de deposición durante el año nivológico entre los glaciares Bello y Olivares Alfa según la figura 148, el análisis estadístico de significancia mediante la prueba de Kruskal Wallis mostró que no hay diferencias significativas en los promedios anuales para cada ión entre los 2 glaciares estudiados.

## 5.6 Resultado del análisis de elementos

### 5.6.1 Glaciar Bello

Se determinó la concentración de elementos traza en muestras de nieve superficial y en calicatas en el glaciar Bello. Se muestrearon 3 sitios distintos en el glaciar cuyas ubicaciones se aprecian en la figura 149.



Figura 149. Mapa referencial de ubicación de calicatas en glaciar Bello: N°1 ( $33^{\circ}31'56.8''$  S,  $69^{\circ}56'52.7''$  W), N°2 ( $33^{\circ}31'58.7''$  S,  $69^{\circ}56'52.7''$  W) y N°3 ( $33^{\circ}32'01.1''$  S,  $69^{\circ}56'51.4''$  W).

En cada uno de los sitios descritos en la figura 150 se tomaron 3 muestras de nieve superficial ( $1\text{ m}^2 \times 5\text{ cm}$  profundidad) y se cavaron tres calicatas de al menos 200 cm de profundidad donde se tomaron muestras cada 20 cm de profundidad. A cada muestra se le determinó la concentración de los elementos traza definidas en el estudio; aluminio (Al), hierro (Fe), cobre (Cu), zinc (Zn), arsénico (As), cadmio (Cd), plomo (Pb), mercurio (Hg), cromo (Cr) y antimonio (Sb).

En la tabla 33 se muestra la concentración promedio ( $n=9$ ) de elementos traza presentes en nieve superficial en el glaciar Bello.

Tabla 33: Concentraciones promedio de elementos traza en nieve superficial glaciar Bello (valores en rojo es para destacar que se detectó el elemento pero se encuentra bajo límite de cuantificación del instrumento).

	<b>Concentración Promedio n=9 (µg/L)</b>	<b>LDD/2* (µg/L)</b>
<b>Cr</b>	0,400 ± 0,000	0,400
<b>Cu</b>	1,803 ± 1,591	0,560
<b>Zn</b>	14,708 ± 20,271	0,970
<b>As</b>	0,086 ± 0,086	0,020
<b>Cd</b>	0,004 ± 0,000	0,004
<b>Pb</b>	0,113 ± 0,062	0,080
<b>Sb</b>	0,005 ± 0,000	0,005
<b>Fe</b>	56,481 ± 43,817	1,930
<b>Al</b>	38,451 ± 28,677	0,320
<b>Hg</b>	0,039 ± 0,034	0,010

\*LDD/2: La mitad del límite de detección. Este valor se utiliza en los casos en que se detecta analíticamente el elemento pero en concentraciones bajo el límite de detección (Criterio IUPAC para el tratamiento de datos).

Los valores de concentración promedio de nieve superficial observados en el glaciar Bello son comparados con valores encontrados en sitios remotos como la antártica y el monte Everest en la tabla 34.

Tabla 34. Comparación de resultados obtenidos con literatura valores en rojo es para destacar que se detectó el elemento pero se encuentra bajo límite de cuantificación del instrumento).

	<b>Glaciar Bello (µg/L)</b>	<b>Coast Land Antártica* (pg/g)</b>	<b>Monte Everest** (pg/g)</b>	<b>Cerro Colorado *** (µg/Kg)</b>
<b>Cr</b>	0,400	1,6	34	0,01
<b>Cu</b>	1,803	2,4	343	33,29
<b>Zn</b>	14,708	0,8	2032	29,59
<b>As</b>	0,086	-	183	0,55
<b>Cd</b>	0,004	0,14	-	0,72
<b>Pb</b>	0,113	1,6	5	19,48
<b>Sb</b>	0,005	-	2947	0,03
<b>Fe</b>	56,481	-	11500	-
<b>Al</b>	38,451	0,13	4500	-
<b>Hg</b>	0,039	-	-	-

\*F.A.M. Planchon et al. 2002; \*\* S. Kang et al. 2007; valores en rojo=Bajo límite de detección (LDD/2); \*\*\* F. Cereceda et al. 2012.

Como se observa en la tabla 33, la concentración de Cu observada en el glaciar Bello es 1,3 veces menor que la encontrada en nieve superficial en la antártica (F.A.M. Planchon et al. 2002) y 190 veces menor que la observada en el monte Everest (S. Kang et al. 2007); sin embargo la concentración de Zn en el glaciar Bello es 18 veces superior a la Antártica y 145 veces menor que el monte Everest. Esto indica que si bien los niveles de concentración de elementos observados en nieve superficial en el glaciar Bello son comparables para algunos elementos a la concentración encontrada en sitios remotos como la Antártica, de todas formas existe presencia de elementos contaminantes, hasta ahora de origen desconocido.

Para corroborar si la concentración de elementos observada en el glaciar Bello es de origen natural o antrópica, se calcularon los **Factores de Enriquecimiento (FE)**, los cuales dan cuenta del grado de enriquecimiento de cada elemento comparado con su abundancia relativa en la corteza terrestre. Los FE se calcularon de acuerdo a la siguiente ecuación (Al Momani et al. 2003):

$$FE = \frac{\left(\frac{Cx}{Al}\right) muestra}{\left(\frac{Cx}{Al}\right) crustal}$$

Ecuación 1

Donde Cx corresponde a la concentración del elemento tanto en la muestra así como su referencia crustal y Al corresponde a la concentración de Aluminio tanto en la muestra como en la corteza terrestre (crustal). Los valores de abundancia de cada elemento en la corteza terrestre fueron obtenidos de Mason 1960, sin embargo estos valores corresponden a referencias promedio a nivel global, por lo tanto para dar más exactitud al cálculo de los FE, adicionalmente se utilizaron valores de concentración de elementos medidos en suelos de la Región Metropolitana (Carrasco et al. 1991) como referencia crustal. Valores de FE entre 1 y 10 indican que elemento en cuestión no se encuentra enriquecido antropogénicamente, FE entre 10 y 100 indican enriquecimiento moderado, mientras que FE > 100 indica alto enriquecimiento (Al Momani, 2003).

La tabla 35 muestra los valores de FE calculados para nieve superficial en el glaciar Bello.

Tabla 35. FE para elementos en nieve superficial en glaciar Bello.

FE	Cu	Zn	As	Pb	Fe	Hg
<b>Mason (1960)</b>	<b>262,7</b>	<b>328,7</b>	<b>77,6</b>	<b>30,1</b>	<b>2,4</b>	<b>698,0</b>
<b>Carrasco (1991)</b>	<b>80,3</b>	<b>168,9</b>	*	<b>6,9</b>	<b>2,6</b>	*

\*no se determinó la concentración de este elemento en suelo

Como se observa en la tabla 35, al calcular los FE utilizando la referencia de abundancia crustal de Mason 1960, Cu, Zn y Hg se encuentran altamente enriquecidos en nieve superficial, indicando una fuerte influencia antropogénica en la concentración de estos elementos en el glaciar Bello. Por otro lado, As se encuentra moderadamente enriquecido y Fe no se encuentra enriquecido, indicando que es de origen mayoritariamente crustal. Sin embargo, al utilizar una referencia de valores crustales local (Carrasco 1991), Cu pasa de estar altamente enriquecido a moderado, mientras que Pb y Fe aparecen como crustales, esto asumiendo que la concentración de elementos en suelos de la RM (Carrasco 1991) corresponde a un suelo no contaminado, es decir, constituiría la concentración crustal de elementos de origen geogénico.

La concentración promedio de elementos traza observada por cada estrato en las calicatas realizadas en el glaciar Bello se muestran en la figura 150.

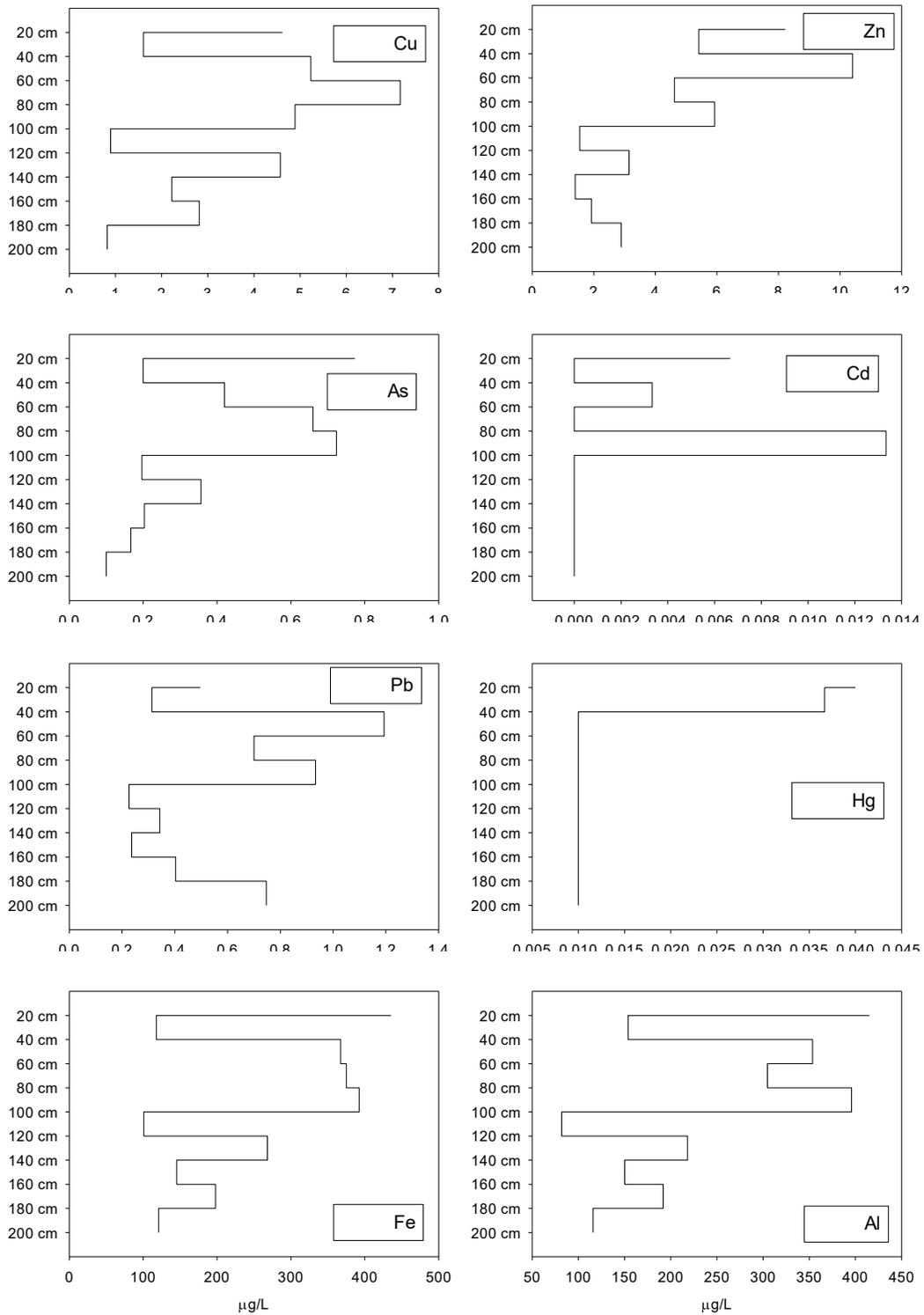


Figura 150. Concentración promedio (n=3) de elementos traza ( $\mu\text{g/L}$ ) en calicatas de glaciar Bello en función de la profundidad.

Como se aprecia en la figura 150, la concentración promedio de elementos traza varía heterogéneamente en profundidad en las calicatas, por ejemplo la mínima concentración de Cu (0,82  $\mu\text{g/L}$ ) se observó en el último estrato de la calicata (180 – 200 cm), mientras que la máxima concentración de Cu (7,17  $\mu\text{g/L}$ ) se observó en el estrato comprendido entre 60 y 80 cm. De la misma forma que para el Cu, el resto de los elementos estudiados presentaron concentraciones variables a lo largo de la calicata dando cuenta de su movilidad a través del snow pack. Con el fin de estimar la cantidad de elementos que se deposita en el glaciar durante el año nivológico, se calculó la tasa de deposición de elementos anual de cada elemento asumiendo que el total de la calicata corresponde a la nieve caída durante un año. La tasa de deposición anual de elementos ( $\mu\text{g/m}^2\cdot\text{año}$ ) se puede observar en la tabla 36.

Tabla 36. Tasa de deposición anual de elementos en glaciar Bello.

Tasa Deposición	Cr	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Sb	Fe	Al	Hg
$\mu\text{g/m}^2\cdot\text{año}$	281	2500	3276	280	2	400	3,51	179589	168354	10
LC ( $\mu\text{g/m}^2\cdot\text{año}$ )	3	793	2791	199	3	131	0	98989	81720	5
%CV	1	32	85	71	150	33	0	55	49	50

LC: Límite de confianza 95% probabilidad, n=3

%CV: Coeficiente de Variación

Como se observa en la tabla 36, la deposición anual de Cu por metro cuadrado en el glaciar Bello es de 2,5 mg en un año. Una comparación de tasas de deposición anual con valores encontrados en literatura se puede observar en la tabla 37.

Tabla 37. Comparación de tasas de deposición húmeda anual de elementos en glaciar Bello respecto de tasa de deposición de elementos en deposición húmeda encontradas en literatura.

$\mu\text{g/m}^2\cdot\text{año}$	Cr	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Sb	Fe	Al	Hg
<b>glaciar Bello</b>	281	2500	3276	280	2	400	3,51	179589	168354	10
<b>Nakanoto, Japón*</b>	400	1800	27000	-	310	10000	-	-	-	-
<b>Reston, Virginia*</b>	160	700	4100	-	54	440	-	23000	52000	-
<b>g. Bello/ Nakanoto</b>	0,7	1,4	0,1		0,006	0,04	-	-	-	-
<b>g. Bello/ Reston</b>	1,8	3,6	0,8		0,04	0,9		7,8	3,2	

\*Sitios de muestreo considerados background, Z. Cong et al. (2010)

Como se observa en la tabla 36, la tasa de deposición de Cu en el glaciar Bello es 1,4 veces mayor que Nakanoto y 3,6 veces mayor que Reston (Z. Cong et al. (2010), ambos sitios de comparación son considerados como background, por lo que se podría decir que la deposición de Cu en el glaciar Bello podría ser considerada como contaminación. La misma situación se presente para Fe y Al, cuyas tasas de deposición son 7,8 y 3,2 veces mayores que Reston. Sin embargo, las tasas de deposición de Zn y Pb son menores a las observadas en los sitios background de Reston y Nakanoto, por lo que las tasas de deposición de estos elementos observadas en el glaciar Bello podrían ser consideradas como naturales. Sin embargo la sola comparación de tasas de deposición observadas en el glaciar Bello respecto de sitios de referencia no es una herramienta concluyente para determinar si un sitio está contaminado o no, por lo tanto para corroborar si los niveles de concentración de elementos en las calicatas realizadas en el glaciar Bello corresponden a aporte antropogénico o natural, se calcularon los Factores de Enriquecimiento de acuerdo a la ecuación 1. Al igual que en el caso de la nieve superficial, los valores de abundancia de cada elemento en la corteza terrestre fueron obtenidos de Mason 1960, sin embargo estos valores corresponden a referencias promedio a nivel global, por lo tanto para dar más exactitud al cálculo de los FE, adicionalmente se utilizaron valores de concentración de elementos medidos en suelos de la Región Metropolitana (Carrasco et al. 1991) como referencia crustal. Valores de FE entre 1 y 10 indican que elemento en cuestión no se encuentra enriquecido antropogénicamente, FE entre 10 y 100 indican enriquecimiento moderado, mientras que  $FE > 100$  indica alto enriquecimiento (Al Momani, 2003)

La tabla 38 muestra los valores de FE calculados para nieve en calicata del glaciar Bello

Tabla 38. FE calculados para concentración de elementos en calicatas realizadas en el glaciar Bello.

	<b>Cu</b>	<b>Zn</b>	<b>As</b>	<b>Cd</b>	<b>Pb</b>	<b>Fe</b>	<b>Al</b>	<b>Hg</b>
<b>Mason (1960)</b>	25,4	24,0	62,9	2,4	13,9	1,7	1,0	12,9
<b>Carrasco (1991)</b>	7,8	12,4	*	0,1	3,2	1,9	1,0	*

\*no se determinó la concentración de este elemento en suelo.

Como se observa en la tabla 38, Cu, Zn, As, Pb y Hg se encuentran moderadamente enriquecidos, mientras que Cd, Fe y Al no se encuentran enriquecidos al utilizar la referencia crustal global (Mason 1960) para el cálculo de los FE. Al realizar el cálculo de los FE utilizando como referencia crustal las concentraciones de elementos en suelo de la Región Metropolitana (Carrasco 1991). Todos los elementos, a excepción del Zn, presentan FE menores a 10 indicando que su presencia correspondería a un aporte crustal.

Una herramienta útil para poder dar interpretaciones del origen de los contaminantes observados en el glaciar Bello es el análisis de conglomerados que es un procedimiento estadístico que parte de un conjunto de datos que contiene información sobre una muestra de entidades e intenta reorganizarlas en grupos relativamente homogéneos a los que se llama conglomerados (clúster). Esto permite inferir que los elementos que se agrupan en un clúster tienen un origen común. El análisis de conglomerados para los valores de concentración de elementos en nieve observados en el glaciar Bello se aprecia en la figura 151.

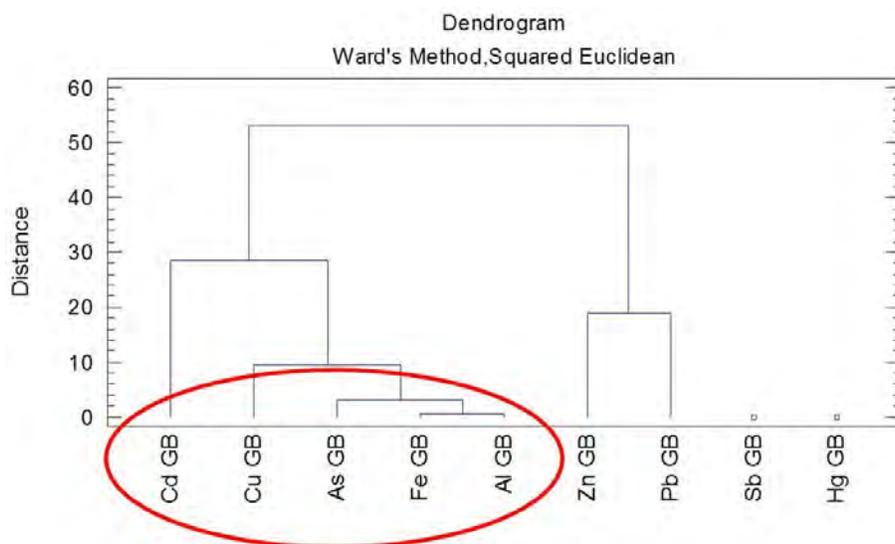


Figura 151. Dendrograma de análisis de conglomerados para concentración de elementos en muestras de nieve del glaciar Bello.

Como se observa en la figura 151, el análisis de conglomerados realizado con el software estadístico Statgraphics Centurion utilizando el método wards euclidiano cuadrado, agrupa los elementos en 2 clúster, el primero agrupa Cd, Cu, As, Fe y Al, elementos que tienen origen antropogénico y crustal. El segundo clúster asocia Zn y Pb indicando que su origen es común y comúnmente provienen de actividades antropogénicas. Por último Sb y Hg no se asocian en ningún clúster, no pudiéndose determinar su origen utilizando esta herramienta estadística.

### 5.6.2 Glaciar Olivares Alfa

Se determinó la concentración de elementos traza en muestras de nieve superficial y en calicatas en el glaciar Olivares Alfa. Se muestrearon 3 sitios distintos en el glaciar cuyas ubicaciones se aprecian en la figura 152.



Figura 152. Mapa referencial de ubicación de calicatas en glaciar Olivares Alfa: N°1 ( $33^{\circ}31'56.8''$  S,  $69^{\circ}56'52.7''$  W), N°2 ( $33^{\circ}31'58.7''$  S,  $69^{\circ}56'52.7''$  W) y N°3 ( $33^{\circ}32'01.1''$  S,  $69^{\circ}56'51.4''$  W).

En cada uno de los sitios descritos en la figura 152 se tomaron 3 muestras de nieve superficial ( $1\text{ m}^2 \times 5\text{ cm}$  profundidad) y se cavaron tres calicatas de al menos 170 cm de profundidad donde se tomaron muestras cada 20 cm de profundidad. A cada muestra se le determinó la concentración de los elementos traza; aluminio (Al), hierro (Fe), cobre (Cu), zinc (Zn), arsénico (As), cadmio (Cd), plomo (Pb), mercurio (Hg), cromo (Cr) y antimonio (Sb).

En la tabla 39 se muestra la concentración promedio ( $n=9$ ) de elementos traza presentes en nieve superficial en el glaciar Olivares Alfa.

Tabla 39: Concentraciones promedio de elementos traza en nieve superficial glaciar Olivares Alfa. Valores en rojo son para destacar que se detectó el elemento pero se encuentra bajo el límite de cuantificación del instrumento.

	<b>Concentración Promedio n=9 (µg/L)</b>	<b>LDD/2* (µg/L)</b>
<b>Cr</b>	3,391 ± 0,000	3,391
<b>Cu</b>	349,649 ± 69,515	0,138
<b>Zn</b>	37,966 ± 10,125	6,144
<b>As</b>	7,509 ± 1,077	0,014
<b>Cd</b>	0,030 ± 0,009	0,023
<b>Pb</b>	9,896 ± 1,789	0,763
<b>Sb</b>	0,351 ± 0,042	0,005
<b>Fe</b>	1656,627 ± 255,040	5,074
<b>Al</b>	949,652 ± 145,279	14,670
<b>Hg</b>	0,080 ± 0,000	0,080

\*LDD/2: La mitad del límite de detección. Este valor se utiliza en los casos en que se detecta analíticamente el elemento pero en concentraciones bajo el límite de cuantificación (Criterio IUPAC para el tratamiento de datos).

Los valores de concentración promedio de nieve superficial observados en el glaciar Olivares Alfa se comparan con los obtenidos en el glaciar Bello en la figura 153.

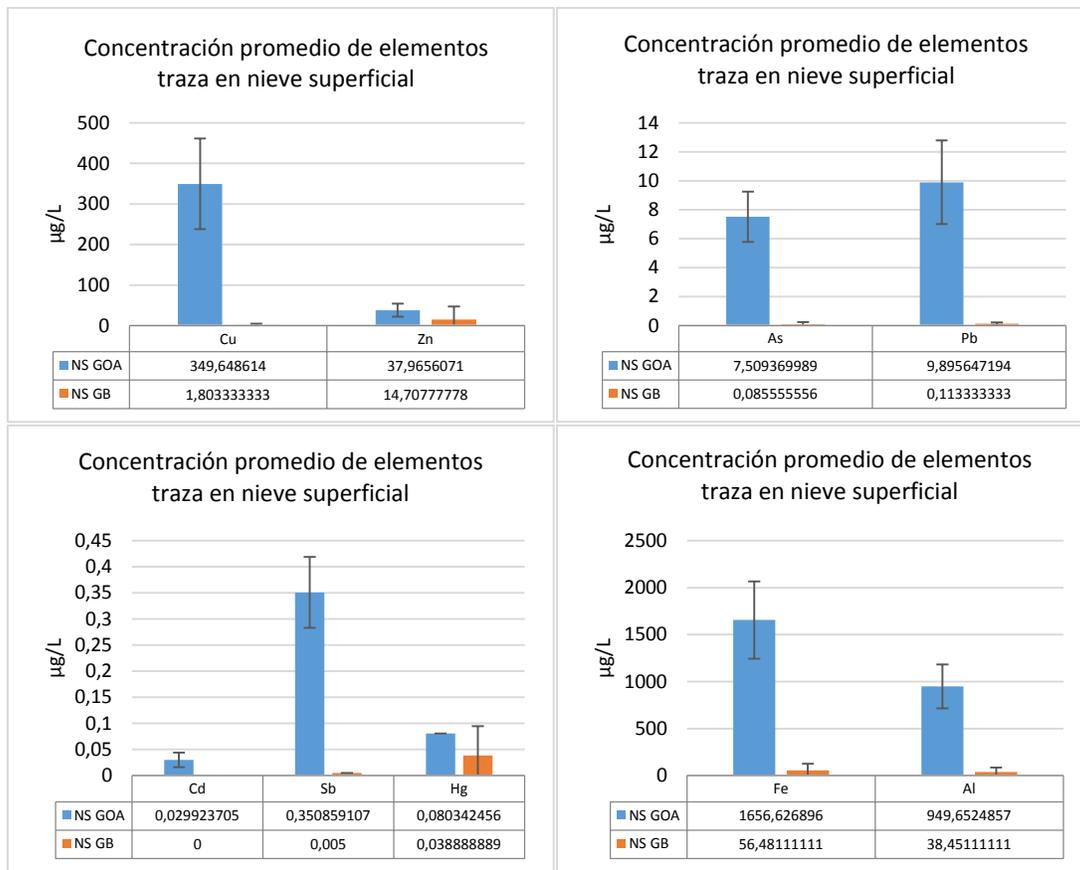


Figura 153. Concentración de elementos en glaciares Bello y Olivares Alfa

Como se observa en la figura 154, la concentración de todos los elementos estudiados en nieve superficial es superior en el glaciar Olivares Alfa. Por ejemplo, la concentración de Cu y As en nieve superficial del glaciar Olivares Alfa es 194 y 88 veces superior a la del glaciar Bello, respectivamente. Para comprobar si las diferencias observadas son estadísticamente significativas (95% probabilidad), se realizaron pruebas estadísticas de comparación de medias y de Kolmogorov Smirnov, los resultados de estas pruebas se aprecian en la figura 154.

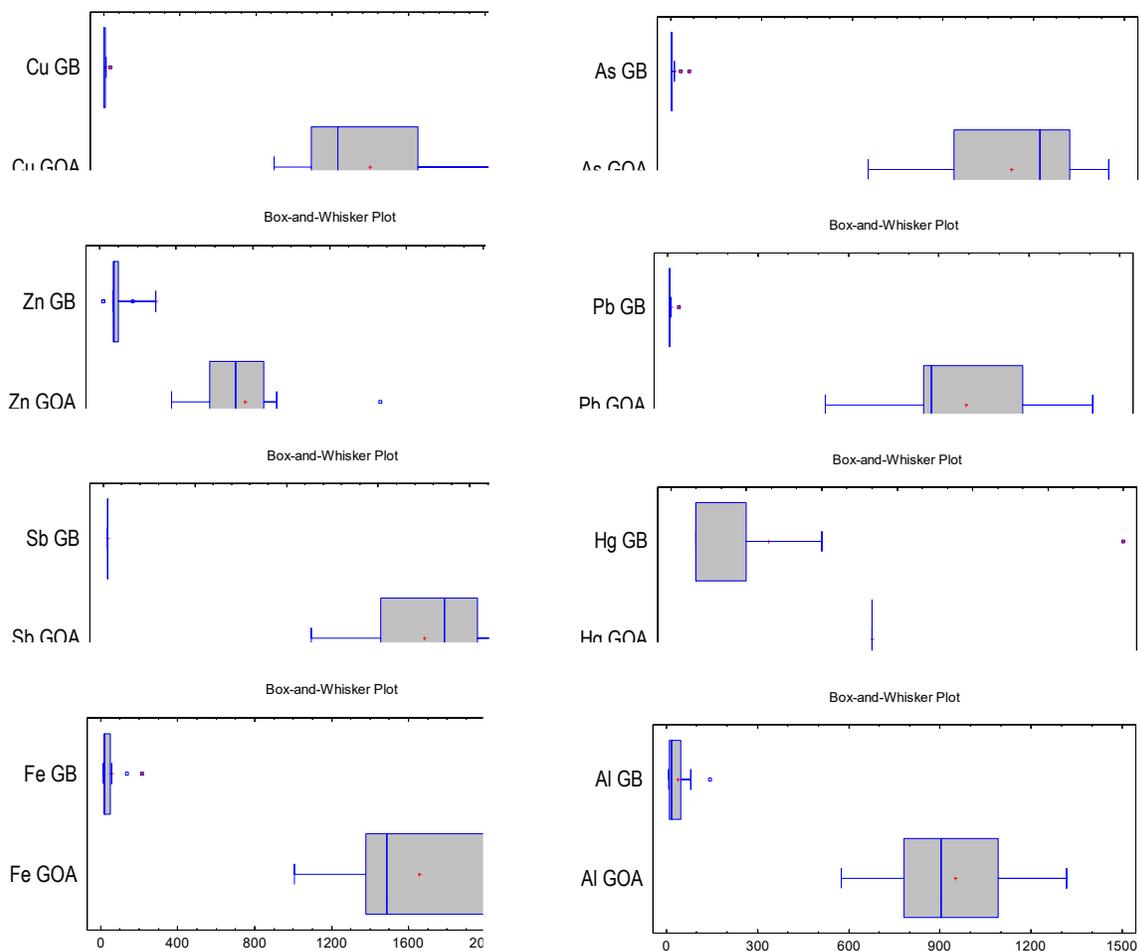


Figura 154. Gráficos de cajas y bigotes para comparación de concentración de elementos traza en nieve superficial.

Como se observa en la figura 154, los gráficos de cajas y bigotes construidos a partir de los análisis estadísticos de comparación de medias y de Kolmogorov Smirnov indican que la concentración de todos elementos observada en nieve superficial en el glaciar Olivares Alfa es significativamente distinta y mayor que la observada en el glaciar Bello. Este antecedente indica que el glaciar Olivares Alfa está siendo muy probablemente impactado por alguna fuente de emisión de elementos traza cercana al glaciar.

Para establecer si los niveles de concentración de los elementos observados en el glaciar Olivares Alfa son de procedencia antropogénica o crustal, se calcularon los factores de enriquecimiento (FE) de acuerdo a la ecuación 1. Los valores de abundancia de cada elemento en la corteza terrestre fueron obtenidos de Mason 1960, sin embargo estos valores corresponden a referencias promedio a nivel global, por lo tanto para dar más exactitud al cálculo de los FE, adicionalmente se utilizaron

valores de concentración de elementos medidos en suelos de la Región Metropolitana (Carrasco et al. 1991) como referencia crustal. Valores de FE entre 1 y 10 indican que elemento en cuestión no se encuentra enriquecido antropogénicamente, FE entre 10 y 100 indican enriquecimiento moderado, mientras que FE > 100 indica alto enriquecimiento (Al Momani, 2003).

La tabla 40 muestra los valores de FE calculados para nieve superficial en el glaciar Olivares Alfa.

Tabla 40. FE para elementos en nieve superficial en glaciar Olivares Alfa.

FE	Cu	Zn	As	Pb	Sb	Fe	Hg
<b>Mason (1960)</b>	<b>677,3</b>	<b>50,1</b>	<b>323,5</b>	<b>56,1</b>	<b>153,1</b>	<b>2,8</b>	<b>14,6</b>
<b>Carrasco (1991)</b>	<b>207,0</b>	<b>25,7</b>	*	<b>12,8</b>	*	<b>3,1</b>	*

\*no se determinó la concentración de este elemento en suelo

Como se observa en la tabla 40, al calcular los FE utilizando la referencia de abundancia crustal de Mason 1960, Cu, As y Sb se encuentran altamente enriquecidos en nieve superficial, indicando una fuerte influencia antropogénica en la concentración de estos elementos en el glaciar Olivares Alfa. Por otro lado, Zn, Pb y Hg se encuentran moderadamente enriquecidos y Fe no se encuentra enriquecido, indicando que sería muy probablemente de origen mayoritariamente crustal. Al utilizar una referencia de valores crustales local (Carrasco 1991), se mantiene la tendencia mostrada al calcular lo FE con los valores de referencia de Mason 1960, sin embargo los valores de FE disminuyeron entre un 60 y 70%. De todas formas, al calcular los FE de elementos traza en nieve superficial en el glaciar Olivares Alfa se puede afirmar que existe una fuerte influencia de tipo antropogénica sobre la concentración de Cu, As y Sb, este antecedente, junto con las mediciones de Iones, Material Particulado y Black Carbon, complementados con los análisis de los datos meteorológicos del sector, permiten inferir que la fuente de contaminación que está afectando al glaciar Olivares Alfa correspondería muy probablemente a la actividad industrial extractiva cercana a éste.

La concentración promedio de elementos traza observada por cada estrato en las calicatas realizadas en el glaciar Olivares Alfa se observan en la figura 155.

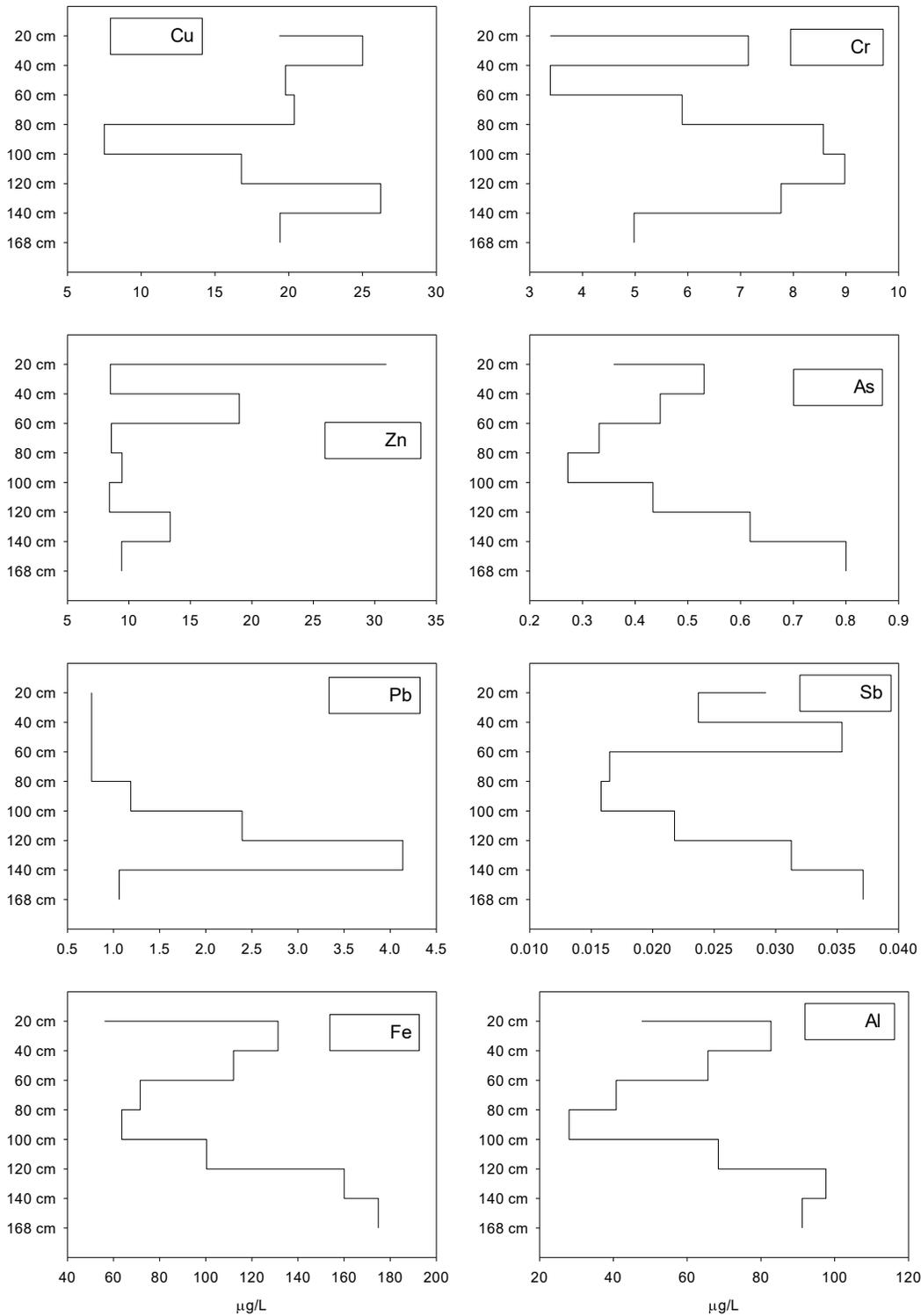


Figura 155. Concentración promedio ( $n=3$ ) de elementos traza ( $\mu\text{g/L}$ ) en calicatas de glaciar Olivares Alfa en función de la profundidad.

Como se aprecia en la figura 155, la concentración promedio de elementos traza varía heterogéneamente en profundidad en las

calicatas, por ejemplo la mínima concentración de Cu (7,50 µg/L) se observó en el estrato de la calicata comprendido entre 80 y 100 cm de profundidad, mientras que la máxima concentración de Cu (26,23 µg/L) se observó en el estrato comprendido entre 120 y 140 cm. Al igual que el Cu, el resto de los elementos estudiados presentaron concentraciones variables a lo largo de la calicata dando cuenta de su movilidad a través del snow pack. Con el fin de estimar la cantidad de elementos que se deposita en el glaciar durante el año nivológico, se calculó la tasa de deposición de elementos anual de cada elemento asumiendo que el total de la calicata corresponde a la nieve caída durante un año. La tasa de deposición anual de elementos (µg/m<sup>2</sup>\*año) se puede observar en la tabla 41.

Tabla 41. Tasa de deposición anual de elementos en glaciar Olivares Alfa.

Tasa Deposición	Cr	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Sb	Fe	Al	Hg
µg/m <sup>2</sup> *año	4101	12571	8975	304	19	969	17	69631	41903	53
LC (µg/m <sup>2</sup> *año)	802	4892	5660	84	10	697	9	23772	8018	3
%CV	20	39	63	28	53	72	53	34	19	6

LC: Límite de confianza 95% probabilidad, n=3

%CV: Coeficiente de Variación

Como se observa en la tabla 41, la deposición anual de Cu por metro cuadrado en el glaciar Olivares Alfa es de 12,6 mg en un año. Una comparación de tasas de deposición anual con los valores encontrados en el glaciar Bello se puede observar en la tabla 42.

Tabla 42. Comparación de tasas de deposición húmeda anual de elementos en glaciar Olivares Alfa respecto de tasa de deposición de elementos en deposición húmeda determinada en el glaciar Bello.

µg/m <sup>2</sup> *año	Cr	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Sb	Fe	Al	Hg
glaciar Olivares Alfa	4101	12571	8975	304	19	969	17	69631	41903	53
glaciar Bello	281	2500	3276	280	2	400	3	179589	168354	10
Olivares Alfa/Bello	14,6	5,0	2,7	1,1	9,5	2,4	5,7	0,4	0,2	5,3

Como se observa en la tabla 42, la tasa de deposición de Cu en el glaciar Olivares Alfa es 5,0 veces mayor que en el glaciar Bello, así como Cu, el resto de los elementos a excepción de Fe y Al, presentaron tasas de deposición mayores en el glaciar Olivares Alfa respecto del glaciar

Bello, para establecer si estas diferencias son estadísticamente significativas (95% probabilidad), se realizaron pruebas estadísticas de comparación de medias y de Kolmogorov Smirnov, los resultados es estas pruebas se aprecian en la figura 156.

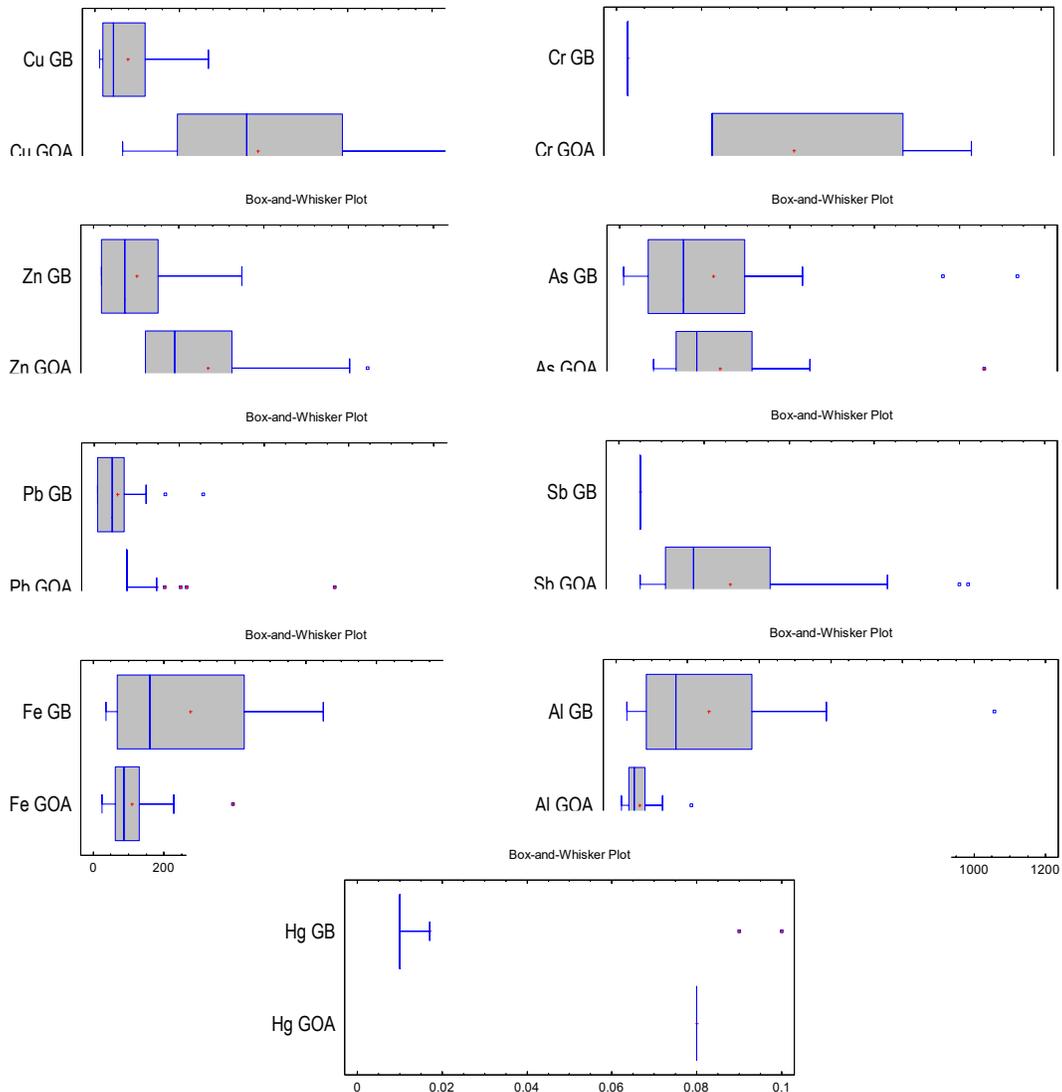


Figura 156. Gráficos de cajas y bigotes para comparación de concentración de elementos traza en calicatas.

Como se aprecia en la figura 156, la concentración de Cu, Cr, Zn, Pb, Hg y Sb es significativamente distinta y mayor en el glaciar Olivares Alfa respecto del glaciar Bello. La concentración de As no presenta diferencias significativas entre ambos glaciares, mientras que la concentración de Fe y Al es significativamente distinta y menor en el glaciar Olivares Alfa, respecto del glaciar Bello.

Para determinar si el origen de los elementos observados en el glaciar Olivares Alfa es natural o antropogénico, se calcularon los Factores de Enriquecimiento de acuerdo a la ecuación 1. Al igual que en el caso de la nieve superficial, los valores de abundancia de cada elemento en la corteza terrestre fueron obtenidos de Mason 1960, sin embargo estos valores corresponden a referencias promedio a nivel global, por lo tanto para dar más exactitud al cálculo de los FE, adicionalmente se utilizaron valores de concentración de elementos medidos en suelos de la Región Metropolitana (Carrasco et al. 1991) como referencia crustal. Valores de FE entre 1 y 10 indican que elemento en cuestión no se encuentra enriquecido antropogénicamente, FE entre 10 y 100 indican enriquecimiento moderado, mientras que  $FE > 100$  indica alto enriquecimiento (Al Momani, 2003). La tabla 43 muestra los valores de FE calculados para nieve en calicata del glaciar Olivares Alfa.

Tabla 43. FE calculados para concentración de elementos en calicatas realizadas en el glaciar Olivares Alfa.

	Cr	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Sb	Fe	Hg
<b>Mason (1960)</b>	47,0	565,5	305,0	305,2	255,0	126,6	175,4	2,7	235,7
<b>Carrasco (1991)</b>	173,4	172,8	156,8	337,9	12,3	29,0	194,2	3,0	260,9

\*no se determinó la concentración de este elemento en suelo

Como se observa en la tabla 43, Cu, Zn, As, Cd, Pb, Sb y Hg se encuentran altamente enriquecidos, mientras que Cr está moderadamente enriquecido y Fe no se encuentra enriquecido al utilizar la referencia crustal global (Mason 1960) para el cálculo de los FE. Al realizar el cálculo de los FE utilizando como referencia crustal las concentraciones de elementos en suelo de la Región Metropolitana (Carrasco 1991), todos los elementos, a excepción del Cd, Pb y Fe, se encuentran altamente enriquecidos. Los resultados del cálculo de los FE indican una fuerte influencia antropogénica para Cu, Zn, As, Cd, Sb, Pb, y Hg, todos estos elementos asociados habitualmente a actividades mineras (W. Ndilila et al. 2014). Una herramienta útil para poder dar interpretaciones del origen de los contaminantes observados en el glaciar Olivares Alfa es el análisis de conglomerados que es un procedimiento estadístico que parte de un conjunto de datos que contiene información sobre una muestra de entidades e intenta reorganizarlas en grupos relativamente homogéneos a los que se llama conglomerados (clústers). Esto permite inferir que los elementos que se agrupan en un clúster tienen un origen común. El análisis de conglomerados para los valores de concentración de elementos en nieve observados en el glaciar Olivares Alfa se aprecia en la figura 157.

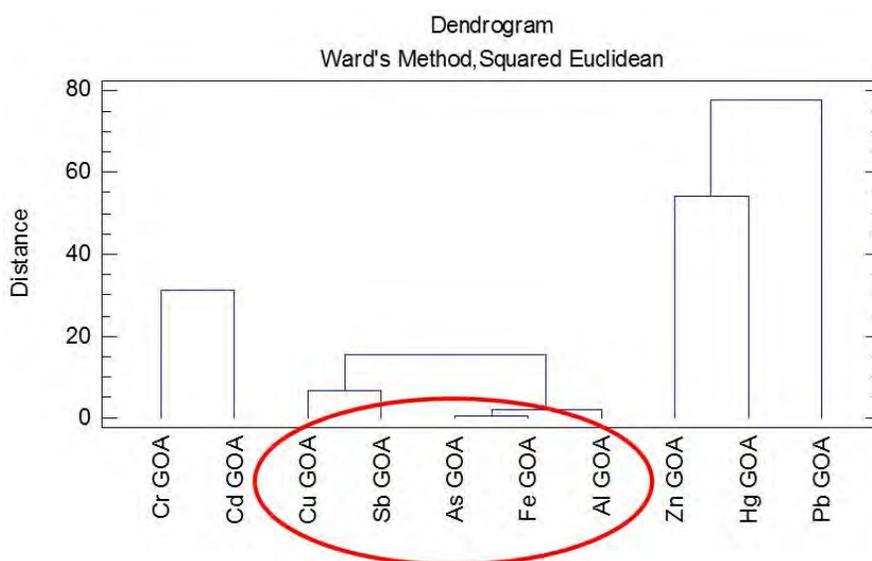


Figura 157. Dendrograma de análisis de conglomerados para concentración de elementos en muestras de nieve del glaciar Olivares Alfa.

Como se observa en la figura 157, el análisis de conglomerados realizado con el software estadístico Statgraphics Centurion utilizando el método wards euclidiano cuadrado, agrupa los elementos en 3 clúster, el primero agrupa Cu, Sb, As, Fe y Al, elementos que tienen origen antropogénico y crustal. El segundo clúster asocia Zn, Hg y Pb indicando que su origen es común y muy probablemente provienen de actividades antropogénicas. Por último Cr y Cd se asocian en un clúster, no pudiéndose determinar su origen utilizando esta herramienta estadística.

#### 5.6.1.1 Monitoreo atmosférico en Santiago

Se realizó análisis de elementos a los filtros de material particulado atmosférico PM<sub>2,5</sub> utilizados en el monitoreo de aire ambiente realizado en la estación de Parque O´Higgins perteneciente a la red de monitoreo denominada Red MACAM perteneciente a la Región Metropolitana y realizado durante la semana del 9 al 17 de septiembre, de manera paralela al monitoreo de nieve realizado en glaciar Bello.

Los resultados de concentración promedio (n=8) de elementos traza en material particulado atmosférico de la ciudad de Santiago se observan en la figura 158.

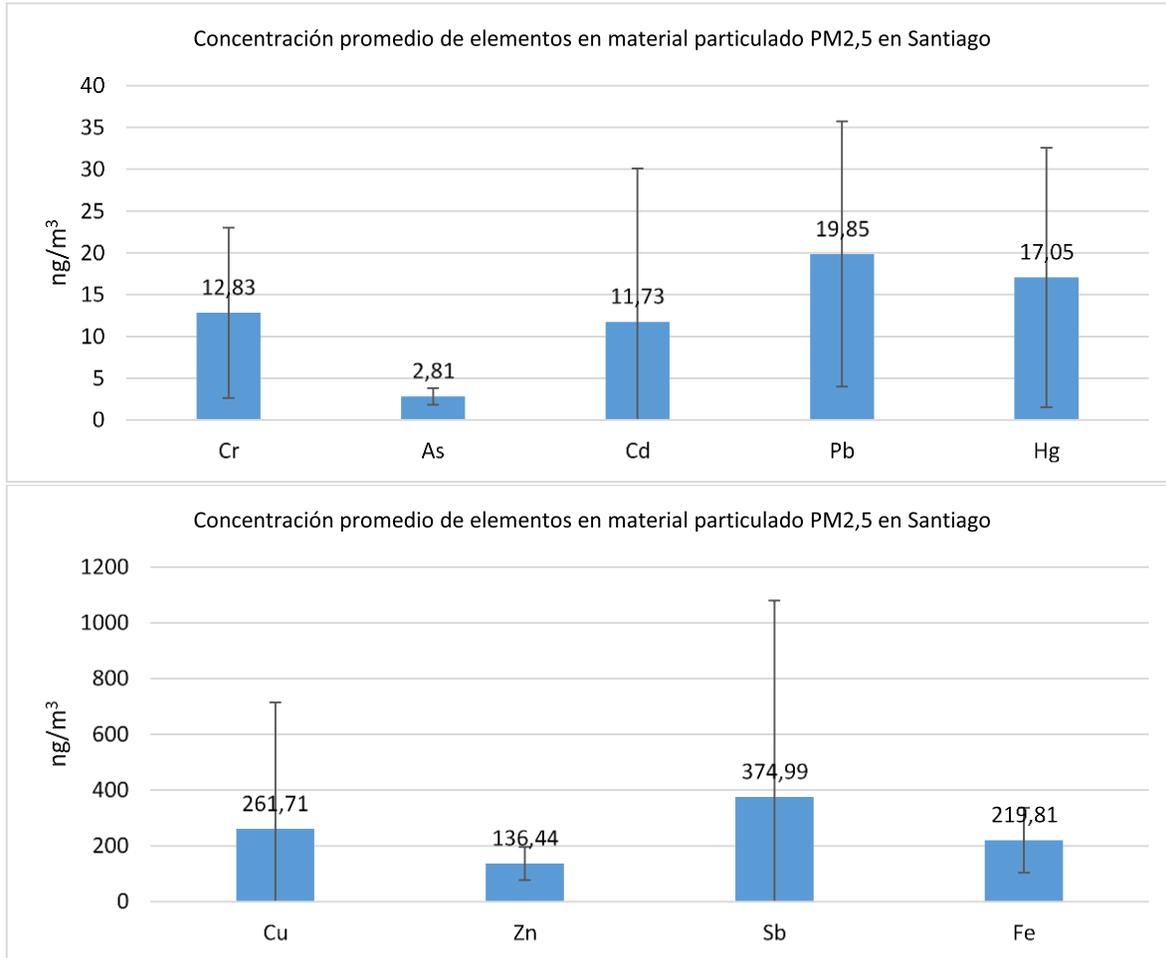


Figura 158. Concentración promedio de elementos traza (n=8) en material particulado atmosférico PM2,5 de la ciudad de Santiago.

La figura 158 muestra que Sb es el elemento de mayor concentración (374,99 ng/m<sup>3</sup>), seguido de Cu, Fe y Zn. Antimonio (Sb) es un metaloide que ha sido asociado a emisiones producidas por el tráfico vehicular (F. Fujiwara et al. 2011), lo que explica su alta concentración debido al hecho de que la estación de monitoreo de Parque O´Higgins se encuentra contigua a una importante carretera con alto flujo vehicular.

Dado que la concentración de elementos en la ciudad de Santiago se determinó en material particulado atmosférico y en los glaciares se hizo sobre muestras de nieve, no es posible efectuar una comparación directa entre concentraciones, por lo tanto se comparó la distribución de elementos en cada sitio muestreado para establecer si existen similitudes entre ellos (figura 159).

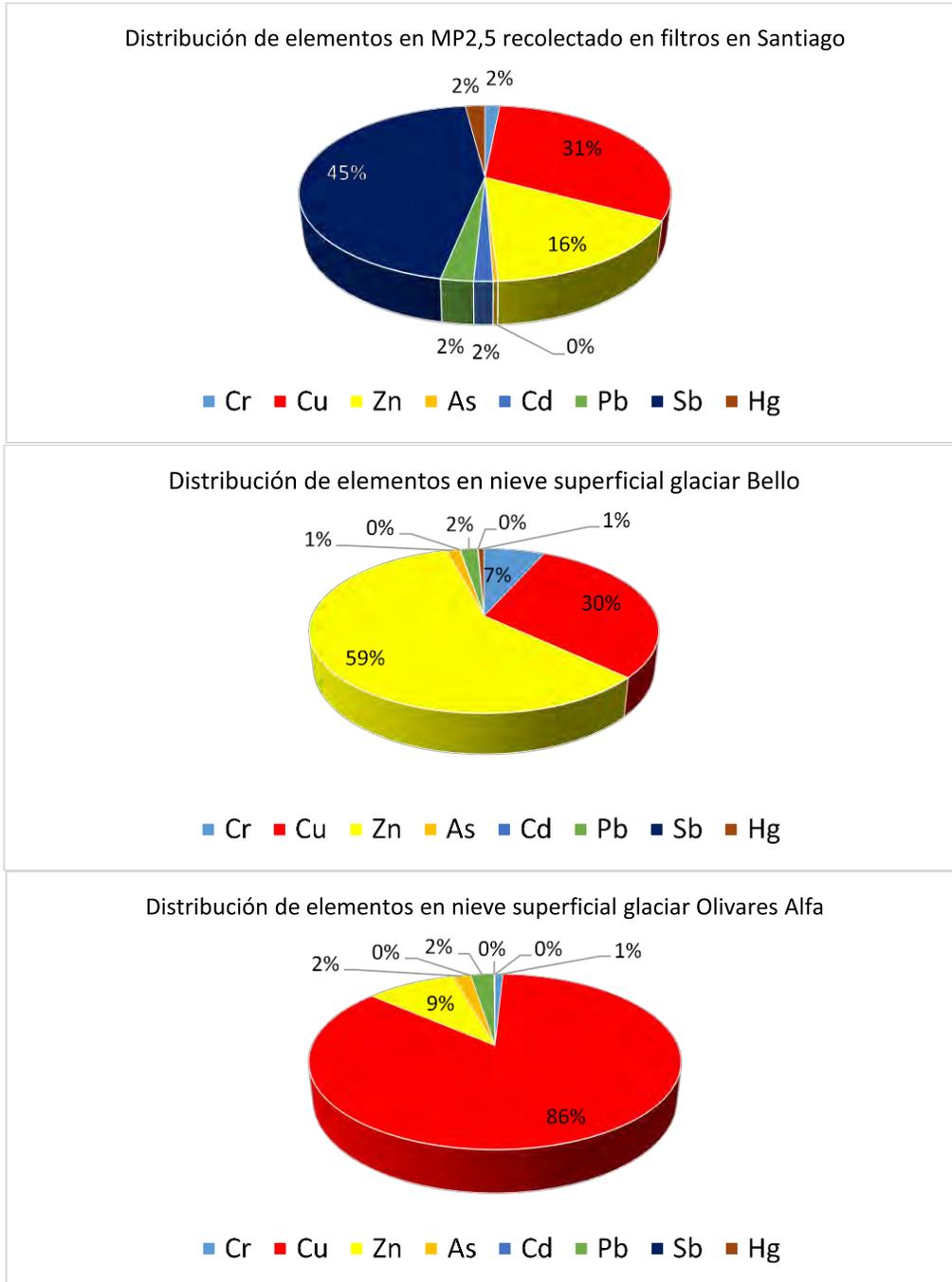


Figura159. Distribución de elementos traza en sitios de estudio.

Al analizar las distribuciones de elementos en los sitios de estudio, se observa claramente que en la ciudad de Santiago Sb es predominante (45%) por sobre el resto de los elementos determinados, le siguen Cu (31%) y Zn (16%). Esta distribución es distinta a la observada en el glaciar Bello donde Zn es el elemento mayoritario (59%) seguido de Cu

(30%) y Cr (7%). Por otra parte en el glaciar Olivares Alfa, Cu es el elemento mayoritario (86%) dando cuenta de su cercanía a la fuente de emisión, seguido de Zn (9%). El análisis de las distribuciones de elementos en los 3 sitios de estudio da cuenta de que son distintos entre sí, sin embargo no se puede descartar la influencia de la actividad industrial extractiva cordillerana proveniente de las cercanías del Glaciar Olivares Alfa, sobre el glaciar Bello debido a los antecedentes de dirección de viento, albedo, iones y concentración de partículas discutidos en capítulos anteriores.

## VI CONCLUSIONES

### Conclusiones Meteorología

Se analizaron los datos meteorológicos medidos en los glaciares Olivares Alfa y Bello, en adelante sitios monitoreados, junto con los datos meteorológicos de las estaciones Valle Olivares y glaciar Olivares Gamma de la Dirección General de Aguas, en adelante sitios observados, los cuales están emplazados cercanos a los sitios de monitoreo de este estudio. En función de los datos analizados se puede concluir que la zona del glaciar Olivares Gamma presenta una temperatura promedio de  $-2,8^{\circ}\text{C}$ , una mínima de  $-16,7^{\circ}\text{C}$  y máxima de  $12,3^{\circ}\text{C}$ . Por su parte el glaciar Olivares Alfa presentó una temperatura promedio de  $-1,2^{\circ}\text{C}$ , una mínima de  $-10,3^{\circ}\text{C}$  y una máxima de  $10,7^{\circ}\text{C}$  y por su parte Valle Olivares presentó una temperatura promedio de  $3,8^{\circ}\text{C}$ , una mínima de  $-13,9^{\circ}\text{C}$  y una máxima de  $23,2^{\circ}\text{C}$ , siendo esta la zona más templada respecto a los registros estudiados, y finalmente, el glaciar Bello presentó una temperatura promedio de  $-8,7^{\circ}\text{C}$ , una mínima de  $-17,9^{\circ}\text{C}$  y una máxima de  $6,1^{\circ}\text{C}$ , siendo este el sitio con las temperaturas más bajas de los sitios monitoreados y observados.

Respecto a la humedad relativa, el glaciar Olivares Gama presentó un promedio de  $37,3\%$ , una mínima de  $10\%$  y una máxima de  $97,6\%$ , a su vez Valle Olivares presentó un promedio de  $35,7\%$ , una mínima de  $2,9\%$  y una máxima de  $98,7\%$ . El glaciar Olivares Alfa en tanto, presentó un promedio de  $36,1\%$ , una mínima de  $7,9\%$  y una máxima de  $78,6\%$ , mientras que el glaciar Bello presentó un promedio de  $68,8\%$ , una mínima de  $19,3\%$  y una máxima de  $93,3\%$ , siendo este sitio el que presenta la mayor humedad relativa en promedio de los sitios monitoreados y observados.

Respecto a las medidas de radiación en los sitios monitoreados, se puede concluir que gracias al cálculo de las diferencias absolutas de los valores registrados, se puede observar que existen diferencias estadísticamente significativas ( $95\%$  probabilidad) entre las radiaciones incidentes y reflejada de cada glaciar, considerando los datos de onda corta y de onda larga, respectivamente. Los resultados muestran para radiación solar de (onda corta incidente – reflejada) en el glaciar Bello un valor promedio de  $128 \text{ watt/m}^2$  de diferencia. En tanto, el mismo balance para la onda larga mostró un valor promedio de  $50 \text{ watt/m}^2$  de diferencia. Por otra parte, para la radiación solar de (onda corta incidente – reflejada) del glaciar Olivares Alfa entregó un valor de  $63 \text{ watt/m}^2$  de diferencia, y el mismo balance para la onda larga del mismo glaciar, un valor de  $84 \text{ watt/m}^2$  de diferencia. Al analizar cada glaciar

por separado, los resultados dan cuenta que hay diferencias estadísticamente significativas en la tasa de absorción de energía y que esta es propia de cada glaciar, lo cual en principio estaría supeditado a las características físicas de su superficie de reflexión, lo cual sin duda condicionaría su capacidad de reflejar la radiación incidente. Con estos resultados es posible observar que la diferencia entre la energía incidente y reflejada sería mayor en el glaciar Olivares Alfa en comparación con el glaciar Bello, lo cual estaría indicando que el primero de ellos estaría absorbiendo o reteniendo mayor cantidad de energía en su superficie, en ambos tipos de onda, lo cual sin duda podría estar condicionado por la presencia de agentes o sustancias que absorben o retienen radiación en la superficie del glaciar. Al calcular albedo para cada glaciar, los resultados muestran un albedo promedio de 0,64 en el glaciar Olivares Alfa y 0,77 para el glaciar Bello. En otras palabras en términos de albedo, el albedo del glaciar Bello es un 17% mayor que el albedo del glaciar Olivares Alfa, esta diferencia muy probablemente se deba al tipo de contaminación que está recibiendo este glaciar, afectando directa y negativamente a su albedo. Cuando verificamos estas diferencias de albedo en función de la radiación incidente menos la reflejada para la longitud de onda corta, los resultados indican que el glaciar Bello presenta 2 veces mayor reflexión que el glaciar Olivares Alfa; cuando realizamos el mismo cálculo para la longitud de onda larga, los resultados indican que el glaciar Bello presenta 1,7 veces mayor reflexión que el glaciar Olivares Alfa.

Respecto a las intensidades y direcciones predominantes de los vientos, el glaciar Gamma, este presenta una mayor frecuencia de vientos noreste con velocidades que van desde los 3,6-5,7 m/s en el 40,1% de los vientos registrados y desde los 5,7-8,8 m/s en el 39,3% de los vientos registrados. Para el caso de Valle Olivares, se repite la mayor frecuencia en términos de dirección noreste, de los cuales el 100% presenta intensidades entre 0,5-2,1 m/s, lo cual corresponde a los vientos de menor intensidad registrados en los sitios observados y monitoreados. El glaciar Olivares Alfa en tanto, mostró mayor frecuencia de vientos nornoreste, de las cuales un 33,1% presentó intensidades de 0,5-2,1 m/s y un 27,9% presentó intensidades entre 2,1-3,6 m/s, mostrando un comportamiento similar a Valle Olivares, dado que su vientos son de baja intensidad. Para el caso del glaciar Bello, este presentó mayor frecuencia de dirección de vientos norte, con intensidades que van desde los 3.6-5.7 m/s en el 27,3% de los vientos registrados y 5,7-8,8 m/s en el 23,9% de los vientos registrados, siendo este último el que presenta mayores intensidades de viento registrada entre los sitios monitoreados.

## Conclusiones Material Particulado Atmosférico

La concentración promedio de material particulado atmosférico en el glaciar Olivares Alfa observada para el período completo de monitoreo fue para PM10 de  $1,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  con máximos de  $44,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , mientras que la concentración promedio de PM2,5 fue de  $0,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$  alcanzando máximos de  $6,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Por último la concentración promedio de PM1 fue de  $0,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , alcanzando máximos de  $2,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

La distribución por tamaño de material particulado atmosférico en este glaciar muestra una clara predominancia de partículas finas ( $0,265\text{--}0,615 \mu\text{m}$ ), con valores promedio de 6.948 partículas de  $0,265 \mu\text{m}$ , las cuales logran alcanzar máximos de 32.755 partículas.

La concentración promedio de material particulado atmosférico en el glaciar Bello observada para el período completo de monitoreo fue para PM10 fue de  $1,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  con máximos de  $95,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , mientras que la concentración promedio de PM2,5 fue de  $0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  alcanzando máximos de  $5,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , por último la concentración promedio de PM1 fue de  $0,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  alcanzando máximos de  $1,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

La distribución por tamaño de material particulado atmosférico en el glaciar Bello muestra una clara predominancia de partículas finas ( $0,265 \leq \text{PM} \leq 0,425 \mu\text{m}$ ), con valores promedio de 4.225 partículas de  $0,265 \mu\text{m}$  las cuales logran alcanzar máximos de 14.115 partículas.

El 98% de las partículas observadas en los glaciares Olivares Alfa y Bello corresponden a partículas finas ( $\text{MP} \leq 0,425 \mu\text{m}$ )

Respecto del origen del material particulado atmosférico encontrado en el glaciar Bello podría explicarse muy probablemente debido a transporte desde una zona geográfica ubicada al nornoroeste de este glaciar, dirección en la cual se encuentra la zona de explotación minera extractiva colindante con el glaciar Olivares Alfa.

La concentración de material particulado atmosférico observada en el glaciar Olivares Alfa presenta ciclos marcados de aumento de concentración durante los primeros 6 días de muestreo. A partir del séptimo día de muestreo no se observó el mismo fenómeno, produciéndose un decrecimiento de la concentración promedio de 78%, 66% y 61% para la concentración de PM10, PM2,5 y PM1, respectivamente.

Al ser la actividad minera la fuente de emisión de partículas más cercana y visiblemente evidente en la zona estudiada del GOA, sumado al hecho que estas zonas de explotación de mineral están justamente en la dirección del viento predominante del sector durante la campaña de monitoreo, se puede inferir que los ciclos de aumento y disminución de material particulado atmosférico observados en el glaciar Olivares Alfa son muy probablemente producto de la actividad de dichas zonas de explotación.

El material particulado atmosférico emitido permanentemente por la actividad minera extractiva de la zona, muy probablemente permanecería confinado en el rajo de la mina hasta que es capaz de superar la barrera altitudinal que constituye el cordón montañoso que la separa del glaciar Olivares Alfa, permitiendo en condiciones adecuadas de viento y temperatura que las partículas emitidas lleguen hasta éste glaciar. Para comprobar esto se analizaron estas variables meteorológicas, obteniéndose una buena correlación de la ciclicidad del PM con la temperatura, en aquellos momentos en que las partículas llegaban al glaciar. De igual modo el fenómeno de la ciclicidad coincidió solamente cuando la dirección del viento venía con dirección noroeste-noreste, específicamente en la misma dirección del rajo de la extracción minera. Por el contrario el fenómeno desapareció, cuando el viento cambió de dirección (este), viniendo desde Argentina, desapareciendo la ciclicidad y disminuyendo en forma importante la concentración de material particulado atmosférico, como ya se describió anteriormente.

La concentración de material particulado atmosférico en Santiago presenta ciclos marcados de aumento de concentración durante las mañanas (7:00 a 10:00 h aproximadamente) y durante las tardes (18:00 a 21:00 h) lo que es coincidente con las horas punta del tránsito vehicular diario de la ciudad de Santiago.

La distribución por tamaño de material particulado atmosférico en Santiago muestra una clara predominancia de partículas finas (0,265–0,615  $\mu\text{m}$ ), con valores promedio de 87.171 partículas de 0,265  $\mu\text{m}$  las cuales logran alcanzar máximos de 603.901 partículas

La concentración promedio de PM10 observada en Santiago es 46 veces mayor a la observada en los glaciares Bello y Olivares Alfa, así mismo la concentración promedio de PM2,5 es 50 y 28 veces superior a la observada en los glaciares Bello y Olivares Alfa respectivamente. Por último la concentración promedio de PM1 observada en Santiago es 48 y 32 veces superior a la observada en los glaciares Bello y Olivares Alfa respectivamente

La concentración de material particulado atmosférico PM10, PM2,5 y PM1 es significativamente distinta y mayor en la ciudad de Santiago respecto de los glaciares Olivares Alfa y Bello.

El análisis factorial realizado a los valores de concentración de material particulado atmosférico sugiere que el origen del MP en ambos glaciares estudiados podría muy probablemente ser común y distinto al de la ciudad de Santiago, esto en conjunto con los datos expuestos anteriormente respecto de la relación del material particulado atmosférico con la meteorología de ambos glaciares, hacen sugerir que una de las fuentes importantes de partículas en ambos glaciares muy probablemente correspondería a la actividad minera contigua al glaciar Olivares Alfa.

Las partículas de 0,265  $\mu\text{m}$  presentan proporciones similares en los glaciares Bello y Olivares Alfa (49 y 54% respectivamente), mientras que en Santiago su porcentaje alcanza al 37%, por otro lado las partículas de 0,375  $\mu\text{m}$  representan un 6 y 5% de la fracción fina del material particulado atmosférico encontrada en los glaciares Bello y Olivares Alfa respectivamente, mientras que en la ciudad de Santiago alcanza un 13%. Estas diferencias de distribución permiten inferir que las partículas finas atmosféricas de la ciudad de Santiago muy probablemente son distintas de las partículas finas encontradas en los glaciares Bello y Olivares Alfa, (las cuales serían similares entre los glaciares), lo que constituye otro indicativo de que muy probablemente su origen es común.

Las pruebas estadísticas de comparación de medias y de Kolmogorov-Smirnov indicaron que las concentraciones de PM10, PM2,5 y PM1 observadas en el glaciar Olivares Alfa son significativamente distintas y mayores a las observadas en el glaciar Bello. Este comportamiento en la concentración del material particulado atmosférico podría ser explicado por el hecho de que el glaciar Bello se encuentra a mayor distancia (51 Km) que el glaciar Olivares Alfa (5 Km) de la fuente de emisión más cercana probable que se podría encontrar, como es la actividad minera extractiva cordillerana.

El número de partículas finas (0,265  $\mu\text{m}$ ) observado en la ciudad de Santiago es 12,6 y 20,8 veces mayor que la medida en los glaciares Olivares Alfa y Bello, respectivamente

El número promedio de partículas finas (0,265  $\mu\text{m}$ ) observadas en el glaciar Olivares Alfa es 39% superior al glaciar Bello, las partículas de

0,615  $\mu\text{m}$  son 52% mayores en el glaciar Olivares Alfa y así en todos los tamaños de partícula medidos, el glaciar Olivares Alfa presenta una mayor cantidad de partículas respecto del glaciar Bello, antecedente que son coincidentes con el comportamiento de la concentración de material particulado atmosférico y que también podría ser explicado por la mayor distancia del glaciar Bello respecto de la fuente de emisión de partículas más probable y predominante en la zona

### Conclusiones Black Carbon

La concentración de BC medida en el glaciar Olivares Alfa presentó un promedio para el período de monitoreo de 294  $\text{ng}/\text{m}^3$ , alcanzando un máximo de concentración de 3.504  $\text{ng}/\text{m}^3$ .

El BC medido en el glaciar Bello presentó una concentración promedio para el período de monitoreo de 108  $\text{ng}/\text{m}^3$  alcanzando un máximo de concentración de 3.867  $\text{ng}/\text{m}^3$ . Cuando comparamos esta concentración de BC con sitios prístinos como la estación McMurdo (Antártica) y el monte Sonnblick (Alpes Austríacos) permite presumir que los niveles de concentración promedio de BC observados en el glaciar Bello son más bajos que los sitios de comparación y hay una diferencia estadísticamente significativa y menor que el BC medido en el glaciar Olivares Alfa (294  $\text{ng}/\text{m}^3$ ).

Finalmente, la concentración de BC medida en la ciudad de Santiago presentó un promedio para el período de monitoreo de 4.904  $\text{ng}/\text{m}^3$ , alcanzando un máximo de concentración de 28.880  $\text{ng}/\text{m}^3$ , siendo concordante con concentraciones encontradas en entornos urbanos de grandes ciudades como por ejemplo Viena, o Barcelona.

La concentración de Black Carbon observada en el glaciar Olivares Alfa presenta marcados ciclos diarios de aumento de concentración a partir de aproximadamente las 11 de la mañana hasta las 22 h. durante los primeros 6 días de muestreo. Estos ciclos de aumento de concentración son coincidentes con los ciclos de aumento de concentración de material particulado atmosférico medidos en el mismo glaciar.

Durante el período de monitoreo en el glaciar Olivares Alfa comprendido entre el 21 y 27 de Octubre, período en el cual se observaron los ciclos de aumento y disminución de BC y material particulado atmosférico, el viento predominante proviene desde la dirección noroeste-noreste, coincidiendo en gran parte con la dirección donde se encuentra la actividad minera extractiva de la zona (aproximadamente a 5 Km en dirección noroeste), mientras que en el período comprendido entre el 27

y 29 de Octubre, la dirección del viento cambia proviniendo mayoritariamente del este, lo cual es coincidente con la desaparición de los ciclos de aumento y disminución de la concentración de BC y material particulado atmosférico, medido en la estación de monitoreo instalada en el glaciar.

Existe una correlación significativa ( $>0,6$ ) entre BC y partículas hasta  $0,615 \mu\text{m}$  en el glaciar Olivares Alfa, sobre este tamaño de partículas, la correlación con BC disminuye, 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 corresponden a fuentes de combustión, lo que sumado a que tanto BC como partículas provendrían muy probablemente de la misma fuente (actividad minera extractiva) 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.

Los análisis estadísticos de significancia indican que la concentración de BC observada en el glaciar Olivares Alfa es significativamente distinta y mayor a la observada en el glaciar Bello.

Los resultados obtenidos en el análisis factorial permiten indicar que muy probablemente el Black Carbon (BC) observado en el glaciar Bello tendría un origen distinto al del material particulado atmosférico observado en el mismo glaciar. Por otra parte y dado que el BC del glaciar Bello tampoco se agrupa con el BC del glaciar Olivares Alfa en el análisis de conglomerados, permite inferir que el BC observado en el glaciar Bello muy probablemente no provendría de la misma fuente identificada en el glaciar Olivares Alfa.

No existe correlación significativa ( $>0,6$ ) entre BC y partículas finas en el glaciar Bello, indicando que el Black Carbon observado no está asociado al material particulado atmosférico medido en dicho glaciar y corroborando los resultados observados en el análisis factorial antes mencionado.

La concentración de BC medido en la ciudad de Santiago experimenta una ciclicidad diaria acorde a la observada en otras zonas urbanas del mundo, donde se produce una correlación y asociación directa con el material particulado emitido por fuentes de combustión comunes a estos dos contaminantes atmosféricos, destacando principalmente las fuente móviles, seguidas de las fijas

Las distribuciones de concentración de BC son distintas en los 3 sitios estudiados, por lo tanto se puede decir que la concentración de BC observada en Santiago es significativamente distinta y mayor que la observada en el glaciar Olivares Alfa, la cual a su vez es significativamente distinta y mayor a la concentración de BC observada en el glaciar Bello.

Para el BC medido en la ciudad de Santiago, existe una correlación significativa ( $>0,6$ ) entre BC y partículas sólo en el tamaño más fino capaz de medir con nuestro instrumento ( $0,265 \mu\text{m}$ ). A medida que aumentamos de tamaño de partículas atmosféricas, la correlación con BC disminuye, indicando que el Black Carbon observado en Santiago está asociado principalmente a partículas ultrafinas. Este hecho es un indicativo de que las fuentes de BC corresponden a fuentes de combustión principalmente de combustibles fósiles, lo que en Santiago puede ser atribuible fundamentalmente al parque vehicular de la ciudad.

El análisis multivariados de componentes principales indica que la concentración de BC de los 3 sitios estudiados (Santiago, glaciar Bello y glaciar Olivares Alfa) tiene una distribución distinta por lo que se puede inferir que deberían tener muy probablemente distintos orígenes.

Conclusiones pH, CE y iones.

En el glaciar Bello los valores de pH registrados en muestras de nieve superficial estuvieron enmarcados en un rango comprendido entre 7,46 y 8,02, presentando un promedio de  $7,82 \pm 0,28$ .

En el glaciar Olivares Alfa los valores de pH registrados en muestras de nieve superficial estuvieron comprendidos en un rango entre 7,75 y 8,32, presentando un promedio de  $8,06 \pm 0,41$ .

Entre los 2 glaciares en estudio, no existiría diferencia estadísticamente significativa en los valores de pH promedios obtenidos.

De acuerdo a los valores de pH registrados en los glaciares en estudio, se puede inferir que ellos no estarían influenciados por deposiciones atmosféricas ácidas y/o se estarían produciendo fenómenos de neutralización directamente en la atmósfera o en el proceso de deposición que neutralizarían el valor del pH, llevándolo a niveles básicos como los encontrados. Esto implica la presencia de iones neutralizantes en la atmósfera de estos glaciares que estarían generando este valor final de pH en la nieve.

Los valores de CE observados en el glaciar Bello en muestras de nieve superficial, estuvieron en un rango comprendido entre 3,0 y 7,2  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , presentando un promedio de  $5,2 \pm 2,74$ .

Los valores de CE observados en el glaciar Olivares Alfa registrados en muestras de nieve superficial estuvieron en un rango comprendido entre 8,8 y 14,1  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , presentando un promedio de  $11,2 \pm 0,41$ .

A pesar de que el valor promedio de la CE en el GOA es prácticamente el doble del medido en el GB, entre los 2 glaciares en estudio, no existen diferencias estadísticamente significativas en los valores de CE.

Las concentraciones promedio de los aniones en muestras de nieve superficial recolectadas en el glaciar Bello, variaron en el siguiente orden decreciente:  $\text{NO}_3^-$  (14,87  $\mu\text{Eq}/\text{L}$ ),  $\text{Cl}^-$  (13,30  $\mu\text{Eq}/\text{L}$ ) y finalmente  $\text{SO}_4^{2-}$  (6,88  $\mu\text{Eq}/\text{L}$ ). Los cationes variaron en el siguiente orden decreciente:  $\text{Ca}^{2+}$  (44,88  $\mu\text{Eq}/\text{L}$ ),  $\text{NH}_4^+$  (3,82  $\mu\text{Eq}/\text{L}$ ),  $\text{Mg}^{2+}$  (1,61  $\mu\text{Eq}/\text{L}$ ),  $\text{K}^+$  (1,45  $\mu\text{Eq}/\text{L}$ ) y finalmente  $\text{Na}^+$  (1,28  $\mu\text{Eq}/\text{L}$ ).

Las concentraciones promedio de los aniones en muestras de nieve superficial recolectadas en el glaciar Olivares Alfa, variaron en el siguiente orden decreciente:  $\text{SO}_4^{2-}$  (8,70  $\mu\text{Eq}/\text{L}$ ),  $\text{NO}_3^-$  (8,26  $\mu\text{Eq}/\text{L}$ ),  $\text{Cl}^-$  (7,42  $\mu\text{Eq}/\text{L}$ ). Los cationes variaron en el siguiente orden decreciente:  $\text{Ca}^{2+}$  (11,85  $\mu\text{Eq}/\text{L}$ ),  $\text{NH}_4^+$  (6,97  $\mu\text{Eq}/\text{L}$ ),  $\text{Na}^+$  (2,80  $\mu\text{Eq}/\text{L}$ ),  $\text{Mg}^{2+}$  (2,07  $\mu\text{Eq}/\text{L}$ ), y finalmente  $\text{K}^+$  (1,06  $\mu\text{Eq}/\text{L}$ ).

Entre los 2 glaciares en estudio, se encontró diferencia estadísticamente significativa en las concentraciones promedio, en nieve superficial para los iones  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Ca}^{2+}$ .

En el glaciar Bello y Olivares Alfa, el ion  $\text{Ca}^{2+}$  es el principal agente neutralizante, lo que podría sugerir la presencia de iones alcalinos tales como carbonatos presentes en la atmósfera y/o en la deposición seca y/o húmeda, los que estarían actuando como agentes neutralizantes, produciendo un aumento de la basicidad de la nieve.

El cálculo de los factores de enriquecimiento para los iones mayoritarios en ambos glaciares estudiados, señalan que estos se encuentran desde moderadamente enriquecido a extremadamente enriquecido en los iones estudiados, lo que indicaría que en el glaciar Bello y Olivares Alfa los iones son aportados por una fuente distinta a los aerosoles marinos u otra fuente natural como el suelo o muy probablemente polvo natural resuspendido por el viento.

En ambos glaciares estudiados, el ion más enriquecido corresponde a  $\text{Ca}^{2+}$ . En el caso del glaciar Bello le sigue el  $\text{K}^+$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  en orden decreciente de enriquecimiento. En el glaciar Olivares Alfa le sigue  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{K}^+$  en orden decreciente.

El sulfato no marino (SNM), corresponde a más de un 80% del total del  $\text{SO}_4^{2-}$  determinado en ambos glaciares estudiados, indicando que hay una importante fuente de sulfato que no proviene de esta fuente natural en estos glaciares. El cociente SNM/SM para el GOA es 2,6 veces mayor que el obtenido en el GB, indicando nuevamente la fuerte presencia de sulfato proveniente de un origen distinto del natural en este glaciar. Estas fuentes de SNM para el GOA podrían ser naturales y/o antropogénicas, respecto de esta última se podrían mencionar como probables fuentes: el  $\text{SO}_2$  producido por la combustión de combustibles fósiles generado en la actividad propia de extracción minera en la zona de estudio, o incluso la contribución de  $\text{SO}_2$  proveniente de fundiciones metalúrgicas instalada en las inmediaciones de la Región Metropolitana y cerca también de la ciudad de Santiago.

El análisis de componentes principales y jerárquicos (dendrograma), junto con la matriz de correlación de Pearson para la muestras de nieve superficial realizado para ambos glaciares indican para el glaciar Olivares Alfa una agrupación constituida por  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ , los cuales pueden ser atribuidos a aerosoles marinos de origen natural. Un segundo grupo constituido por  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , donde  $\text{SO}_4^{2-}$  suele ser atribuidos a fuentes antropogénicas, como las emisiones producto de la combustión de combustibles fósiles, quema de biomasa y carbón, fundiciones de cobre o industrias pirometalúrgicas. Un tercer grupo conformado solo por  $\text{NH}_4^+$ , y un último grupo formado por  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{Ca}^{2+}$ , donde  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NH}_4^+$  suelen ser atribuidos a fuentes antropogénicas, donde se incluyen las emisiones producto de la combustión de combustibles fósiles y quema de biomasa, emisiones de planteles de producción ganadera y fertilizantes naturales como artificiales. Finalmente,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Ca}^{2+}$  se asocian a un origen principalmente natural crustal, proveniente muy probablemente de polvo natural resuspendido por el viento.

En análisis anterior para el glaciar Bello genera dos agrupaciones, el primero constituido por  $\text{NH}_4^+$  y el segundo constituido por el resto de los aniones y cationes:  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{NO}_3^-$ . De ellos, los iones  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  pueden ser atribuidos a fuentes naturales, donde los 3 primeros son mayoritariamente representativos de fuentes cuyo origen serían muy probablemente los aerosoles marinos y los dos últimos tienen un origen principalmente crustal, provenientes

muy probablemente de polvo natural resuspendido por el viento. Por otra parte los iones  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{NO}_3^-$  suelen ser atribuidos a fuentes antropogénicas, donde se incluyen las emisiones producto de la combustión de combustibles fósiles y quema de biomasa, emisiones de planteles de producción ganadera y fertilizantes naturales como artificiales.

Se calculó la correlación existente entre los valores del balance iónico ( $\Delta\text{C}$ ) para cada pozo de nieve realizado en cada uno de los glaciares estudiados y se correlacionó con la concentración de calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ). La correlación obtenida para ambos glaciares fue buena ( $>0,64$  GOA y  $>0,76$  GB). Por lo que se puede inferir la presencia de carbonato/bicarbonato en la nieve, dando cuenta de que esta sería la especie química predominante en términos del equilibrio químico que determina el pH de la nieve, lo que se condice directamente con el hecho de haber encontrado para ambos glaciares que el FN mayor es para el ion  $\text{Ca}^{2+}$  quien es el contra ion positivo de las especies de carbonato/bicarbonato en la nieve y quien estaría basificando el valor de pH en este hidrometeoro.

El análisis fisicoquímico de los iones distribuidos en la calicata de nieve profunda (snow pit) realizadas en este estudio presenta una gran variabilidad en la concentración tanto de aniones como de cationes, la cual se puede explicar por distintos fenómenos como son los procesos de infiltración, fusión, congelamiento y recongelamiento, así como la percolación que afectan en mayor o menor medida a los distintos iones según sus características fisicoquímicas. En este estudio se pudo observar que las calicatas realizadas en ambos glaciares presentan un comportamiento muy similar al descrito en la literatura, con una gran movilidad de  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , con la excepción de  $\text{NH}_4^+$  quien manifiesta una gran presencia en los distintos horizontes de las calicatas estudiadas. Una posible explicación podría ser las cercanías de estos glaciares con zonas agrícolas donde la aplicación de fertilizantes naturales y/o artificiales, junto con otras actividades agropecuarias aportan  $\text{NH}_4^+$  en forma permanente durante todo el año. Produciéndose una deposición también permanente en los perfiles de nieve que se van acumulando, dejando estos iones  $\text{NH}_4^+$  atrapados en cada horizonte, aspecto que se ve reflejado en las altas y variables concentraciones de  $\text{NH}_4^+$  presentes en este estudio y en ambos glaciares. Por otra parte la correlación existente entre  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$ , en la nieve superficial, como en calicata encontrada en los sitios de monitoreo, hace presumir que todos estos iones tendrían un origen antropogénico, tal como se ha explicado anteriormente, reafirmando el origen antrópico del ion  $\text{NH}_4^+$ .

Finalmente en el estudio del comportamiento fisicoquímico de los iones distribuidos en la calicata de nieve profunda (snow pit) realizados tanto para el GB como para el GOA se puede observar lo siguiente:

Buena correlación ( $>0,5$ ) existente entre la concentración de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ , lo cual estaría de acuerdo con la especie postulada de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , como responsable de la concentración de estos iones en la nieve.

Que mayoritariamente la variación del pH a través de la calicata es dependiente de la variación de la concentración de  $\text{Ca}^{2+}$  (ion neutralizador).

Que existe una baja correlación ( $R^2=0,1$ ) entre la concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$  y el pH, dando cuenta este anión no está asociado con el pH de los distintos estratos de la calicata, o que ha sido neutralizado por el ion  $\text{Ca}^{2+}$  como se explicó en el punto anterior.

Que la variación de la conductividad eléctrica (CE) respecto de la concentración total de iones presenta una correlación  $R^2$  mayor a 0,5, lo que indica una buena concordancia entre la CE y la carga iónica de cada estrato de la calicata, como debiera esperarse.

Que se puede observar una buena correlación ( $> 0,93$ ) entre la concentración total de aniones y la concentración total de cationes, lo que está de acuerdo al principio de electroneutralidad, en donde debiera esperarse una concentración aproximadamente igual entre aniones y cationes, aspecto que además valida la calidad de los análisis, como ocurre en este estudio.

## Conclusiones Elementos

En la nieve superficial y profunda de cada Glaciar se determinó la concentración de los elementos traza definidas en el estudio; aluminio (Al), hierro (Fe), cobre (Cu), zinc (Zn), arsénico (As), cadmio (Cd), plomo (Pb), mercurio (Hg), cromo (Cr) y antimonio (Sb).

### ***Glaciar Bello***

Los resultados para la concentración de Cu observada en nieve superficial en el glaciar Bello muestran que es 1,3 veces menor que la encontrada en nieve superficial en la antártica y 190 veces menor que la observada en el monte Everest; sin embargo la concentración de Zn en el glaciar Bello es 18 veces superior a la Antártica y 145 veces menor

que el monte Everest. Esto indica que si bien los niveles de concentración de los demás elementos observados en nieve superficial en el glaciar Bello son comparables para algunos elementos a la concentración encontrada en sitios remotos como la Antártica, de todas formas existe presencia de elementos contaminantes.

El cálculo de los Factores de enriquecimiento de elementos traza en nieve superficial indica que Cu, Zn y Hg se encuentran altamente enriquecidos en nieve superficial, indicando una fuerte influencia antropogénica en la concentración de estos elementos en el glaciar Bello. Por otro lado, As se encuentra moderadamente enriquecido y Fe no se encuentra enriquecido, indicando que es de origen mayoritariamente crustal.

La concentración promedio de elementos traza varía heterogéneamente en profundidad en las calicatas realizadas en el glaciar Bello, dando cuenta de su movilidad a través del snow pack.

Se calculó la tasa de deposición de elementos anual de cada elemento asumiendo que el total de la calicata corresponde a la nieve caída y acumulada durante un año. Según esto, la tasa de deposición de Cu en el glaciar Bello es 1,4 veces mayor que aquella encontrada en glaciares como Nakanoto (Deposición Húmeda) y 3,6 veces mayor que Reston (Deposición Húmeda), ambos sitios de comparación son considerados como background, por lo que se podría decir que la deposición de Cu en el glaciar Bello podría ser considerada como contaminación. La misma situación se presenta para Fe y Al, cuyas tasas de deposición son 7,8 y 3,2 veces mayores que Reston. Sin embargo las tasas de deposición de Zn y Pb son menores a las observadas en los mismos sitios background de comparación, por lo que las tasas de deposición de estos últimos elementos observadas en el glaciar Bello podrían ser consideradas como naturales.

El cálculo de los Factores de Enriquecimiento de elementos traza en nieve profunda (calicata) del glaciar Bello indican que Cu, Zn, As, Pb y Hg se encuentran moderadamente enriquecidos, mientras que Cd, Fe y Al no se encuentran enriquecidos.

El análisis de conglomerados realizado a los valores de concentración de elementos traza en nieve profunda del glaciar Bello, agrupa los elementos en 2 clúster, el primero agrupa Cd, Cu, As, Fe y Al, elementos que tienen origen antropogénico y crustal. El segundo clúster asocia Zn y Pb indicando que su origen es común y muy probablemente provienen de actividades de tipo antropogénicas.

## *Glaciar Olivares Alfa*

La concentración de todos los elementos estudiados en nieve superficial es significativamente distinta y superior en el glaciar Olivares Alfa respecto del glaciar Bello, por ejemplo, la concentración de Cu y As en nieve superficial del glaciar Olivares Alfa es 194 y 88 veces superior a la del glaciar Bello respectivamente.

El cálculo de los Factores de Enriquecimiento de elementos traza en nieve superficial del glaciar Olivares Alfa indica que Cu, As y Sb se encuentran altamente enriquecidos, indicando una fuerte influencia antropogénica en la concentración de estos elementos en el glaciar Olivares Alfa. Por otro lado, Zn, Pb y Hg se encuentran moderadamente enriquecidos y Fe no se encuentra enriquecido, indicando que sería muy probablemente de origen mayoritariamente crustal.

De todas formas, al calcular los FE de elementos traza en nieve superficial en el glaciar Olivares Alfa se puede afirmar que existe una fuerte influencia de tipo antropogénica sobre la concentración de Cu, As y Sb, este antecedente, junto con las mediciones de Iones, Material Particulado y Black Carbon, complementados con los análisis de los datos meteorológicos del sector, permiten inferir que la fuente de contaminación que está afectando al glaciar Olivares Alfa correspondería muy probablemente a la actividad minera extractiva cercana a éste.

La concentración de elementos traza varía heterogéneamente en profundidad en las calicatas realizadas en el glaciar Olivares Alfa, dando cuenta de su movilidad a través del snow pack.

Al igual que en el GB, se calculó tasa de deposición de elementos anual de cada elemento asumiendo que el total de la calicata corresponde a la nieve caída y acumulada durante un año. Según esto, la tasa de deposición de Cu en el glaciar Olivares Alfa es 5,0 veces mayor que en el glaciar Bello, así como Cu, el resto de los elementos a excepción de As, Fe y Al, presentaron tasas de deposición mayores en el glaciar Olivares Alfa respecto del glaciar Bello.

La concentración de Cu, Cr, Zn, Pb, Hg y Sb es significativamente distinta y mayor en el glaciar Olivares Alfa respecto del glaciar Bello. La concentración de As no presentó diferencias significativas entre ambos glaciares, mientras que la concentración de Fe y Al es significativamente distinta y menor en el glaciar Olivares Alfa, respecto del glaciar Bello.

De la misma manera, los resultados del cálculo de los Factores de Enriquecimiento indican una fuerte influencia antropogénica para Cu, Zn, As, Cd, Sb y Hg en el glaciar Olivares Alfa, todos estos elementos asociados habitualmente a actividades mineras.

El análisis de conglomerados realizado a la concentración de elementos medidos en calicatas (snow pit) realizadas en el glaciar Olivares Alfa, agrupa los elementos en 2 clúster, el primero agrupa Cu, Sb, As, Fe y Al, elementos que tienen origen antropogénico y crustal. El segundo clúster asocia Zn, Hg y Pb indicando que su origen es común y muy probablemente provienen de actividades antropogénicas. Por último Cr y Cd se asocian en un clúster aparte, no pudiéndose determinar su origen utilizando esta herramienta estadística.

### ***Ciudad de Santiago***

El análisis de elementos traza realizado a las muestras de material particulado atmosférico de la ciudad de Santiago indica que Sb es el elemento de mayor concentración (374,99 ng/m<sup>3</sup>), seguido de Cu, Fe y Zn. Antimonio (Sb) es un metaloide que ha sido asociado a emisiones producidas por el tráfico vehicular, lo que explica su alta concentración urbana, debido al hecho de que la estación de monitoreo de Parque O´Higgins se encuentra contigua a una importante carretera con alto flujo vehicular.

Al analizar las distribuciones de elementos en los sitios de estudio, se observa claramente que en la ciudad de Santiago Sb es predominante (45%) por sobre el resto de los elementos determinados, le siguen Cu (31%) y Zn (16%). Esta distribución es distinta a la observada en el glaciar Bello donde Zn es el elemento mayoritario (59%) seguido de Cu (30%) y Cr (7%). Por otra parte en el glaciar Olivares Alfa, Cu es el elemento mayoritario (86%) dando cuenta de su cercanía a la fuente de emisión, seguido de Zn (9%). El análisis de las distribuciones de elementos en los 3 sitios de estudio da cuenta de que son distintos entre sí, sin embargo no se puede descartar la influencia de la actividad minera cordillerana proveniente de las cercanías del Glaciar Olivares Alfa, sobre el glaciar Bello debido a los antecedentes de dirección de viento, albedo, iones y concentración de partículas, que si indican una relación con esta fuente de emisión en cordillera.

## VII BIBLIOGRAFIA

1. Aamaas, B., C.E. Boggild, F. Stordal, T. Berntsen, K.I.M. Holmen and J. Strom. 2011. Elemental carbon deposition to Svalbard snow from Norwegian settlements and long-range transport. *Tellus B*, doi: 10.1111/j.1600-0889.2011.00531: 1-12.
2. Ali K, Sonbawane S., Chate D, Siingh D, Rao P., Safai P and Budhavant K. *J. Earth Syst. Sci.* 2010, 119, No. 6, pp. 753–762
3. B. Mason. (1960). *Principles of geochemistry*. New York: John Wiley & Sons Inc.
4. Bales, R.C., R.E. Davis and D.E. Stanley. 1989. Ion elution through shallow homogeneous snow. *Water Resour. Res.*, 25(8), 1869–1877.
5. Báez A., Belmont R., García R., Padilla H., Torres M, **“Chemical composition of rainwater collected at a southwest site of Mexico City, Mexico”, *Atmospheric Research 2007, Vol,86, 61-75***
6. Barrie, L.A., Fisher, D., Koerner, R.M., 1985. Twentieth century trends in Arctic air pollution revealed by conductivity and acidity observations in snow and ice in the Canadian high Arctic. *Atmospheric Environment* 19 (12), 2055–2063
7. Benn and Evans, 1998. *Glaciers and Glaciation*. Arnold, Londres, 734 pp.
8. Bolius D, Schwikowski M, Jenk T, Gauggeler H W , Casassa G, Rivera A. *Annals of Glaciology* 2006, 43, 14-22
9. 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.
10. Braithwaite, R., 2002. Glacier mass balance: the first 50 years of international monitoring. *Progress in Physical Geography* 26(1), 76-95.
11. Brimblecombe, P., M. Tranter, P.W. Abrahams, I. Blackwood, T.D. Davies and C.E. Vincent. 1985. Relocation and preferential elution of acidic solute through the snowpack of a small, remote, high-altitude Scottish catchment. *Ann. Glaciol.*, 7, 141–147.
12. Carrasco, J., G. Casassa and J. Quintana. 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.
13. Carrasco, J., R. Osorio and G. Casassa. 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.
14. Casassa, G., 1995. Glacier inventory in Chile: current status and recent glacier variations. *Annals of Glaciology*, 21, 317-322.
  15. Casassa, G., A. Rivera, M. Aniya & R. Naruse (2000): "Características glaciológicas del Campo de Hielo Patagónico Sur" *Anales del Instituto de la Patagonia, Serie Ciencias Naturales*, 28:5-22.
  16. Casassa, G., Rivera A. and Carrasco J., 2000b. Glacier variations in the Southern Patagonia Icefield and their Relation with Climate. En: *Sixth International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography*, 312-313.
  17. Casassa, G., Rivera A., Aniya M. and Naruse R, 2000a. Características glaciológicas del Campo de Hielo Patagónico Sur. *Anales Instituto Patagonia, Serie Ciencias Naturales*, 28, 5-22.
  18. CECs (Centro de Estudios Científicos). 2009. *Estrategia Nacional de Glaciares*. Dirección General de Aguas, S.I.T. N° 205, 289 p.
  19. Cereceda-Balic F, M.R. Palomo-Marín, E. Bernalte, V. Vidal, J. Christie, X. Fadic, J.L. Guevara, C. Miro, E. Pinilla Gil. Impact of Santiago de Chile urban atmospheric pollution on anthropogenic traceelements enrichment in snow precipitation at Cerro Colorado, Central Andes. *Atmospheric Environment* 47 (2012) 51-57.
  20. De Angelis, M., Barkov, N.I., Petrov, V.N., 1987. Aerosol concentrations over the last Climate Cycle (160kyr) from an Antarctic Ice Core. *Nature* 325, 318-321.
  21. Doherty, S.J., Warren S.G., Grenfell T.C., Clarke A.D. and Brandt R.E. 2010. Light-absorbing impurities in Arctic snow. *Atmospheric chemistry and Physics*, 10(3), doi: 10.5194/acp-10-11647-2010: 11647-11680
  22. Flanner, M.G., C.S. Zender, J.T. Randerson and P.J. Rasch. 2007. Present-day climate forcing and response from black carbon in snow. *Journal of Geophysical Research*, 112(D11202), doi: 10.1029/2006JD008003.
  23. Gabrieli, L. Carturan, P. Gabrielli, N. Kehrwald, C. Turetta, G. Cozzi, A. Spolaor, R. Dinale, H. Staffler, R. Seppi, dalla Fontana G., Thompson L., and Barbante C. 2011, *Atmos. Chem. Phys.* 11, 8087-8102
  24. Gramsch E., Cereceda-Balic F., Oyola P., von Baer D. Examination of pollution trends in Santiago de Chile with cluster analysis of PM10 and Ozone data. *Atmospheric Environment* 40 (2006) 5464-5475.

25. Grigholm, B., Mayewski, Paul., Kurbatov, Andrei V., Casassa G., Staeding, Contreras A., Handley, M., Sneed, S. and Introne D., *Journal of Glaciology*, 2009, 55, 193, 769-776.
26. Hammer, C.U., 1980. Acidity of polar ice cores in relation to absolute dating, past volcanism and radio-echoes. *Journal of Glaciology* 25 (93), 359–372 Herron, M.M., 1982. Impurity sources of F-, Cl-, NO<sub>3</sub>- and SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> in Greenland and Antarctic precipitation. *Journal of Geophysical Research* 87, 3052–3060.
27. Hewen Niu, Yuanqing He, Xi Xi Lu, Jie Shen, Jiankuo Du, Tao Zhang, Tao Pu, Huijuan Xin, Li Chang. Chemical composition of rainwater in the Yulong Snow Mountain region, Southwestern China. *Atmospheric Research* 144 (2014) 195–206.
28. Hewitt, A.D., J.H. Cragin and S.C. Colbeck. 1991. Effects of crystal metamorphosis on the elution of chemical species from snow. *Proceedings of the 48th Annual Eastern Snow Conference*. Guelph, Ont., Eastern Snow Conference, 1–10.
29. Hempel, Ludwig, Thyssen, Franz, Gundestrup, Niels, Clausen, Henrik B., Miller, Heinz, 2000. A comparison of radio-echo sounding data and electrical conductivity of the GRIP ice core. *Journal of Glaciology* 46 (154), 369–374.
30. Herron, M.M., 1982. Impurity sources of F-, Cl-, NO<sub>3</sub>- and SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> in Greenland and Antarctic precipitation. *Journal of Geophysical Research* 87, 3052–3060.
31. Hou, S. and D. Qin. 2002. The effect of postdepositional process on the chemical profiles of snow pits in the percolation zone. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 34(2), 111–116.
32. IMPUESTOS AL CARBONO. Octubre del 2010 Richard Arguello y Francisco Salazar. *Mercados Energéticos, Escuela de Ingeniería Mecánica. Tesis. P. Universidad Católica de Chile.*
33. Iizuka, Y., M. Igarashi, K. Kamiyama, H. Motoyama and O. Watanabe. 2002. Ratios of Mg<sup>2+</sup>/Na<sup>+</sup> in snowpack and an ice core at Austfonna ice cap, Svalbard, as an indicator of seasonal melting. *J. Glaciol.*, 48(162), 452–460.
34. Johannessen, M. and A. Henriksen. 1978. Chemistry of snow meltwater: changes in concentration during melting. *Water Resour. Res.*, 14(4), 615–619.
35. Jouzel, J., Petit, J.R., Raynaud, D., 1990. Palaeoclimatic information from Ice Cores: the Vostok records. *Earth Sciences* 81, 349–355.
36. Kang, S; Qin, D; Mayewski, P; and Sneed, S. *Journal of Glaciology* , 2002, 48, 161, 337-339.
37. Kaspari, S.D., Schwikowski, M. Gysel, M.G. Flanner, S. Kang, S. Hou and P.A. Mayewski. 2011. Recent increase in black

- carbon concentrations from a Mt. Everest ice core spanning 1860-2000 AD. *Geophysical Research Letters*, 38(L04703).
38. Kimitaka, Kawamura, Ikuko, Suzuki, Yoshiyuki, Fujii, Okitsugu, Watanabe, 1996. Ice core record of fatty acids over the past 450 years in Greenland. *Geophysical Research Letters* 23 (19).
  39. Li X, Li Z, Ding Y, Liu S, Zhao Z, Luo L, Pang H, Li C, Li H, You X, Wan F. (2007). Seasonal variations of pH and electrical conductivity in a snow-firn pack on Glacier No. 1, eastern Tianshan, China. *Cold Regions Science and Technology* 48 55–63
  40. Lliboutry, 1956. Nieves y glaciares de Chile. *Fundamentos de Glaciología*. Ediciones de la Universidad de Chile, Santiago, 471 pp
  41. Luo, H. 1983. Hydrochemical features of the Glacier No. 1 in the source region of U'' ru'' mqi River, Tian Shan. *J. Glaciol. Geocryol.*, 5(2), 55–64. [In Chinese with English abstract.
  42. Mayewski, P.A., Meeker, L.D., Morrison, M.C., Twicker, M.S., Whitlow, S.L., Ferland, K.K., Meese, D.A., Legrand, M.R., **Steffensen, J.P., 1993. Greenland ice core "signal" characteristics: an expand view of climate change.** *Journal of Geophysical Research* 98 (12), 839–847.
  43. Mayewski, P.A., Meeker, L.D., Whitlow, S., Twicker, M.S., 1994. Changes in atmospheric circulation and ocean ice cover over the North Atlantic during the last 41000Years. *Science* 263 (17), 47–51.
  44. Mayewski, P.A., Twiker, M.S., Whitlow, S.L., 1996. Climate change during the last deglaciation in Antarctica. *Science* 272 (16), 36–38.
  45. Miller, N.J y Miller, J.C. *Estadística y Quimiometría para Química Analítica*. Pearson Educación S.A. Madrid 2002. 278 p.
  46. Ming, J., C. Xiao, H. Cachier, D. Qin, X. Qin, Z. Li and J. Pu. 2009. Black Carbon (BC) in the snow of glaciers in west China and its potential effects on albedos. *Atmospheric Research*, 92(1),
  47. Mihajlidi-**Zelić, I. D.**-T. (2006). Contribution of marine and continental aerosols to the content of the central Mediterranean. *Science of the Total Environment*, 441–451
  48. Millar, D.H.M., 1982. Acidity levels in ice sheets from radio echosounding. *Annals of Glaciology* 3, 199–203.
  49. Oerlemans, 2001. *Glaciers and Climate Change*. Wilco, Amsterdam, 148 pp
  50. Orozco. (2003). *Contaminación Ambiental: Una visión desde la Química*. Madrid: Thompson.
  - 51.

52. Ostrem, G. & M. Brugman, 1991. Glacier Mass-Balance Measurements. A manual for field and office work. Norwegian Water Resources and Energy Administration, Saskatchewan, 224 pp.
53. Paul F., H. Machguth and A. Käab. On the impact of glacier albedo under conditions of extreme glacier melt: the summer of 2003 in the Alps. EARSel eProceedings 4, 2/2005.
54. P. Gabrielli, G. Cozzi, S. Torcini, P. Cescon, C. Barbantea. Trace elements in winter snow of the Dolomites (Italy): A statistical study of natural and anthropogenic contributions. Chemosphere 72 (2008) 1504–1509.
55. Paterson, W.S.B. 1994. The physics of glaciers. Third edition. Oxford, etc., Elsevier.
56. 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.
57. Rivera, A. and. Acuña C, 1997. Variaciones recientes de Glaciares en la macrozona central de Chile". En: XVIII Congreso Nacional de Geografía, 293-304
58. Rivera, A., C. Acuña, G. Casassa and F. Bown, 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.
59. Rivera, A., J.G. Corripio, B. Brock, J. Clavero, J. Wendt. 2008. Monitoring ice-capped active Volcan Villarrica, southern Chile, using terrestrial photography combined with automatic weather stations and global positioning systems. Journal of Glaciology, 54(188), 920-930.
60. Rivera, A., Casassa, G; Acuña C. and Lange, H. 2000a. Variaciones recientes de glaciares en Chile. Revista de Investigaciones Geográficas, 34, 29-60.
61. Sanhueza, E.; Santana, M.; Donoso, L, y Pacheco, M. 2005. Química atmosférica en la Gran Sabana III. Composición iónica y características ácido básicas de las lluvias. Interciencia 30: 618-622.
62. Shumskii, P.A. 1964. Principles of structural glaciology. New York, Dover Publications.
63. Sutherland. (2000). Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu , Hawaii. Environmental Geology, 611–27.
64. S. Dragovic, N. Mihailovic, B. Gajic. Heavy metals in soils: Distribution, relationship with soil characteristics and radionuclides and multivariate assessment of contamination sources. Chemosphere 72 (2008) 491–495.

65. Schwikowski, M. and Eichler A. 2010. Alpine Glaciers as Archives of Atmospheric Deposition. In: Bunde (ed.), U. Alpine Waters. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag: 141-150.
66. 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. *Journal of Geophysical Research*, 104 (D11).
67. Taylor, K.C., Hammer, C.U., Alley, R.B., Clausen, H.B., Dahl-Jensen, D., Gow, A.J., Gundestrup, N.S., Kipfstuhl, J., Moore, J.C., Waddington, E.D., 1993. Electrical conductivity measurements from the GISP2 and GRIP Greenland ice cores [J]. *Nature* 366, 549–552.
68. Tranter, M., S. Tsiouris, T.D. Davies and H.G. Jones. 1992. Laboratory investigation of the leaching of solute from snowpack by rainfall. *Hydrol. Process.*, **6**(2), 169–178.
69. Unmesh Chandra Panda, Sanjay Kumar Sundaray, Prasant Rath, Binod Bihari Nayak, Dinabandhu Bhatta. Application of factor and cluster analysis for characterization of river and estuarine water systems – A case study: Mahanadi River (India). *Journal of Hydrology* (2006) 331, 434–445.
70. Wake, C. P., P. A. Mayewski and M.J. Spencer. 1990. A review of central Asian glaciochemical data. *Ann. Glaciol.*, 14, 301–306.
71. Warren S. 1984 Impurities in snow: effects on albedo and snowmelt. (review) *Annals of Glaciology* 5
72. 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
73. Wei-Zhen Lu, Hong-Di He, Li-yun Dong. Performance assessment of air quality monitoring networks using principal component analysis and cluster analysis. *Building and Environment* 46 (2011) 577e583.
74. Williams, M.W., K.A. Tonnessen, J.M. Melack and D. Yang. 1992. Sources and spatial variation of the chemical composition of snow in the Tien Shan, China. *Ann. Glaciol.*, 16, 25–32
75. Wolff, E.W., Peel, D.A., 1985. The record of global pollution in polar snow and ice. *Nature* 313, 535–540.
76. Wolff, E.W., Moore, J.C., Clausen, H.B., 1995. Long-term changes in the acid and salt concentrations of the GRIP Greenland ice core from electrical stratigraphy [J]. *Journal of Geophysical Research* 100, 16,249–16,264.
77. Zhu G, Pu T, He Y, Shi P, Zhang T. *Environ Earth Sci*. DOI 10.1007/s12665-012-1928-0

78. Zhongqin Li, Ross Edwards, Mosley-Thompson, Feiteng Wang, Zhibao Dong, Xiaoni You, Huilin Li, Chuanjin Li, Yuman Z. Seasonal variability of ionic concentrations in surface snow and elution processes in snow-firn packs at the PGPI site on Urumqi glacier No. 1, eastern Tien Shan, China 2006. *Annals of Glaciology* 43.

## VIII ANEXOS

1. Ver documento "Ingersoll\_etal2009\_ROMNSnowChemistryProtocol\_FINAL\_Web" en CD.
2. Ver documento "reference-equivalent-methods-list" en CD.