



UNIVERSIDAD DE CHILE

PROGRAMA INTERFACULTADES

MAGÍSTER EN GESTIÓN Y PLANIFICACIÓN AMBIENTAL

**EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LA PENÍNSULA FILDES,
ISLA REY JORGE, ANTÁRTICA
BIOMONITOREO DE LÍQUENES COMO HERRAMIENTA DE GESTIÓN**

**Tesis para optar al Grado de Magíster en
Gestión y Planificación Ambiental**

ROMINA TAPIA ESPINOZA

Directora de Tesis

DRA. MARGARITA PRÉNDEZ BOLÍVAR

Santiago, Chile

2011



UNIVERSIDAD DE CHILE
Programa Interfacultades
Magíster en Gestión y Planificación Ambiental

**EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LA PENÍNSULA FILDES,
ISLA REY JORGE, ANTÁRTICA
BIOMONITOREO DE LÍQUENES COMO HERRAMIENTA DE GESTIÓN**

Romina Tapia Espinoza

Directora de Tesis:

Dra. Margarita Préndez

Comisión de Evaluación:

Presidente:

Dr. Italo Serey

Profesores:

Dr. Jaime Hernández

MCs. Hugo Peralta

Santiago, Chile

2011

Dedicatoria:
A Gustavo, a Javiera y a mis Padres

AGRADECIMIENTOS

Mis sinceros agradecimientos para aquellos que contribuyeron a la elaboración de mi tesis de magister y a quienes me entregaron su apoyo en estos años de estudio, especialmente:

Al Programa de Formación de Capital Humano Avanzado de la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica, CONICYT, del Gobierno de Chile por la beca de estudios otorgada, financiamiento que permitió la realización del programa de Magíster en Gestión y Planificación Ambiental de la Universidad de Chile.

Al Centro Nacional del Medio Ambiente CENMA, por su apoyo técnico e instrumental especialmente al equipo a cargo de la Dra. Isel Cortés.

A mi Directora de Tesis Dra. Margarita Préndez por brindarme la oportunidad de realizar esta investigación y apoyarme con sus conocimientos y experiencia.

Al Dr. Jaime Hernández y María Paz Acuña por los conocimientos entregados en Geomática contribuyendo a la realización de este estudio.

A Edith Flores del Instituto Antártico Chileno por atender siempre mis consultas.

A mis profesores y compañeros del magister quienes permanecerán siempre en mi mente y en mi corazón.

A Catalina Garay y Don Sergio por su apoyo y buena voluntad siempre.

A mis profesores de pregrado por su constante apoyo, especialmente a Ernesto Cortés, Alejandro Aron, Rodrigo Gallardo y Carlos Vásquez.

A Carolina Barra por aportar información y responder mis consultas en los inicios de esta investigación.

Al grupo de alumnos tesistas del Laboratorio de Química de la Atmósfera que dirige mi Directora de Tesis con quienes compartimos inquietudes y experiencias en la elaboración y desarrollo de nuestras investigaciones, especialmente a Virginia, Rosemary, Nicolás, Luciano y Jesús.

A Virginia Carvajal con quien compartimos desde el comienzo del magister por su amistad y constante apoyo.

A Gustavo por su amor y comprensión, por apoyarme e incentivarme a seguir adelante con mis proyectos.

A mis padres Luis y Mariana por su amor y dedicación conmigo, por enseñarme el gusto de aprender constantemente.

A Javiera mi hermana por su cariño y apoyo constante.

INDICE DE CONTENIDOS

1. Introducción.....	1
2. Hipótesis y objetivos.....	3
2.1 Hipótesis.....	3
2.2 Objetivo General.....	3
2.3 Objetivos Específicos.....	3
3. Marco Teórico.....	4
3.1 Antecedentes generales.....	4
3.2 Península Fildes, Isla Rey Jorge, Antártica.....	5
3.3 Legislación Antártica.....	8
3.4 Efectos de la presencia humana en la Antártica.....	9
3.5 Uso de líquenes como organismos biomonitores.....	10
3.5.1 Otras aplicaciones de los líquenes.....	13
4. Materiales y Métodos.....	14
4.1 Área de Estudio.....	14
4.2 Muestreo.....	14
4.2.1 Toma de muestras de líquenes.....	14
4.2.2 Toma de muestras de suelo.....	15
4.3 Procedimiento analítico líquenes.....	17
4.4 Procedimiento analítico suelos.....	18
4.5 Tratamiento de los datos.....	19
4.6 Análisis de relaciones espaciales.....	20
4.7 Propuesta de medidas de gestión.....	21
5. Resultados y Discusión.....	22
5.1 Concentración de elementos químicos en líquenes.....	21
5.2 Concentración de elementos químicos en suelos.....	24
5.3 Factores de Enriquecimiento (FE).....	25
5.3.1 Factores de Enriquecimiento para los líquenes del año 1997.....	25
5.3.2 Factores de Enriquecimiento para los líquenes del año 2006.....	26

5.3.3 Factores de Enriquecimiento para los líquenes del año 2008.....	28
5.3.4 Factores de Enriquecimiento para los líquenes del año 2010.....	29
5.3.5 Factores de Enriquecimiento para los elementos seleccionados.....	31
5.4 Distribución espacial de las concentraciones de los elementos Mo, Ni, Pb y Zn.....	33
5.5 Fuentes posibles de los elementos Mo, Ni, Pb y Zn en la atmósfera Antártica.....	38
5.6 Medidas de gestión para la prevención o disminución de la contaminación atmosférica en la península Fildes, Isla Rey Jorge, Antártica.....	40
5.6.1 Medidas de Eficiencia Energética y uso de Energías Renovables No Convencionales.....	41
5.6.2 Medidas de gestión de residuos.....	45
5.6.3 Consideraciones generales.....	47
6. Conclusión.....	48
7. Recomendaciones.....	50
8. Bibliografía.....	52
ANEXO. Concentraciones de líquenes y suelos para los años estudiados expresadas en (mg/kg).....	62
Cuadro 1. Concentraciones de líquenes en mg/kg para el año 1997 por punto de muestreo.....	62
Cuadro 2. Concentraciones de líquenes en mg/kg para el año 2006 por punto de muestreo.....	62
Cuadro 3. Concentraciones de líquenes en mg/kg para el año 2008 por punto de muestreo.....	63
Cuadro 4. Concentraciones de líquenes en mg/kg para el año 2010 por punto de muestreo.....	63
Cuadro 5. Concentraciones de suelo en mg/kg para el año 1997 por punto de muestreo.....	64
Cuadro 6. Concentraciones de suelo en mg/kg para el año 2006 por punto de muestreo.....	64

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Bases científicas temporales y permanentes de la península Fildes.....	6
Cuadro 2. Consumo anual aproximado de combustible diesel en las bases científicas de la península Fildes.....	7
Cuadro 3. Concentraciones de algunos elementos químicos y sus niveles umbrales en diferentes líquenes.....	13
Cuadro 4. Programa de digestión para líquenes.....	17
Cuadro 5. Programa de concentración de muestras.....	17
Cuadro 6. Programa de digestión para suelo.....	18
Cuadro 7. LD y LC para la lectura de elementos en ICP - OES.....	19
Cuadro 8. Concentraciones promedio y desviación estándar poblacional en líquenes, expresadas en mg/kg para los años 1997, 2006, 2008 y 2010.....	23
Cuadro 9. Concentraciones máximas, expresadas en mg/kg en la especie <i>Usnea aurantiaco-ater</i> por año de muestreo y concentración máxima recomendada por el USDA Forest Service para el liquen <i>Usnea spp.</i>	24
Cuadro 10. Concentraciones promedio y desviación estándar poblacional en suelo de los años 1997 y 2006 de la península Fildes, expresadas en mg/kg y en la corteza terrestre.....	25
Cuadro 11. Concentraciones promedio obtenidas en el año 2010 en el liquen <i>Usnea aurantiaco-ater</i> comparadas con las concentraciones promedio obtenidas en líquenes antárticos por otros investigadores. Valores expresados en mg/kg.....	38

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación geográfica península Fildes, Isla Rey Jorge, Antártica.....	14
Figura 2. Liqueen antártico, <i>Usnea aurantiaco-ater</i>	15
Figura 3. Península Fildes, Isla Rey Jorge, Antártica. Datum WGS 84, Huso 21 S.....	16
Figura 4. Modelo con los principales geoprocesos programa Arc Gis 9.3.....	20
Figura 5. Factores de enriquecimiento para líquenes del año 1997 utilizando el valor de corteza terrestre (Mason, 1966).....	26
Figura 6. Factores de enriquecimiento para los líquenes del año 1997 utilizando los valores de suelo promedio para la península Fildes del mismo año.....	26
Figura 7. Factores de enriquecimiento para líquenes año 2006 utilizando como referencia los valores de corteza terrestre (Mason, 1966).....	27
Figura 8. Factores de enriquecimiento para líquenes del año 2006 utilizando como referencia los valores de suelo promedio para la península Fildes en el año 1997.....	27
Figura 9. Factores de enriquecimiento para líquenes del año 2006 utilizando como referencia los valores de suelo promedio para la península Fildes en el mismo año.....	28
Figura 10. Factores de enriquecimiento para líquenes del año 2008 utilizando como referencia los valores de corteza terrestre (Mason, 1966).....	28
Figura 11. Factores de enriquecimiento para líquenes del año 2008 utilizando como referencia los valores de suelo promedio para la península Fildes del año 1997.....	29
Figura 12. Factores de enriquecimiento para líquenes del año 2008 utilizando como referencia los valores de suelo promedio para la península Fildes para el año 2006.....	29
Figura 13. Factores de enriquecimiento para líquenes del año 2010 utilizando como referencia los valores de corteza terrestre (Mason, 1966).....	30
Figura 14. Factores de enriquecimiento para líquenes del año 2010 utilizando como referencia los valores de suelo promedio de la península Fildes para el año 1997.....	30
Figura 15. Factores de enriquecimiento para líquenes del año 2010 utilizando como referencia los valores de suelo promedio de la península Fildes para el año 2006.....	31
Figura 16. Factores de enriquecimiento para los elementos Mo, Ni, Pb y Zn, con respecto a corteza, suelo promedio y suelo por punto de muestreo en la península Fildes para el año 1997.....	32
Figura 17. Factores de enriquecimiento para los elementos Mo, Ni, Pb y Zn, con respecto a corteza, suelo promedio y suelo por punto de muestreo de la península Fildes para el año 2006.....	33

Figura 18. Concentraciones de Mo en líquenes para los años 1997 y 2010 expresadas en mg/kg.....34

Figura 19. Concentraciones de Ni en líquenes para los años 1997 y 2010 expresadas en mg/kg.....34

Figura 20. Concentraciones de Pb en líquenes para los años 1997 y 2010 expresadas en mg/kg.....35

Figura 21. Concentraciones de Zn en líquenes para los años 1997 y 2010 expresadas en mg/kg.....36

Figura 22. Concentraciones de de (a) Mo, (b) Ni, (c) Pb, y (d) Zn en mg/kg para las muestras de líquenes estudiadas los años 1997, 2006, 2008 y 2010.....37

RESUMEN

La Antártica se considera un laboratorio natural de investigación debido a su clima, geografía, flora y fauna, donde la conservación de su ambiente se vigila a través del Protocolo de Madrid; sin embargo, existen problemas locales de contaminación asociados principalmente a actividades humanas como investigación, turismo y pesca; en particular existen impactos negativos para la calidad del aire por el uso de combustibles fósiles.

El objetivo de este estudio fue evaluar la evolución de la calidad del aire por elementos químicos en la península Fildes, Isla Rey Jorge, Antártica, entre los años 1997 y 2010, mediante biomonitorio por líquenes para aportar medidas que contribuyan a la preservación de la calidad del aire.

Se utilizó el líquen *Usnea aurantiaco-ater* de los años 1997, 2006, 2008 y 2010 y suelos antárticos de los años 1997 y 2006 de un área georeferenciada con 10 puntos de muestreo. Líquenes y suelos se digirieron con una mezcla ácida (método 3052 USEPA) se cuantificaron con un Espectrómetro de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP – OES).

Se elaboraron mapas de concentraciones elementales en líquenes utilizando el programa ArcGis 9.3 y se calcularon los Factores de Enriquecimiento (FE). La concentración máxima de Mo en líquenes superó la recomendada por el USDA Forest Service en *Usnea spp* para calidad de aire. Los mapas mostraron diferencias en las concentraciones cercanas a las bases científicas, al aeródromo y al glaciar Collins. Los resultados obtenidos de $FE > 10$, utilizando como referencia el suelo promedio de los años 1997 y 2006, señalan que de los 18 elementos analizados, son antropogénicos Mo, Ni, Pb y Zn. Se analizaron y discutieron las posibles fuentes responsables de los elementos antropogénicos.

De los resultados obtenidos se desprende la necesidad de implementar y/o mejorar medidas de gestión ambiental, como por ejemplo: realizar inventario de emisiones, mantener el biomonitorio y promover el control de emisiones, para mantener la calidad del aire en la península Fildes.

ABSTRACT

Antarctica is considered a natural laboratory for research due to its special characteristics regarding climate, geography, flora and fauna. In this area the protection of the environment is monitored through the Madrid Protocol, however, there are local pollution problems mainly associated with human activities such as research, tourism and fishing; in particular there are negative impacts to air quality related to the use of fossil fuels.

The aim of this study was to assess the evolution of air quality through the biomonitoring of chemical elements in lichens in the Fildes Peninsula, Rey Jorge Island, Antarctica, between 1997 and 2010, in order to provide measures to preserve air quality.

For these purposes the lichen species *Usnea aurantiaco-ater* were evaluated for the years 1997, 2006, 2008 and 2010 as well as samples of Antarctic soils for the years 1997 y 2006, in a georeferenced area with 10 sampling points. Lichens and soils were digested with an acid mixture (method USEPA 3052) and quantified with Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES).

Elemental concentrations in lichens were mapped using the software ArcGis 9.3. and enrichment Factors (EF) were calculated. The highest concentration of Mo in lichens exceeded the recommended value by the USDA Forest Service in *Usnea spp* for air quality. The maps showed exceedance of concentrations close to scientific bases, the airfield and the Collins Glacier. The results with EF > 10 using as reference the average soil for the years 1997 and 2006 indicate that, within 18 elements analyzed, the anthropogenic elements are Mo Ni, Pb and Zn. The different potential sources of anthropogenic elements were analysed and discussed.

The results of this work suggest the need to implement and/or improve environmental management measures, such as: developing an inventory of emissions, continue with biomonitoring effort and promote the actual control of emissions, in order to preserve the air quality in the Fildes Peninsula.

1. Introducción

El Continente antártico es un importante laboratorio natural de investigación debido a sus características climáticas extremas (zona frío-desértica), cuya geografía, hidrología, suelo, flora y fauna se desarrollaron durante mucho tiempo sin influencia humana, considerándose, por muchos años, uno de los pocos lugares prístinos en el mundo (Choi *et al.*, 2007; Hughes *et al.*, 2007; Smith *et al.*, 2008, Bargagli, 2008); sin embargo, las costas antárticas han sido ocupadas por más de 50 años con bases científicas trayendo consecuencias ambientales insuficientemente estudiadas (Stark *et al.*, 2003). Según Tin *et al.*, (2009) la Antártica ya no debiera ser considerada un lugar prístino por los impactos ambientales provocados por las actividades humanas.

En 1992 los Estados Parte del Tratado Antártico ratificaron su compromiso con la conservación del medio ambiente antártico, a través del Protocolo de Madrid, comprometiéndose a la protección global del ambiente antártico y de los ecosistemas dependientes y asociados, designando a la Antártica como reserva natural, consagrada a la paz y a la ciencia. Con el propósito de preservar las áreas de interés científico también se crearon Áreas Antárticas Especialmente Administradas (ASMA), Áreas Antárticas Especialmente Protegidas (ASPA) y el Comité Científico para la Investigación Antártica (SCAR), para la obtención de acceso y toma de muestras (SCAR, 2009).

En la última década parte de los estudios desarrollados en la Antártica se han realizado con el propósito de investigar cambios por influencia humana de carácter local y global; en este último aspecto cabe mencionar la reducción de la concentración de ozono estratosférico y el cambio climático (Ugolini y Bockheim, 2008; Malandrino *et al.*, 2009; Stastna, 2010). La Antártica contiene el 90% del hielo del mundo y debido a su ubicación geográfica y altitud ejerce una influencia predominante en la atmósfera global y en las corrientes oceánicas (Ugolini y Bockheim, 2008).

Los problemas locales de contaminación en la Antártica han sido asociados principalmente a actividades humanas, incluidas la investigación (Stark *et al.*, 2003; Choi *et al.*, 2007; Hughes *et al.*, 2007; Ugolini y Bockheim, 2008), el turismo (Choi *et al.*, 2007; Hughes *et al.*, 2007; Liggett *et al.*, 2010) y la pesca (Tin *et al.*, 2009). De acuerdo con las estadísticas de la Asociación Internacional de Operadores Turísticos en la Antártica (IAATO, 2010), sólo por concepto de turismo, el número de visitas a la Antártica ha aumentado de 8.210 a 37.858 personas entre el periodo 1994-1995 y el de 2008-2009.

Distintas investigaciones han señalado que uno de los principales impactos negativos descritos en el continente antártico, se produciría por el uso de combustibles fósiles para transporte, calefacción y generación de electricidad necesarios para la supervivencia de los asentamientos humanos en latitudes altas (Stark *et al.*, 2003; Delille *et al.*, 2007; Hughes *et al.*, 2007; Ferguson *et al.*, 2008; Chong *et al.*, 2010).

En 1997 ocurrió un derrame de 20.000 L de diesel en la isla Crozet, cerca de la base científica francesa Alfred Faure; según Delille *et al.*, (2007) al año 2002, 5 años después de ocurrido el derrame, los residuos de diesel aún eran detectados en la zona. El problema de contaminación por hidrocarburos en el suelo se ve incrementado potencialmente por la baja temperatura y la baja actividad microbiana (Nedwell, 1999). Deprez *et al.*, (1999) y Stark *et al.*, (2003) han detectado una amplia distribución de contaminación en sedimentos terrestres y marinos por metales pesados e hidrocarburos en torno a dos vertederos abandonados en la costa este Antártica (Estación Casey, Australia).

Poblet *et al.*, (1997) investigaron la concentración de metales pesados en líquenes antárticos cerca de la base científica Argentina Jubany, en la Isla Rey Jorge, señalando que existe una circulación atmosférica de metales traza relacionada a las actividades humanas desarrolladas en las bases científicas.

El propósito de la presente investigación es evaluar la evolución de la calidad del aire en la península Fildes, Isla Rey Jorge, Antártica, entre los años 1997 y 2010, mediante el biomonitorio de elementos químicos en líquenes de la especie *Usnea aurantiaco-ater*, en un estudio conjunto con dichos elementos químicos en el suelo, con el propósito de proponer medidas de gestión para la prevención o disminución de la contaminación atmosférica local.

2. Hipótesis y Objetivos

2.1 Hipótesis

El incremento en la concentración de algunos elementos químicos en el aire de la península Fildes, Isla Rey Jorge, Antártica, medido mediante biomonitorio de líquenes, en un periodo de estudio superior a una década, se debe a actividades antropogénicas vinculadas al asentamiento humano.

2.2 Objetivo General

Evaluar la evolución de la calidad del aire en la península Fildes, Isla Rey Jorge, Antártica, entre los años 1997 y 2010, mediante el monitoreo de elementos químicos, vía biomonitores y ambientes directamente vinculados, para aportar medidas de gestión que contribuyan a la preservación de la calidad del aire.

2.3 Objetivos Específicos

Cuantificar la concentración de algunos elementos químicos en el líquen *Usnea aurantiaco-ater* de los años 1997, 2006, 2008 y 2010 y en el suelo de los años 1997 y 2006 en la península Fildes, Isla Rey Jorge, Antártica.

Analizar la relación entre el contenido de elementos químicos en los líquenes y suelos que los sustentan.

Analizar la distribución espacial de las concentraciones de los elementos químicos seleccionados en líquenes y suelos para vincular su presencia en el aire con sus potenciales fuentes.

Proponer medidas de gestión para la prevención o disminución de la contaminación atmosférica en la península Fildes, Isla Rey Jorge, Antártica, basadas en el biomonitorio de líquenes.

3. Marco Teórico

3.1 Antecedentes Generales

La Antártica es el continente más helado y el menos poblado del planeta. En la meseta continental Antártica la temperatura media anual es de -50°C y en la estación Vostok (Base Rusa), se ha obtenido la temperatura más baja registrada de -89.2°C (AARI, 2010; Tin *et al.*, 2010). El continente posee $14.062.500\text{ km}^2$ de los cuales sólo 45.000 km^2 , es decir, el 0,32 % de su superficie total está libre de hielo (Ugolini y Bockheim, 2008).

A pesar de su situación remota y condiciones extremas, la presencia humana ha existido en la Antártica desde hace más de 200 años con la actividad ballenera (Tin *et al.*, 2009; Bargagli, 2008) y desde aproximadamente 50 años con la instalación de bases científicas (Sark *et al.*, 2003). En la actualidad la presencia humana está representada por 75 bases de investigación en todo el continente, las que tienen una capacidad total para alojar unas 4000 personas durante el verano; en invierno 38 estaciones se encuentran en funcionamiento y pueden acomodar a unas 1000 personas (Tin *et al.*, 2010). Aún con la presencia humana, el continente antártico es considerado por algunos investigadores como uno de los últimos lugares prístinos en el mundo (Choi *et al.*, 2007; Delille *et al.*, 2007, Hughes *et al.*, 2007).

Consagrado a la ciencia y a la paz, la investigación Antártica aporta valiosa información sobre distintos temas de relevancia ambiental, como por ejemplo estudios que tratan de explicar o aportar información sobre el ciclo hidrológico global y los efectos de la pérdida de masa de hielo (Chen *et al.*, 2008), la evolución de las especies y sus adaptaciones climáticas (Pörtner, 2006), la influencia de la Antártica en el clima global (Busalacchi, 2004; Smith *et al.*, 2008), estudios sobre cambio climático (Gille, 2002; Smith *et al.*, 2008; Sato y Hirasawa, 2007, Stastna, 2010), la influencia del continente antártico en el movimiento de los vientos y el ciclo atmosférico global (Roscoe, 2004) y la disminución del ozono estratosférico (Solomon, 1999), entre otros, además de numerosas investigaciones locales o regionales sobre flora (Øvstedal y Gremmen, 2006; Peat *et al.*, 2007; Kozeretska *et al.*, 2010) y fauna Antártica (Malyutina, 2004; Thatje, 2005; De Broyer *et al.*, 2011; Husmann *et al.*, 2011) o los impactos causados por las actividades humanas en el continente antártico (Micol y Jouventin, 2001; Stark *et al.*, 2003; Aislabie *et al.*, 2004; Carlini *et al.*, 2007; Corsolini, 2009).

De acuerdo a King y Riddle (2001) el potencial de perturbación en la Antártica puede ser especialmente grave, tratándose de un sistema natural, particularmente para la fauna en sus estados iniciales de desarrollo, ya que posiblemente dichas especies son más sensibles a la contaminación ambiental.

Liggett *et al.*, (2010) señala que la principal actividad comercial del continente antártico es el turismo, el cual se ha desarrollado desde hace 50 años y se ha incrementado en el tiempo, teniendo implicancias ambientales; es por esto que la actividad turística tiene adherentes y contrarios, siendo un tema de preocupación y debate (Bauer, 2003; Higham y Shelton, 2011). Según Bastmeijer *et al.*, (2008) los turistas en la Antártica han aumentado de 2.500 a 37.000 personas desde el periodo de 1990-1991 al de 2006-2007, considerando además, que en los años 90s, el 95% de los turistas se trasladaba en buques y actualmente el turismo se ha diversificado al uso de aviones, cruceros y embarcaciones menores.

3.2 Península Fildes, Isla Rey Jorge, Antártica

Entre las islas ubicadas en la península Antártica destaca la isla Rey Jorge, donde se encuentra la península Fildes con aproximadamente 29 km² de superficie; funciona como centro logístico del continente antártico y en ella se concentra el mayor número de instalaciones como bases científicas y refugios (Peter *et al.*, 2008; Tin *et al.*, 2009), además del tráfico aéreo y marítimo para el transporte de personas y el abastecimiento de insumos para las operaciones de las bases científicas. La isla Rey Jorge es considerada un punto de desarrollo turístico y “*hot spot*” por la presencia de instalaciones de bases científicas y un aeródromo, que permite el arribo de aeronaves desde la ciudad de Punta Arenas, Chile, principalmente por ser una zona libre de hielo durante el verano (Bastmeijer *et al.*, 2008). En la península Fildes se encuentran las bases chilenas Presidente Eduardo Frei Montalva, Profesor Julio Escudero y Julio Ripamonti, además de la base Gran Muralla de China, Bellinghausen de Rusia y Artigas de Uruguay, como se señala en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Bases científicas temporales y permanentes de la península Fildes.

País	Nombre de la Base	Funcionamiento	Coordenadas
Chile	Presidente Eduardo Frei Montalva*	Permanente	62°12'0''S y 58°57'51''W
	Profesor Julio Escudero	Permanente	62°12'04''S y 58°57'45''W
	Julio Ripamonti	Temporal	62°12'04''S y 58°53'08''W
China	Gran Muralla	Permanente	62°12'59''S y 58°57'52''W
Rusia	Bellingshausen	Permanente	62°11'47''S y 58°57'39''W
Uruguay	Artigas	Permanente	62°11'04''S y 58°54'09''W.
	*Incluye aeródromo Teniente Rodolfo Marsh y el poblado civil de Villa las Estrellas.		

Fuente: Modificado de CONMAP, (2009).

Debido al ambiente frío y condiciones extremas de la Antártica, se requieren grandes cantidades de combustible fósil, con altos costos económicos de transporte, almacenamiento y riesgos ambientales (Tin *et al*, 2010). La generación de energía en las estaciones de la península Fildes se basa exclusivamente en generadores diesel (Peter *et al.*, 2008). Los requerimientos de combustible varían dependiendo de la estación científica y de su funcionamiento (Tin *et al*, 2010), teniendo además en cuenta, el combustible que se requiere para el uso de aviones, helicópteros, embarcaciones y sistemas de bombeo.

En la península Fildes existe un almacén de combustible construido en el año 1970, que se ubica al noreste de la estación Bellingshausen y se utilizó para abastecer durante los años 1922-1991 a las flotas pesqueras dedicadas a la caza de ballenas (Peter *et al.*, 2008). En la actualidad, funcionan sólo dos de los nueve estanques que componían el almacén que utilizan las estaciones de Bellingshausen y Artigas. De acuerdo a Peter *et al.*, (2008), el consumo de combustible difiere entre las estaciones de la península Fildes y su consumo aproximado se describe a continuación:

Cuadro 2. Consumo anual aproximado de combustible diesel en las bases científicas de la península Fildes.

Nombre de la Base	Abastecimiento	Consumo Anual	Consumo Adicional	
			Vehículos	Embarcaciones tipo Zodiac
Base Eduardo Frei Montalva	Abastecimiento anual vía marítima. La transferencia desde el barco a la estación se realiza por medio de una tubería marina.	1.000.000 L*	5.000 a 6.000 L	200 L
Base Julio Escudero	La base funciona temporalmente durante los meses de enero y febrero. El consumo de combustible es muy inferior al de otras estaciones.	12.000 L	200 L	125 L (incluye sistemas de bombeo).
Base Julio Ripamonti	Es la base más pequeña de la península Fildes, pertenece al Instituto Antártico Chileno, funciona temporalmente con el combustible de la base Escudero.	-	-	-
Base Gran Muralla	Almacena el combustible en ocho tanques, cada uno de 50.000 L ubicados al sur de la estación. El diesel es transportado desde los tanques principales por tuberías, que alimentan el generador de la base.	70.000 L	-	-
Artigas	El suministro es proporcionado por barco desde Uruguay. Se almacena en 5 estanques arrendados a la estación Bellingshausen con capacidad total es de 120.000 L. Además, el combustible se transporta por vehículo en caso de ser necesario.	170.000 L	-	-
Bellingshausen	El combustible para la estación Bellingshausen se suministra del mismo modo que para la estación Artigas. Cada 2 a 3 años un barco repone el combustible. El transporte de diesel a la estación se realiza por vehículos.	120.000 L	2.000 L (para vehículos y embarcaciones).	

* No incluye el combustible utilizado por aeronaves.

Fuente: Modificado de Peter *et al.*, (2008).

3.3 Legislación Antártica

De acuerdo a Tin *et al.*, (2009) la regulación de las actividades humanas en la Antártica comenzaron en 1948 con la entrada en vigencia de la Convención Internacional para la Reglamentación de la Caza de Ballenas y el establecimiento de la Comisión Ballenera Internacional (IWC por sus siglas en inglés). En 1961 entró en vigencia el Tratado Antártico, acuerdo firmado por 28 países o estados parte (Tin *et al.*, 2010). El Sistema de Tratado Antártico (ATS, por sus siglas en inglés) se ha expandido incluyendo otros instrumentos legales, tales como:

1) El Acuerdo de Medidas para la Conservación de la Flora y la Fauna que entró en vigencia el año 1982, teniendo como principal objetivo la protección de las aves y mamíferos nativos. Muchas de estas medidas fueron incorporadas posteriormente en los anexos del Protocolo Ambiental adoptado en el año 1998.

2) La Convención para la Conservación de Focas Antárticas (CCAS, por sus siglas en inglés) que entró en vigencia el año 1978.

3) La Convención para la Conservación de los Recursos Marinos Vivos Antárticos (CCAMLR por sus siglas en inglés), que entró en vigencia el año 1982.

4) El Protocolo sobre la Protección del Medio Ambiente o Protocolo Ambiental del Tratado Antártico que entró en vigencia el año 1998.

El Tratado Antártico suscrito el 1 de diciembre de 1959 entró en vigencia a partir del 23 de junio de 1961 y fue creado inicialmente para resolver conflictos de soberanía, libertad de investigación científica y potencial militarización del continente durante la Guerra Fría (Peterson, 1988). De acuerdo al ATS (2011) tanto la Convención para la Conservación de Focas Antárticas como la Convención para la Conservación de los Recursos Marinos Vivos Antárticos funcionan como entes independientes, pero contienen disposiciones que son parte del Tratado Antártico.

3.4 Efectos de la presencia humana en la Antártica

La presencia humana ha traído una serie de consecuencias al medio ambiente antártico, como por ejemplo el derrame de petróleo del Bahía Paraíso ocurrido en enero de 1989 cerca de la estación Palmer, Isla Anvers, donde se derramaron 600.000 L de combustible diesel, afectando en distintos grados diversos componentes del ecosistema, como por ejemplo aves, peces, almejas, macroalgas y sedimentos (Kennicutt *et al.*, 1991). Según Bargagli *et al.*, (1998) en el caso de los ecosistemas marinos antárticos con cadenas alimentarias extensas, se puede incrementar la biomagnificación de contaminantes como el metil mercurio (MeHg) y compuestos orgánicos persistentes; sin embargo, las relaciones tróficas y la biología de algunas especies aún no están adecuadamente estudiadas.

La biota terrestre Antártica en general, no es de gran riqueza en especies (Convey y Stevens 2007); las comunidades de fauna consisten principalmente de invertebrados como por ejemplo Diptera, Acari, Collembola, Nematoda, Rotíferos, Tardigrada y Protista, y de las comunidades vegetales gran parte son criptógamas como musgos, hepáticas y líquenes (Tin *et al.*, 2009); de acuerdo a Peter *et al.*, (2008) se identificaron en la península Fildes 175 especies de líquenes y 40 especies de musgos, además de la existencia de dos plantas florales; el pasto antártico (*Deschampsia antarctica*) y el clavel antártico (*Colobanthus quitensis*). Por el contrario, el ecosistema marino antártico posee una gran riqueza de especies; noventa y dos especies de ballenas de barbas y dentadas migran a las áreas de alimentación cada año entre noviembre y mayo, al igual que una serie de especies de pingüinos y otras aves marinas (Bargagli, 2008). En términos generales, según Pörtner (2006) los organismos marinos de la Antártica se caracterizan por altos niveles de endemismo, gigantismo, longevidad y tasas de crecimiento lento, donde la cadena trófica pelágica en la zona se basa principalmente en el krill (Cornejo-Donoso y Antezana, 2008).

Las actividades humanas pueden afectar a la flora y fauna en diferentes niveles de organización biológica; hábitats, comunidades, poblaciones e individuos, donde los impactos pueden ir desde leves a severos y de transitorios a largo plazo (Convey y Stevens 2007). El ruido y la intrusión visual derivados de operaciones de las aeronaves también puede perturbar la fauna Antártica (Hughes *et al.*, 2008); de acuerdo con De Villiers (2008), los impactos de operaciones de aeronaves pueden tener desde un rango despreciable, es decir, no observable, a menor, como por ejemplo de cambios de

conducta o incluso considerables, como por ejemplo aumentos en la frecuencia cardíaca y deserciones temporales del nido, señalando que un ave puede presentar cambios de comportamiento y en su fisiología como respuesta al estrés, que si se mantiene, podría tener un impacto negativo sobre la reproducción y la supervivencia. Además se debe tener presente que se supone generalmente una mayor vulnerabilidad de las especies locales que estuvieron aisladas y evolucionaron sin intervención humana (Bargagli, 2008).

Algunos de los problemas que se han asociado a los asentamientos humanos en la Antártica (Bargagli, 2008; Harris, 2009; Tin *et al.*, 2009) son: derrames de combustibles, abandono y acumulación de residuos, contaminación por aguas residuales, destrucción física de la flora (por construcción de infraestructura y caminos), perturbación de la fauna (por ruido y luz), introducción de especies foráneas y extracción de recursos marinos. Harris (2009) concluye que las medidas de gestión adoptadas en la isla Rey Jorge son inadecuadas para los problemas ambientales existentes.

En cuanto a efectos sobre la calidad del aire en la península Fildes no existe un inventario de fuentes o redes de monitoreo y registro (Peter *et al.*, 2008 y Tin *et al.*, 2009). Sin embargo, existen algunas investigaciones donde se han utilizado líquenes como organismos biomonitores de la calidad del aire. Poblet *et al.*, (1997) señalan que existe una circulación atmosférica de metales traza relacionada a las actividades humanas desarrolladas en las bases científicas. Los musgos y líquenes constituyen el principal componente biótico de los ecosistemas terrestres de la Antártica y pueden ser utilizados como biomonitores de la depositación atmosférica de contaminantes persistentes (Poblet *et al.*, 1997; Olech *et al.*, 1998; Bargagli, 2008). Además, existen algunos estudios sobre aerosoles atmosféricos, como por ejemplo el realizado en la base King Sejong donde se indica que los elementos Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, V y Zn poseen un origen antrópico asociado a fuentes locales (Mishra *et al.*, 2004).

3.5 Uso de líquenes como organismos biomonitores

El biomonitoreo se define como el uso de organismos para obtener información de ciertas características de la biósfera (Szczepaniak y Biziuk, 2003). La información relevante obtenida con el biomonitoreo por ejemplo de plantas o animales, se logra comúnmente por los cambios en el comportamiento del organismo monitor, ya sea en la composición o riqueza de especies, fisiología, funcionamiento ecológico, morfología o en

la medición de la concentración de sustancias específicas en los tejidos de la o las especies monitoreadas (Szczepaniak y Biziuk, 2003).

Las ventajas del biomonitoreo están relacionadas principalmente a la presencia permanente y común del organismo en el campo, incluso en áreas remotas, la facilidad de muestreo, especialmente al trabajar con plantas y la facilidad de ausencia de cualquier equipo o técnica costosa (Wolterbeek y Verburg, 2002). Existen dos tipos de biomonitoreo: el activo, que incluye la exposición bien definida de especies a condiciones controladas mediante el uso de instrumentos y el biomonitoreo pasivo que se refiere a la observación o análisis químico de plantas autóctonas (Ceburnis y Valiulis, 1999).

El biomonitoreo se considera un medio para evaluar las concentraciones de elementos traza en los aerosoles atmosféricos y su depositación; esto implica que el elemento de interés debe concentrarse en el monitor y reflejar cuantitativamente sus condiciones ambientales (Wolterbeek y Verburg, 2002). Las plantas acumulan elementos químicos por algunos factores como la disponibilidad de elementos, las características de la planta (tipo de especie, edad, estado de salud y tipo de reproducción), temperatura, humedad disponible y características del sustrato (Conti y Cecchetti, 2001). Dentro de las especies que han sido utilizadas para biomonitoreo el uso de líquenes ha resultado ser una buena herramienta para el seguimiento de la calidad del aire (Ra *et al.*, 2005; Gombert *et al.*, 2006; Munzi *et al.*, 2007; Pinho *et al.*, 2008; Cristofolini *et al.*, 2008).

Los líquenes son asociaciones simbióticas entre hongos y algas o cianobacterias; el hongo cubre al alga y esta interacción da origen a diferentes tipos y formas de líquenes, comportándose como un solo organismo (Honegger, 1991). Los líquenes se organizan en estructuras llamadas talos, que generalmente consisten en varias capas, dividiéndose en una corteza superior e inferior, una capa algal y otra medular; la mayor parte de su estructura está compuesta por el hongo y sus hifas, mientras que las algas y/o cianobacterias constituyen aproximadamente el 7% de su estructura (Coutiño y Montañez, 2000). Los líquenes generan ácidos liquénicos los que son importantes en la formación de los suelos y erosión de las rocas, permitiendo la absorción de elementos para su nutrición (Peter *et al.*, 2008; Alias, 2009). Según Szczepaniak y Biziuk (2003) a diferencia de las plantas superiores los líquenes no tienen raíces muy desarrolladas y no poseen cutícula, características morfológicas que los hacen favorables para propósitos de monitoreo.

De acuerdo con las Directrices para el Monitoreo de la Contaminación por Líquenes en Parques Nacionales, Bosques y Refugios (US Forest Service, 2003), las investigaciones sobre líquenes antárticos de Raggio *et al.*, (2008) y los estudios de Fuga

et al., (2008), (Sloof, 1993) y Wolterbeek y Verburg, (2002) las ventajas del uso de líquenes como biomonitores de contaminación se pueden resumir en:

- a) Los líquenes son especies abundantes y ampliamente distribuidas.
- b) No poseen cutícula por lo que están estrechamente ligados a su atmósfera para la obtención de nutrientes, por lo tanto son representativos de su atmósfera local.
- c) Bioacumulan elementos químicos lo que permite que las concentraciones sean detectables.
- d) Otorgan información integrada de la atmósfera.
- e) No contaminan adicionalmente la muestra respecto al muestreo activo.
- f) Permiten el seguimiento de los puntos muestreados en el tiempo.
- g) Tienen bajo costo en comparación al muestreo instrumental.

Los organismos biomonitores deben ser resistentes al efecto tóxico del contaminante a controlar, al menos en el rango común de los niveles ambientales, de tal manera que no se mueran o sean dañados por el contaminante en sí (Beeby, 2001; Loppi *et al.*, 2003). Los líquenes pueden acumular y retener elementos traza en concentraciones que superan con creces sus necesidades fisiológicas y tolerar estas altas concentraciones (Bačkor y Loppi, 2009) resultando útiles como sistema de alerta temprana de cambios en los ecosistemas (Loppi *et al.*, 2003). Los líquenes acumulan contaminantes persistentes y sirven para medir la cantidad biológicamente disponible de un determinado contaminante en un ecosistema en específico (Beeby, 2001).

Por lo general, se asume que los elementos adquiridos por líquenes representan una fracción de los elementos presentes en su entorno inmediato y como consecuencia en un estado aparentemente sano deben reflejar un equilibrio razonable entre sus requisitos y la disponibilidad de elementos en el medio ambiente (Bačkor y Loppi, 2009).

El Servicio Forestal de Estados Unidos (2010) entrega una extensa base de datos de calidad del aire en relación al biomonitoreo mediante líquenes disponiendo de tablas con niveles umbrales de elementos químicos presentes en Oregon, Washington y en los bosques nacionales de Alaska. El Cuadro 3 muestra las concentraciones límite superior; si los valores indicados se sobrepasan, se consideran valores elevados, si son inferiores significa que la concentración está dentro del rango base recomendado.

Cuadro 3. Concentraciones de algunos elementos químicos y sus niveles umbrales en diferentes líquenes (Fuente: USDA Forest Service, 2010).

Elemento (mg/kg)	Especies		
	<i>Hypogymnia enteromorpha</i>	<i>Letharia vulpina</i>	<i>Usnea spp.</i>
Al	2101	614	499
B	9,2	3,5	3,7
Ba	143,2	52,1	30,1
Be	0,08	0,04	0,04
Cd	0,8	0,4	0,3
Co	0,5	0,4	0,4
Cr	3,7	2,1	4,1
Cu	39,1	14,9	25,6
Fe	1655	472	272
Mn	858,5	408,5	572
Mo	1,1	0,3	0,4
Ni	6,6	2,7	7,1
Pb	23,8	7	13,3
V	6,8	1,5	1,5
Zn	62,7	43,6	65,8

3.5.1. Otras aplicaciones de los líquenes

La realización de mapas sobre la diversidad y abundancia de líquenes es común en muchos países europeos con zonas boscosas y es utilizado para comparar áreas urbanas y regiones industriales con lugares menos intervenidos, generalmente como indicador de la contaminación de SO₂, puesto que la contaminación atmosférica es uno de los factores que explican la distribución espacial de muchas especies de líquenes (Purvis *et al.*, 2003; Giordani 2007; Jeran *et al.*, 2007; Munzi *et al.*, 2007; Cristofolini *et al.*, 2008). Para estos casos se utilizan métodos de estimación de la cobertura de líquenes en especies de árboles y la concentración del contaminante en la atmósfera; sin embargo, se debe tener cuidado con otros factores que condicionan la distribución de líquenes en un territorio, como por ejemplo la altitud y condiciones climáticas (Giordani, 2007; Jeran *et al.*, 2007). Para otros estudios se ha utilizado el trasplante de líquenes desde zonas no contaminadas a zonas urbanas o contaminadas para utilizarlos como bioindicadores (Carreras y Pignata, 2002). Los líquenes han sido además utilizados como recurso alimenticio y medicinal en el tratamiento de enfermedades como tuberculosis y carcinoma de pulmón (Nash, 1996). Especies de *Usnea* (*U.barbata*, *U.rigida*, *U.florida*, *U.hirta*, etc.) son bien conocidas por su actividad antimicrobiana (Cansaran *et al.*, 2006).

4. Materiales y Métodos

4.1 Área de Estudio

El área de estudio corresponde geográficamente a la Península Fildes, Isla Rey Jorge, archipiélago de las Shetlands del Sur, Antártica (Figura 1), 62°11' Latitud Sur y 58° 52' Longitud Oeste, limitando al norte con el mar de Drake, al sur con el mar de Bellingshausen, al este con el Glaciar Collins y al oeste con el Estrecho de Bransfield. La península Fildes es un centro logístico y cuenta con un desembarcadero y un aeródromo.

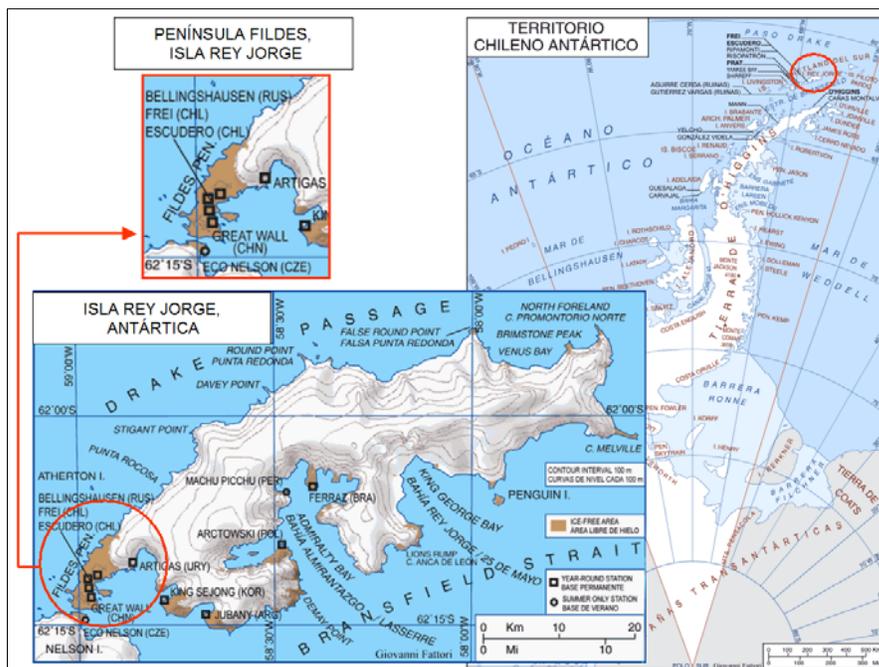


Figura 1. Ubicación geográfica península Fildes, Isla Rey Jorge, Antártica.

4.2 Muestreo

4.2.1 Toma de muestras de líquenes

Las muestras del líquen *Usnea aurantiaco-ater* (Figura 2), se extrajeron en las temporadas verano de los años 1997, 2006, 2008 y 2010, en un área georeferenciada de 1 m². Se realizó una muestra compuesta (2 a 3 individuos). Las muestras se secaron al aire antártico y se envolvieron en papel y material aislante para su transporte al

laboratorio para su análisis, manteniéndose aisladas de influencias externas. Los líquenes una vez secos no se descomponen (Vartia, 1973; Cavieres *et al*, 1995).



Figura 2. Liquen antártico, *Usnea aurantiaco-ater* (Fotografía: Nicolás Donoso, 2010).

4.2.2 Toma de muestras de suelo

Se tomaron de 2 a 3 muestras de suelo superficial (primeros 5 cm) en las áreas georeferenciadas de los líquenes. Se formaron muestras compuestas que se secaron al aire antártico y se envasaron en bolsas de papel guardados adicionalmente en envases plásticos a -18°C .

Los puntos georeferenciados muestreados tanto para líquenes como para suelos, se señalan en la Figura 3 para líquenes de los años 1997, 2006, 2008 y 2010, y para suelo de los años 1997 y 2006. Los puntos de muestreo fueron denominados de acuerdo a la cercanía a lugares reconocidos: zonas cercanas al aeródromo de la península Fildes (Aero 1, Aero 2, Aero 3, MET 5), cerros Fósil y GPS, zona en altura próxima a las Bases Eduardo Frei y Bellinghausen, Laboratorio Antártico de Radiación Cósmica (LARC), Base China, península Ardley y glaciar Collins.

Los puntos de muestreo de líquenes y suelos del año 1997 son sólo tres, puesto que corresponden a muestreos efectuados a la época y debidamente conservados y aislados de influencias externas. Para los fines de este estudio constituyen la línea base para la comparación del impacto potencial de la última década. Independientemente de ello, todas las muestras fueron reanalizadas con el fin de evitar diferencias en los resultados debido a cambios en el procedimiento analítico. Los puntos de muestreo representan zonas donde se espera encontrar influencia directa de los asentamientos

humanos, como por ejemplo el aeródromo y las bases científicas y además, zonas donde no se espera encontrar influencia humana por falta de fuentes de emisión directa, como la península Ardley y el glaciar Collins.

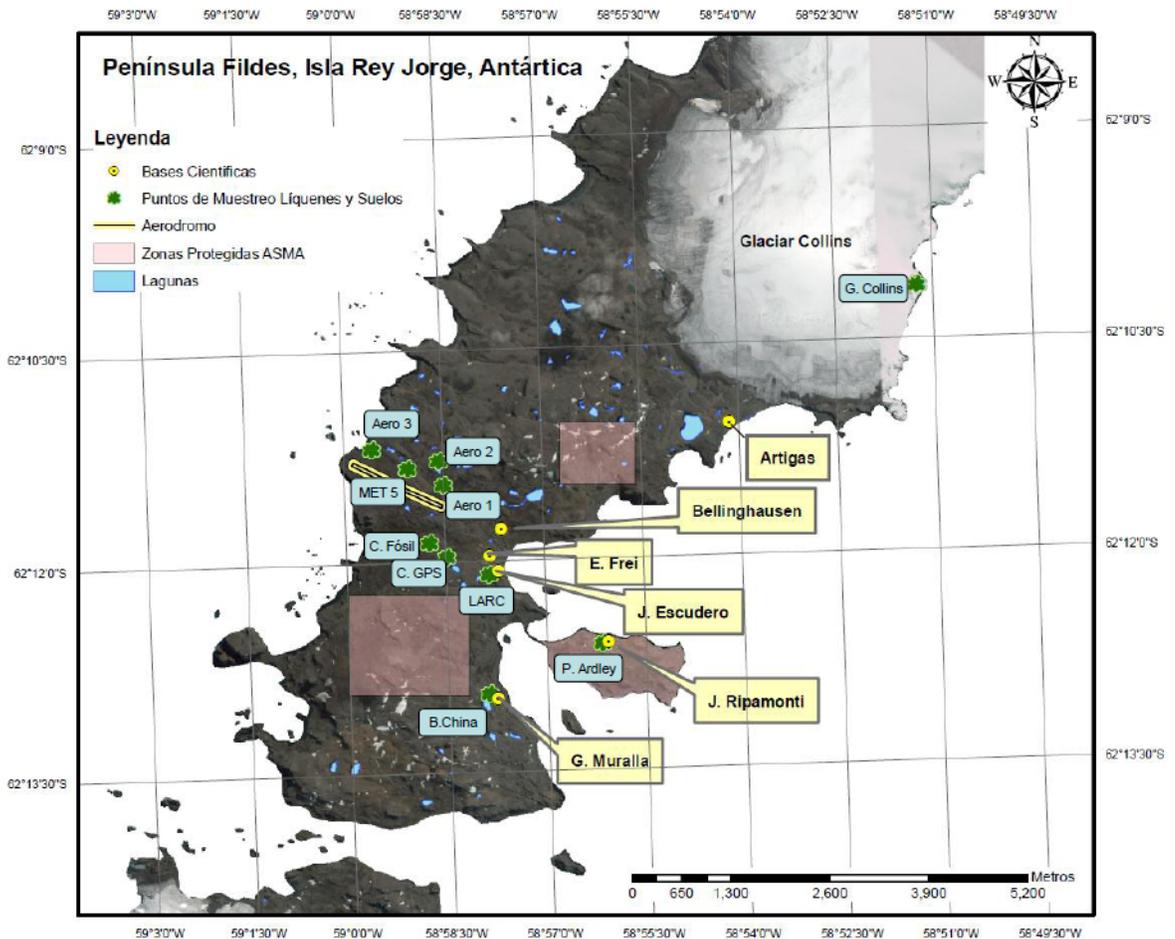


Figura 3. Península Fildes, Isla Rey Jorge, Antártica. Datum WGS 84, Huso 21 S.

Los elementos cuantificados, tanto para líquenes como para suelos, fueron Ag, Al, As, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb, Se, V y Zn. Para la selección de los elementos químicos en estudio se tomaron en cuenta los siguientes criterios:

- Elementos químicos potencialmente tóxicos.
- Probabilidad de encontrarlos en el área de estudio en concentraciones cuantificables por la técnica empleada (investigaciones previas).
- Elementos químicos bioacumulables.
- Origen antrópico.

4.3 Procedimiento Analítico Líquenes

La muestra se secó a temperatura ambiente y se pulverizó en un mortero de ágata utilizando sólo los talos más delgados del líquen y se almacenó en una cápsula de Petri esterilizada. Luego se pesaron 450 mg de muestra que se trataron con una mezcla ácida según el método 3052 (USEPA, 1996) y lo recomendado según la guía “Application Notes for Microwave Digestion” para líquenes del horno microondas Milestone Ethos 1 Advanced Microwave Digestion System (2004). Se usó una mezcla de 7 mL de ácido nítrico al 65% y 1 mL de peróxido de hidrógeno al 30%, ambos reactivos Merck para análisis y se digirió usando un rotor segmentado de alta presión modelo HPR1000/10S; se utilizó el programa de digestión que se muestra en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Programa de digestión para líquenes.

Paso	Tiempo	Temperatura Interna	Temperatura Externa	Potencia
1	10 minutos	200 °C	110 °C	970 Watt
2	10 minutos	200 °C	110 °C	970 Watt
Venteo	10 minutos	-	-	-

Luego de la digestión los envases se enfriaron, y se evaporó la solución a 130 °C de temperatura externa hasta obtener 1 mL aproximadamente del extracto ácido, utilizando la unidad de concentración VAC 1000 Acid Scrubber Module con el programa de concentración de muestras que se señala en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Programa de concentración de muestras.

Paso	Tiempo	Temperatura Interna	Temperatura Externa	Potencia
1	5 minutos	-	130 °C	600 Watt
2	7 minutos	-	130 °C	600 Watt
Venteo	5 minutos	-	-	-

Luego la muestra se filtró y aforó a 10 mL con ácido nítrico al 1% preparado con agua desionizada milli-Q (18,2 MΩ cm a 25°C). El extracto ácido se agitó y trasvasijó a un frasco de polietileno estéril para cuantificar los elementos químicos mediante Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES) modelo Óptima 3-300 XL marca Perkin Elmer.

Para cada muestra se realizaron duplicados; también se realizaron blancos y estándares, utilizando el material de referencia N°482, Community Bureau of Reference

(BCR), Commission of the European Communities, especial para elementos traza en líquen *Pseudevernia furfurácea* para el control de digestión y cuantificación.

4.4 Procedimiento Analítico Suelos

Se secaron las muestras de suelo en estufa y se pesaron 300 mg; se trataron con una mezcla ácida según la guía “Application Notes for Microwave Digestion” (1996) del horno microondas Milestone MLS 1200 MEGA con monomotor, de acuerdo al método 3052 de la USEPA (1996). Se utilizaron 3 mL de ácido nítrico al 65 % y 3 mL de ácido fluorhídrico HF al 40 %, ambos reactivos de Merck para análisis; además se realizaron duplicados y blancos. El programa de digestión utilizado se muestra en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Programa de digestión para suelo.

Paso	Tiempo	Potencia
1	6 minutos	250 Watt
2	6 minutos	400 Watt
3	6 minutos	650 Watt
4	6 minutos	250 Watt
Venteo	5 minutos	-

La muestra digerida se concentró en una plancha calefactora a una temperatura menor o igual a 80°C, hasta obtener 1mL aproximadamente de extracto ácido; luego se filtró y aforó a 25 mL utilizando ácido nítrico al 1%. Para cada muestra se realizaron duplicados; también se realizaron blancos y estándares, utilizando el material de referencia Quality Control Standard 26, High Purity Standards del National Institute of Standards and Technology (NIST) para el control de digestión de sólidos. Los elementos químicos se cuantificaron mediante Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES) modelo Óptima 3-300 XL marca Perkin Elmer.

Para la lectura de elementos tanto para líquenes como para suelos se utilizó el estándar HP ICP 200 – 7,5 N° 1027112, con el cual se calculó el límite de detección midiendo 7 veces consecutivas el estándar más bajo utilizado en la curva de calibración (0,1 mg/L), definiéndose el límite de detección (LD) como 3 veces la desviación estándar de las mediciones efectuadas y el límite de cuantificación (LC) como 10 veces la desviación estándar, los que se muestran en el Cuadro 7.

Cuadro 7. LD y LC para la lectura de elementos en ICP - OES.

Elemento	LD (mg/L)	LC (mg/L)
Ag	0,0006	0,0019
Al	0,0021	0,0069
As	0,0279	0,0931
B	0,0055	0,0182
Ba	0,0001	0,0004
Be	0,0002	0,0007
Cd	0,0008	0,0026
Co	0,0013	0,0042
Cr	0,0054	0,0181
Cu	0,0033	0,0110
Fe	0,0011	0,0035
Mn	0,0002	0,0005
Mo	0,0037	0,0124
Ni	0,0046	0,0153
Pb	0,0032	0,0106
Se	0,0212	0,0706
V	0,0004	0,0012
Zn	0,0016	0,0052

4.5 Tratamiento de los Datos

Las concentraciones obtenidas para los elementos químicos se compararon con la tabla de la USDA Forest Service 2010 para *Usnea spp.*, ya que no existe información de referencia para el líquen *Usnea aurantiaco-ater*.

Los suelos se analizaron con el propósito de distinguir, a través del método de los factores de enriquecimiento, aquellos elementos químicos que son absorbidos por el líquen directamente desde los aerosoles atmosféricos de aquéllos que son absorbidos desde el suelo que los sustenta. Para ello, se utilizó la fórmula de Rahn (1976) para aerosoles atmosféricos modificada para líquenes, quedando de la forma:

$$FE = \frac{C_i \text{ líquen} / C \text{ estándar líquen}}{C_i \text{ corteza o suelo} / C \text{ estándar corteza o suelo}}$$

donde:

C_i líquen: Concentración del elemento i en el líquen.

C estándar líquen: Concentración del elemento estandarizador en el líquen.

C_i corteza o suelo: Concentración del elemento i en la corteza o el suelo.

C estándar corteza o suelo: Concentración del elemento estandarizador en la corteza o el suelo.

Es particularmente importante utilizar los suelos locales como referencia, puesto que el suelo Antártico es especial y diferente a otros suelos del planeta ya que se trata de un suelo de desarrollo incipiente, cuya clasificación ha sido ampliamente discutida por los pedólogos. La World Reference Base for Soil Resources denomina el suelo antártico como Cryosol y la Soil Taxonomy como Gelisol (Godagnone, 2002), que corresponde a suelos que están constantemente expuestos a fenómenos de lixiviación e interacción con la capa activa del permafrost (Peter *et al.*, 2008).

En primera instancia se utilizaron como referencia las concentraciones de corteza obtenidos desde Mason (1966). Para los suelos antárticos se utilizaron valores promedio de varios puntos de la península Fildes colectados los años 1997 y 2006 y para aquellos elementos de especial interés se utilizaron como referencia los valores para los suelos del punto de muestreo. En todos los casos se usó el Fe como elemento normalizador.

4.6 Análisis de Relaciones Espaciales

Las concentraciones obtenidas para los elementos químicos seleccionados se representaron utilizando un Sistema de Información Geográfica (SIG) como herramienta para el análisis espacial (Software ArcGis 9.3) Para la elaboración de los mapas se utilizó una imagen de Google Stitch Map con el Datum WGS 84, Huso 21 S y cartografía escala 1:10.000, además de las coberturas “Bases Científicas”, “Puntos de Muestreo”, “Aeródromo”, “Zonas Protegidas” y “Lagunas”, donde las últimas tres coberturas fueron aportadas por Barra (2009).

Para el análisis espacial se utilizó la herramienta Inverse Distance Weighted (IDW) delimitando una zona de influencia de 500 m a partir de los lugares georeferenciados en la recolección de muestras. Los geoprocenos utilizados se muestran en la Figura 4.

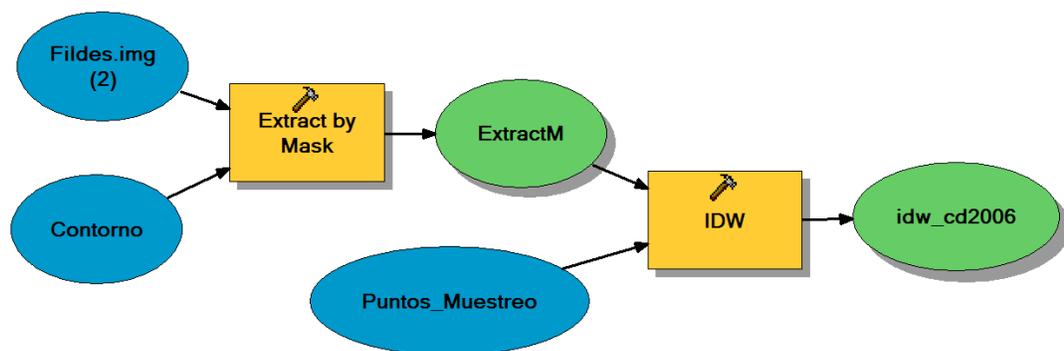


Figura 4. Modelo con los principales geoprocenos programa Arc Gis 9.3.

La relación espacial se analizó de acuerdo a la ubicación de los puntos de muestreo, los que se han asociado a la presencia de potenciales fuentes de emisión.

4.7 Propuesta de medidas de gestión

La propuesta de medidas de gestión, se realizó de acuerdo a los resultados obtenidos en esta investigación junto con los antecedentes bibliográficos de experiencias o medidas propuestas en lugares con condiciones similares (por ejemplo áreas de interés científico o zonas frías). Puesto que en la península Fildes conviven bases de distintas nacionalidades las medidas propuestas incluyen desde el control de las fuentes hasta la posible restricción de actividades, medidas que pueden ser aplicadas independientemente de las diferentes legislaciones que rigen en cada nación.

5. Resultados y Discusión

5.1. Concentración de elementos químicos en líquenes

Las concentraciones promedio y su correspondiente desviación estándar poblacional, expresadas en mg/kg para los 17 elementos químicos cuantificados en los líquenes de los años 1997, 2006, 2008 y 2010 se muestran en el Cuadro 8. El elemento As se encontró bajo el límite de detección (BLD) en todos los años estudiados. Las concentraciones en líquenes por punto de muestreo se muestran en el ANEXO en los Cuadros 1 al 4. Las concentraciones máximas obtenidas por elemento químico para cada año se compararon con las concentraciones máximas recomendadas por la USDA Forest Service (2010) para calidad del aire; los resultados se muestran en el Cuadro 9.

En general, las concentraciones promedio anual de los elementos Al, B, Ba, Be, Cd Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, V y Zn entre el año 1997 y el 2010 disminuyen, exceptuando Ag y Se (Cuadro 8); sin embargo, los valores no presentan variaciones relevantes de acuerdo a su desviación estándar poblacional. Destaca el caso del Cr cuantificado durante los años 1997, 2006 y 2008, pero que en 2010 se encuentra bajo el límite de detección de la técnica empleada.

Los elementos cuyas concentraciones máximas obtenidas superan los valores recomendados por el USDA Forest Service para *Usnea spp.*, que se muestran en el Cuadro 9 son: Al, B, Be, Co, Fe, Mo y V, de los cuales sólo se observa un incremento de Mo a través de los años. Los elementos Ba, Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb y Zn se encuentran dentro de los valores recomendados por el USDA Forest Service para *Usnea spp.* Los elementos Ag y Se no poseen un valor recomendado. Para Ag no se encontraron valores para comparar en líquenes (Poblet *et al.*, 1997; Rodrigues dos Santos *et al.*, 2006; Osyczka *et al.*, 2007; Conti *et al.*, 2009); para Se, Conti *et al.*, (2009) informa para el líquen *Usnea barbata* en la provincia de Tierra del Fuego de la Patagonia Argentina, una concentración promedio anual de $5,86 \pm 3,38$ mg/kg, tres veces superior a la concentración promedio anual obtenida en este estudio de $1,70 \pm 0,52$ mg/kg para el año 2010.

Puesto que los líquenes absorben elementos tanto del aire como del suelo, una mejor representatividad de la calidad del aire local se puede obtener relacionando la concentración en el líquen con los suelos que lo sustentan (Loppi *et al.*, 1999).

Cuadro 8. Concentraciones promedio y desviación estándar poblacional en líquenes, expresadas en mg/kg para los años 1997, 2006, 2008 y 2010.

Elemento	1997	2006	2008	2010
Ag	0,60 ± 0,34 (6)	0,69 ± 0,40 (10)	0,50 ± 0,22 (9)	0,67 ± 0,22 (10)
Al	475 ± 376 (6)	863 ± 765 (10)	726 ± 450 (9)	133 ± 51,3 (10)
B	3,32 ± 1,45 (6)	5,10 ± 1,75 (10)	2,05 ± 1,19 (9)	2,07 ± 1,39 (10)
Ba	0,39 ± 0,1 (2)	0,79 ± 0,46 (6)	0,73 ± 0,28 (9)	0,25 ± 0,09 (10)
Be	0,02 ± 0,02 (6)	0,04 ± 0,03 (6)	0,04 ± 0,02 (9)	0,01 ± 0,01 (8)
Cd	0,11 ± 0,02 (6)	0,08 ± 0,03 (10)	0,11 ± 0,02 (9)	0,05 ± 0,01 (10)
Co	0,23 ± 0,16 (6)	0,37 ± 0,23 (10)	0,35 ± 0,17 (9)	0,07 ± 0,04 (10)
Cr	0,19 ± 0,18 (4)	0,20 ± 0,18 (8)	0,03 ± 0,02 (2)	<LD (10)
Cu	2,59 ± 0,94 (6)	2,85 ± 1,81 (8)	3,11 ± 1,54 (9)	1,13 ± 0,75 (9)
Fe	451 ± 337 (6)	847 ± 588 (10)	681 ± 386 (9)	124 ± 58,2 (10)
Mn	11,4 ± 7,61 (6)	13,2 ± 6,64 (10)	13,0 ± 4,52 (9)	4,42 ± 0,97 (10)
Mo	0,42 ± 0,06 (6)	0,20 ± 0,13 (7)	0,43 ± 0,06 (9)	0,36 ± 0,18 (10)
Ni	0,67 ± 0,4 (6)	0,87 ± 0,44 (10)	0,22 ± 0,13 (9)	0,32 ± 0,31 (9)
Pb	2,88 ± 1,5 (6)	1,80 ± 1,46 (10)	1,82 ± 0,85 (9)	1,30 ± 1,12 (10)
Se	1,11 ± 0,89 (5)	0,89 ± 1,20 (4)	0,58 ± 0,41 (5)	1,70 ± 0,52 (10)
V	1,49 ± 0,96 (6)	2,79 ± 1,65 (10)	2,46 ± 1,26 (9)	0,50 ± 0,22 (10)
Zn	15,2 ± 5,41 (6)	15,1 ± 9,44 (10)	19,7 ± 2,52 (9)	12,7 ± 3,81 (10)

Nota: El valor (x) indica el número de datos obtenidos para distintos puntos de muestreo en la Península Fildes, con los cuales se calculó el valor promedio y la desviación estándar poblacional.

Cuadro 9. Concentraciones máximas, expresadas en mg/kg en la especie *Usnea aurantiaco-ater* por año de muestreo y concentración máxima recomendada por el USDA Forest Service para el líquen *Usnea spp.*

Elemento	<i>Usnea aurantiaco-ater</i>				<i>Usnea spp.</i>
	1997	2006	2008	2010	
Ag	1,12	1,54	0,92	1,21	-
Al	1276	2489	1801	247	499
B	5,77	7,53	4,22	4,48	3,70
Ba	0,49	1,48	1,15	0,35	30,10
Be	0,06	0,09	0,07	0,02	0,04
Cd	0,09	0,15	0,13	0,07	0,30
Co	0,56	0,71	0,67	0,17	0,40
Cr	0,49	0,59	0,05	<LD	4,10
Cu	4,06	5,75	6,01	2,83	25,6
Fe	1177	1875	1522	242	272
Mn	27,0	22,0	20,8	6,58	572
Mo	0,49	0,41	0,51	0,54	0,40
Ni	1,25	1,63	0,44	0,99	7,10
Pb	4,45	4,77	3,99	3,35	13,3
Se	2,33	2,98	1,03	2,81	-
V	3,45	5,16	4,94	0,89	1,50
Zn	22,2	36,9	23,6	17,8	65,8

5.2 Concentración de elementos químicos en suelos

El Cuadro 10 muestra las concentraciones promedio y su desviación estándar poblacional de 15 elementos químicos en los suelos en los años 1997 y 2006 y el valor corteza según Mason (1966). Los elementos Ag, As y Se encontraron bajo el límite de detección. Las concentraciones de los elementos en los suelos en cada punto de muestreo se entregan en el ANEXO Cuadros 5 y 6. Es probable que la variación de la concentración de los elementos químicos en el suelo se deba principalmente a la composición de las rocas y las fuerzas ambientales que las erosionan física, química y biológicamente (Bowen y Walker, 1981; Peter *et al.*, 2008). Carrasco y Préndez (1991) observaron la variación de la concentración de elementos químicos de acuerdo a la cantidad de materia orgánica en la Isla Doumer, Antártica. Suelos con un porcentaje de materia orgánica superior al 12% presentaron una concentración menor de Al, Co, Cr, Fe

y Ni y en suelos con materia orgánica inferior al 12% obtuvieron concentraciones más altas de Cu y Zn.

Cuadro 10. Concentraciones promedio y desviación estándar poblacional en suelo de los años 1997 y 2006 de la península Fildes, expresadas en mg/kg y en la corteza terrestre.

Elemento	1997	2006	Corteza*
Al	10360 ± 491 (3)	8998 ± 1515 (7)	81300
B	111 ± 18,3 (3)	95 ± 18,5 (7)	10
Ba	16,6 ± 1,93 (3)	18,1 ± 5,30 (7)	425
Be	6,74 ± 0,72 (3)	5,42 ± 1,02 (7)	2,8
Cd	3,60 ± 0,27 (3)	3,13 ± 0,43 (7)	0,2
Co	25,1 ± 4,28 (3)	25,0 ± 3,59 (7)	25
Cr	16,2 ± 2,16 (3)	14,9 ± 4,60 (7)	100
Cu	87,8 ± 13,9 (3)	77,4 ± 23,6 (7)	55
Fe	42065 ± 2953 (3)	38610 ± 5400 (7)	50000
Mn	308 ± 114 (3)	391 ± 94,7 (7)	950
Mo	0,24 ± 0,00 (1)	0,08 ± 0,00 (1)	1,5
Ni	5,72 ± 3,72 (3)	6,93 ± 3,45 (7)	75
Pb	4,53 ± 0,59 (3)	3,66 ± 1,00 (7)	13
V	203 ± 22,3 (3)	188 ± 16,4 (7)	135
Zn	47,4 ± 6,97 (3)	53,1 ± 6,19 (7)	70

*Mason, (1966).

Nota: El valor (x) indica el número de datos obtenidos para distintos puntos de muestreo en la península Fildes, con los cuales se calculó el valor promedio y la desviación estándar poblacional.

5.3 Factores de Enriquecimiento (FE)

Se calcularon los FE para los líquenes de los años 1997, 2006, 2008 y 2010 usando como elemento normalizador el valor de corteza de Mason (1966) y la concentración de suelo promedio para los años 1997 y 2006. Los resultados se entregan en las Figuras 5 a la 15.

5.3.1 Factores de Enriquecimiento para los líquenes del año 1997

Se calcularon los FE para los líquenes colectados en el año 1997 en los distintos puntos de muestreo utilizando como referencia el valor de corteza (Figura 5) y los valores promedio de los suelos de la península Fildes para el mismo año (Figura 6). En el primer caso los FE superiores a 10 fueron B, Cd, Mo, Pb y Zn, asignando a estos elementos un

origen antrópico. En el segundo caso para los mismos puntos de muestreo de los líquenes los elementos de origen antrópico fueron Mo, Pb y Zn. Nótese la diferencia en la asignación de Ni para algunos de los sitios estudiados en la Figura 6.

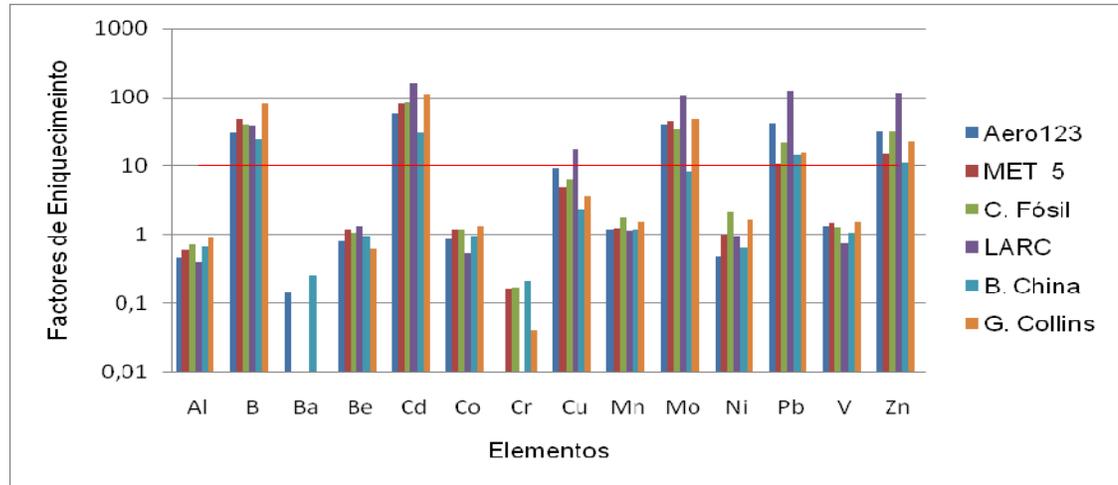


Figura 5. Factores de enriquecimiento para líquenes del año 1997 utilizando el valor de corteza terrestre (Mason, 1966).

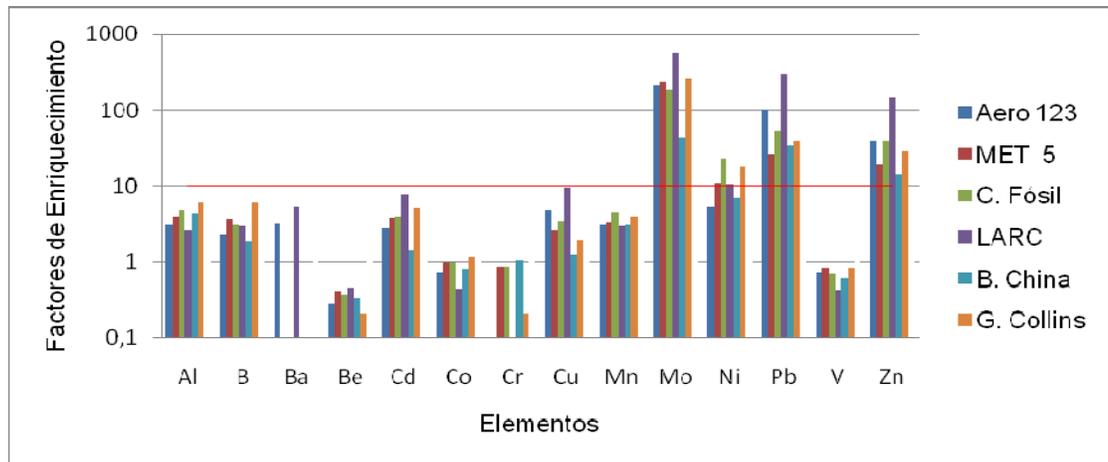


Figura 6. Factores de enriquecimiento para los líquenes del año 1997 utilizando los valores de suelo promedio para la península Fildes del mismo año.

5.3.2 Factores de Enriquecimiento para los líquenes del año 2006

La Figura 7 muestra los FE para los líquenes del año 2006 en los distintos puntos de muestreo respecto de corteza (Mason, 1966) y las Figuras 8 y 9 muestran los FE utilizando como referencia los valores promedios de los suelos antárticos para el año

1997 y 2006, respectivamente. Utilizando la corteza los FE indican que los elementos de origen antrópico son B, Cd, Mo, Pb y Zn. Los FE respecto del suelo promedio de la península Fildes para los años 1997 y 2006 señalan que los elementos de origen antrópico son Mo, Pb y Zn. En el caso del Ni, éste se presenta como antropogénico solo en algunos de los sitios estudiados.

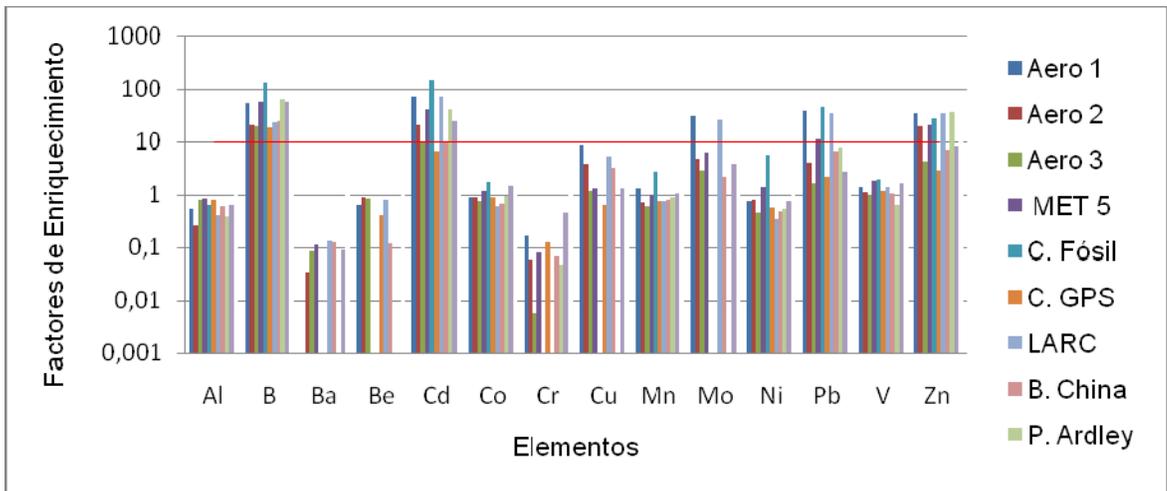


Figura 7. Factores de enriquecimiento para líquenes año 2006 utilizando como referencia los valores de corteza terrestre (Mason, 1966).

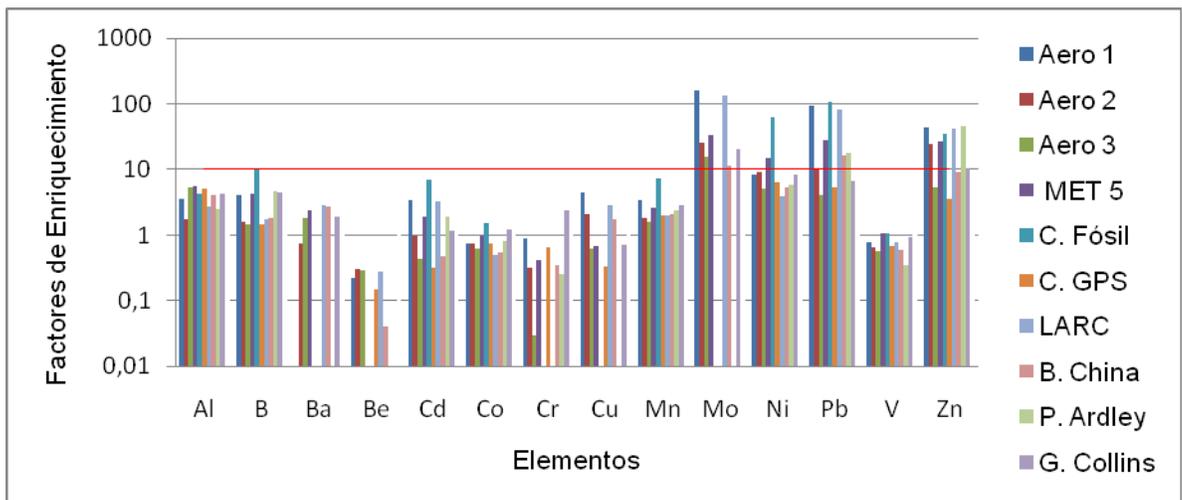


Figura 8. Factores de enriquecimiento para líquenes del año 2006 utilizando como referencia los valores de suelo promedio para la península Fildes en el año 1997.

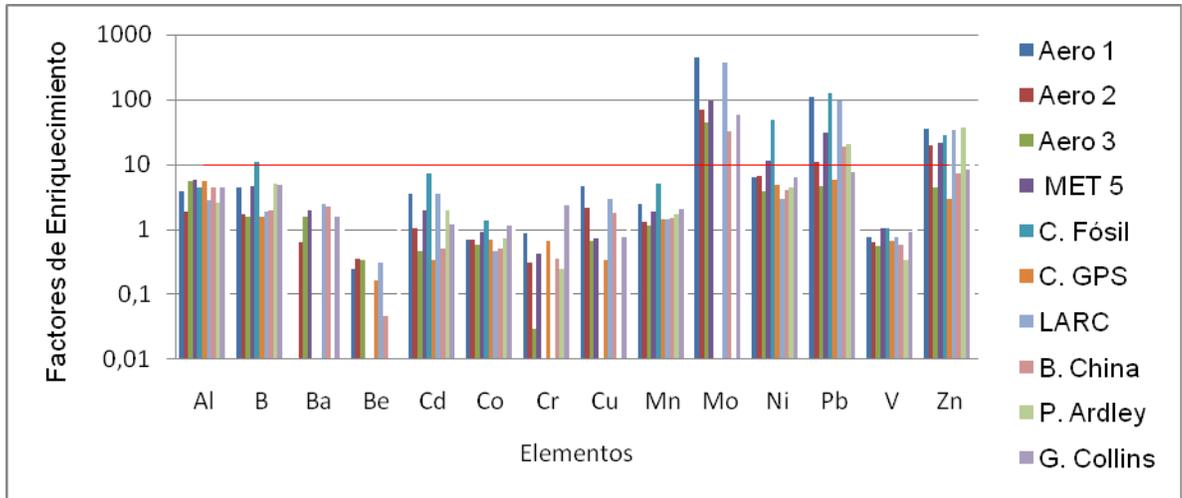


Figura 9. Factores de enriquecimiento para líquenes del año 2006 utilizando como referencia los valores de suelo promedio para la península Fildes en el mismo año.

5.3.3 Factores de Enriquecimiento para los líquenes del año 2008

Los FE para los líquenes colectados en el año 2008 para los distintos puntos de muestreo, se calcularon utilizando corteza como referencia (Figura 10), los valores promedio de los suelos de la península Fildes para el año 1997 (Figura 11) y para el año 2006 (Figura 12). En el primer caso los valores de FE señalan que los elementos de origen antrópico son B, Cd, Mo, Pb y Zn; en los otros dos casos sólo se mantienen como elementos de origen antrópico Mo, Pb y Zn.

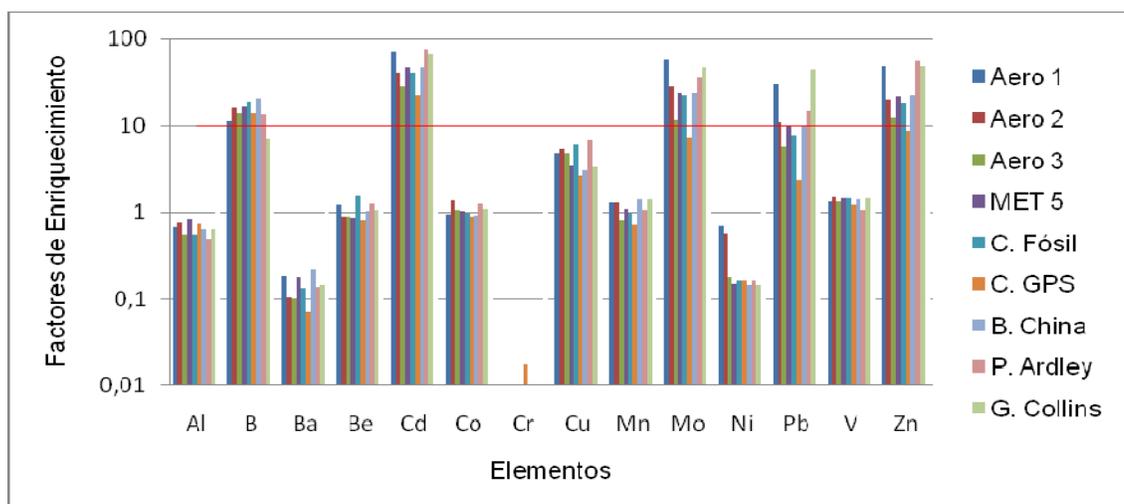


Figura 10. Factores de enriquecimiento para líquenes del año 2008 utilizando como referencia los valores de corteza terrestre (Mason, 1966).

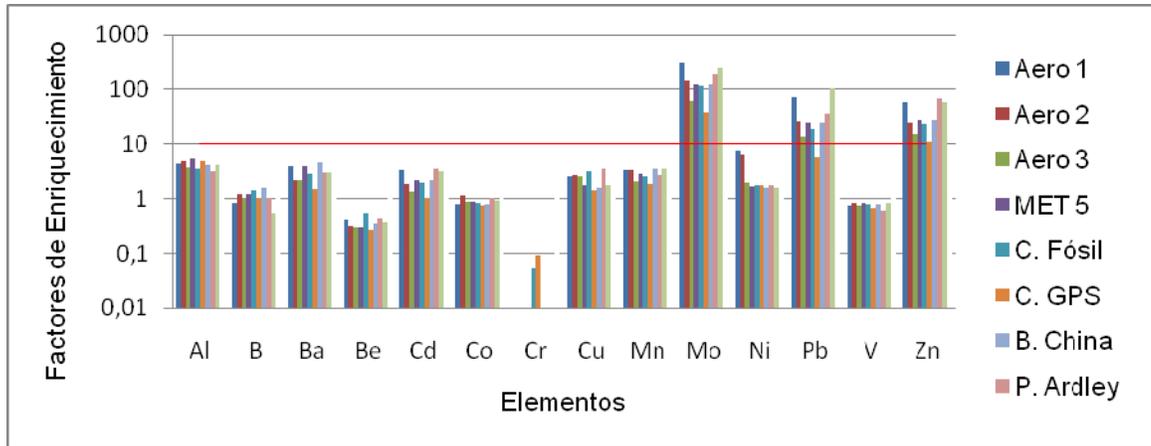


Figura 11. Factores de enriquecimiento para líquenes del año 2008 utilizando como referencia los valores de suelo promedio para la península Fildes del año 1997.

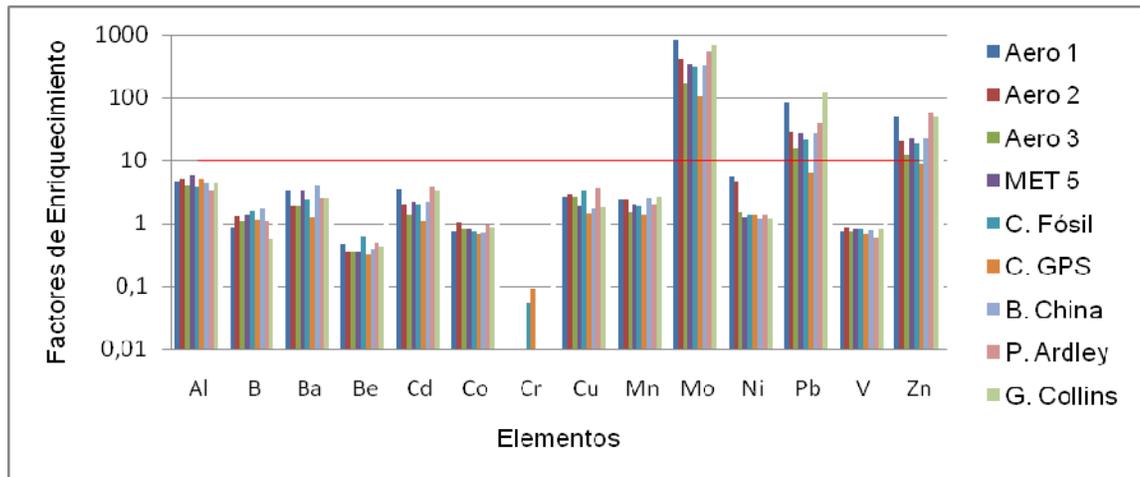


Figura 12. Factores de enriquecimiento para líquenes del año 2008 utilizando como referencia los valores de suelo promedio para la península Fildes para el año 2006.

5.3.4 Factores de Enriquecimiento para los líquenes del año 2010

Los FE para los líquenes colectados en el año 2010 para los distintos puntos de muestreo utilizando corteza como referencia se encuentran en la Figura 13; en este caso los elementos B, Cd, Cu, Mo, Pb y Zn serían de origen antrópico, utilizando el promedio de los suelos de la península Fildes para 1997 y 2006, los FE se muestran en las Figuras 14 y 15, respectivamente. En este caso los elementos de origen antrópico serían B, Ba, Cd, Cu, Mo, Ni, Pb y Zn. Nótese que con respecto a los años 1997, 2006 y 2008 se incorporan los elementos B, Ba, Cd y Cu.

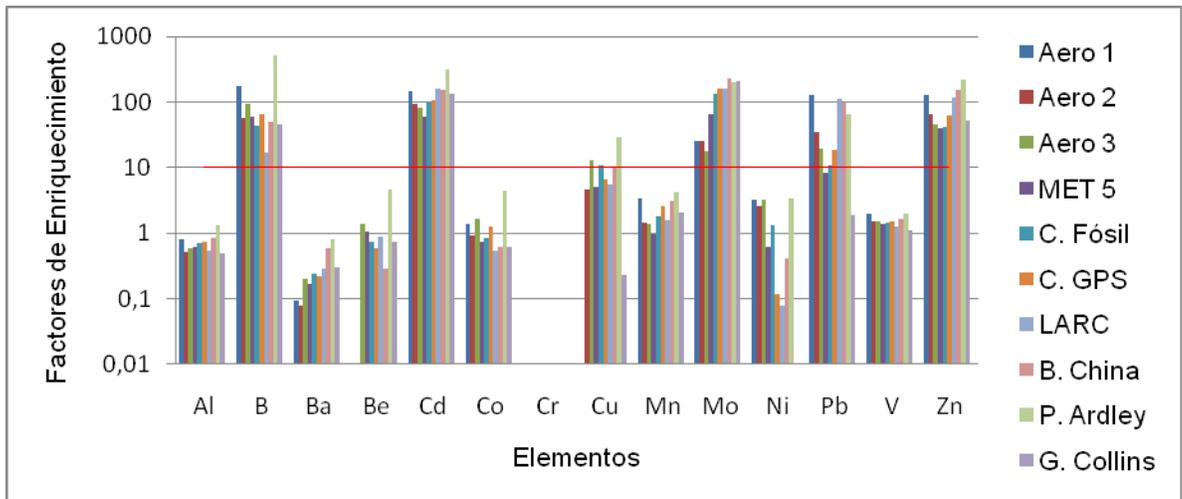


Figura 13. Factores de enriquecimiento para líquenes del año 2010 utilizando como referencia los valores de corteza terrestre (Mason, 1966).

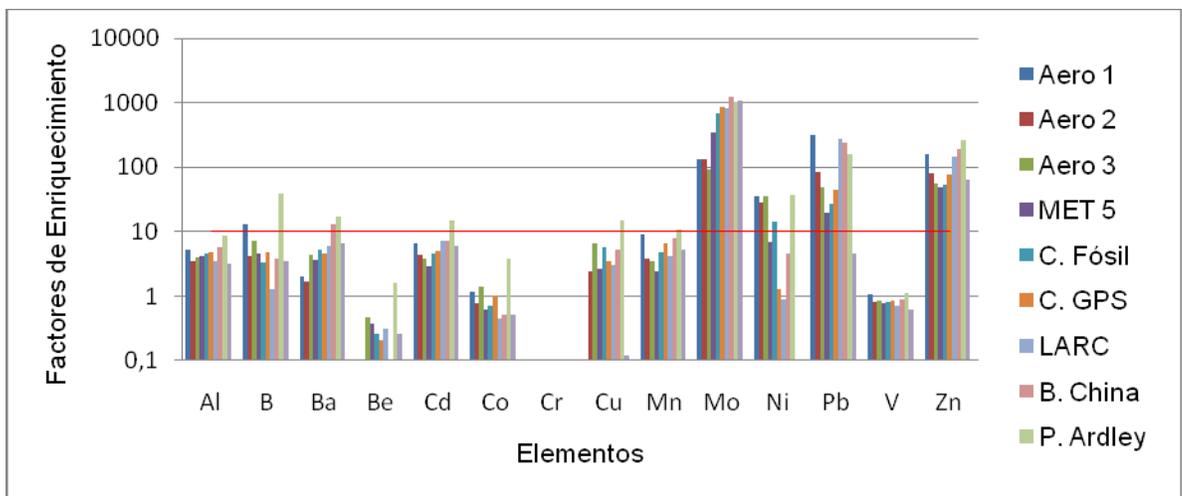


Figura 14. Factores de enriquecimiento para líquenes del año 2010 utilizando como referencia los valores de suelo promedio de la península Fildes para el año 1997.

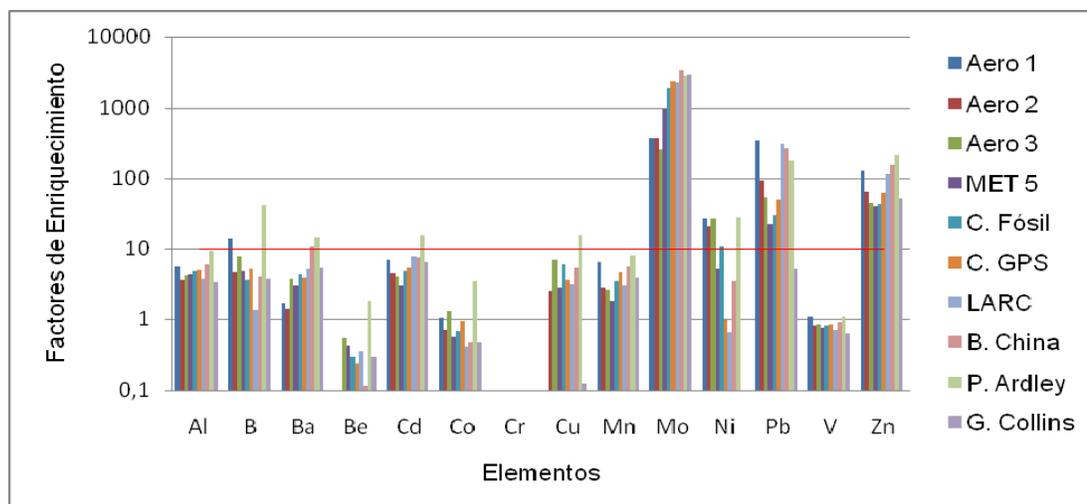


Figura 15. Factores de enriquecimiento para líquenes del año 2010 utilizando como referencia los valores de suelo promedio de la península Fildes para el año 2006.

El análisis de los FE muestra un origen antrópico para Mo, Ni, Pb, Zn en los años 1997, 2006, 2008 y 2010 utilizando los valores de suelo promedio para la península Fildes de los años 1997 y 2006. En los líquenes del año 2010 se incorporan los elementos B, Ba, Cd y Cu mostrando un incremento notorio en la Península Ardley; esta situación es muy particular ya que ésta es una Zona Especialmente Protegida. Posibles orígenes de B se podrían encontrar en el uso de fibras para aislación térmica, detergentes y aceites de motor (Scialli, *et al.*, 2010), además de emisiones de diesel (Giordano *et al.*, 2010). El Ba se emite en la quema de combustibles fósiles como petróleo crudo (Pereira *et al.*, 2010) y petróleo diesel (Giordano *et al.*, 2010) y el Cd por la combustión de petróleo (Pacyna y Pacyna, 2001) o como producto de incineración de residuos domiciliarios (Yuan *et al.*, 2005). El Cu se emite también en la combustión de petróleo crudo (Pacyna y Pacyna, 2001) y de diesel (Giordano *et al.*, 2010).

5.3.5 Factores de Enriquecimiento para los elementos seleccionados

Para verificar la relación entre suelos y líquenes se calcularon los FE para los elementos seleccionados: Mo, Ni, Pb y Zn relacionando el liquen con su respectivo suelo en determinado punto y año de recolección. Estos FE se compararon con los obtenidos anteriormente con respecto a corteza y suelo promedio para el año específico.

La Figura 16 muestra que el año 1997 los cuatro elementos se evidencian muy claramente antropogénicos en el sitio nominado LARC. Los elementos Mo, Pb y Zn lo son también en los otros dos sitios.

En el caso del Mo el análisis por punto de muestreo, sólo entregó un FE muy superior a 10 en el sitio LARC, ya que en Aeródromo 123 y MET 5 la concentración de Mo en el suelo se encuentra bajo el límite de detección. Todo ello evidencia un origen fundamentalmente atmosférico.

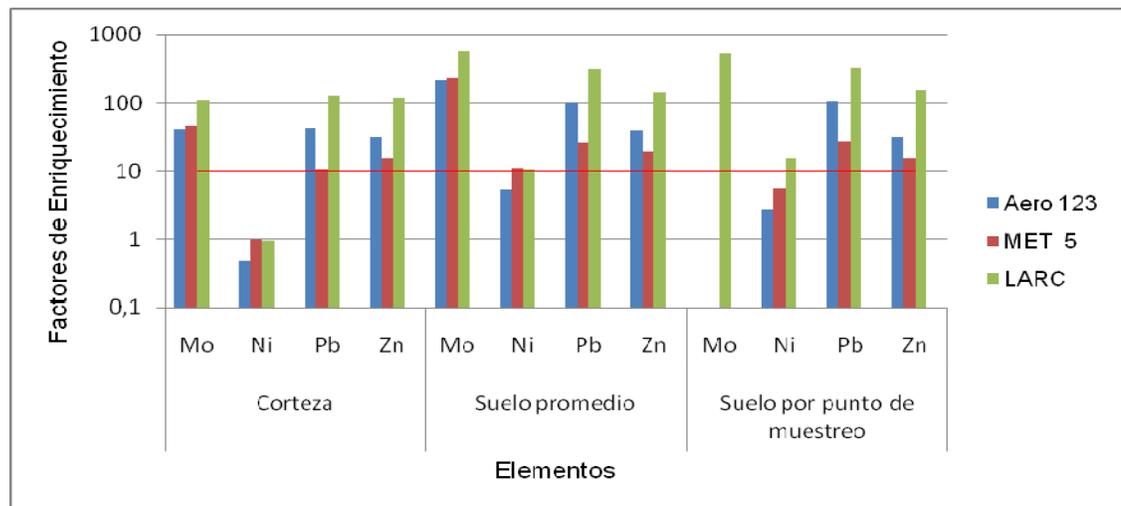


Figura 16. Factores de enriquecimiento para los elementos Mo, Ni, Pb y Zn, con respecto a corteza, suelo promedio y suelo por punto de muestreo en la península Fildes para el año 1997.

La Figura 17 muestra que en el año 2006 el FE para Mo sólo se pudo calcular en el Glaciar Collins, ya que las concentraciones en el suelo de los otros sitios se encontraron bajo el límite de detección. El Ni se evidencia como antropogénico en 3 sitios: MET 5, Cerro Fósil y Península Ardley. El Pb antropogénico se observa en todos los sitios, excepto en Cerro Fósil y Glaciar Collins. En el caso del Zn antropogénico la excepción la constituyen Cerro GPS y Glaciar Collins. Ni, Pb y Zn muestran un origen antrópico en la Península Ardley Zona especialmente Protegida y donde hay escasa actividad humana, esporádica y regulada.

Para los años 1997 y 2006 se encontraron diferencias en los FE de hasta dos veces para Ni usando como referencia los suelos promedios respecto a los suelos por punto de muestreo, mientras que Pb y Zn se mantuvieron.

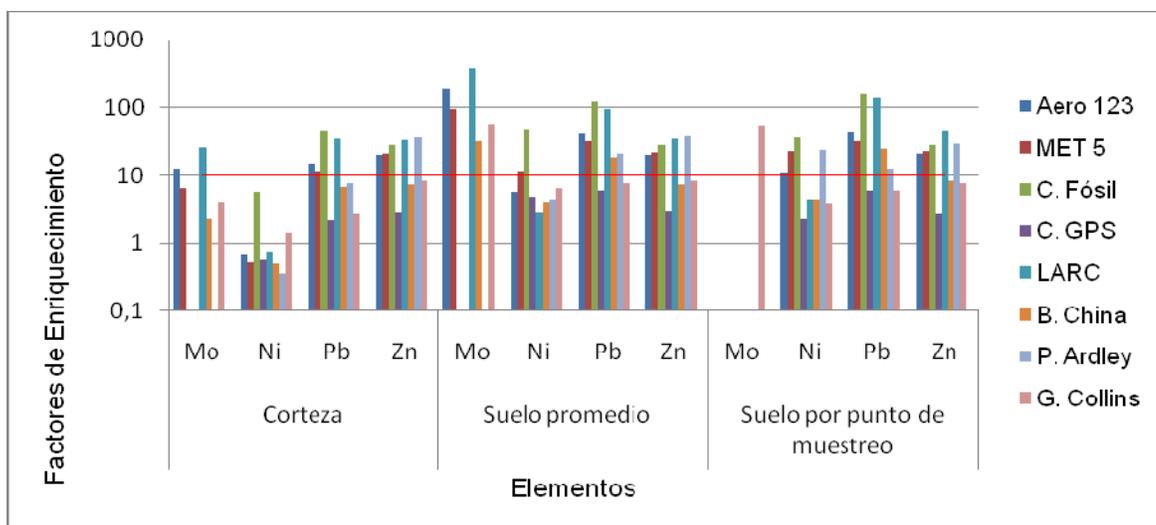


Figura 17. Factores de enriquecimiento para los elementos Mo, Ni, Pb y Zn en líquenes, con respecto a corteza, suelo promedio y suelo por punto de muestreo de la península Fildes para el año 2006.

5.4 Distribución espacial de las concentraciones de los elementos Mo, Ni, Pb y Zn

La Figura 18 muestra las concentraciones de Mo en líquenes de los años 1997 y 2010. Las mayores concentraciones se encuentran en el Aeródromo 123 donde se registró el valor máximo de 0,49 mg/kg en 1997. El año 2010 las mayores concentraciones de Mo se obtuvieron en torno a las Bases Eduardo Frei y Bellinghausen (LARC, Cerros Fósil y GPS) y Glaciar Collins siendo la mayor concentración de 0,54 mg/kg en LARC. Ambos máximos se encuentran por sobre el valor máximo de 0,4 mg/kg para Mo en *Usnea spp.*, recomendado por la USDA Forest Service (2010). El alto valor cuantificado en el Glaciar Collins sólo podría explicarse por el traslado de larga distancia de las masas de aire hacia el lugar, ya que no existe en este sitio actividad humana directa.

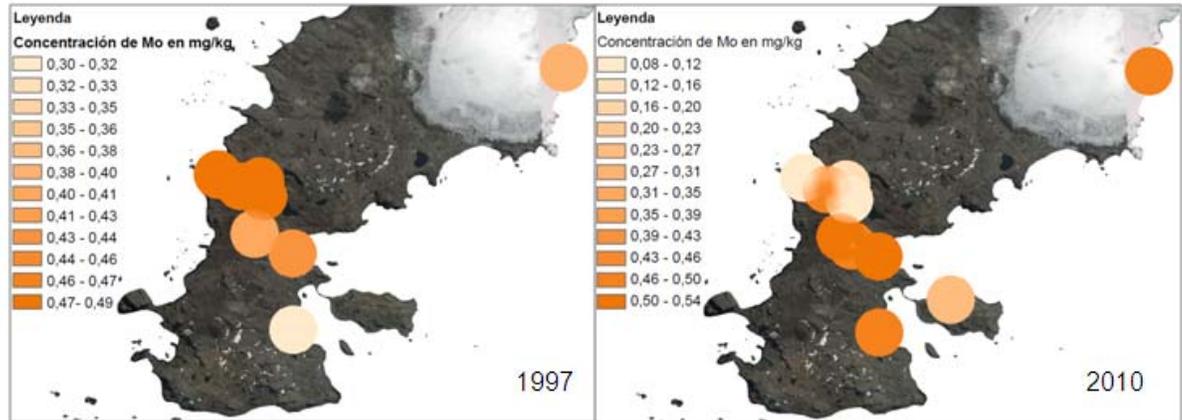


Figura 18. Concentraciones de Mo en líquenes para los años 1997 y 2010 expresadas en mg/kg.

La Figura 19 muestra las concentraciones de Ni en líquenes para los años 1997 y 2010. Las mayores concentraciones en 1997 se observaron en torno al cerro fósil y a la Base China siendo la mayor concentración de 1,25 mg/kg en el cerro Fósil. El año 2010 las mayores concentraciones de Ni se obtuvieron en la cabecera del aeródromo con un valor máximo de 0,99 mg/kg en Aeródromo 3. Ambos máximos se encuentran bajo el valor máximo de 7,1 mg/kg para Ni en *Usnea spp.*, recomendado por la USDA Forest Service (2010).

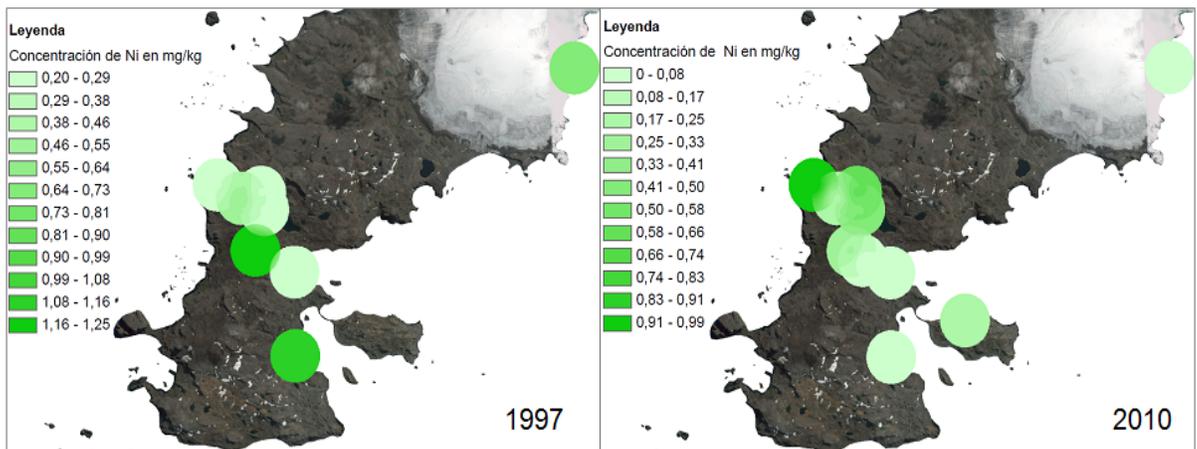


Figura 19. Concentraciones de Ni en líquenes para los años 1997 y 2010 expresadas en mg/kg.

La Figura 20 muestra las concentraciones de Pb en líquenes para los años 1997 y 2010. El año 1997 las mayores concentraciones se encontraron en torno las bases científicas Eduardo Frei, Bellinghausen, en la Gran Muralla; y el aeródromo y la mayor concentración fue de 4,45 mg/kg en LARC. El año 2010 las mayores concentraciones se observaron en la cabecera del aeródromo y en las Bases Eduardo Frei y Bellinghausen; la mayor concentración fue de 3,35 mg/kg en Aeródromo 1. Ambos máximos se encuentran bajo el valor máximo de 13,3 mg/kg para Pb en *Usnea spp.*, recomendado por la USDA Forest Service (2010).

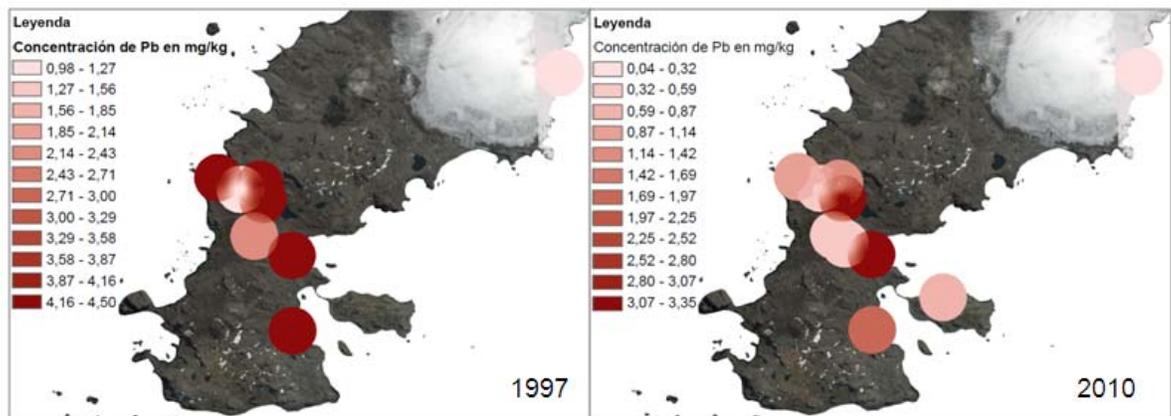


Figura 20. Concentraciones de Pb en líquenes para los años 1997 y 2010 expresadas en mg/kg.

La Figura 21 muestra las concentraciones de Zn en líquenes para los años 1997 y 2010. El año 1997 las mayores concentraciones se observaron en el complejo de Bases Eduardo Frei y Bellinghausen, donde la mayor concentración fue de 22,24 mg/kg en LARC. El año 2010 las mayores concentraciones de Zn se observaron en el complejo de Bases Eduardo Frei y Bellinghausen y en la cabecera del aeródromo, donde la mayor concentración fue de 18,08 mg/kg en LARC. Ambos máximos se encuentran bajo el valor máximo de 65,8 mg/kg para Zn en *Usnea spp.*, recomendado por la USDA Forest Service (2010).

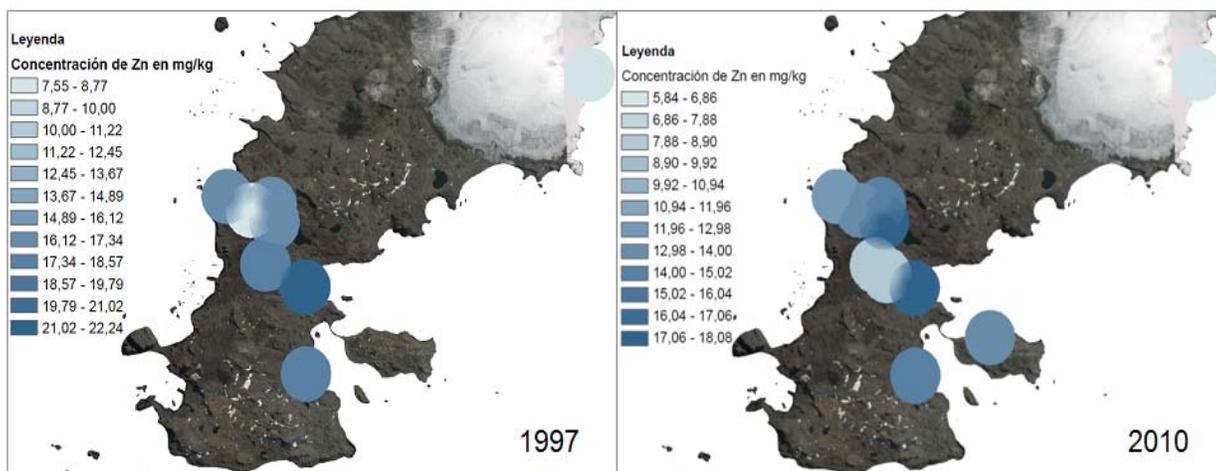


Figura 21. Concentraciones de Zn en líquenes para los años 1997 y 2010 expresadas en mg/kg.

La EPA (2008) elaboró un listado de 187 compuestos y elementos considerados peligrosos en aire para la salud humana, la evaluación de riesgos incluye aspectos como probabilidad de cáncer y enfermedades respiratorias graves con el fin de identificar y priorizar tóxicos en el aire, el listado incluye los elementos Ni y Pb.

La Figura 22 (a-d) muestra las concentraciones de los elementos Mo, Ni, Pb y Zn en los líquenes en los años 1997, 2006, 2008 y 2010, a) los puntos que incrementaron su concentración de Mo el año 2010 con respecto al año 1997 son Cerro Fósil, LARC, Base China y Glaciar Collins; las mayores concentraciones de Mo se observan notoriamente en los años 2008 y 2010; b), los puntos que incrementaron su concentración en Ni el año 2010 con respecto al año 1997 son Aeródromo 1, 2 y 3; sin embargo, las mayores concentraciones de Ni se observaron el año 2006 en diferentes sitios; c), las concentraciones de Pb en los líquenes disminuyeron en el año 2010 con respecto al año 1997, aunque se observaron elevadas concentraciones en los años 2006 y 2008; d) los puntos que incrementaron su concentración de Zn el año 2010 con respecto al año 1997 son Aeródromo 1 y MET 5; las mayores concentraciones se observan en el año 2006. Sólo Mo presenta un incremento evidente de sus concentraciones en el año 2010 y Pb una disminución de sus concentraciones.

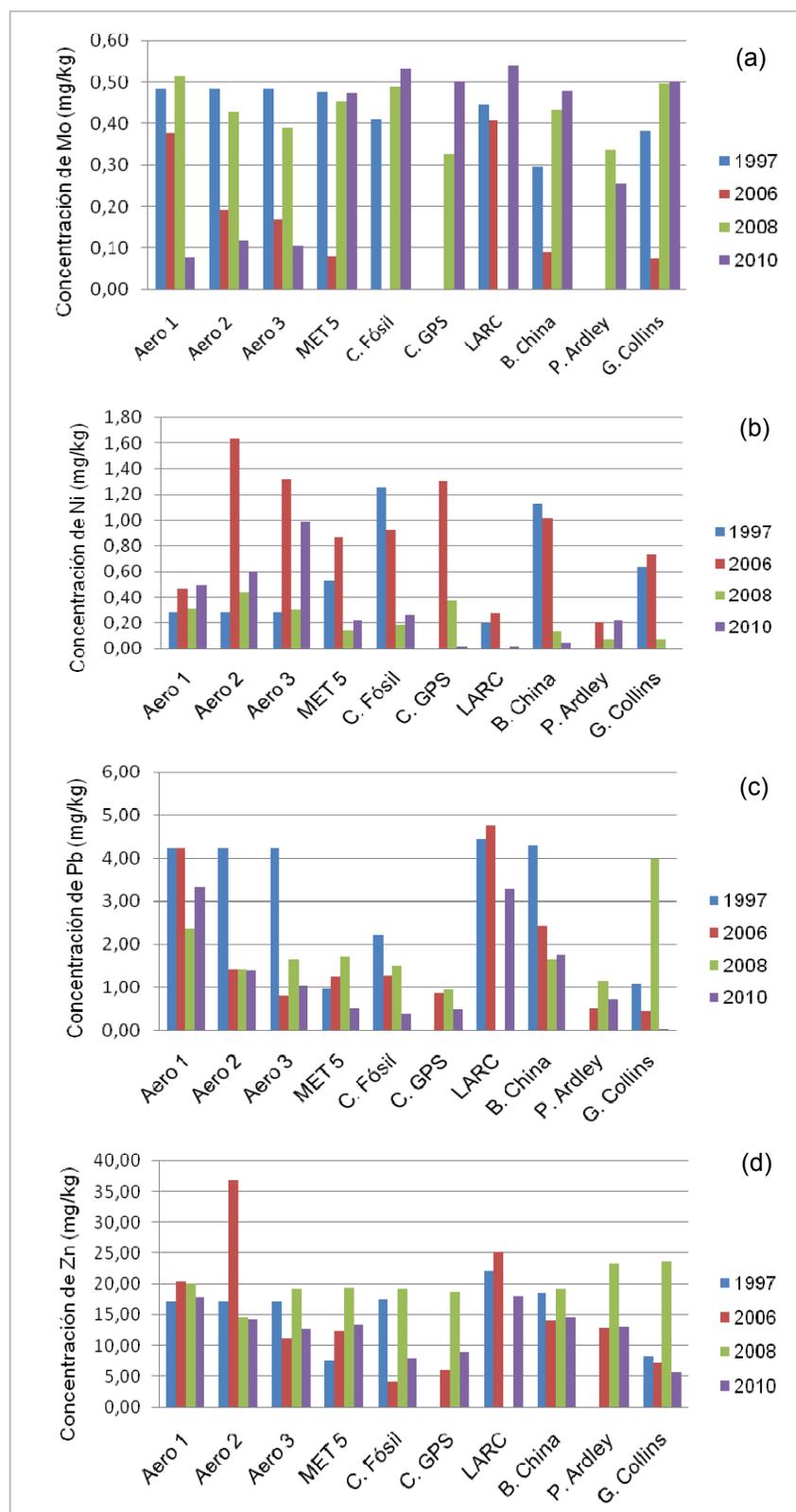


Figura 22. Concentraciones de de (a) Mo, (b) Ni, (c) Pb, y (d) Zn en mg/kg para las muestras de líquenes estudiadas los años 1997, 2006, 2008 y 2010.

El Cuadro 11 muestra una comparación entre las concentraciones promedio de los elementos Mo, Ni, Pb y Zn obtenidas en el año 2010 para el líquen *Usnea aurantiaco-ater* y, otras informadas en la Antártica para el mismo líquen, para *Usnea spp* y para *Usnea antartica*. Los elementos Mo y Ni no están informados en dichas investigaciones (Poblet *et al.*, 1997; Rodrigues dos Santos *et al.*, 2006; Osyczka *et al.*, 2007). En los distintos estudios las concentraciones de Pb en líquenes se mantienen aproximadamente en el mismo orden de magnitud al obtenido en esta investigación de $1,30 \pm 1,12$ mg/kg, excepto en el realizado por Osyczka *et al.*, (2007), en el cual la concentración es de $5,00 \pm 1,00$ mg/kg para *Usnea aurantiaco-ater*. Las concentraciones de Zn en líquenes se encuentran en un orden de magnitud similar al obtenido en este estudio de $12,7 \pm 3,81$ mg/kg, excepto en los estudios de Osyczka *et al.*, (2007), donde se obtuvieron $27,0 \pm 5,00$ mg/kg para *Usnea aurantiaco-ater* y en el de Rodrigues dos Santos *et al.*, (2006) que informa 5,60 mg/kg para *Usnea spp.*, ambos estudios representan la mayor y menor concentración respectivamente.

Cuadro 11. Concentraciones promedio obtenidas en el año 2010 en el líquen *Usnea aurantiaco-ater* comparadas con las concentraciones promedio obtenidas en líquenes antárticos por otros investigadores. Valores expresados en mg/kg.

Elemento	<i>Usnea aurantiaco-ater</i> ¹	<i>Usnea aurantiaco-ater</i> ²	<i>Usnea aurantiaco-ater</i> ³	<i>Usnea spp.</i> ⁴	<i>Usnea antartica</i> ²
Mo	$0,36 \pm 0,18$	-	-	-	-
Ni	$0,32 \pm 0,31$	-	-	-	-
Pb	$1,30 \pm 1,12$	$1,15 \pm 1,03$	$5,00 \pm 1,00$	-	$0,95 \pm 1,05$
Zn	$12,7 \pm 3,81$	$9,66 \pm 4,03$	$27,0 \pm 5,00$	5,60	$10,9 \pm 2,85$

¹ Este trabajo, península Fildes.

² Poblet *et al.*, (1997). Estación Jubany, Isla Rey Jorge.

³ Osyczka *et al.*, (2007). Bases científicas, Isla Rey Jorge.

⁴ Rodrigues dos Santos *et al.*, (2006). Bahía Almirantazgo, Isla Rey Jorge.

5.5 Fuentes posibles de los elementos Mo, Ni, Pb y Zn en la atmósfera Antártica

Molibdeno

La presencia de Mo en los líquenes de la península Fildes podría provenir del uso de incineradores (Pacyna y Pacyna, 2001), los que son utilizados por las bases científicas para la eliminación de residuos. Boccaccini y Ondracek (1995) informan la presencia de elementos como Cd, Mo y Sr entre otros, en concentraciones del orden de mg/kg en los

polvos de los filtros de incineradores y en las cenizas emitidas. El Mo también puede originarse de la combustión de petróleo (Pacyna y Pacyna 2001; Pereira *et al.*, 2010) y por el uso de aceites lubricantes con molibdenita (MoS_2) (Moulson y Herbet, 2003), insumos que son utilizados en la Antártica en aviones y maquinaria de diversos tipos, como por ejemplo vehículos, maquinaria para despeje de nieve y construcción.

Es posible además, que el aumento de la concentración de Mo del año 2010 respecto del año 1997 refleje el incremento de la producción global de Mo a partir del año 2003, la cual tuvo su máximo el año 2007. China, E.E.U.U., Chile y Perú son los principales productores de Mo a nivel mundial (COCHILCO, 2008).

Níquel

El Ni se puede encontrar en la atmósfera y ser absorbido por los líquenes de la península Fildes debido a la combustión de petróleo (Pacyna y Pacyna 2001; Pereira *et al.*, 2010), combustión de diesel (Giordano *et al.*, 2010) o al uso de aceites lubricantes (Song *et al.*, 2010).

Plomo

El Pb se puede originar por la combustión de gasolinas bajas o altas en Pb y la combustión de petróleo (Pacyna y Pacyna 2001; Pereira *et al.*, 2010). Otro posible origen es debido al desgaste de pastillas de freno, gasolina, lubricantes de petróleo y pesos de plomo en ruedas (Lough *et al.*, 2005), otros autores que señalan su origen en la quema de aceites lubricantes son Muñoz *et al.*, (2006) y Song *et al.*, (2010). Las concentraciones de Pb estarían disminuyendo en el 2010 respecto al 1997. La escasez local del tipo de fuentes podrían indicar más el hecho de que el Pb que está siendo absorbido por los líquenes es un Pb residual de tipo global, más que un Pb generado por fuentes locales.

Zinc

El Zn en la Antártica puede provenir de la combustión de petróleo (Pacyna y Pacyna 2001; Pereira *et al.*, 2010), de la combustión de diesel (Giordano *et al.*, 2010) y de aceites lubricantes (Lombaert *et al.*, 2004; Maricq, 2007; Song *et al.*, 2010). Lombaert *et al.*, (2004) determinó la composición del material particulado generado por la combustión del diesel, el combustible más utilizado en la Antártica, mostrando que el Zn es parte principal de su composición.

Estudios conjuntos de Mo, Ni, Pb y Zn

De acuerdo a Song *et al.*, (2010) los aceites lubricantes nuevos poseen Pb en concentraciones menores a 5 mg/kg, Ni en concentraciones menores a 0,5 mg/kg y Zn en una concentración de 683 mg/kg. En el aceite lubricante usado el Pb posee concentraciones menores a 5 mg/kg, Ni en concentraciones menores a 0,5 mg/kg y Zn en una concentración de 457 mg/kg. En cuanto a las cenizas que se producen de la quema del aceite lubricante por pirolisis se encontró el Pb en una concentración menor a 0,1 mg/kg, el Ni en una concentración menor a 0,01 mg/kg y el Zn en una concentración de 0,3 mg/kg.

Los elementos Ni y Mo se utilizan como aditivos en los combustibles de aviación para mejorar la eficiencia de los motores (Marín-Flores *et al.*, 2010) y la gasolina de aviación contiene tetraetilo de Pb (CH_3CH_2)₄Pb (Chile Diesel, 2009).

Las baterías, pueden contener elementos como Ni, Cd, Zn, Pb y Hg, especialmente aquellas Ni-Cd, Zn-Pb; si no existen medidas adecuadas de disposición o reciclaje de baterías, sus componentes se pueden ser liberadas al entorno y producir problemas ambientales (Romano *et al.*, 2004).

Lough *et al.*, (2005) señala que otros posibles orígenes del Pb en la atmósfera pueden darse debido a las concentraciones traza presentes en las pastillas de freno, gasolina y lubricantes de petróleo (en forma de nano partículas), además de pesos de plomo en las ruedas, donde el material se deposita y es pulverizado por el tráfico generando su acumulación.

5.6 Medidas de gestión para la prevención o disminución de la contaminación atmosférica en la península Fildes, Isla Rey Jorge, Antártica

Con el propósito de mantener y/o mejorar las medidas de gestión ambiental que actualmente se utilizan y complementarlas con aquellas que han dado resultados en otros casos para mejorar la calidad del aire en la península Fildes se proponen las siguientes medidas de gestión ambiental.

5.6.1 Medidas de Eficiencia Energética y uso de Energías Renovables No Convencionales

- **Medidas de eficiencia energética**

Estas medidas están orientadas al ahorro energético para la reducción del uso y dependencia de combustibles fósiles, entre las cuales destacan:

- Cambio de iluminación y equipos de control:* Una ampolleta eficiente que consume 20 watts provee la misma cantidad de luz que una incandescente de 100 watts y una ampolleta que usa LED (Light-Emitting Diode) gasta 3 watts, además, mientras la ampolleta eficiente dura 10 mil horas una de LED tiene 35 mil horas de vida útil (AChEE, 2011). Los equipos de control lumínico poseen sensores que detectan movimiento y se encienden y apagan automáticamente permitiendo ahorrar energía.
- Cambio de Equipos:* Seleccionar o reemplazar equipos con menor consumo energético y mayor rendimiento, especialmente aquellos con certificados y etiquetados que garantizan dicha condición como por ejemplo Energy Star de la EPA (Fundación Chile, 2008).
- Ahorro de Agua:* El bombeo que se realiza hacia las bases también implica un consumo de energía, por lo tanto, al ahorrar agua también se estará ahorrando energía.
- Uso de materiales aislantes en la construcción y renovación de edificios:* Considerar desde el diseño de los edificios aspectos energéticos y medio ambientales y renovar instalaciones antiguas, orientación de los edificios menos expuesta a las condiciones climáticas, utilizar materiales aislantes y ventanas con aislamiento térmico de mayor eficiencia (OTA, 2003)
- Capacitación:* Realizar programas de mejoramiento de conducta para el ahorro energético eliminando prácticas que impliquen alto consumo como por ejemplo mantener equipos encendidos que no están siendo utilizados (Fundación Chile, 2008).

- f) *Aprovechamiento de la energía*: Aquellos sistemas o procesos que generan calor remanente como por ejemplo calderas y sistemas de enfriamiento, pueden ser aprovechados para calefacción y/o generación de energía.

Ejemplos de Eficiencia Energética: Tin *et al.*, (2010) señala que en la base Rothera del Reino Unido se han utilizado medidas simples de eficiencia energética como el cambio de la calefacción eléctrica por agua caliente y combustión directa, mejora de la iluminación, sistemas de ahorro de energía en congeladores, programas de cambio de conductas y diseño de estructuras que minimizan la acumulación de nieve, debido al alto consumo energético que involucran las actividades de despeje de nieve.

En la estación sueca Wasa se utilizó un diseño de conservación energética donde los muros y techos tienen hasta 0,5 metros de aislamiento térmico (lana mineral) las ventanas son de triple panel y no existen ventanas de orientación sur. El aire caliente generado por las cocinas o sauna se redistribuye por los edificios. La mayor cantidad de calor es generado por paneles solares y se planifica cuidadosamente las necesidades energéticas en cada campaña anual.

En la base Franco-Italiana Concordia se utiliza el calor residual de enfriamiento y escape de los generadores diesel para calefacción y el aislamiento minimiza la pérdida de calor.

En las bases australianas se les advierte a los nuevos ocupantes que el costo del consumo energético puede ser 5 veces el costo en el continente.

- ***Uso de Energías Renovables No Convencionales***

Las energías renovables se caracterizan porque sus procesos de transformación y aprovechamiento de energía útil no se consumen ni se agotan, y se clasifican como convencionales y no convencionales según el grado de desarrollo de las tecnologías para su aprovechamiento y el grado de participación en el mercado (CNE, 2010). Son utilizadas con el objetivo de reemplazar la fuente de emisión o complementar el uso de combustibles fósiles para reducir su consumo. Son consideradas energías limpias y tienen la ventaja de reducir la dependencia de combustibles fósiles y transporte desde los países que conforman el tratado antártico, Chile por ejemplo importa el diesel principalmente desde Argentina (ENAP, 2011).

- a) *Energía eólica*: Se obtiene de la energía cinética generada por los vientos principalmente para la obtención de energía eléctrica, su uso ha sido aplicado en la Antártica continental con resultados positivos (Tin *et al.*, 2010).

Ejemplos del uso de Energía Eólica: En Mawson, dos turbinas de 300 kW proveen la mayor cantidad de energía, se está construyendo un nuevo parque eólico en la isla Ross para proveer 100% de la energía de la estación de Nueva Zelanda Scott y alimentar parte de los requerimientos de la estación McMurdo (USA).

La división antártica australiana diseñó una granja eólica basada en 3 turbinas de 300 kW para Mawson y permitir su funcionamiento sin combustible fósil. Desde el inicio de su operación la carga de energía de la estación ha excedido el 90%, con vientos mayores a 12 m/s. La entrada de los vientos durante los primeros 6 años de operación ha promediado un 35%, equivalente a un ahorro de combustible de 32% anual sobre la línea base de 2002. El máximo ahorro mensual de combustible ha llegado a 58% comparado con el año 2002.

En la base Neumayer de Alemania fue necesario instalar turbinas especiales con materiales ligeros para evitar el uso de grúas pesadas en el hielo, el potencial de energía eólica es de 165 W/m². El generador provee en promedio 4 kW diarios de energía eléctrica (35.000 kWh/año) directamente alimentados a la red eléctrica de la base. El consumo promedio de combustible se redujo en un 6%, con reducciones de 10% a 13% en invierno (por menor demanda debido a la temporada). Se decidió la construcción de 5 generadores eólicos de 30 kW acoplados a un generador diesel de 160 kW de respaldo, que suplen todas las necesidades energéticas de la base. Se espera completar esta nueva instalación hacia fines de 2011, con el primer generador ya instalado en febrero 2009.

- b) *Energía solar*: Se obtiene mediante la captación de luz y calor provenientes del sol, principalmente obtenida a través de paneles fotovoltaicos para la generación de energía eléctrica o el uso de colectores solares térmicos para calentar directamente agua (Fundación Chile, 2008).

Ejemplos del uso de la Energía Solar: De acuerdo a Tin *et al.*, (2010) la energía solar se está utilizando para proveer de energía a las bases antárticas y las estaciones de campo. También se utiliza a menudo energía termosolar para proveer aire y agua

caliente. En la estación Wasa, 48 paneles solares de 55 W cada uno proveen la mayor parte de la energía de la base. Los paneles están respaldados baterías capaces de almacenar 1160 Ah. El viento antártico frecuentemente quiebra los paneles y sus placas de vidrio protectoras, pero aun así el sistema funciona bien.

En la base Syowa japonesa (110 personas en verano y 28 en invierno) utilizan paneles solares con 55 kW de capacidad y proveen un suministro anual de 44.000 kWh reemplazando entre 3 y 5% del combustible fósil. Los paneles son complementados por colectores solares de tipo aire que capturan calor transfiriéndolo a los muros de la estación produciendo 86.318 MJ/año. Un sistema de agua caliente solar con tubos al vacío con capacidad de 324.000 kcal/día permite elevar la temperatura del agua desde 0°C a 30°C en un minuto.

- c) *Biomasa*: Proviene del aprovechamiento de la materia orgánica e inorgánica formada generalmente por algún proceso biológico proviene de plantas o animales, habitualmente residuos, los cuales se pueden utilizar para generar energía eléctrica o calor a través de biogás por descomposición de la materia orgánica (Fundación Chile, 2008); con ello se podrían aprovechar los residuos orgánicos de las bases científicas.

Ejemplos de uso de biomasa: No existen casos en la antártica de la utilización de esta energía, sin embargo, es ampliamente usada en Alemania en grandes y pequeñas plantas. En Estados Unidos un pequeño digestor ubicado en una plaza que es alimentado sólo por los residuos vegetales y excremento de mascotas se utiliza para obtener electricidad e iluminar la plaza (Shimbla, 2010).

- d) *Mareomotriz*: Esta energía proviene del movimiento del mar Un estudio realizado para el Banco Interamericano del Desarrollo (2009) demostró que Chile tiene un potencial bruto en energía mareomotriz, sólo a través del oleaje, de unos 164 GW, si se utilizara un 10% de la energía mareomotriz disponible se podría igualar la capacidad instalada de todo el Sistema Interconectado Central. Sin embargo, aun no ha sido adecuadamente estudiada en Chile y no ha sido implementada en la Antártica.

Ejemplos de uso de Energía Mareomotriz: La empresa de energía Électricité de France en La Rance funciona desde el año 1967, produciendo electricidad con energía

mareomotriz para cubrir las necesidades de una ciudad como Rennes, equivalente al 9% de las necesidades de Inglaterra (Retiere, 1994).

- e) *Sistemas Combinados*: En materia energética y usos de ERNC se recomienda no utilizar un sólo tipo de energía, si no que sistemas complementarios que garanticen la provisión de energía constante, especialmente en climas extremos.

Ejemplos del uso de sistemas combinados: En la mayoría de los casos utilizados en el continente antártico. Según Tin *et al.*, (2010) la energía solar se combina con generadores eólicos y generadores diesel para suplir la demanda de energía; en algunos casos como en la base Wasa, los paneles solares son capaces de atender la mayor parte de la demanda energética.

La estación belga Princess Elisabeth está diseñada para abastecerse en un 100% con energías renovables con generadores diesel sólo de respaldo. Cuenta con turbinas eólicas, paneles solares y termosolares

5.6.2 Medidas de gestión de residuos

- ***Incineradores***

- a) *Selección y segregación de residuos que requieren incineración*: De acuerdo a Alvim-Ferraz y Afonso (2005) la cantidad de residuos a incinerar podría reducirse en un 80% sólo cuando los residuos que requieren incineración están rigurosamente separados. En consecuencia, las cantidades de contaminantes emitidos en relación con la incineración de una mezcla de todos los tipos de residuos se obtuvieron las siguientes reducciones: material particulado 98%, dioxinas 99,5 %, As, Cd, Cr, Mn y Ni en un 90%, 92%, 84%, 77%, respectivamente y en un 92% de Hg y Pb, SO₂ y NO_x en un 93% y prácticamente se eliminó el CO y el HCl con más de un 99%.

- b) *Uso de Filtros "ad hoc"*: Si los residuos se separan adecuadamente, se puede utilizar un filtro acorde a los tipos de residuos incinerados y los elementos y compuestos que se espera encontrar en las emisiones.

- c) *Disposición de Cenizas*: Las cenizas que provienen de la limpieza del incinerador deben ser encapsuladas y llevadas al continente; las cenizas volantes pueden controlarse a través de filtros para reducir la cantidad de metales que se liberan a la atmósfera. Otras medidas o tratamientos dependen de la composición de la cenizas (Reijnders, 2005).
- d) *Pirólisis*: La incineración por pirólisis, sin presencia de oxígeno, es considerada una alternativa a la incineración de residuos convencional ya que reduce la emisión de dioxinas y metales pesados, así como otros contaminantes como el NOx y SOx debido a una combustión más eficiente (Shin *et al.*, 2008)

- ***Eliminación de Baterías Zn-Pb y Ni-Cd***

Las baterías en desuso pueden traer consecuencias ambientales si no tienen una adecuada disposición o tratamiento, estos residuos catalogados como peligrosos según la normativa chilena Art. 90 D.S. 148, deben ser encapsulados y transportados al continente para impedir que sus componentes sean liberados a la atmósfera, suelos, recursos hídricos y biológicos. Existen también métodos de reciclaje previa separación de sus componentes (Romano *et al.*, 2004).

- ***Eliminación de aceites lubricantes y contenedores***

Lubricantes usados y sin usar contienen metales pesados e hidrocarburos policíclicos aromáticos; incentivar el uso de aceites lubricantes más afines con el medio ambiente, como por ejemplo, aquéllos que se biodegradan con mayor rapidez y son menos tóxicos por su composición química logrando disminuir el riesgo de contaminación. En las condiciones de la Antártica los lubricantes sintéticos basados en polialfaolefinas y naftalenos alquilados persisten en los sedimentos después de un año con poco o ningún cambio en la concentración o la composición (Thompson *et al.*, 2007); Barra (2009) encontró aportes de hidrocarburos en sedimentos costeros con un origen petrogénico y pirogénico, por lo que es necesario mejorar las prácticas de manejo y disposición de residuos de lubricantes para evitar su derrame o evaporación.

5.6.3 Consideraciones Generales

Se debe incorporar la generación de información base sobre emisiones atmosféricas, como por ejemplo realizar un inventario de emisiones; elaborar sistemas de vigilancia, como por ejemplo el biomonitoreo para el control de emisiones de forma permanente, generando información de utilidad tanto para investigación como para tomar decisiones e implementar medidas de gestión ambiental.

Se deben fortalecer acciones de cooperación internacional y cooperación tecnológica entre los países que son parte del Tratado Antártico.

Otro aspecto que se debería considerar es limitar y/o controlar las actividades turísticas con el objetivo de reducir sus impactos, entre ellos eliminar la presión por el uso de combustibles fósiles y emisiones atmosféricas (Liggett *et al.*, 2010).

6. Conclusión

El aire de la Antártica y su composición química es uno de los compartimentos ambientales menos estudiados con lo que este estudio hace una contribución importante al entregar información científica de la evolución de su composición elemental en la península Fildes entre los años 1997 y 2010.

El estudio conjunto de líquenes y suelos permitió demostrar la necesidad de utilizar los suelos locales y específicamente los suelos que sustentan estos líquenes para definir mejor la vía de absorción de los elementos.

La herramienta de análisis espacial IDW del programa ArcGis 9.3 resultó adecuada para obtener información de interpretación directa y gráfica, con el fin de relacionar las concentraciones obtenidas por biomonitoreo con sus potenciales fuentes.

La evidencia de introducción de elementos químicos de origen antrópico en el aire antártico es relevante, ya que ello puede alterar otros compartimentos ambientales (agua, suelo, biota vegetal, biota animal) y afectar los ecosistemas.

Los elementos encontrados, atribuibles a fuentes antropogénicas, guardan relación principalmente con el uso de combustibles fósiles, lubricantes, productos de incineración y al manejo inadecuado de residuos, como por ejemplo baterías y lubricantes.

Por otra parte, la Antártica es el continente de la ciencia y la paz y un laboratorio natural habitualmente considerado prístino. Su “contaminación” puede interferir en la realización de investigaciones cuyos objetivos son conocer un ambiente carente o con mínima intervención humana. Así, es particularmente preocupante la presencia de Mo, Ni, Pb y Zn evidenciada en el año 2010 en la península Ardley y de Mo y Ni en el glaciar Collins desde 1997.

De los cuatro elementos antropogénicos sólo Mo incrementa en el periodo estudiado, superior a una década, en tanto que Ni, Pb y Zn disminuyen; esto se puede deber a dos posibilidades; la primera es que las medidas de gestión ambiental aplicadas en los últimos años han resultado efectivas, como por ejemplo el uso de incineradores de doble cámara y gestión de residuos; una segunda posibilidad es que las concentraciones encontradas reflejen cambios globales, como el incremento de la producción de Mo o la disminución en el uso de Pb como anti detonante en motores de combustión. Si este fuera el caso, aumentaría la evidencia para considerar la Antártica como un continente remoto, pero no aislado.

La ausencia de un inventario de emisiones y de sistemas de vigilancia que sustenten la realización de medidas de gestión para mantener y/o controlar la calidad de aire dificulta el poder dar cumplimiento al artículo 3 del Protocolo de Madrid, en cuanto a la protección del ambiente antártico.

Existen experiencias exitosas en la Antártica continental que confirman el funcionamiento de las energías renovables no convencionales, sin embargo, no están exentas de desafíos. Sin embargo, las condiciones extremas y las barreras tecnológicas no debieran ser limitantes para su aplicación. Si bien la demanda energética de las bases antárticas es relativamente pequeña comparada con la de asentamientos urbanos en otros continentes, se deben considerar medidas de gestión ambiental que aseguren la conservación del ambiente antártico.

La realización de estos estudios y su continuación en el tiempo permitirían tomar decisiones para la gestión de la calidad del aire en la península Fildes.

7. Recomendación

A partir de los resultados obtenidos se recomiendan medidas de gestión ambiental que cumplan con el propósito de reducir o eliminar las posibles fuentes de los elementos químicos que presentan un origen antrópico, como por ejemplo aplicar medidas de eficiencia energética, uso de energías renovables no convencionales, selección rigurosa de los residuos para incineración, uso de filtros “*ad hoc*”, incineración por pirolisis, mejoramiento de la gestión de residuos, tales como cenizas de incineradores, baterías en desuso y aceites lubricantes.

Sería conveniente desarrollar un inventario de emisiones y un sistema de biomonitoreo de largo plazo que sustente la toma de decisiones en el control de emisiones atmosféricas.

Se debiera incentivar la colaboración científica y tecnológica entre los países que forman parte del Tratado Antártico, con el fin de aunar criterios y compartir experiencias que fomenten la elaboración e implementación de medidas de gestión ambiental y su adecuada fiscalización.

Se recomienda restringir o establecer un límite máximo anual para la realización de actividades turísticas, con el objetivo de reducir la presión por uso de combustibles fósiles en la península.

La aplicación de una medida de gestión ambiental por sí sola no constituye una única solución si no que se debe considerar una combinación de medidas y efectuar el seguimiento de ellas.

Puesto que de los compartimentos ambientales, el aire y su composición, es uno de los menos estudiados en la Antártica, se recomienda continuar con esta línea de investigación, teniendo en cuenta las siguientes recomendaciones prácticas para estudios futuros:

- a) Aumentar la cobertura y densidad de muestreo para líquenes y suelos que abarquen toda la península Fildes para poder elaborar proyecciones y modelos de calidad del aire, que se puedan utilizar como base de datos permanente para la toma de decisiones.
- b) Realizar un muestreo sistemático de líquenes y suelo por cuadratas o transectos.
- c) Utilizar siempre la misma especie de líquen y que sea de fácil reconocimiento en terreno, como en este caso.

- d) Buscar puntos de control menos expuestos donde no existan fuentes directas de asentamientos humanos, como por ejemplo en la Antártica continental.
- e) Continuar utilizando los suelos locales con el propósito de diferenciar de manera más certera los elementos químicos que los líquenes obtienen del suelo o de la atmósfera.
- f) Considerar otros elementos químicos y compuestos que se pudieran encontrar en el aire, (Hg, COx, SOx, NOx, entre otros).
- g) Realizar estudios que incluyan la caracterización química en distintos compartimientos ambientales y su movilidad en el medio ambiente.
- h) Caracterizar las fuentes de emisión para poder vincular directamente la presencia de determinado elemento o compuesto en el medio ambiente.
- i) Generar protocolos de decisión para establecer medidas de gestión ambiental para la calidad del aire basadas en el biomonitoreo y en el seguimiento de las fuentes de emisión.

8. Bibliografía

- AARI, 2010. Arctic and Antarctic Research Institute. Meteorological Information. [en línea] <http://www.aari.nw.ru/index_en.html> [consulta: 20 octubre 2010].
- ACHEE, 2011. Agencia Chilena de Eficiencia Energética. Guía Residencial de Eficiencia Energética. 21 pp.
- AISLABIE J., BALKS M., FOGHT J., WATERHOUSE E. 2004. Critical Review Hydrocarbon Spills on Antarctic Soils: Effects and Management. *Environmental Science and Trchnology* 5 (38): 1265-1274.
- ALIAS A. 2009. Edafología. Departamento de Química Agrícola. Universidad de Murcia. España. 19 pp.
- ALVIM-FERRAZ M. Y S. AFONSO. 2005. Incineration of healthcare wastes: management of atmospheric emissions through waste segregation. *Waste Management* 25: 638–648.
- ATS, 2011. Antarctic Treaty System. [en línea] <<http://www.ats.aq/e/ats.htm>> [consulta: 03 de febrero 2011].
- BAČKOR M., Y S. LOPPI. 2009. Review. Interactions of lichens with heavy metals. *Biología Plantarum* 53 (2): 214-222.
- BARGAGLI R. 2008. Environmental contamination in Antarctic ecosystems. *Science of the Total Environment*. 400: 212-226.
- BARGAGLI R., MONACI F., SANCHEZ-HERNANDEZ J., CATENI D. 1998. Biomagnification of mercury in an Antarctic marine coastal food web. *Marine Ecology Progress Series*. 169: 65-76.
- BARRA C. 2009. Principios, lineamientos y medidas de gestión ambiental, para la península Fildes, Isla Rey Jorge, Antártica. Tesis para optar al grado de Magíster en Gestión y Planificación Ambiental. Departamento de Posgrado y Postítulo. Programa Interfacultades. Universidad de Chile.
- BASTMEIJER K. LAMERS M., Y HARCHA J. 2008. Permanent land-based facilities for tourism in Antarctica: the need for regulation. *Review of European Community & International Environmental Law*. 17 (1): 84-99.
- BAUER T. 2003. Book reviews. Case Study. Tourism in the Antarctic: opportunities, constraints, and future prospects. *Tourism Management* 24: 345–352.
- BEEBY A. 2001. What do sentinels stand for? *Environmental Pollutantion* 112: 285 –298.
- Busalacchi A. 2004. The role of the Southern Ocean in global processes: an earth system science approach. *Antarctic Science* 16 (4): 363–368.
- BID 2009. Energía mareomotriz en Chile. Garrad Hassan and Partners. 69 pp.

- BOCCACCINI A., Y G. ONDRACEK. 1995. Nuevos materiales a partir de residuos. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. Ciencia Hoy 29 (5):10-15.
- BOWEN H., Y J. WALKER. 1981. Environmental Chemistry of the Elements. Science (211) 273 pp.
- CANSARAN D., KAHYA D., YURDAKULOL E., ATAKOL O. 2006. Identification and quantitation of usnic acid from the lichen *Usnea* species of Anatolia and antimicrobial activity. Z.Naturforsch.C 61, 773–776.
- CARLINI A., CORIA N., SANTOS M., LIBERTELLI M., DONINI G. 2007. Breeding success and population trends in Adélie penguins in areas with low and high levels of human disturbance. Polar Biology 30: 917–924.
- CARRASCO M., Y M. PRÉNDEZ. 1991. Element distribution of some soils of continental Chile and Antarctic península. Projection to atmospheric pollution. Earth and environmental Science. (57-58): 713-722.
- CARRERAS H., Y M. PIGNATA. 2002. Biomonitoring of heavy metals and air quality in Cordoba City, Argentina, using transplanted lichens Environmental Pollution 117: 77–87.
- CAVIERES F., FERNÁNDEZ E., RUBIO C., Y QUILHOT W. 1995. Importancia de las colecciones de líquenes en el estudio de problemas químico-ambientales. Boletín Antártico Chileno 14: 2-4.
- CEBURNIS D., Y D. VALIULIS. 1999. Investigation of absolute metal uptake efficiency from precipitation in moss. Science of the Total Environment 226: 247–253.
- CHEN J., WILSON C., TAPLEY B., BLANKENSHIP D., YOUNG D. 2008. Antarctic regional ice loss rates from GRACE. Earth and Planetary Science Letters 266: 140–148.
- CHILE DIESEL, 2009. Gasolina de aviación [en línea] <http://www.chilediesel.cl/gasolina_aviacion.html> [consulta: 15 junio 2011].
- CHOI H., JI J., CHUNG K., Y I. AHN. 2007. Cadmium bioaccumulation and detoxification in the gill and digestive gland of the Antarctic bivalve *Laternula elliptica*. Comparative Biochemistry and Physiology. Part C 145:227–235.
- CHONG CH., PEARCE D., CONVEY P., TAN G., WONG R., Y I. TAN. 2010. High levels of spatial heterogeneity in the biodiversity of soil prokaryotes on Signy Island, Antarctica. Soil Biology & Biochemistry 42: 601-610.
- COCHILCO. 2008. Mercado internacional y minería del Molibdeno en Chile. [en línea] <<http://www.amchamchile.cl/sites/default/files/Molibdeno.pdf>> [consulta: 20 julio 2011].
- CONMAP. 2009. Antarctic Facilities. Main Antarctic Facilities operated by National Antarctic Programs in the Antarctic Treaty [en línea] <<https://www.comnap.aq/facilities>> [consulta: 30 abril 2010].
- CONTI E., Y G. CECCHETTI. 2001. Biological monitoring: lichens as bioindicators of air pollution assessment a review. Environmental Pollution 114: 471–492.

CONTI M., PINO A., BOTRÈ F., BOCCA B., ALIMONTI A. 2009. Lichen *Usnea barbata* as biomonitor of airborne elements deposition in the Province of Tierra del Fuego (southern Patagonia, Argentina) *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 72: 1082–1089.

CONVEY, P., Y M. STEVENS. 2007. Antarctic biodiversity. *Science*, 317, 1877–1878.

CORNEJO-DONOSO J., Y T. ANTEZANA. 2008. Preliminary trophic model of the Antarctic Peninsula Ecosystem (Sub-area CCAMLR 48.1). *Ecological Modelling* 218: 1–17.

CORSOLINI S. 2009. Review: Industrial contaminants in Antarctic biota. *Journal of Chromatography A* 1216: 598–612.

COUTIÑO B., Y A. MONTAÑEZ. 2000. Liqueenes. *Universidad Nacional Autónoma de México. Ciencias* 59: 64-65.

CRISTOFOLINI F., GIORDANI P., GOTTARDINI E., Y MODENESI P. 2008. The response of epiphytic lichens to air pollution and subsets of ecological predictors: A case study from the Italian Prealps. *Environmental Pollution* 151: 308-317.

DE BROYER C., DANIS B., WITH 64 SCAR-MARBIN TAXONOMIC EDITORS. 2011. How many species in the Southern Ocean? Towards a dynamic inventory of the Antarctic marine species. *Deep-Sea Research II* 58: 5–17

DELILLE D., PELLETIER E., Y COULON F. 2007. The influence of temperature on bacterial assemblages during bioremediation of a diesel fuel contaminated subAntarctic soil. *Cold Regions Science and Technology* 48 :74– 83.

DEPREZ P., ARENS P., Y LOCHER H. 1999. Identification and preliminary assessment of contaminated sites at Casey Station. Wilkes Land, Antarctica. *Polar Record* 35: 299–316.

DE VILLIERS M. 2008. Review of recent research into the effects of human disturbance on wildlife in the Antarctic and sub-Antarctic region. In *Human disturbance to wildlife in the broader Antarctic region: a review of findings*. Appendix 1. Working Paper 12 for XXXI Antarctic Treaty Consultative Meeting, Kiev, Ukraine. 2–13.

ENAP, 2011. Registro de Proveedores del Grupo de Empresas ENAP [en línea] <<http://extranet.enap.cl/proveedores/>> [consulta: 20 mayo 2011].

EPA. 2008. National Air Toxics Assessments. List of hazardous air pollutants [en línea] <<http://www.epa.gov/ttn/atw/188polls.html>> [consulta: 1 junio 2011].

FERGUSON S., POWELL SH., SNAPE I., GIBSON J., Y FRANZMANN P. 2008. Effect of temperature on the microbial ecology of a hydrocarbon-contaminated Antarctic soil: Implications for high temperature remediation. *Cold Regions Science and Technology* 53:115–129.

FUGA A., SAIKI M., MARCELLI M., SALDIVA P. 2008. Atmospheric pollutants monitoring by analysis of epiphytic lichens. *Environmental Pollution* 151: 334 – 340.

FUNDACIÓN CHILE. 2008. Guía práctica de eficiencia energética. Gobierno de Chile, Ministerio de Hacienda. 20 pp.

GILLE S. 2002. Warming of the Southern Ocean since the 1950s. *Science* 295: 1275–1277.

GIORDANI P. 2007. Is the diversity of epiphytic lichens a reliable indicator of air pollution? A case study from Italy. *Environmental Pollution* 146: 317-323.

GIORDANO S., ADAMO P., SPAGNUOLO V., VAGLIECO B. 2010. Instrumental and biomonitoring of heavy metal and nanoparticle emissions from diesel engine exhaust in controlled environment. *Journal of Environmental Sciences* 22 (9): 1357-1363.

GODAGNONE, 2002. La Antártica, un Desafío para Pedólogos. Instituto de Suelos. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. [en línea] <http://www.inta.gov.ar/suelos/info/documentos/informes/antartida_p_pedologos.htm> [consulta: 20 marzo 2011].

GOMBERT S., ASTA J., Y SEAWARD M. 2006. Lichens and tobacco plants as complementary biomonitors of air pollution in the Grenoble area (Isere, southeast France). *Ecological Indicators* 6: 429–443.

HARRIS C. 2009. Environmental effects of human activities on King George Island, South Shetland Islands, Antarctica. *Polar Record*. 27: 193-204

HIGHAM J., Y E. SHELTON. 2011. Tourism and wildlife habituation: Reduced population fitness or cessation of impact?. *Tourism Management* xxx 1- 9.

HILAL N., KIM G. Y C. SOMERFIELD. 2011. Boron removal from saline water: A comprehensive review. *Desalination* 273: 23–35.

HONEGGER R. 1991. Functional aspects of the lichen symbiosis. *Annual Review of Plant Physiology and Molecular Biology* 42: 553- 578.

HUGHES K., BRIDGE P., Y CLARK M. 2007. Tolerance of Antarctic soil fungi to hydrocarbons. *Science of the Total Environment* 372: 539–548.

HUGHES K., WALUDA C., STONE R., RIDOUT M., Y SHEARS J. 2008. Short-term responses of king penguins *Aptenodytes patagonicus* to helicopter disturbance at South Georgia. *Polar Biology*. 31:1521–1530.

HUSMANN G., PHILIPP E., ROSENSTIEL P., VAZQUEZ S., ABELE D. 2011. Immune response of the Antarctic bivalve *Laternula elliptica* to physical stress and microbial exposure. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 398: 83–90.

JERAN Z., MRAK T., JACIMOVIC R., BATIC F., KASTELEC D., MAVSAR R., SIMONCIC P. 2007. Epiphytic lichens as biomonitors of atmospheric pollution in Slovenian forests. *Environmental Pollution* 146: 324-331.

- KENNICUTT M., SWEET S., FRASER W., STOCKTON W., CULVERT M. 1991. Grounding of the Bahia Paraiso at Arthur Harbor, Antarctica. 1. Distribution and Fate of Oil Spill Related Hydrocarbons. *Environmenta Science and Technology*. 25: 509-518.
- KING C., Y M. RIDDLE. 2001. Effects of metal contaminants on the development of the common Antarctic sea urchin *Sterechinus neumayeri* and comparisons of sensitivity with tropical and temperate echinoids. *Marine Ecology Progress Series*. (215): 143–154.
- KOZERETSKA I., PARNIKOZA I., MUSTAFA O., TYSCHENKO O., KORSUN S Y CONVEY P. 2010. Development of Antarctic herb tundra vegetation near Arctowski station, King George Island. *Polar Science* 3: 254-261.
- LIGGETT D., MCINTOSH A., THOMPSON A., GILBERT N., STOREY B. 2010. From frozen continent to tourism hotspot? Five decades of Antarctic tourism development and management, and a glimpse into the future. *Tourism Management* 30: 1-10.
- LOMBAERT K. MOREL S., LE MOYNE L., ADAM P., TARDIEU DE MALEISSYE J., AMOUROUX J. 2004. Nondestructive analysis of metallic elements in diesel soot collected on filter: Benefits of laser induced breakdown spectroscopy. *Chemistry of Material Science* 24: 41–56.
- LOPPI S., PIRINTOS S., Y DE DOMINICIS V. 1999. Soil contribution to the elemental composition of epiphytic lichens (Tuscany, Central Italy). *Environmental Monitoring and assessment*. 58: 121-131.
- LOPPI S. Y S. PIRINTSOS. 2003. Epiphytic lichens as sentinels for heavy metal pollution at forest ecosystems (central Italy). *Environmental Pollution* 121: 327 - 332.
- LOUGH G., SCHAUER J., PARK J., SHAFER M., DEMINTER J., WEINSTEIN, J. 2005. Emissions of metals associated with motor vehicle roadways. *Environmental Science &Technology* 39 (3): 826–836.
- MALANDRINO M., ABOLLINO O., BUOSO S., CASALINO C., GASPARN M., GIACOMINO A., LA GIOIA C., Y MENTASTI E. 2009. Geochemical characterisation of Antarctic soils and lacustrine sediments from Terra Nova Bay. *Microchemical Journal* 92: 21–31.
- MALYUTINA M. 2004. Russian deep-sea investigations of Antarctic fauna. *Deep-Sea Research II* 51: 1551–1570.
- MARICQ M. 2007. Chemical characterization of particulate emissions from diesel engines: A review. *Aerosol Science* 38: 1079 – 1118.
- MARIN-FLORES O., TURBA T., ELLEFSON C., WANG K, BREIT J., AHN J., GRANT NORTON M., HA S. 2010. Nanoparticle molybdenum dioxide: A highly active catalyst for partial oxidation of aviation fuels. *Applied Catalysis B: Environmental* 98:186–192
- MASON B. 1966. *Principles of Geochemistry*. 3ra Ed. J. Wiley and Sons. New York. 346 pp.

- MICOL T., Y JOUVENTIN P. 2001. Long-term population trends in seven Antarctic seabirds at Pointe Géologie (Terre Adélie). Human impact compared with environmental change. *Polar Biology*. 24: 175-185.
- MISHRA V., KIM K., HONG S., LEE K. 2004. Aerosol composition and its sources at the King Sejong Station, Antarctic península. *Atmospheric Environment* 38: 4069–4084.
- MOULSON A., Y J. HERBERT. 2003. *Electroceramics: materials, properties, applications*. 2da Edición John Wiley and Sons. 543 pp.
- MUNZI S., RAVERA S., Y G. CANEVA. 2007. Epiphytic lichens as indicators of environmental quality in Rome. *Environmental Pollution* 146: 350-358.
- MUNOZ R., OLIVEIRA P., ANGNES L. 2006. Combination of ultrasonic extraction and stripping analysis: An effective and reliable way for the determination of Cu and Pb in lubricating oils. *Talanta* 68: 850–856.
- NASH III, T. 1996. *Lichen Biology*. 2da Ed. Cambridge University Press. 496 pp.
- NATIONAL PARK SERVICE AIR RESOURCES DIVISION, U.S. FOREST SERVICE AIR RESOURCE MANAGEMENT. 2003. Program U.S. Fish and Wildlife Service Air Quality Branch. Air Pollution-Related Lichen Monitoring in National Parks, Forests, and Refuges: Guidelines for Studies Intended for Regulatory and Management Purposes. [en línea] <http://www.nature.nps.gov/air/Pubs/pdf/Lichen_Studies.pdf> [consulta: 23 abril 2010]
- NEDWELL D. 1999. Effect of low temperature on microbial growth: lowered affinity for substrates limits growth at low temperature. *FEMS Microbiology Ecology* (30) 2:101–111.
- OLECH M., KWIA TEK W., Y DUTKIEWICZ M. 1998. Lead Pollution in the Antarctic Region. *X-RAY Spectrometry* 27: 232-235.
- OSYCZKA P., DUTKIEWICZ E., Y M. OLECH. 2007. Trace elements concentrations in selected moss and lichen species collected within Antarctic research stations. *Polish Journal of Ecology* 55 (1): 39-48.
- OTA, 2003. *Energy efficiency technologies for Central and Eastern Europe*. Office of Technology Assessment. US Government Printing. 130 pp.
- ØVSTEDAL D., Y N. GREMMEN. 2006. Lichens of sub-Antarctic Heard Island South African Journal of Botany 72: 353–366.
- PACYNA J., Y E. PACYNA 2001. An assessment of global and regional emissions of trace metals to the atmosphere from anthropogenic sources worldwide. *Environmental Review* 9: 269–298.
- PEAT H., CLARKE A., Y CONVEY P. 2007. Diversity and biogeography of the Antarctic flora.. *Journal of Biogeography* 34: 132–146.
- PEREIRA J., MORAES D., ANTES F., DIEHL L., SANTOS M., GUIMARÃES R., FONSECA T., DRESSLER V., FLORES E. 2010. Determination of metals and metalloids

in light and heavy crude oil by ICP-MS after digestion by microwave-induced combustion. *Microchemical Journal* 96: 4–11.

PETER H., PETER U., BUESSER C., MUSTAFA O., PFEIFFER S. 2008. Risk assessment for the Fildes Peninsula and Ardley Island, and development of management plans for their designation as Specially Protected or Specially Managed Areas. Dessau: German Environmental Agency. Federal Environment Agency (Umweltbundesamt). 508 pp.

PETERSON J. 1988. *Managing the Frozen South. The Creation and Evolution of the Antarctic Treaty System.* University of California Press. Ltda. London, England. 285 pp.

PINHO P., AUGUSTO S., MÁGUAS C., PEREIRA M., SOARES A., Y BRANQUINHO C. 2008. Impact of neighbourhood land-cover in epiphytic lichen diversity: Analysis of multiple factors working at different spatial scales. *Environmental Pollution* 151: 414-422.

POBLET A., ANDRADE S., SCAGLIOLA M., VODOPIVEZ C., PUCCI A., Y MARCOVECCHIO J. 1997. The use of epilithic Antarctic lichens (*Usnea aurantiacoatra* and *U. antarctica*) to determine deposition patterns of heavy metals in the Shetland Islands, Antarctica. *Science of the Total Environment* 207: 187-194.

PÖRTNER H. 2006. Climate-dependent evolution of Antarctic ectotherms: An integrative analysis. *Deep-Sea Research II* 53: 1071–1104.

PURVIS O., CHIMONIDES J., DIN V., EROKROITOU L., JEFFRIES T., JONES G., LOUWHOFF S., READ H., SPIRO B. 2003. Which factors are responsible for the changing lichen floras of London? *The Science of the Total Environment* 310: 179–189.

RA H., GEISER L., Y CRANG R. 2005. Effects of season and low-level air pollution on physiology and element content of lichens from the U.S. Pacific Northwest. *Science of the Total Environment* 343: 155– 167.

RAHN, K. 1976. *The chemical composition of the atmospheric aerosol.* University of Rhode Island, Technical Report. 265 pp

RAGGIO J., VIVAS M., GARCÍA L., PINTADO A. 2008. Líquenes en ambientes extremos: La Antártica como puerta al espacio. [en línea] <http://www.ucm.es/info/otri/cult_cient/infocientifica/descargas/concurso%20divulgacion%2008/liquenes_ambientes_extremos.pdf> [consulta: 15 marzo 2010]

REIJNDERS L. 2005. Disposal, uses and treatments of combustion ashes: a review. *Resources, Conservation and Recycling* 43: 313–336.

RETIERE, C. 1994. Tidal power and the aquatic environment of La Rance. *Biological Journal of the Linnean Societe* 1-2 (51): 25-36.

RODRIGUES DOS SANTOS I., VIEIRA SILVA-FILHO E., SCHAEFER C, SELLA S., SILVA C., GOMES V., A.C.R. PASSOS M., VAN NGAN P. 2006. Baseline mercury and zinc concentrations in terrestrial and coastal organisms of Admiralty Bay, Antarctica. *Environmental Pollution* 140: 304- 311.

- ROMANO D., MOURA A., Y SOARES J. 2004. An overview on the current processes for the recycling of batteries. *Journal of Power Sources* 135: 311–319.
- ROSCOE H. 2004. Possible descent across the “Tropopause” in Antarctic winter. *Advances in Space Research* 33: 1048–1052.
- SATO K., Y HIRASAWA N. 2007. Statistics of Antarctic surface meteorology based on hourly data in 1957e2007 at Syowa Station. *Polar Science* 1: 1-15.
- SCAR, 2009. Antarctic Treaty. [en línea] <<http://www.scar.org/treaty/>> [consulta: 10 mayo 2010]
- SCIALLI A., BONDE J., BRÜSKE-HOHLFELDC I., CULVERD B. LI Y, SULLIVAN F. 2010. Review An overview of male reproductive studies of boron with an emphasis on studies of highly exposed Chinese workers. *Reproductive Toxicology* 29: 10–24.
- SHIMBLA D. 2010. Technology. Park Spark Project. [en línea] <http://www.greendiary.com/entry/park-spark-project-utilizes-dog-poop-to-power-lamppost-on/> [consulta: 20 abril 2011].
- SHIN D., YUB T., YANG W., JEON B., PARK S., HWANG J. 2008. Combustion characteristics of simulated gas fuel in a 30 kg/h scale pyrolysis-melting incinerator. *Waste Management* 28: 2422–2427.
- SLOOF J. 1993. Environmental Lichenology: Biomonitoring Trace-Element Air Pollution. Doctor’s thesis. Delft University of Technology, Interfaculty Reactor Institute, Delft, p. 191.
- SMITH R., MARTINSON D., STAMMERJOHN SH., IANNUZZI R., Y IRESON K. 2008. Bellingshausen and western Antarctic Peninsula region: Pigment biomass and sea-ice spatial/temporal distributions and interannual variability. *Deep-Sea Research II* 55: 1949–1963.
- SONG G., SEO Y., PUDASAINEE D., KIM I. 2010. Characteristics of gas and residues produced from electric arc pyrolysis of waste lubricating oil. *Waste Management* 30: 1230–1237.
- SOLOMON S. 1999. Stratospheric ozone depletion: A Review of concepts and history. *Reviews of Geophysics* 37 (3): 275–316.
- SPARKS 2003. *Environmental Soil Chemistry*. 2da Edition. Academic Press. 353 pp.
- STARK J., RIDDLE M., SNAPE I., SCOLLER R. 2003. Human impacts in Antarctic marine soft-sediment assemblages: correlations between multivariate biological patterns and environmental variables at Casey Station. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 56:717–734.
- STASTNA V. 2010. Spatio-temporal changes in surface air temperature in the region of the northern Antarctic Peninsula and south Shetland islands during 1950-2003. *Polar Science*. 4: 18-33

SZCZEPANIAK K., Y M. BIZIUK. 2003. Review: Ecotoxicology. Aspects of the biomonitoring studies using mosses and lichens as indicators of metal pollution. *Environmental Research* 93: 221–230.

THATJE S. 2005. The future fate of the Antarctic marine biota?. *Trends in Ecology and Evolution* 8 (20): 418-419.

THOMPSON B., GOLDSWORTHY P., RIDDLE M., SNAPE I, STARK J. 2007. Contamination effects by a 'conventional' and a 'biodegradable' lubricant oil on infaunal recruitment to Antarctic sediments: A field experiment. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 340: 213–226.

TIN T., FLEMING Z., HUGHES K., AINLEY D., CONVEY P., MORENO C., S. PFEIFFER S., SCOTT J., AND SNAPE I. 2009. Review Impacts of local human activities on the Antarctic environment. *Antarctic Science* (21) 1: 3–33.

TIN T., SOVACOOOL B., BLAKE D., MAGILL D., NAGGAR S., LIDSTROMF S., ISHIZAWA K., BERTE J. 2010. Energy efficiency and renewable energy under extreme conditions: Case studies from Antarctica. *Renewable Energy* 35: 1715–1723.

UGOLINI F., Y J. BOCKHEIM. 2008. Antarctic soils and soil formation in a changing environment: A review. *Geoderma* 144: 1-8.

USDA FOREST SERVICE, 2010. United States Forest Service. National Lichens & Air Quality Database and Clearinghouse. Provisional Element Analysis Thresholds. [en línea] <<http://gis.nacse.org/lichenair/index.php?page=cleansite>> [consulta: 15 marzo 2010]

USEPA, 1996. Method 3052. Microwave assisted acid digestion of siliceous and organically based matrices. [en línea] <<http://www.epa.gov/epawaste/hazard/testmethods/sw846/pdfs/3052.pdf>> [consulta: 10 marzo 2010]

VARTIA, 1973. Antibiotics in lichens. *The Lichens* (eds. V. Ahmadjian and M. E. Hale), Academic Press, New York, pp. 547-561.

WOLTERBEEK T., Y G. VERBURG. 2002. Judging survey quality: local variances. *Environmental Monitoring Assessment* 73: 7–16.

YUAN C., LIN H., WU C., LIU M. 2005. Partition and size distribution of heavy metals in the flue gas from municipal solid waste incinerators in Taiwan *Chemosphere* 59: 135-145.

ANEXO

ANEXO. Concentraciones de líquenes y suelos para los años estudiados expresadas en (mg/kg).

Cuadro 1. Concentraciones de líquenes en mg/kg para el año 1997 por punto de muestreo (n= 2).

1997	Ag	Al	B	Ba	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	Pb	Se	V	Zn
Aero 123	0,57	298	2,44	0,49	0,02	0,09	0,17	<LD	4,06	393	8,94	0,49	0,28	4,23	0,93	1,40	17,1
MET 5	0,62	339	3,39	<LD	0,02	0,11	0,21	0,12	1,90	349	8,34	0,48	0,53	0,98	0,09	1,39	7,55
C. Fósil	0,91	468	3,16	<LD	0,02	0,13	0,24	0,13	2,81	393	13,2	0,41	1,25	2,24	0,28	1,34	17,6
LARC	0,28	89	1,06	0,29	0,01	0,09	0,04	<LD	2,69	137	3,01	0,44	0,20	4,45	2,33	0,28	22,2
B. China	0,12	1276	5,77	<LD	0,06	0,14	0,56	0,49	3,04	1177	27,0	0,30	1,13	4,31	<LD	3,45	18,5
G. Collins	1,12	383	4,12	<LD	0,01	0,12	0,17	0,02	1,05	258	7,60	0,38	0,64	1,09	1,92	1,05	8,32

Cuadro 2. Concentraciones de líquenes en mg/kg para el año 2006 por punto de muestreo (n= 2).

2006	Ag	Al	B	Ba	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	Pb	Se	V	Zn
Aero 1	0,80	367	4,41	<LD	0,01	0,12	0,18	0,14	3,79	411	10,3	0,38	0,47	4,24	0,17	1,55	20,3
Aero 2	0,58	585	5,75	0,40	0,07	0,11	0,60	0,16	5,75	1341	18,1	0,19	1,63	1,42	<LD	4,16	36,9
Aero 3	1,03	2489	7,37	1,37	0,09	0,07	0,71	0,02	2,47	1875	22,0	0,17	1,32	0,83	<LD	5,16	11,2
MET 5	0,88	564	4,78	0,39	<LD	0,07	0,24	0,07	0,60	416	8,03	0,08	0,86	1,24	0,24	2,10	12,3
C. Fósil	1,54	111	2,92	<LD	<LD	0,06	0,10	<LD	<LD	107	5,63	<LD	0,92	1,26	2,98	0,56	4,21
C. GPS	0,51	1932	5,82	<LD	0,04	0,04	0,68	0,39	1,05	1517	21,9	<LD	1,30	0,85	<LD	5,01	6,15
LARC	0,27	355	2,47	0,60	0,02	0,15	0,16	<LD	3,12	530	7,80	0,41	0,28	4,77	0,20	1,99	25,1
B. China	0,46	1403	6,77	1,48	0,01	0,06	0,46	0,19	5,06	1383	21,2	0,09	1,02	2,43	<LD	4,01	14,0
P. Arley	0,06	156	3,17	<LD	<LD	0,04	0,12	0,02	<LD	254	4,37	<LD	0,20	0,50	<LD	0,43	13,0
G. Collins	0,74	670	7,53	0,48	<LD	0,06	0,47	0,59	0,96	639	13,2	0,08	0,73	0,47	<LD	2,91	7,35

Cuadro 3. Concentraciones de líquenes en mg/kg para el año 2008 por punto de muestreo (n= 2).

2008	Ag	Al	B	Ba	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	Pb	Se	V	Zn
Aero 1	0,47	323	0,66	0,47	0,02	0,08	0,14	<LD	1,61	298	7,26	0,51	0,31	2,36	1,03	1,07	20,0
Aero 2	0,56	626	1,66	0,45	0,03	0,08	0,35	<LD	2,97	512	12,5	0,43	0,44	1,43	0,86	2,09	14,6
Aero 3	0,69	1023	3,08	0,97	0,06	0,13	0,59	<LD	6,01	1124	17,4	0,39	0,30	1,63	<LD	3,97	19,2
MET 5	0,52	862	2,11	0,98	0,03	0,12	0,33	<LD	2,40	639	13,1	0,45	0,14	1,71	0,08	2,52	19,4
C. Fósil	0,43	667	2,85	0,86	0,07	0,12	0,37	0,02	4,94	748	14,0	0,49	0,18	1,50	0,10	2,92	19,2
C. GPS	0,92	1801	4,22	0,91	0,07	0,13	0,67	0,05	4,42	1522	20,8	0,33	0,37	0,95	<LD	4,94	18,6
B. China	0,28	639	2,57	1,15	0,04	0,12	0,29	<LD	2,10	625	16,4	0,43	0,13	1,65	<LD	2,37	19,1
P. Arley	0,11	241	0,82	0,36	0,02	0,09	0,19	<LD	2,25	304	6,19	0,33	0,07	1,16	<LD	0,88	23,4
G. Collins	0,49	357	0,50	0,43	0,02	0,10	0,19	<LD	1,29	354	9,46	0,50	0,08	3,99	0,84	1,40	23,6

Cuadro 4. Concentraciones de líquenes en mg/kg para el año 2010 por punto de muestreo (n= 2).

2010	Ag	Al	B	Ba	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	Pb	Se	V	Zn
Aero 1	0,85	132	3,45	0,08	<LD	0,06	0,07	<LD	<LD	101	6,58	0,08	0,49	3,35	1,08	0,53	17,8
Aero 2	0,74	133	1,77	0,10	<LD	0,06	0,07	<LD	0,79	157	4,37	0,12	0,60	1,40	1,53	0,63	14,2
Aero 3	1,21	195	3,82	0,35	0,02	0,07	0,17	<LD	2,83	202	5,25	0,11	0,99	1,04	1,44	0,83	12,7
MET 5	0,75	247	2,87	0,35	0,01	0,06	0,09	<LD	1,34	242	4,38	0,47	0,22	0,52	1,14	0,89	13,4
C. Fósil	0,51	153	1,17	0,28	0,01	0,05	0,06	<LD	1,62	135	4,71	0,53	0,26	0,39	1,74	0,53	8,01
C. GPS	0,63	121	1,31	0,19	0,00	0,04	0,06	<LD	0,75	103	4,92	0,50	0,02	0,49	1,41	0,42	8,89
LARC	0,56	98	0,38	0,27	0,01	0,07	0,03	<LD	0,70	113	3,38	0,54	0,01	3,29	2,45	0,38	18,1
B. China	0,63	95	0,68	0,35	0,00	0,04	0,02	<LD	0,75	68	3,95	0,48	0,04	1,76	1,82	0,30	14,5
P. Arley	0,42	95	4,48	0,29	0,01	0,06	0,10	<LD	1,38	43	3,53	0,26	0,22	0,73	1,56	0,23	13,1
G. Collins	0,45	64	0,74	0,21	0,00	0,04	0,02	<LD	0,02	80	3,16	0,50	<LD	0,04	2,81	0,24	5,84

Cuadro 5. Concentraciones de suelo en mg/kg para el año 1997 por punto de muestreo (n= 2).

1997	Al	B	Ba	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	Pb	V	Zn
Aero 123	11053	102	19,2	5,83	3,45	31,2	17,7	107	40926	488	<LD	10,9	4,25	234	57
LARC	9981	95	14,7	6,79	3,38	22,8	13,2	74	39155	269	0,24	3,60	3,99	182	42
P. Ardley	10045	137	15,8	7,60	3,97	21,5	17,8	83	46115	167	<LD	2,61	5,36	193	43

Cuadro 6. Concentraciones de suelo en mg/kg para el año 2006 por punto de muestreo (n= 2).

2006	Al	B	Ba	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	Pb	V	Zn
Aero 2	8607	93	12,5	4,69	3,35	25,2	14,5	125	41169	464	<LD	3,79	3,80	201	54
C. Fósil	11701	91	18,2	5,19	3,07	30,3	10,6	92	36845	510	<LD	8,88	2,71	199	52
C. GPS	6708	62	18,6	3,51	2,27	26,5	15,3	72	31404	429	<LD	11,7	3,04	168	46
LARC	10170	114	15,7	6,68	3,72	27,5	12,2	81	50124	357	<LD	5,92	3,29	217	54
B. China	9460	101	14,6	5,56	3,01	24,2	10,0	64	37609	326	<LD	6,35	2,69	186	46
P. Ardley	8616	122	16,6	6,61	3,49	17,8	17,0	59	37075	207	<LD	1,26	5,68	171	66
G. Collins	7721	81	30,1	5,67	3,00	23,7	24,6	48	36046	443	0,08	10,6	4,42	177	55